

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**TEK BACAĞI ZIPLAYAN BİR ROBOTUN SIFIR MOMENT  
NOKTASI İLE DENGELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OZAN KARAKULAK**

**BALIKESİR, MAYIS - 2015**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**TEK BACAĞI ZIPLAYAN BİR ROBOTUN SIFIR MOMENT  
NOKTASI İLE DENGELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OZAN KARAKULAK**

**BALIKESİR, MAYIS - 2015**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Ozan KARAKULAK** tarafından hazırlanan “**TEK BACAĞLI ZIPLAYAN BİR ROBOTUN SIFIR MOMENT NOKTASI İLE DENGELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 27.05.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Davut AKDAŞ



Üye  
Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI



Üye  
Yrd. Doç. Dr. Gürol DEMİRBAŞ



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

## ÖZET

**TEK BACAKLI ZIPLAYAN BİR ROBOTUN SIFIR MOMENT NOKTASI  
İLE DENGELENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
OZAN KARAKULAK  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. DAVUT AKDAŞ)**

**BALIKESİR, MAYIS - 2015**

Bu tez çalışmasında tek bacaklı bir robotun sıfır moment noktası denklemleri çıkartılmıştır. İki ayaklı yürüyen robotun dinamik yürümesi için gerekli olan hesaplamalar tek bacaklı bir robot için yapılmıştır. Bu hesaplamalar, denklemlerin elde edilmesi açısından bir ön çalışmadır. Tek bacaklı robotların literatür taraması yapılarak, uygun tasarım belirlenmiştir. Basit bir tek bacaklı zıplayan robot tasarlanmıştır. Sıfır moment noktası yönteminin araştırması yapılmıştır. Yapılan tasarım üzerinden matematik model çıkartılıp sıfır moment noktası için gerekli denklemler elde edilmiştir.

Tasarlanan model üzerinden denklemlerin çıkarımı yapılarak sıfır moment noktasının tek bacaklı zıplayan robotta tek eksen de dengeli zıplama hareketi için açılar denklemleri bulunmuştur. Böylelikle dengeli bir zıplama hareketi için, hareket sağlayıcıların kontrolü yapılabilecektir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Tek Bacaklı Zıplayan Robotlar, SMN, İki Ayaklı Robotlar

## **ABSTRACT**

### **BALACING OF A ONE LEGGED HOPPING ROBOT WITH ZERO MOMENT POINT**

**MSC THESIS**

**OZAN KARAKULAK**

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. DAVUT AKDAŞ)**

**BALIKESİR, MAY 2015**

In this study of thesis, zero moment point equations for am legged robot has been derived. Necessary calculation for a biped robot to walk dynamically has been made for a one lagged robot. These calculations are a preliminary work for derived the equations a literature research for a legged robots has been made and a suitable design has been determined. A simple one legged hopping robot has been design. Zero moment point method was researched. Mathematical model of the design has been derived and necessary equations for zero moment point has been obtained.

Angle equations of the zero moment point for balanced hopping motion on a single axis for a one legged hopping robot has been obtained by deducing equations for designed model.

**KEYWORDS:** One Legged Hopping Robots, ZMP, Biped

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ .....	v
SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ.....	viii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Giriş .....	1
1.2 İki Ayaklı Robotların Tarihçesi.....	2
1.3 Tek Ayaklı Robotların Tarihçesi .....	9
<b>2. MEKANİK YAPI .....</b>	<b>32</b>
2.1 Düzlemsel Tek Bacaklı Robot Mekanizması .....	32
2.2 Düzlemsel Tek Bacaklı Zıplayan Robot .....	32
2.3 Raibert'in Üç kısımlı Kontrolcüsü .....	34
<b>3. SIFIR MOMENT NOKTASI.....</b>	<b>38</b>
3.1 Statik Yürüme.....	38
3.2 Ağırlık Merkezi Yörüngesi .....	38
3.3 Dinamik Yürüme .....	39
<b>4. TASARLANAN ROBOTUN TEMEL SİMULASYONU.....</b>	<b>47</b>
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>51</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>52</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: WABIAN-2R [2] .....	4
Şekil 1.2: HRP-3 ve HRP-3P .....	5
Şekil 1.3: Honda ASIMO prototipleri .....	6
Şekil 1.4: QRIO SDR-4X [2] .....	6
Şekil 1.5: JOHNNIE [2] .....	7
Şekil 1.6: LOLA [2] .....	8
Şekil 1.7: KHR-3 HUBO [2] .....	9
Şekil 1.8: Raibert'in modeli [38] .....	11
Şekil 1.9: Raibert'in 2 boyutlu prototipi [38] .....	12
Şekil 1.10: Raibert'in 3 boyutlu hareket robotu [38] .....	13
Şekil 1.11: Zeglin'in ilk tek ayaklı robotu Uniro [38] .....	15
Şekil 1.12: Uniro'nun mekanik dizaynı [38] .....	16
Şekil 1.13: Papantoniou'nun prototipi [38] .....	17
Şekil 1.14: Prosser ve Kam tarafından geliştirilen robot [38] .....	18
Şekil 1.15: ARL Monopod mekanik dizaynı [38] .....	19
Şekil 1.16: Rad'ın deneysel robotu [38] .....	21
Şekil 1.17: ARL Monopod 1 detaylı gösterimi [38] .....	22
Şekil 1.18: ARL Monopod 2 mekanizması [38] .....	23
Şekil 1.19: Mehrandezh'in robotu [38] .....	24
Şekil 1.20: Okuba'nın zıplayan modeli [38] .....	25
Şekil 1.21: Ringrose'un monopodu [38] .....	26
Şekil 1.22: Üç eklemlili bacak tasarımı [38] .....	27
Şekil 1.23: OLIE robot tasarımı [38] .....	28
Şekil 1.24: Zeglin'in yaylı ayak tasarımı [38] .....	29
Şekil 1.25: 3 Eksenli yaylı bacak tasarımı [38] .....	30
Şekil 1.26: Berkemeier ve Desai'nin tasarımı [38] .....	31
Şekil 2.1: Düzlemsel tek ayaklı robot .....	33
Şekil 2.2: Robotun hareketinin zamansal gösterimi .....	36
Şekil 2.3: Tek bacaklı robotun tasarımı .....	37
Şekil 3.1: Sıfır moment noktası referansı [3] .....	38
Şekil 3.2: İki ayaklı model [3] .....	40
Şekil 3.3: Yer düzlemi gösterimi [2] .....	41
Şekil 3.4: Ters kinematik gösterimi .....	42
Şekil 3.5: Sıfır moment noktasının tek bacaklı robotta gösterilmesi [39] .....	43
Şekil 3.6: Uçuş fazı gösterimi [39] .....	46
Şekil 3.7: 3 eksenli görünüm .....	46
Şekil 4.1: Konum-zaman grafiği .....	47
Şekil 4.2: Hız-zaman grafiği .....	48
Şekil 4.3: İvme-zaman grafiği .....	48
Şekil 4.4: Sıfır moment noktasının zamanla değişimi .....	49
Şekil 4.5: Sıfır moment noktasının sinüs giriş cevabı .....	49

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 1.1:</b> Dünya genelinde yapılan insansı robot çalışmaları .....	2
<b>Tablo 1.2:</b> ARL monopod güç tüketimi [38].....	20



## SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Mm</b>	: Milimetre
<b>m</b>	: Metre
<b>Kg</b>	: Kilogram
<b>Km</b>	: Kilometre
<b>SMN</b>	: Sıfır Moment Noktası
<b>ZMP</b>	: Zero Moment Point (Sıfır Moment Noktası)
<b>g</b>	: Yer Çekimi İvmesi
<b><math>\theta</math></b>	: Teta Açısı
<b><math>\varphi</math></b>	: Phi Açısı
<b><i>m</i></b>	: Gövdenin Kütlesi
<b><i>J</i></b>	: Eylemsizlik Momenti
<b>R</b>	: Gövdenin Kütle Merkezi ile Olan Mesafesi
<b><i>r</i></b>	: Bacağın Eklem Noktasına Olan Mesafesi
<b><i>m<sub>l</sub></i></b>	: Bacağın Kütlesi
<b><i>J<sub>l</sub></i></b>	: Bacağın Eylemsizlik Momenti
<b><i>l<sub>1</sub></i></b>	: Ayaktan Bacağın Kütle Merkezine Olan Mesafesi
<b><i>l<sub>2</sub></i></b>	: Kalçadan Bacağın Kütle Merkezine Olan Mesafesi
<b><i>F<sub>x</sub></i></b>	: Yatay Eksende Etki Eden Kuvvetler
<b><i>F<sub>y</sub></i></b>	: Dikey Eksende Etki Eden Kuvvetler
<b><i>T<sub>kalça</sub></i></b>	: Kalçanın Dönme Torku
<b><i>F<sub>bacak</sub></i></b>	: Bacağa Etki Eden Kuvvet
<b>ÇDF</b>	: Çift Destek Fazı
<b>TDF</b>	: Tek Destek Fazı
<b>QRIO</b>	: Quest for curiosity
<b>ASIMO</b>	: Advanced Step in Innovative Mobility (Yenilikçi İleri Adım Hareketi)
<b>WABIAN</b>	: WAseda BIpedal humANoid (Waseda İki Ayaklı İnsansı Robotu)
<b><i>X<sub>zmp</sub></i></b>	: Sıfır Moment Noktasının x Eksenindeki Konumu

<b><math>Y_{zmp}</math></b>	: Sıfır Moment Noktasının y Eksenindeki Konumu
<b>CoM</b>	: Center of Mass (Ağırlık Merkezi)
<b>J</b>	: Joule
<b><math>V_{çekme}</math></b>	: Çekme Hızı
<b><math>V_{itme}</math></b>	: İtme Hızı
<b>PWM</b>	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada tek ayaklı zıplayan bir robot bilgisayar ortamında tasarlanıp sıfır moment noktası denklemleri çıkarılmıştır. İki ayaklı robotlar için ön çalışma yapılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi birikimi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan, bana her konuda yardımcı olan başta danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Davut AKDAŞ olmak üzere Arş. Gör. Dr. Sabri BİCAKCI ve Arş Gör. Erman KÖYBAŞI'ya teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim esnasında maddi manevi desteklerini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Murat Erhan BALCI'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmalarım sırasında bana her zaman destek olan Yrd. Doç. Dr. Gürol DEMİRBAŞ'a, Öğr. Gör. Hüseyin Güneş'e ve beni sabırla destekleyen aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Balıkesir, 2015

Ozan KARAKULAK

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş

Hızla gelişen teknoloji ile robotik alanındaki çalışmalar, robotların insan yaşamının önemli bir parçası olacağını göstermektedir. Mevcut araştırmalar doğadaki en gelişmiş varlık olan insan mekanizmasını taklit etme eğilimindedir. Bunun başlıca sebebi ise zaten var olan sistemlerin insanlar tarafından hali hazırda kullanılıyor olması ve sistemlerin ayrı ayrı robotik otomasyon yapılması maliyetinin, mevcut sistemleri kullanabilecek insan şeklindeki robotun geliştirilmesi maliyetinden daha yüksek olmasıdır. Böylece insanların yetiştirilmesi ve tehlikeli işlerde kullanılması için harcanacak zaman ve para giderleri daha düşük olacaktır [1,2].

Robot kavramının temelleri çok eski tarihlere dayansa da bilinen şekliyle “Robot” kelimesi 1922 yılında Karel Çapek isimli Çek yazar tarafından yazmış olduğu piyesinde bir tiptemenin adı olarak ortaya çıkmıştır. Robot kavramının ortaya çıkışı 18.yy gibi gözükse de tarihin ilk çağlarından bu yana bildiğimiz anlamıyla robotların tasarımları ve geliştirilmesi mevcuttur [3].

Günümüzde robot, duyarları (sensörleri) ile çevresini algılayan, algıladıklarını yorumlayan, bunun sonucunda karar alan (yapay zekâ), karar sonucuna göre davranan, eylem olarak hareket organlarının çalıştıran veya durduran bir aygıttır [4].

Bu çalışmada iki ayaklı robot mekanizmalarında dinamik yürüme hareketinin yapılabilmesi için sıfır moment denge noktasının tek ayaklı robotlar üzerinden incelemesi yapılmıştır. Tezin amacı tek ayaklı zıplayan robotlar üzerinde sıfır moment denge noktasının denklemlerini 2 eksen için çıkartarak, iki ayaklı robotlarda dinamik yürüme hareketi için gerekli olan denklemlerin ve sıfır moment noktası hesaplamasının tek eklem için hesaplamalarının yapılmasıdır.

## 1.2 İki Ayaklı Robotların Tarihçesi

Literatürde iki ayaklı olarak geliştirilen robot prototiplerinin sayısı son yıllarda artma eğilimi göstermiştir. 1968 yılında Miomir Vukobratovic tarafından iki ayaklı yürüme hareketinin teorik olarak ilk çalışmalarının yapılmasının ardından [5] 1969 yılında Mihajlo Pupin Enstitüsü'nde ilk aktif antropomorfik dış iskelet yapılmıştır [6].

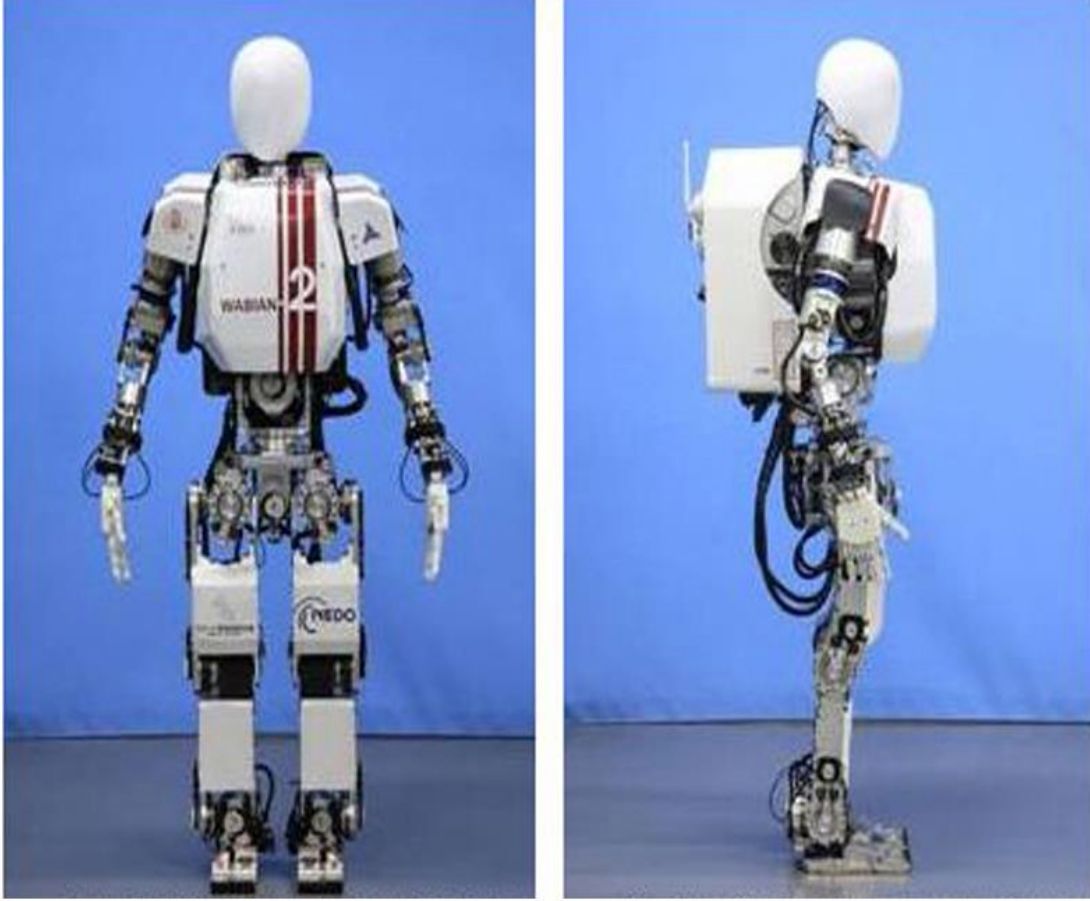
**Tablo 1.1:** Dünya genelinde yapılan insansı robot çalışmaları

	Kapsamlı Projeler	Küçük Projeler	Toplam Proje
Almanya	7	1	8
Amerika	10	20	30
Arjantin	x	1	1
Avustralya	1	7	8
Bulgaristan	1	x	1
Çin	3	x	3
Danimarka	x	1	1
İngiltere	4	7	11
İran	1	x	1
İşveç	2	2	4
İtalya	1	x	1
Japonya	37	18	55
Kanada	1	2	3
Kore	7	x	7
Rusya	1	1	2
Singapur	1	x	1
Tayland	1	x	1
Türkiye	2	1	3

1966 yılında insansı robot çalışmalarının yanı sıra el protezi ve yürüyen mekanizmalar üzerinde de çalışmalara başlayan Ichiro Kato, 1967 yılında yapay yürüyen prototip olan WL-1'i insan bacak yapısından esinlenerek üretmiştir. Başlanan bu çalışma ile yürüme hareketinin temel fonksiyonları araştırılmıştır. 1969 yılında ise

WL-3 isimli elektro hidrolik servolardan hareketini sağlayan prototip üretilmiştir. Takip eden yıl içerisinde pnomatik ayaklı insan şeklinde hareket eden yapı WAP-1 isimle üretilmiştir. Kauçuktan yapılan yapay kaslar kullanılarak hareket sistemi geliştirilmiştir. 1970 yılında WAP-2 adıyla daha güçlü yapay kaslar kullanılarak üretilen prototip tabanı altına yerleştirilen basınç sensörleri sayesinde otomatik durma kontrolü yapabilmektedir. 1971 yılında WAP-3 isimliyle üretilen prototip pwm (Darbe Genişlik Modülasyonu) ile sürülen ve hafızaya dayanan bir kontrolcüye sahip olarak üretilmiştir [40].

Daha sonra Japonya’da Waseda niversitesi’nde Wabot-1 isimli robotla statik yürüme hareketini 1973 yılında gerçekleştirilmiştir [7]. Waseda niversitesi tarafından yapılan iki ayaklı robot çalışmaları 1967 yılına dayanmakla birlikte Wabot-1’ den sonra 1984 yılında ilk dinamik yürüme hareketini yapabilen WL-10RD isimli robotu yapmışlardır [8]. Yapılan çalışmalardan sonra WABIAN isimli robot hlihazırda literatürdeki gelişmiş iki ayaklı robotlardan biri olarak literatüre geçmiştir. şekil 1.1’de gösterilen WABIAN-2R isimli en son model 41 serbestlik derecesine sahip olan robot, 1475 mm boyunda ve 64,5 kg ağırlığındadır. Enerji ihtiyacını ise üzerine yerleştirilmiş bir dhili güç kaynağından sağlamaktadır. Hareket kabiliyetini arttırması amacıyla bacaklarındaki serbestlik derecesi 7 olarak tasarlanmıştır ve yürüme hareketi sırasında dizlerini bükmeden hareket edebilmektedir [9].



*Ön*

*Sağ*

**Şekil 1.1:** WABIAN-2R [2]

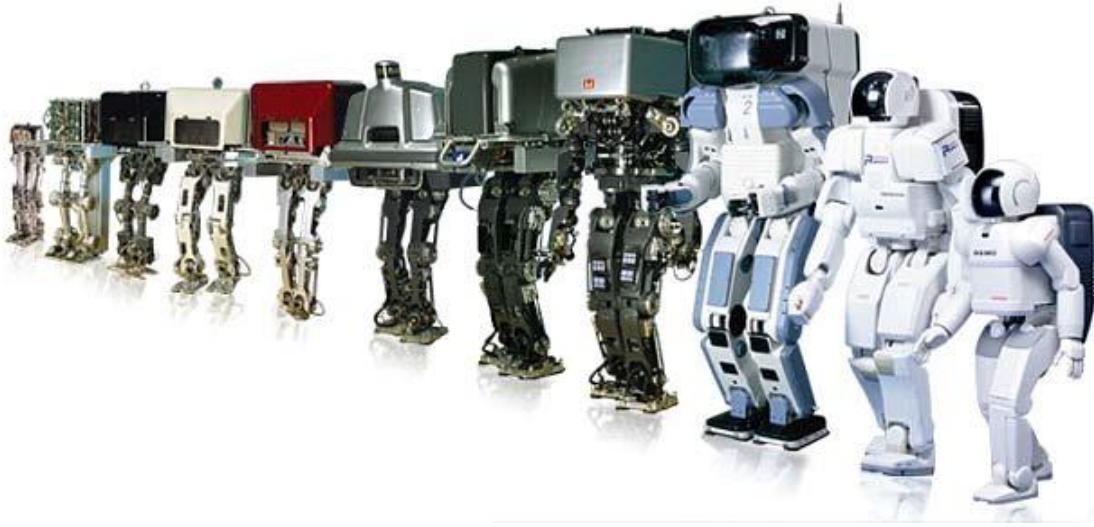
Robotlar ile ilgili araştırmalarda lider durumunda bulunan AIST, Kawada Industries ve Honda firmalarının geliştirdiği HRP-3 ve HRP-3P Şekil 1.2’de gösterilen en son robot prototipleridir. Bu prototipler, 1600 mm boyunda ve 68 kg ağırlığında, 42 serbestlik derecesine sahip, 2,5 km/saat’lik maksimum yürüme hızlarına çıkarabilmektedir [10]. Bu robotun dikkat çekici bir diğer özelliği ise düşük sürtünme katsayısına sahip yüzeylerde yürümesini sağlayan kontrol algoritmasıdır.



**Şekil 1.2:** HRP-3 ve HRP-3P

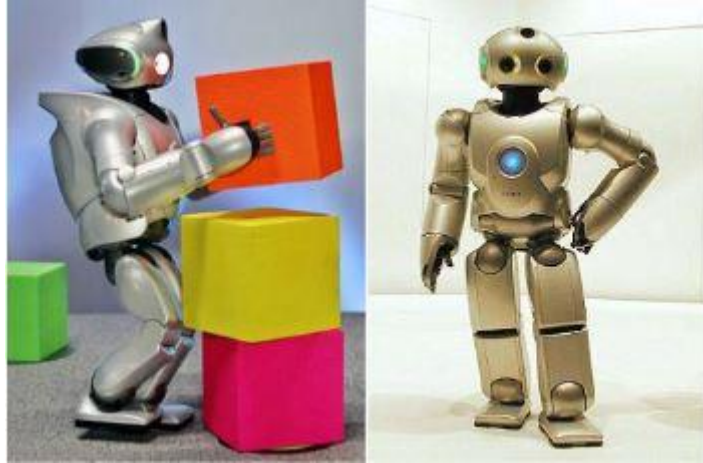
Bir diğer bilinen en gelişmiş insansı robot olan ASIMO, Japonya'da Honda firmasının ticari amaçla geliştirmekte olduğu robottur. Başlangıcı 1986 yılına uzanan projede 1997 yılına kadar Şekil 1.3'de gösterilen 10 adet prototip üretilmiştir. 2000 yılında duyurulan ASIMO 2000 34 serbestlik derecesine sahip, 1300 mm boyunda ve 54 kg ağırlığındadır. Maksimum 5 km/saat hızla yürüyebilen ASIMO 2000 oldukça esnek hareket kapasitesine sahip olup 6 km/saat hızla koşabilmektedir. 2007 yılına kadar toplam 46 adet üretildiği bilinmektedir [11].





**Şekil 1.3:** Honda ASIMO prototipleri

Japon firması olan SONY tarafından oyuncak amaçlı üretilmiş olan Şekil 1.4’de gösterilen QRIO SDR-4X isimli robot, her ne kadar oyuncak da olsa hareket kabiliyeti açısından önemli özellikler taşımaktadır [12]. Dengesini gerçek zamanlı olarak sağlayabilen robot 600 mm boyunda ve 7 kg ağırlığındadır. Piyasaya sürülmemesine rağmen proje tamamlanmıştır.



**Şekil 1.4:** QRIO SDR-4X [2]

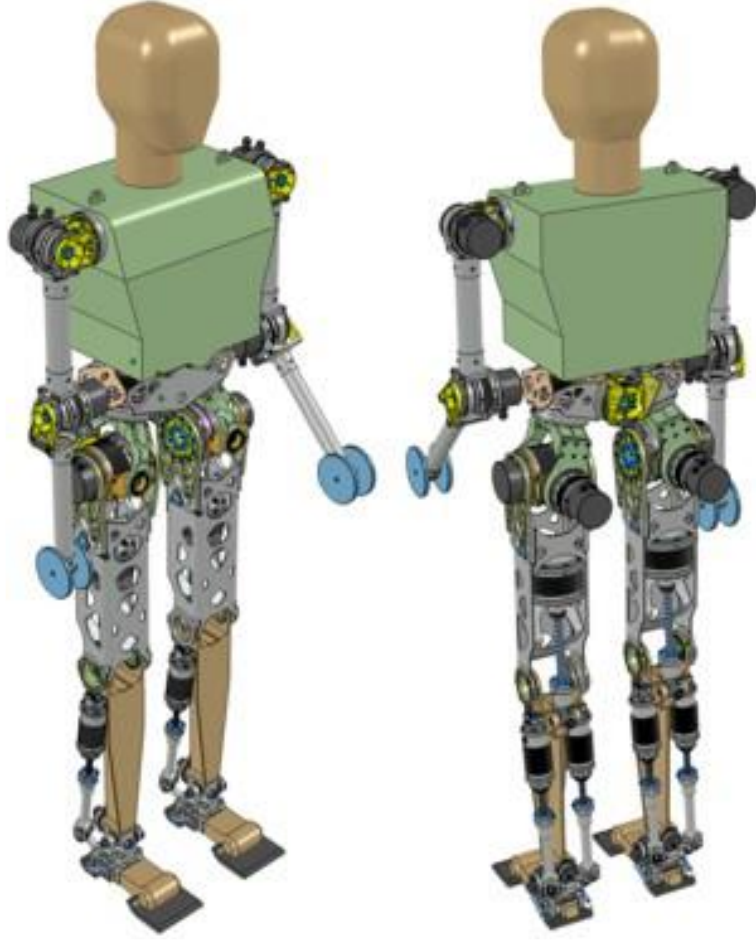
Münih Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen Şekil 1.5’de gösterilen JOHNNIE ise insan şeklindeki bir diğer robottur [13]. 17 serbestlik derecesi bulunan robotun, boyu 1800 mm olup ve 40 kg ağırlığa sahiptir. 2,4 km/saat’lik yürüme

hızlarına çıkabilmektedir. Dikkat çeken bir diğer özelliği ise ayak bilek eklemlerinin sürüş mekanizmasının vida mekanizması şeklinde olmasıdır.



**Şekil 1.5: JOHNNIE [2]**

Yine Münih Teknik Üniversitesi tarafından JOHNNIE'den sonra geliştirilmesine başlanan Şekil 1.6'da gösterilen LOLA isimli bir diğer insansı robottur. Geliştirilen bu robotun mekanik tasarımı ve sahip olduğu kontrolcülerini maksimum 5 km/saat'lik yürüme hızlarına çıkabilecek şekilde yenilenmiştir [14]. Serbestlik derecesi ise önceki robottan farklı olarak 22'ye çıkarılmıştır.



**Şekil 1.6:** LOLA [2]

Kore İleri Teknoloji Enstitüsü KAIST ve Hanson Robotics firmasının ortak geliştirdiği KHR isimli robot bir diğer büyük ölçekli insansı robot projesidir. 2000 yılında başlayan projede şuna kadar toplam 4 adet prototip üretilmiştir. Şekil 1.7’de gösterilen KHR-3 HUBO ismiyle anılan son prototip ise 41 serbestlik derecesine sahiptir [15]. 1250 mm boyunda ve 56 kg ağırlığında olan bu robot maksimum 1,25 km/saat’lik yürüme hızlarına çıkabilmektedir.



**Şekil 1.7:** KHR-3 HUBO [2]

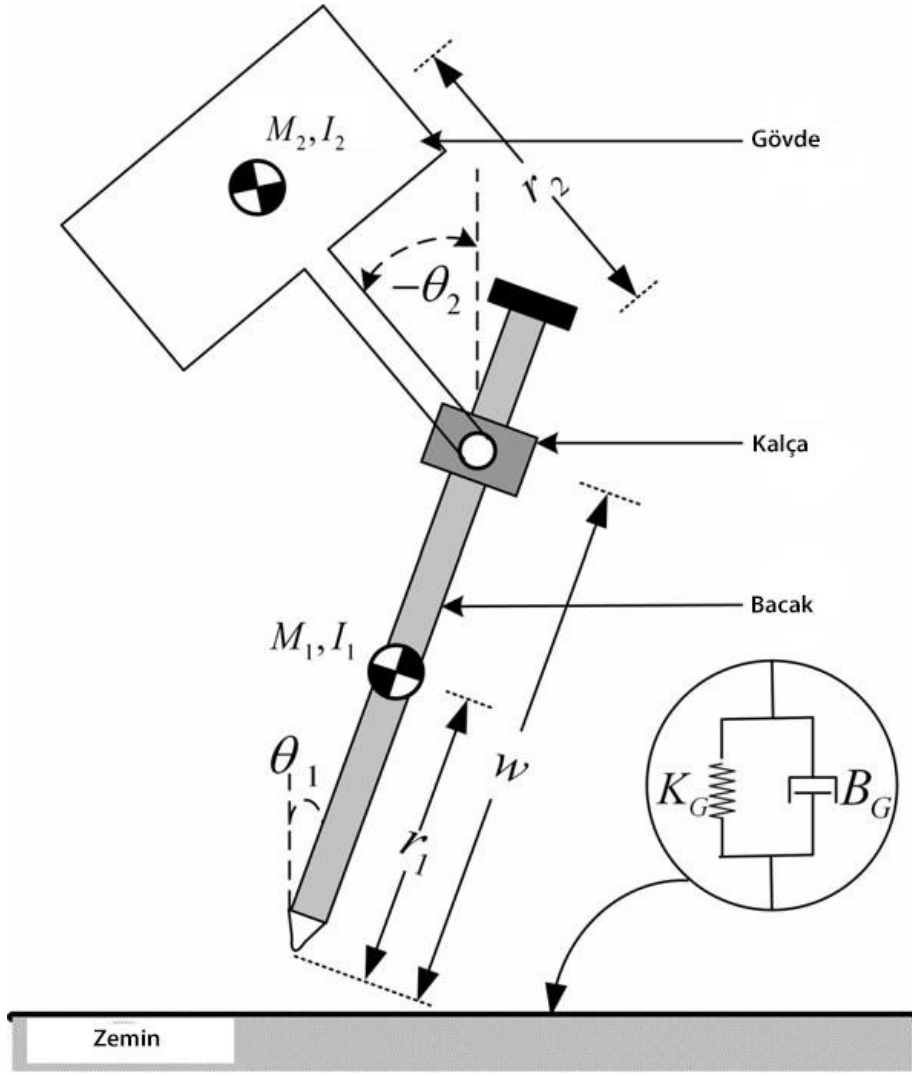
### **1.3 Tek Ayaklı Robotların Tarihçesi**

İki ayaklı robotların tarihsel gelişimiyle beraber, robotları yürütme ve dengede tutmak için yapılan çalışmalar, sorunların tek ayaklı robotlar üzerinden çözümlenip daha sonra iki ayaklı robotlarda uygulanmasının daha kolay olacağını göstermiştir. Tek ayaklı robotun ise durduğu zaman dengede kalması mümkün olmadığı için tek ayağının üzerinde sürekli zıplaması gerekmektedir. Bu sebeple tek ayaklı robotlara zıplayan robotlar da denir.

Matsuoka tek ayaklı robot kavramına uygun, yerden ayağı havalanan ve periyodik olarak uçuş hareketini yapan ilk makineyi bulmuştur. Matsuoka'nın amacı insan yürüyüşünü, tek ayak üzerinde zıplayarak gerçekleştiren ve bu hareketi tekrar eden bir model oluşturmaktır. Bu amacı gerçekleştirmek için de ağırlığı olmayan bir ayak ve bu ayağa bağlı gövdeyi modelleyerek, yere basan destek fazındaki sürenin

ayak havada kaldığı süreye göre çok kısa olan bir yürüyüş modelini ortaya çıkarmıştır [16]. Ayrıca,  $10^\circ$ 'lik yatay eğimli düzlemsel bir masa üzerinde sürtünmesiz rulmanları kullanarak yer çekimi etkisini azaltan, tek ayak üzerinde zıplayarak hareket eden robotu da bulmuştur [17].

Raibert, zıplayan tek ayaklı robotların ilk araştırmalarını yapan kişilerden birisi olmuştur. Yaptığı çalışmalar diğer araştırmaların kaynakçası olarak alınmaktadır. Modelinin önemli bir parçası ağırlığı olan gövde ile gövdeye ait kütle eylemsizlik momenti, kütlesi olan bir bacak ile bacağına ait kütle eylemsizlik momenti ve uyumlu zemin yüzeyidir. Hareket sağlayıcının iki önemli parçası vardır, bunlar yaylı prizmatik bacak ve dönen kalça eklemidir. Şekil 1.8'de sistemin modeli gösterilmiştir.

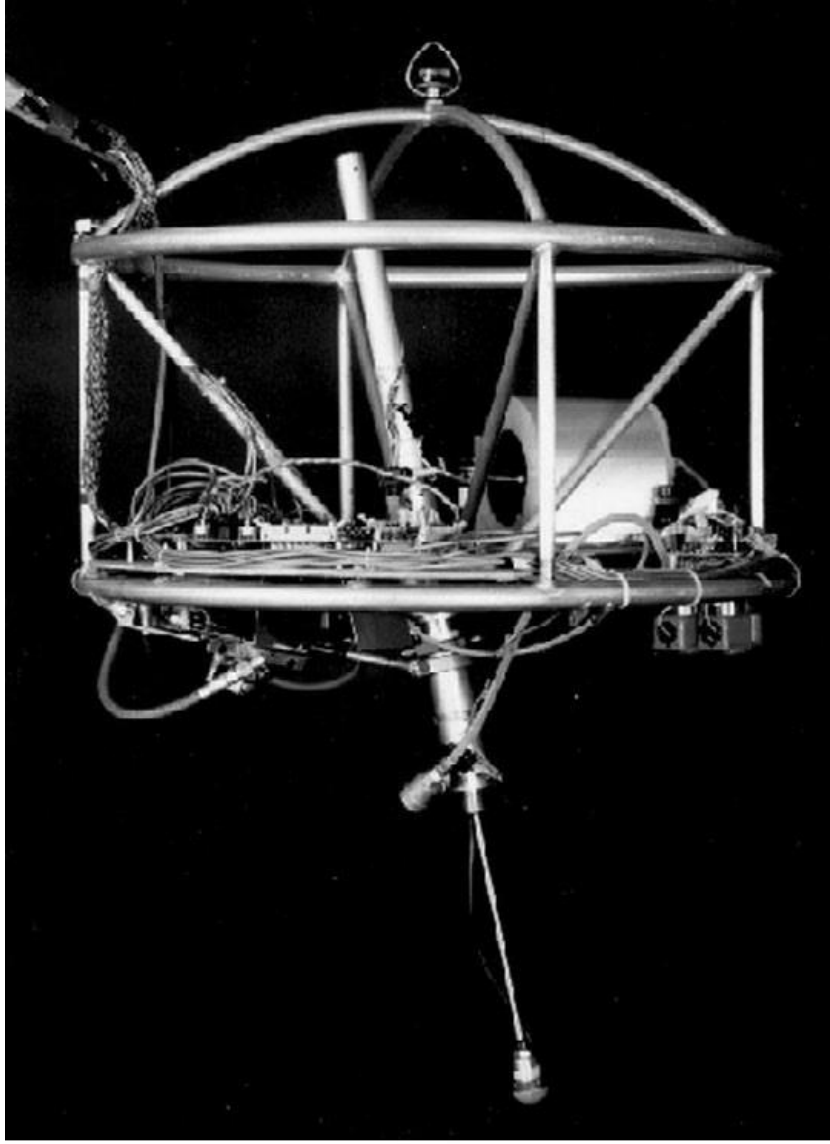


**Şekil 1.8:** Raibert'in modeli [38]

Modellenen sistemde zemin sürtünme ve sönümlenme elemanı olarak modellenmiştir. Bacağın zemin ile yaptığı açı  $\theta_1$  gövdenin bacak ile yaptığı açı ise  $\theta_2$  olarak gösterilmiştir. Bacağın ağırlık merkezi ile uç kısmı arasındaki mesafe  $r_1$  ile gösterilmiştir. Gövdenin ağırlık merkezi ile bacak bağlantı noktasına olan mesafesi  $r_2$  ile gösterilmiştir. Bacağın kütlesi ve atalet momenti  $M_1$  ve  $I_1$  ile gösterilmiştir. Gövdenin kütlesi ve atalet momenti ise  $M_2$  ve  $I_2$  ile gösterilmiştir.

Hareketinin yönünü hareket sağlayıcı bacağın bağlı olduğu eklem sağa ve sola döndürülmesi ile belirlenir. Teleskopik bir ayak (pnömatik silindir) yer ile etkileşim elemanı olarak enerji geri kazanımı sağlamaktadır. Teleskopik ayağın bağlandığı prizmatik eklem de yukarı zıplamak için doğrusal bir hareket sağlayıcı





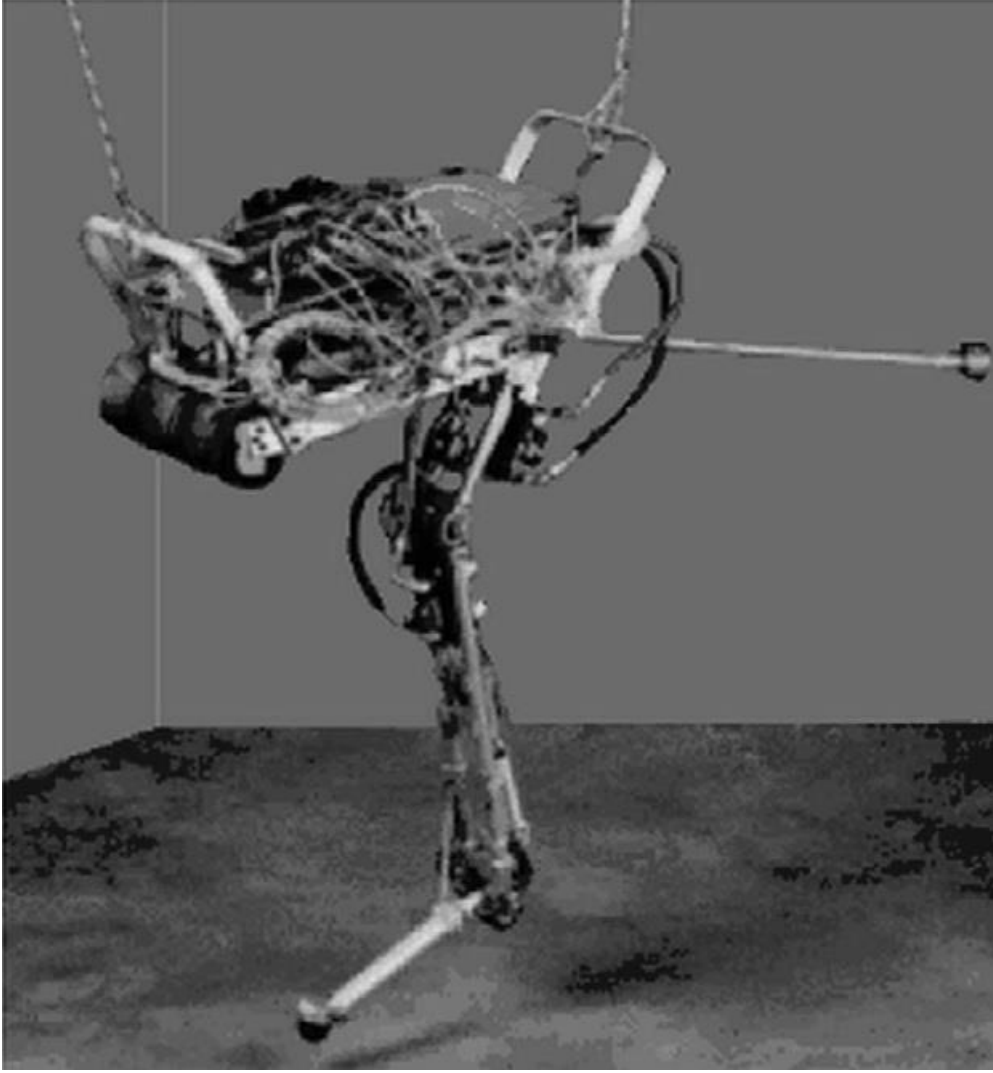
**Şekil 1.10:** Raibert'in 3 boyutlu hareket robotu [38]

Robot basit bir yönetme kolu ile operatör gözetiminde oda içerisinde atlayabilmektedir. Raibert'in 2 robotu da yaylı teleskopik bacaklara sahiptir. Daha sonra Lee ve Raibert Monopod adını verdikleri tek bacaklı ve ayağı olan bir eklemli yeni bir yapı geliştirdiler. Bu düzlemsel prototip bir ayak, bir bacak ve bir gövdeden oluşmaktadır. Kalça eklemi kütle merkezinin olduğu bölümden çıkmaktadır. Ayak kısmı fiberglas yaprak yaylardan oluşmaktadır. Kalça ekleminde ise doğrusal hidrolik hareket sağlayıcı yer almaktadır. Ayak kısmı ise döner ayak bileği ve elastik olmayan tendondan oluşmaktadır. Bir başka hidrolik hareket sağlayıcı ise kalçayı sağa ve sola yönlendirmek için kullanılmaktadır. Ayak ve bacak kısımları arasında gerginlik sağlaması için geri çekme yayı kullanılmaktadır. Monopod ayağı üzerinde



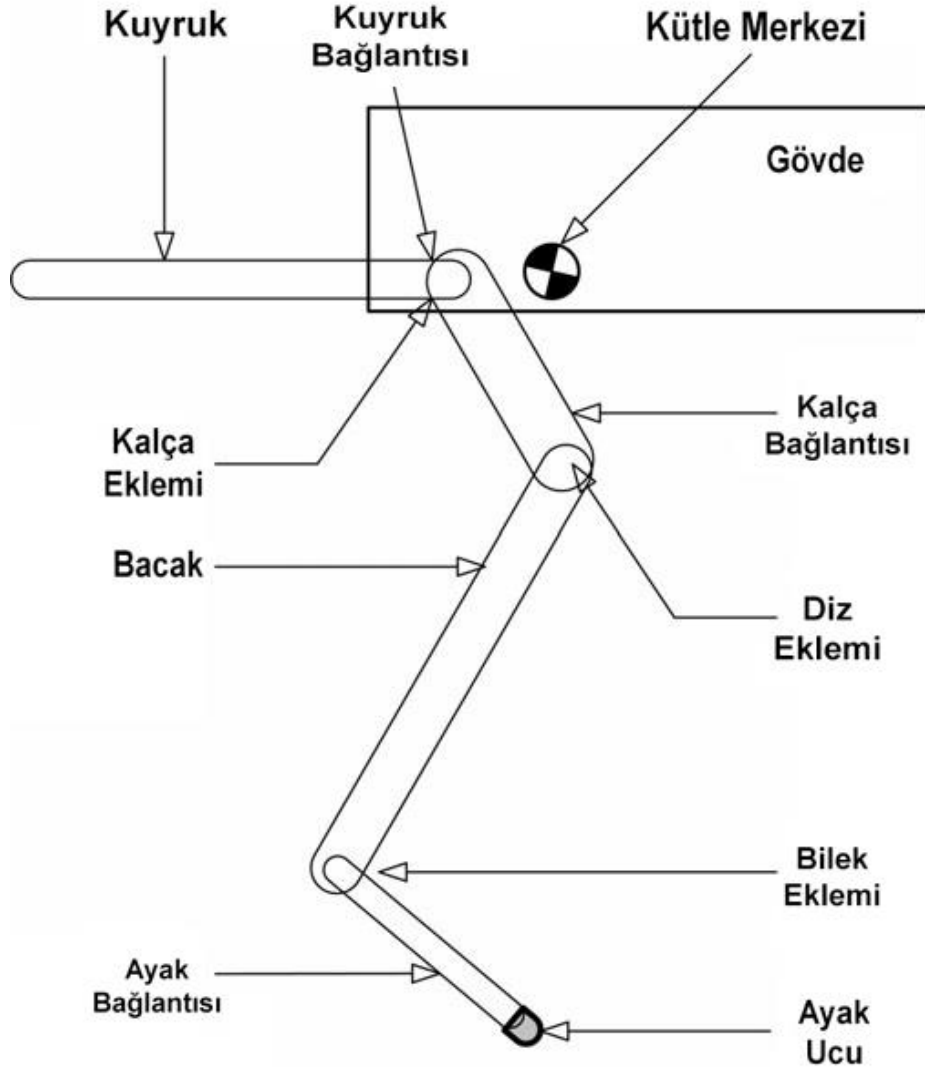
yuvarlanmadan ve düşmeden koşabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarımında eklem açılarını ölçmek için potansiyometre kullanılmıştır. Monopod bir bölge içinde zıplayabildiği gibi ileri ve geri yönlerde 8 m/s'den daha yavaş koşabilmektedir[20].

Zeglin ve eski araştırmacılar tarafından Şekil 1.11'de gösterilen Uniro adı verilen ve hidrolik bir hareket sağlayıcısı ile tahrik edilen, kanguru bacağından esinlenerek 3 eklemlilik bir robot yapılmıştır. Robotun bacak yapısı Şekil 1.12'de gösterildiği gibi kangurununkine oldukça benzemesinin yanında kütleli olarak da yakınlık göstermektedir. Dikey düzlemdeki hareketi uzun mili sayesinde oldukça fazladır. Robotun çalışması için orta milin olduğu kısımda güç ve iletişim bağlantıları ile kontrol sistemine bağlantısı vardır. Uniro'nun 40'dan fazla başarılı zıplaması mevcuttur. Raibert'in robotunda hidrolik ve pnömatik hareket sağlayıcılar olmasına karşın Zeglin'in robotunda sadece hidrolik hareket sağlayıcı kullanılmıştır [21].



**Şekil 1.11:** Zeglin'in ilk tek ayaklı robotu UniRo [38]

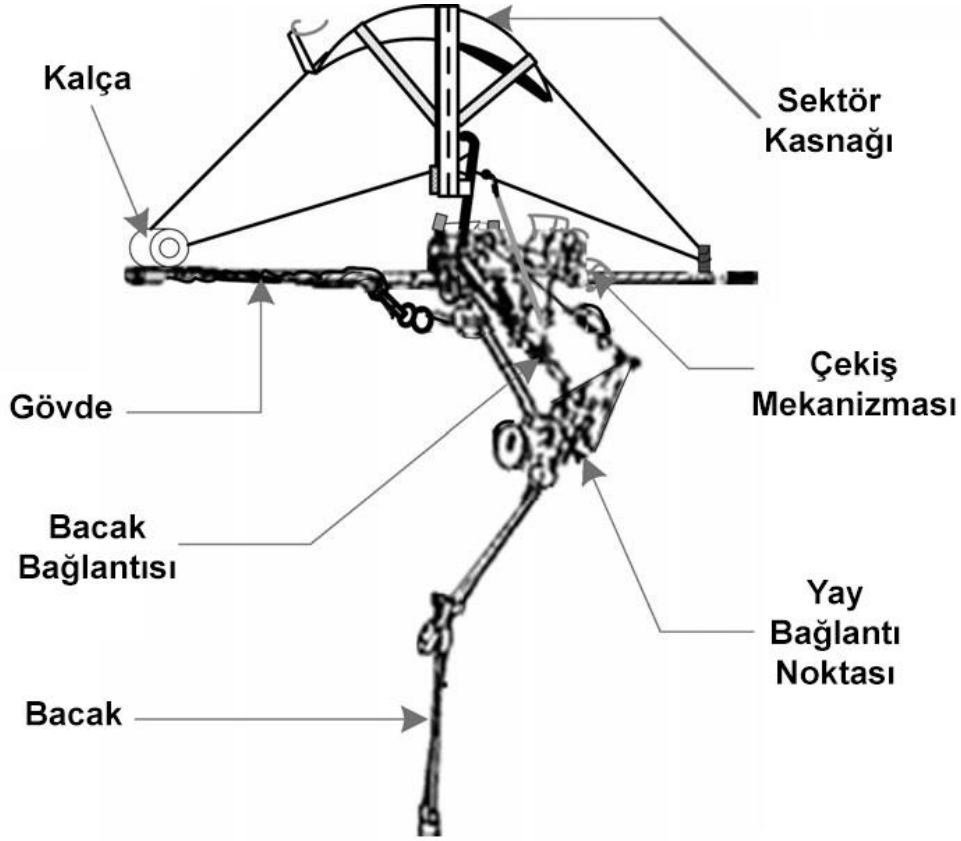
Bu hareket sağlayıcılar yüksek güç – kütle oranını sağlayarak robotun kontrol edilmesini kolaylaştırmıştır. Ancak tüm sistemin verimliliği istenen düzeyde değildir. Enerji verimliliği istenilen seviyenin altında kalmıştır. Raibert, UniRo çalışmasıyla beraber küçük ölçekli sistemlerde uygulanan kontrol kavramlarının enerji verimliliği açısından ciddi bir mühendislik sorunu olduğunu ortaya atmıştır. Yüksek güçlü hareket sağlayıcılar ise ivmelenme ve yavaşlamaların daha karmaşık hale gelmesine neden olmuştur.



**Şekil 1.12:** UniRo'nun mekanik dizaynı [38]

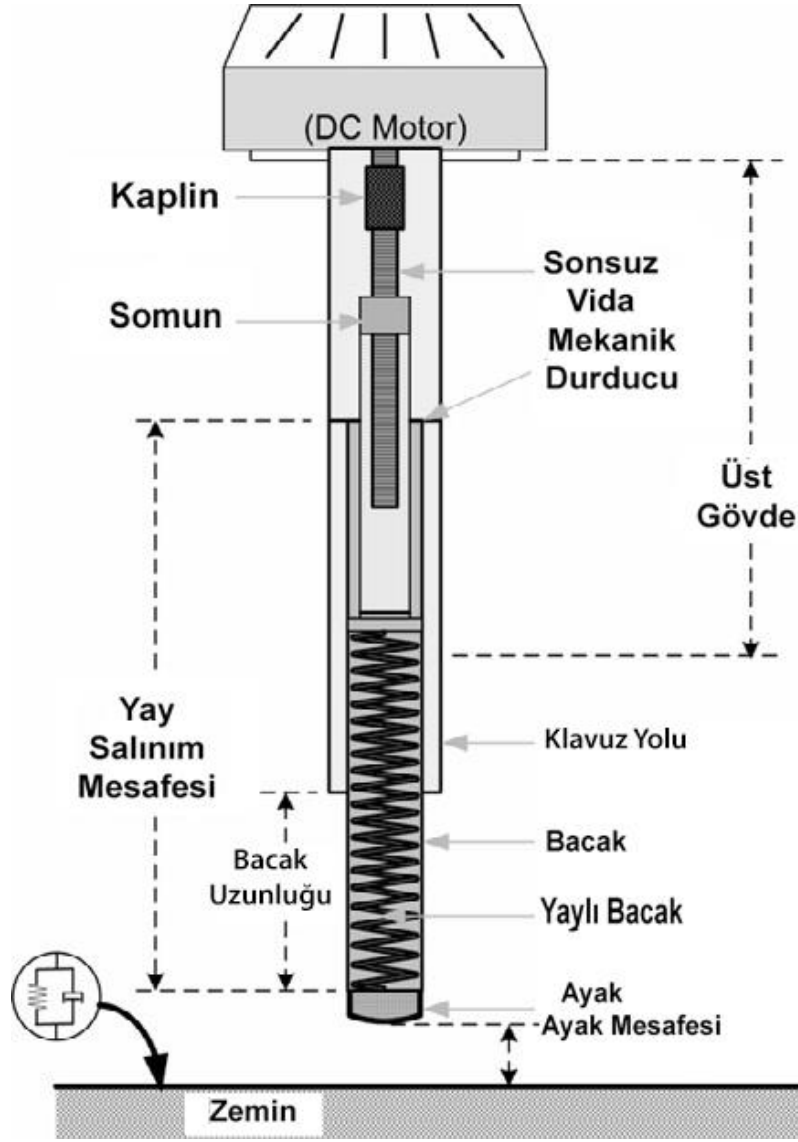
Papantoniou'nun elektromekanik hareket sağlayıcısına sahip tek bacaklı robotu ise Şekil 1.13'de gösterilmiştir. Bu robot gücünü elektrik enerjisinden alan motorlar ile hareketini sağlarken maksimum 0,3 m/s hıza çıkabilmektedir. Toplam ağırlığı 7,5 kg olan robotun bacak yapısı 4 ayrı çubuk parçadan oluşmaktadır. Atalet momentini en aza indirmek için hareket sağlayıcı kısım gövde üzerine yerleştirilmiştir [22]. Elektriksel hareket sağlayıcı gücünü aktarmak ve hareket sırasında elastik enerji depolama ile robotun zıplama hareketini gerçekleştirmek için Papantoniou, mekanik tasarımı ve iletim mekanizmalarını kendisinden önceki robot tasarımlarından farklı gerçekleştirmiştir. İki özel iletim mekanizması, bacak tutum mekanizması için özel olarak tasarlanmış sektör kasnağı kullanımına dayalı yani yay çekme mekanizması için

bir kablo tipi iletim ve yüksek geri dönüşüm oranına sahip tek kademeli dişli kayış şanzımanı olacak şekilde tasarlanmıştır.



**Şekil 1.13:** Papantoniou'nun prototipi [38]

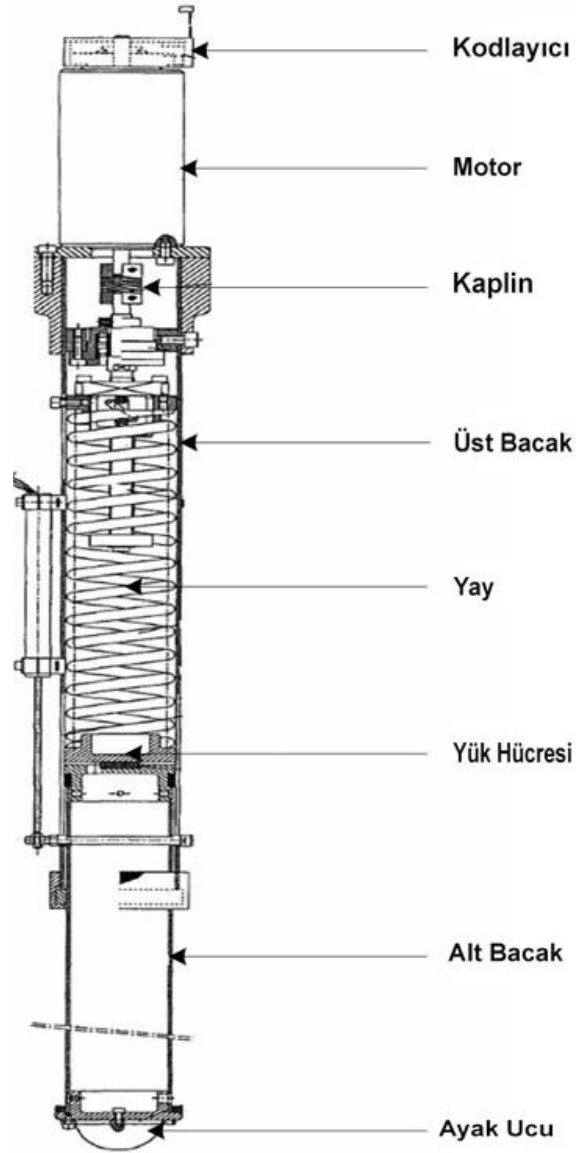
Prosser ve Kam tarafından tek bacaklı elektromekanik bir yapıya sahip Şekil 1.14'deki prototip geliştirilmiştir. Bu robot dikey olarak oldukça kısıtlı hareket kabiliyetine sahiptir. Geliştirilen bu prototip tek yaylı teleskopik bir bacak ve bu bacağa hareket sağlayıcı ile bağlı bir gövdeden oluşmaktadır [23]. Robotun gövdesi üzerine yerleştirilen bir doğru akım motoru bacağın enerjisi depolamasını sağlamaktadır. Bu doğru akım motoru ile bacağın uzunluğunun kontrolü sağlanmaktadır. Bacak ve gövde arasındaki yay sistemi ile bacağın sıkıştırılarak yayda depolanan enerji ile zıplama hareketi gerçekleştirilmektedir [24]. Bu sayede yumuşak ve tekrarlanabilir bir hareket sağlanmıştır.



**Şekil 1.14:** Prosser ve Kam tarafından geliştirilen robot [38]

Buehler, ARL Monopod 1 ve ARL Monopod 2 adında iki deneysel prototip geliştirmiştir. Bu robotları geliştirirken hidrolik ve pnömatik hareket sağlayıcılardan kaçınıp daha güvenli, ucuz ve otonom harekete uygun olduğu için elektrikli hareket sağlayıcılara yönelmiştir. Şekil 1.15’de gösterilen ARL Monopod 1 son uygulamasından önce Rad ve diğer araştırmacılar prizmatik bacak yapısını deneyip önermiştir [25]. Önerilen bu tasarım elektrikli hareket sağlayıcıya göre optimize edilmiş ve her iki monopod tasarımında da kullanılmıştır. Amacı ise yüksek tork – ağırlık oranına sahip küçük motorlar kullanarak güvenilir hareketi sağlamak olmuştur. Bileşenlerin seçimini kısa duruş fazından maksimum enerji ilavesini sağlayacak şekilde yapmıştır. Kullanılan motor 80 watt gücünde fırçalı doğru akım motoru olup 4

kN/m döndürme kuvvetine sahiptir. Hareket sağlayıcının dinamikleri ve yerin etkilerini de göze alarak robotun dinamik modeli elde edilmiştir [26].



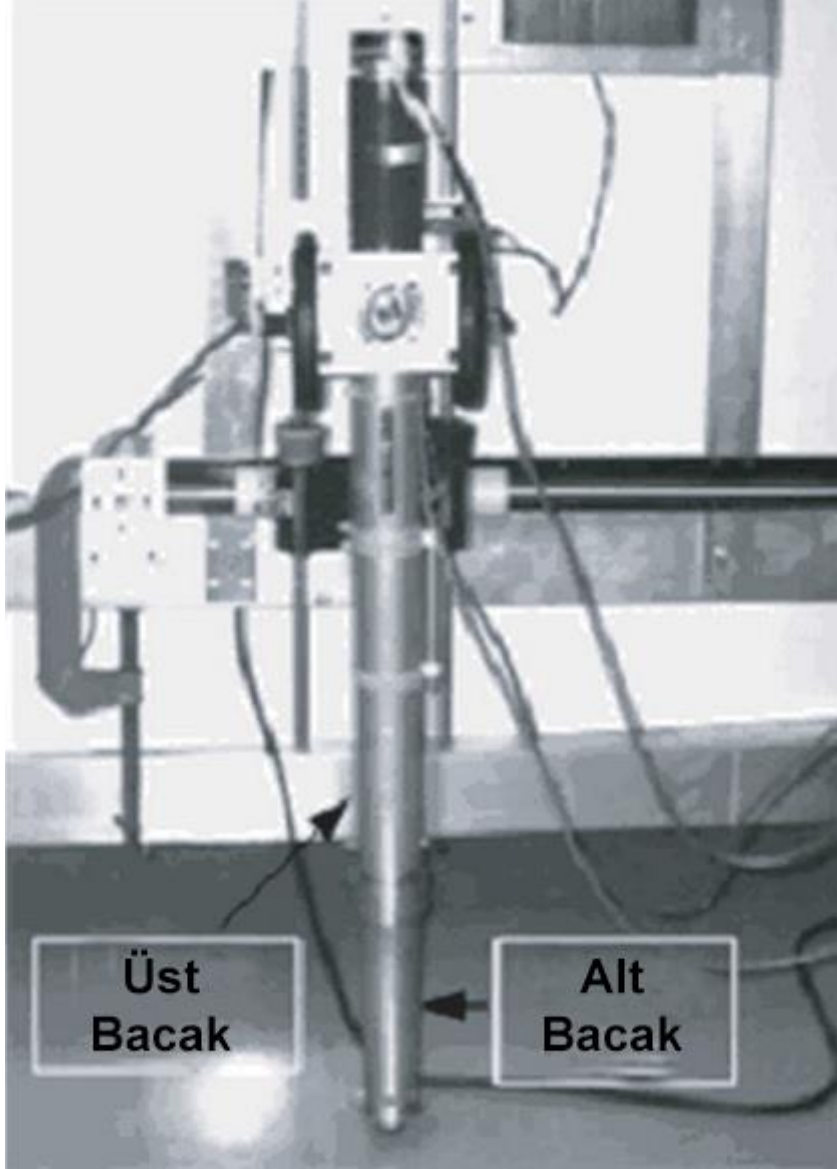
**Şekil 1.15:** ARL Monopod mekanik dizaynı [38]

Gregorio, monopod tasarımındaki itme denetleyicisini değiştirmek için yeni bir bacak tasarımını geliştirmiştir. 150 N'luk ağırlığa sahip olan ARL Monopod 1 sanal hareket sistemi üzerinde dikey düzlemde sınırlı hareket etmektedir. ARL Monopod ve Şekil 1.16'da gösterilen Raibert'in tek bacaklı robotu benzer kinematik yapıya sahip olmasına rağmen, iletim sistemleri ve hareket kapasiteleri bakımından farklılıklara sahiptir. ARL Monopod elektrikli hareket sağlayıcısı yerine hidrolik hareket sağlayıcı ve metal yay yerine hava silindirlerine sahip olması itibari ile Raibert robotuna benzer

yapıdadır [27]. Zıplayan bu robot, bir teleskopik ayak ve hareketli kalça olmak üzere iki alt sistemden oluşmuştur. Robotun sallanan bacağından dolayı gövdenin salınım hareketinin en aza indirmek için gövdenin ataleti yüksek tutulmuştur. Ayrıca dikey hareket için enerji tüketimini azaltmak amacıyla gövde ağırlığı minimum seviyede tutulmuştur. Bacağın dikey salınımı koruyarak çalışması hedeflenmiştir.

**Tablo 1.2:** ARL monopod güç tüketimi [38]

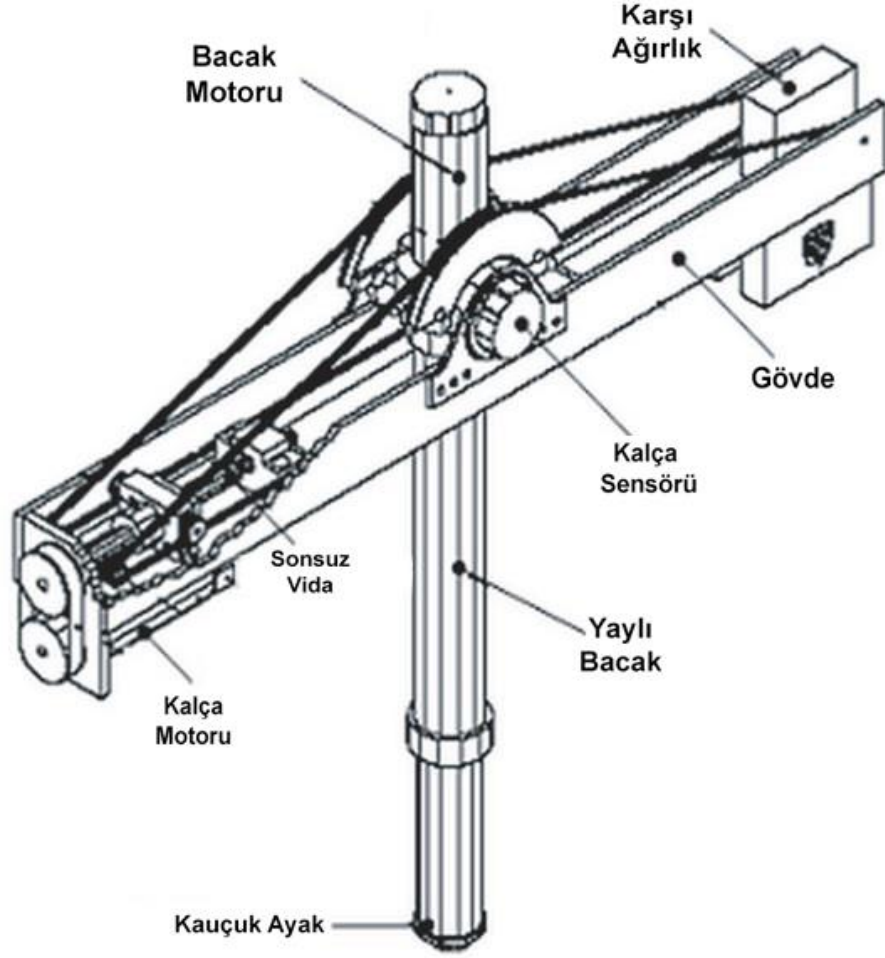
Robot	Motor	Stance	Uçuş	Toplam
ARL	Bacak	13J	12J	25J
Monopod (I)	Kalça	5J	20J	25J
ARL	Bacak	5J	5.5J	10.5J
Monopod (II)	Kalça	3.7J	6.5J	10.5J



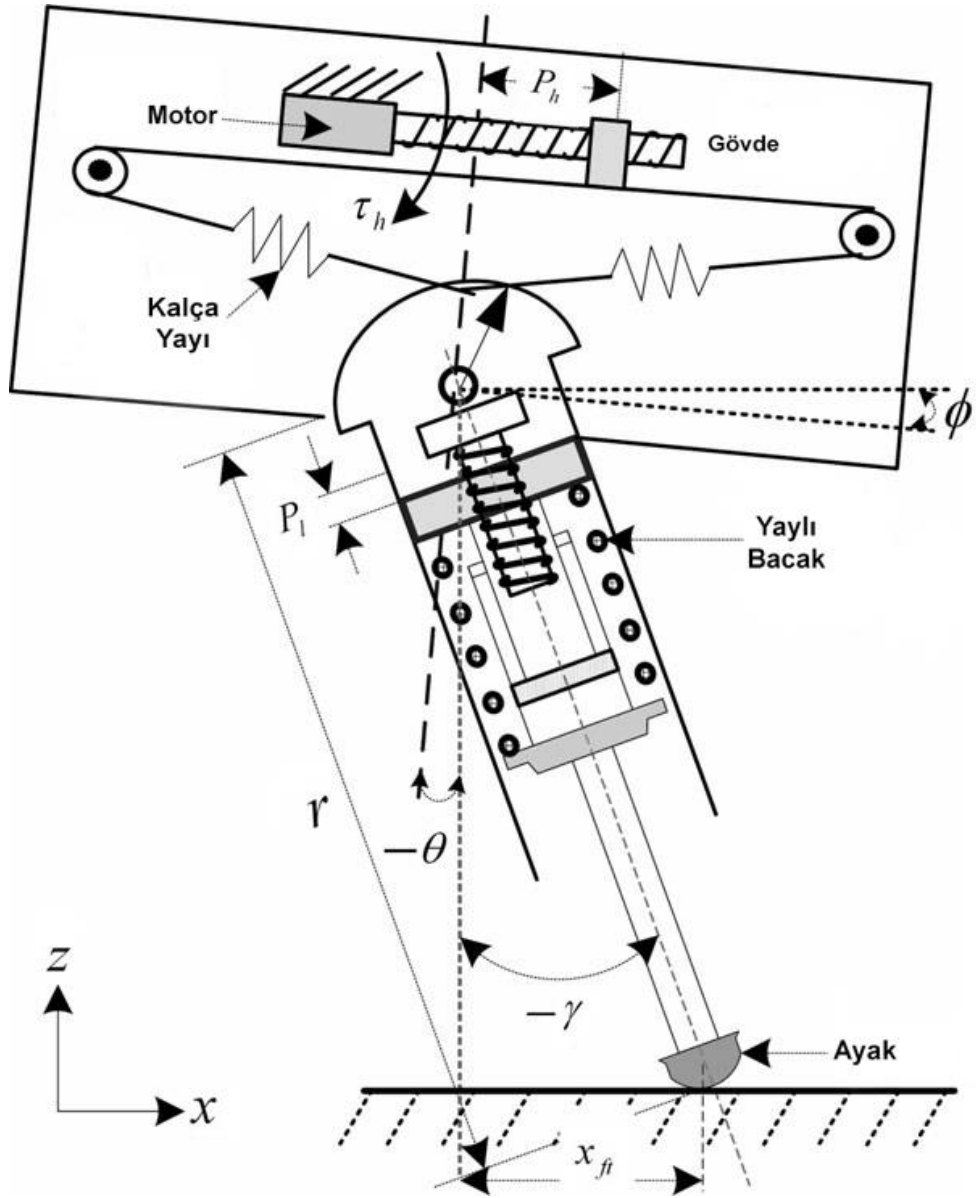
**Şekil 1.16:** Rad'ın deneysel robotu [38]

Uygun bacak açısı ile 125 W güç tüketimi ve ortalama olarak 1,2 m/s hıza kadar çalışmasını sağlamak için buna uygun bir kalça çalıştırma sistemi tasarlanmıştır. ARL Monopod 1 robotunun Şekil 1.17'de gösterilen bacak tasarımındaki önemli enerji israfından dolayı enerji açısından verimli prototibini oluşturmak için ARL Monopod 1'e uyumlu elemanlarla güncelleme yapılmış ve ARL Monopod 2 Şekil 1.18'de gösterilen robot tasarımı ortaya çıkmıştır. ARL Monopod 2 180 N ağırlığında ve en fazla 1,25 m/s hıza çıkabilmektedir. Sonuç olarak maksimum çalışma hızı 1,25 m/s ve toplam güç tüketimi ise sadece 48 W olmuştur [28].



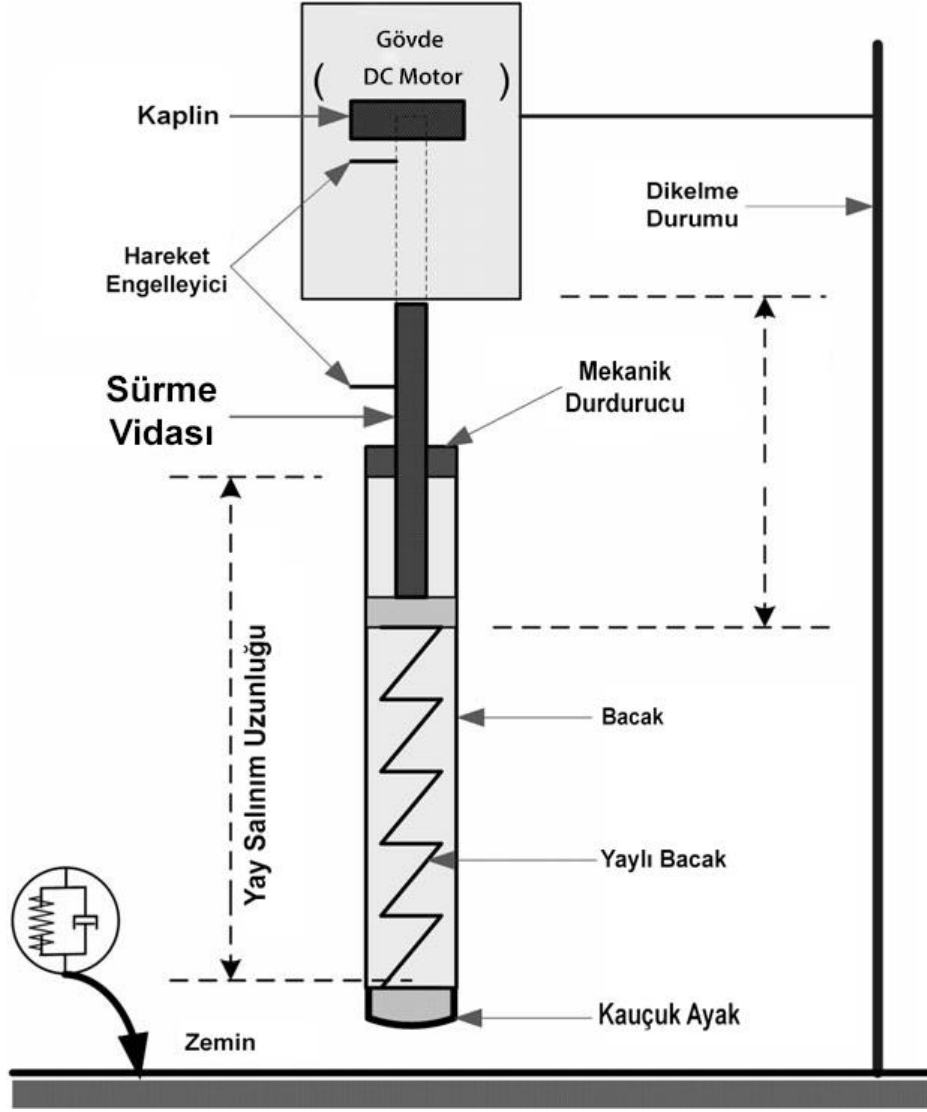


Şekil 1.17: ARL Monopod 1 detaylı gösterimi [38]



**Şekil 1.18:** ARL Monopod 2 mekanizması [38]

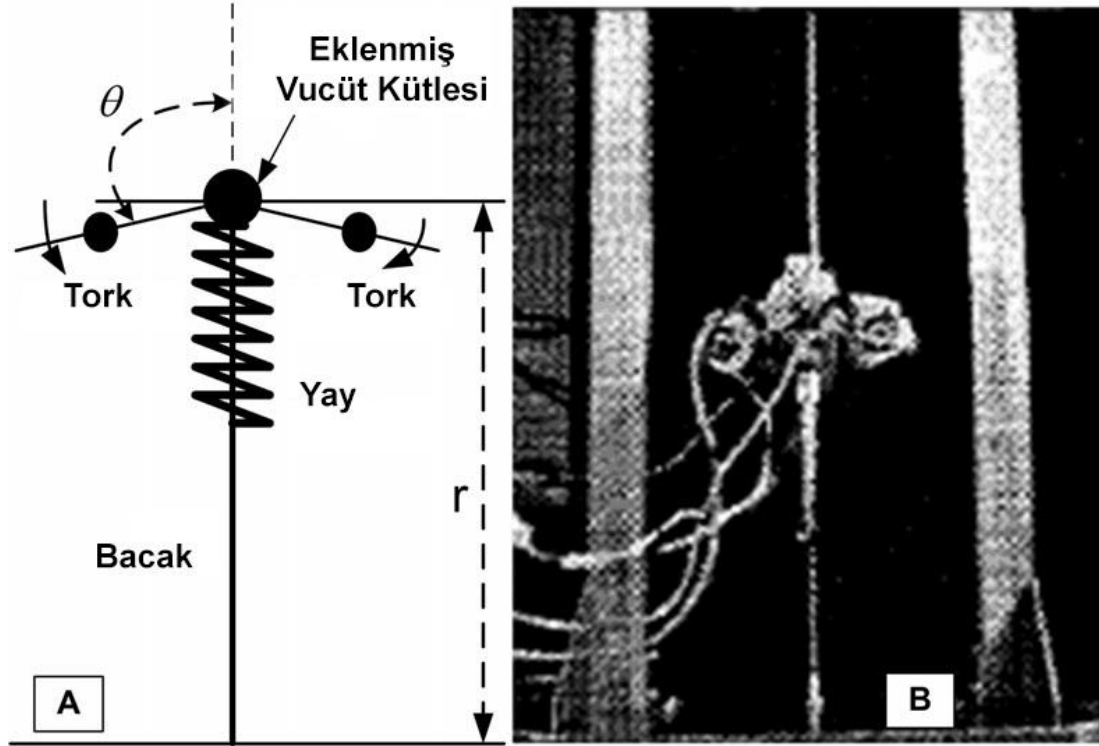
Mehrandezh tek boyutta zıplayan robot için Şekil 1.19'daki mekanik tasarımı ortaya çıkarmıştır. Bu tasarımda teleskopik bacağına eklenen bir doğru akım motoru sayesinde zıplama sırasında sisteme eklenen veya çıkarılan enerji düzenlenebilmektedir.



Şekil 1.19: Mehrandezh'in robotu [38]

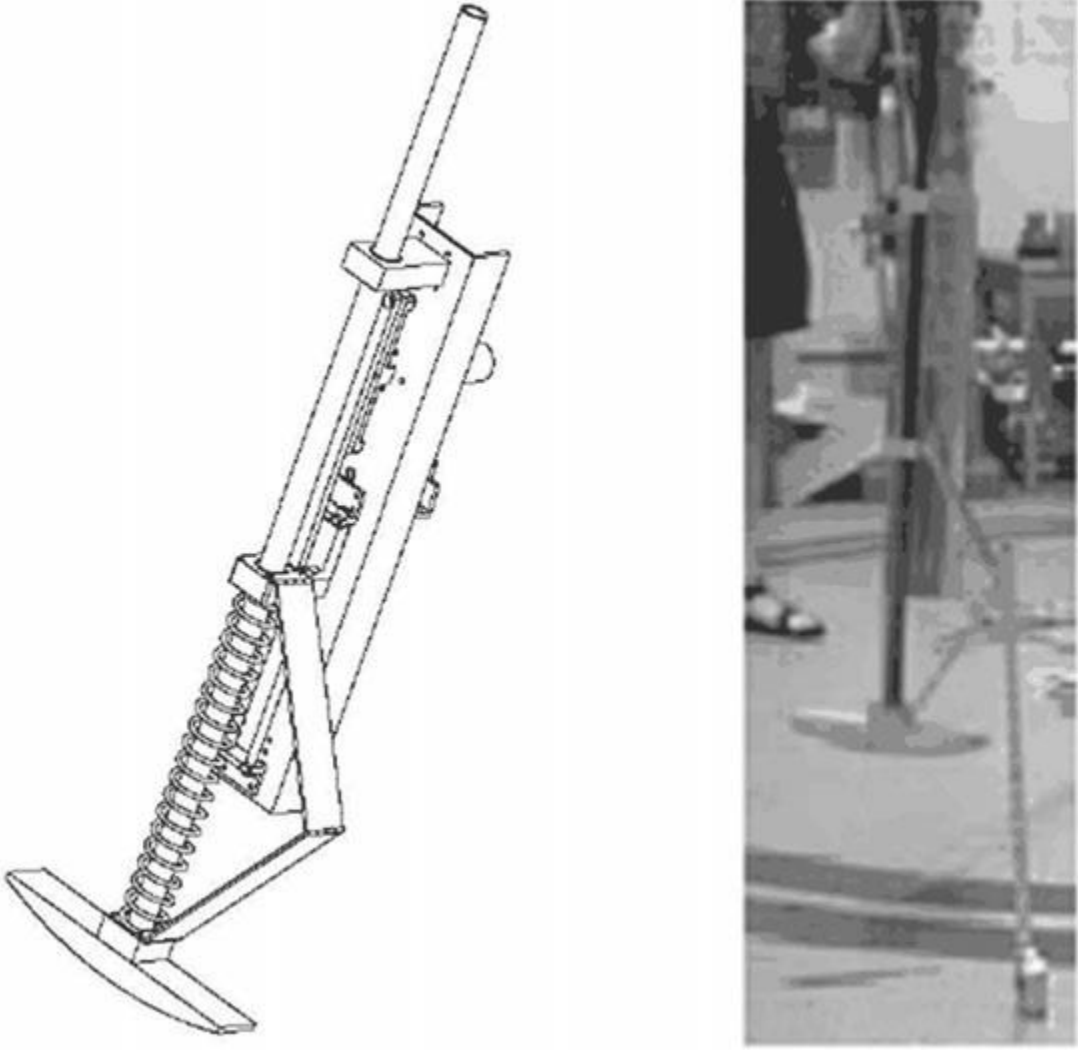
Pratik kullanımda robotun performansını arttırmak için, daha hafif hareket sağlayıcılara ihtiyaç duyulmuştur. Bu fikirden yola çıkarak Okubo daha hafif hareket sağlayıcı ve yaylar kullanarak daha yükseğe zıplayan Şekil 1.20'de gösterilen robotu tasarlamıştır. Tasarladığı bu robotta ağırlık merkezi yayın eksenini boyunca değişmektedir. Sistem birbirine simetrik iki yaylı bacağın birleşiminden oluşmaktadır. Her bağlantının kendine ait kütlesi ve hareket sağlayıcısı bulunmaktadır ve gövdenin üst kısmında yaylı bacağına bir kütle iliştilmiştir. Bağlantılı bacaklar simetrik hareket etmek zorunda oldukları için iliştilen kütle bacak ile beraber hareket etmektedir.

Duruş dengesine bağlı olarak hareket sağlayıcılar enerjiyi depolamak için hareket edebilmektedir. Robotun önemli bir özelliği ise rezonans salınımlarına bağlı olmadan küçük hareketleri, hareket sağlayıcıyı kullanmadan kendi enerjisi ile yapabilmektedir. Deneysel sonuçlar ise sınırlı bir zıplama alanı içerisinde rapor edilebilmiştir.



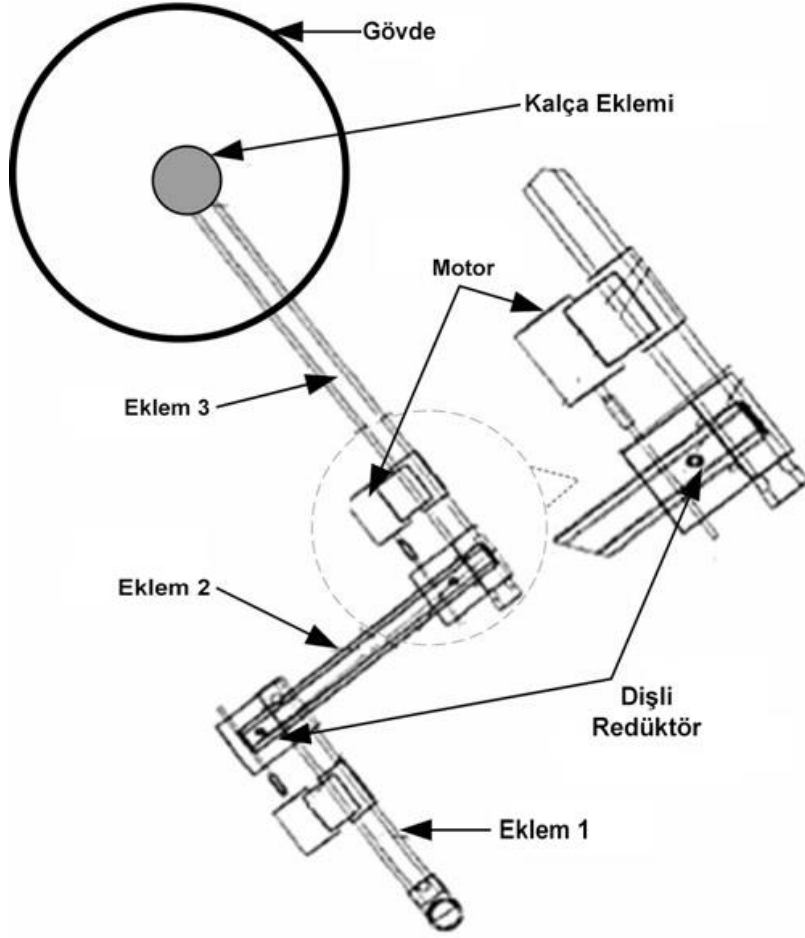
Şekil 1.20: Okuba'nın zıplayan modeli [38]

Ringrose kendi dengesini kurabilen tek bacaklı Monopod ismini verdiği bir robot yapmıştır. Bu robot kendi dengesini sağlamak için sensör geri bildirimlerine doğal yapısı gereği ihtiyaç duymamaktadır. Bu Monopod Şekil 1.21'deki gibi bir bacak, bacağa bağlanmış bir yay ve üst kısımdaki gövde kütesinden oluşmaktadır. Ayak temas bölgesi eğimli yüzeyde kaymayı önlemek için kauçuk tabaka ile kaplıdır. Ayak ve bacak dikey doğrusal rulman kümesi ile kısıtlanmıştır ve menteşe mekanizması, ayağın bükülmesine engel olacak şekilde tutulmaktadır. Robot dikey ve yatay hareket ederken zıplayan ayağı eğilmeyecek yapıya sahip olarak hareket etmektedir. Robotun kendi dengesini sağlayabilmesi için merkezi bir elektrik motorunu gecikme döngüsü zamanlayıcısıyla çalıştırılması gerekmektedir. Bir bağlantı yayı ile doğrusal hareket için elektrik motorunun dönme hareketi bacağa transfer edilmektedir. Bu monopod yükseklik, eğim ve faz bozukluklarını dengeleyebilecek şekilde zıplamaktadır [29].



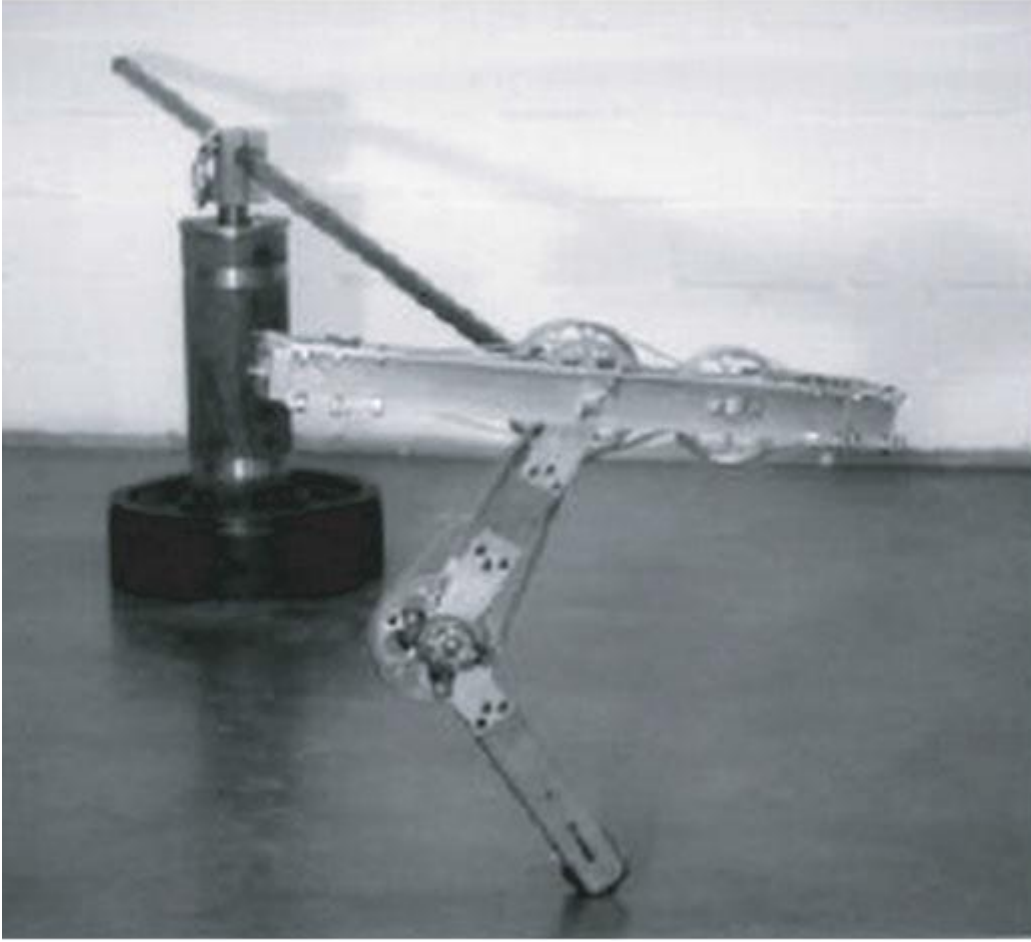
**Şekil 1.21:** Ringrose'un monopodu [38]

Zhang 3 ve 4 eklemlili hayvansal ayaksız bacak hareketlerini araştırmıştır. Daha sonra 3 eklemlili prototipini ön deneyler ile uygulanabilirliğini test etmiştir. 3 eklemlili sistemin farklı 2 prototipini, farklı mekanik özelliklerde sahip olacak şekilde imal etmiştir. Şekil 1.22'de gösterildiği gibi kendi kendini kilitleyen ve 2 adet doğru akım motorundan oluşan bir mekanizma kullanmıştır. Bu iki prototipte plastik dişliler yerine çelik dişli mekanizmalar kullanılarak eklemler daha verimli hale getirilmiştir. Üretilen bu prototip 2 ekseninde normal şekilde, düşük yer çekimi altında zıplamayı başarmıştır [30].



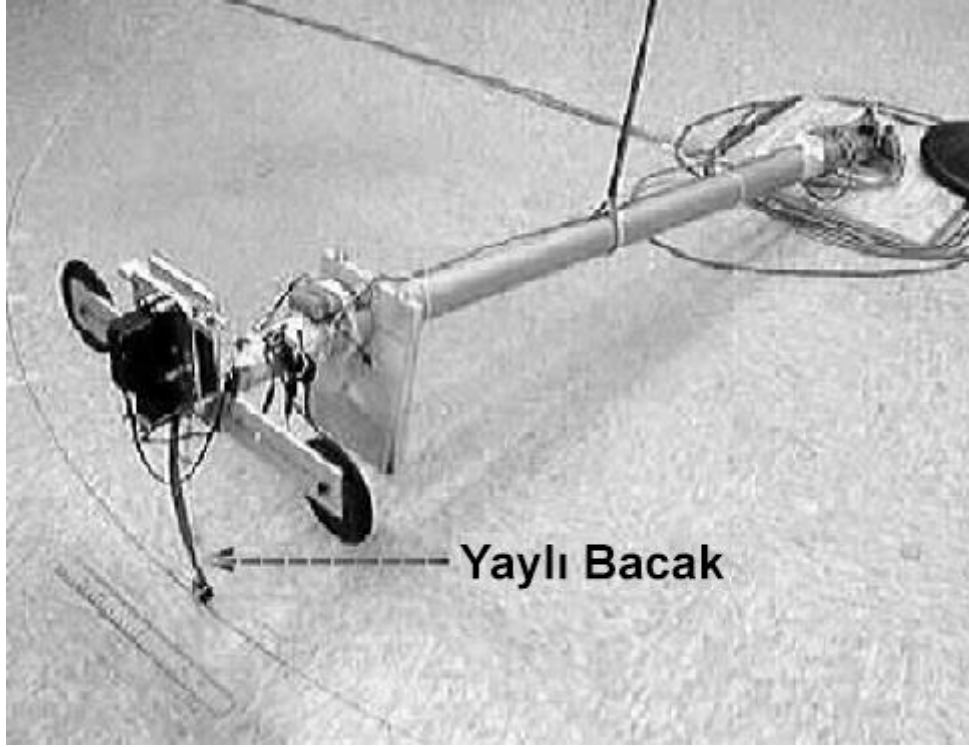
**Şekil 1.22:** Üç eklemlı bacak tasarımı [38]

De Man elektrik ile çalışan Şekil 1.23'deki tek bacaklı zıplayan robotu imal etmiştir. İmal ettiği bu robota Olie (One Leg Is Enough) ismini vermiştir. Ağırlığı 11.66 kg, ayakta dik dururken 0,65 m yüksekliğe sahip olan bu prototip üç temel parçadan oluşmaktadır. Bunlar ana gövde, üst bacak ve alt bacaktır. Robotun kalçasına bağlı silindir yüzeyinde hareketi sınırlıdır. Bu kalça ve dizi hareket ettiren iki elektrik motoru robotun aktif kısmını oluşturmaktadır. Pasif kısım ise alt ve üst bacak arasındaki açıya bağlı olarak dize yerleştirilen iki karbon çelik esnek yaylara uygulanan dönme hareket sağlayıcısından oluşmaktadır. Simülasyon sonuçları sunulmasına rağmen bu robota ait deneysel sonuçlar yayınlanmamıştır [31].



**Şekil 1.23:** OLIE robot tasarımı [38]

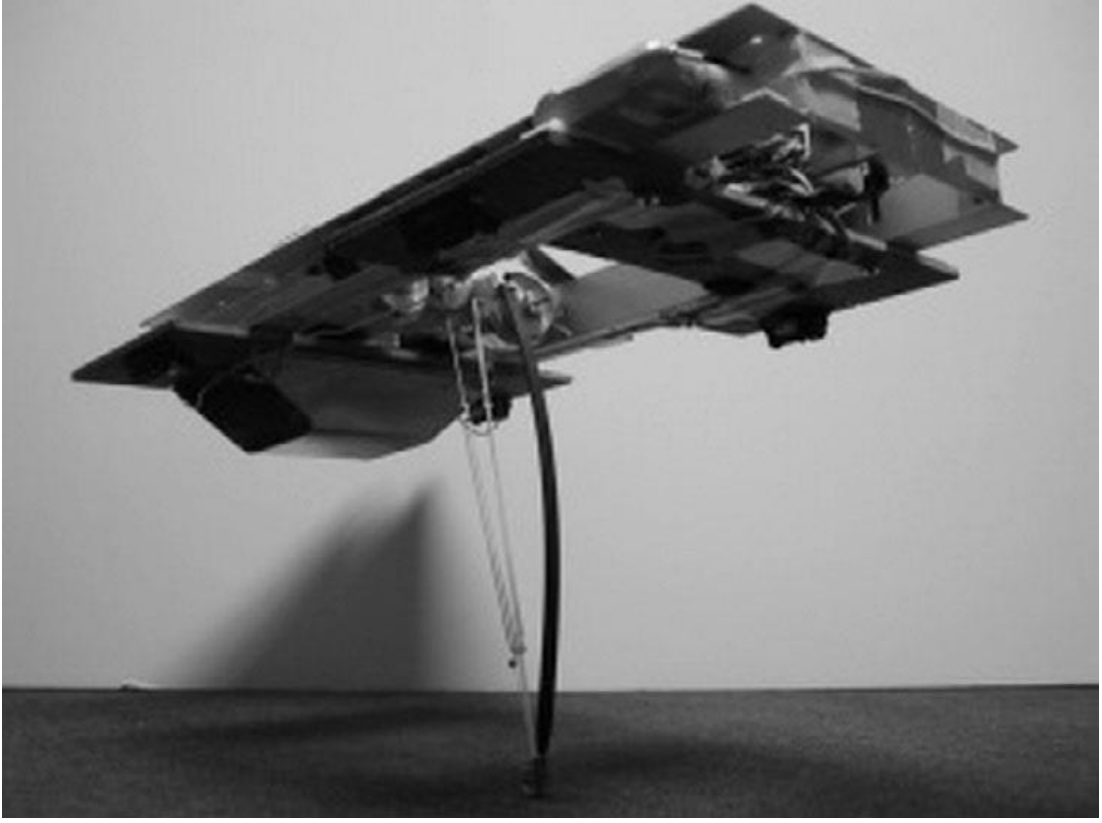
Uniro'nun başarılı bir şekilde uygulanmasından sonra Zeglin Şekil 1.24'deki düzlemsel zıplayan robotu geliştirmiştir. Toplam ağırlığı 2,5 kg olan bu robot yay prensibine sahip olarak geliştirilen ilk robottur. Kullanılan çubuk ile küre yüzeyinde 3 serbestlik derecesine kısıtlanmış hareketi yapabilecek kapasiteye sahiptir. Yüzey ile destek mili arasında bağlanan yay sayesinde yer çekimi kuvvetinin %35'i kadar az bir kuvvet altında çalıştırılarak deneyleri yapılmıştır. Bu azaltılmış kuvvet ile 50 cm yüksekliğe, 1m/s hız ile zıplayabilmektedir. Robot 2 adet servo motor kullanmaktadır. Kullanılan bu servo motorlardan bir tanesi bacağı sıkıştırarak itme kuvvetinin uygulanmasını sağlamaktadır. Diğer servo motor ise bacağın konumu belirlemek için kullanılmıştır. Robotun çalışması için gereken güç, robot üzerine yerleştirilen Ni-Cd bataryalar ile sağlanmaktadır. Bu bataryalar robota yaklaşık olarak 30 dk'lık bir çalışma süresi sunmaktadır [32].



**Şekil 1.24:** Zeglin'in yaylı ayak tasarımı [38]

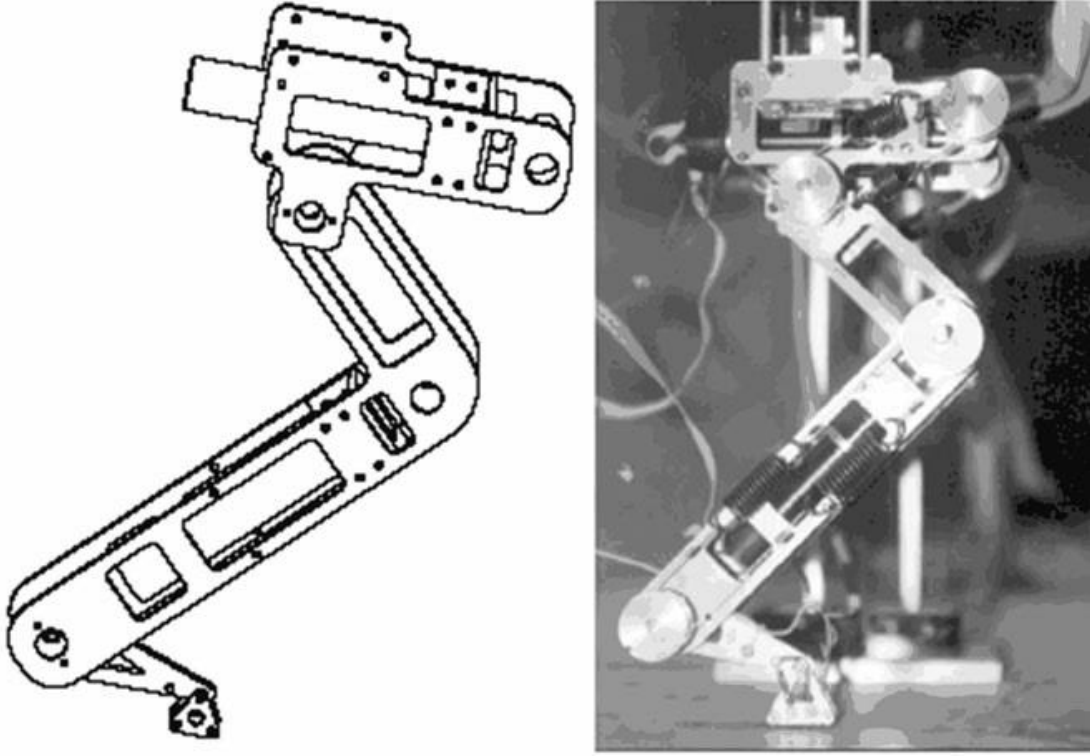
Yüzeysel prototipin performansı Zeglin ve eş araştırmacıları, yaylı ayak temelli sistemleri kendi üzerinde olan bir zıplayan robotu yapmaya yöneltmiştir. Yapılan bu ilk düzlemsel prototip sınırlı bir zıplama kapasitesine sahipti. Temel bir sorun ise üretilen düzlemsel prototipin 3 boyutlu durumda dengede olmamasıdır. Robottaki asıl amaçları ise uzaktan kumandalı bir makine oluşturmak için bir bacak ve gövde tasarımı geliştirmektir. Bu amaçla Şekil 1.25'deki 3 boyutlu yapıyı oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu 3 boyutlu prototip hava sürtünmesi ile sönümlendiğinde, düzlemsel makinenin kısıtlayıcı milinin oluşturduğu bozucu etki oluşmaktadır. 2 boyuttan 3 boyuta geometriyi taşınmasında gövde, kalça ve bacak yönlendiricisi tasarımı, yeniden geliştirilmiştir [33]. Kalça bağlantı noktasında yönlendirici olarak kullanıldığında, bacağın konumlandırılması zor bir sorun oluşturmuştur.





**Şekil 1.25:** 3 Eksenli yaylı bacak tasarımı [38]

Sinir ağı tabanlı denetleyicileri birleştiren tek bacaklı mekanik sistemlerin, 2 boyutlu 2 serbestlik dereceli, elektriksel hareket sağlayıcısına sahip, zıplayan bir robotun Şekil 1.26’da gösterildiği gibi dizayn ve tasarımını keşfetmiştir. Böylece robotun dikey ve yatay hareketleri ayrılmıştır. Diğer bir özellik olarak, alüminyum bacak bağlantıları, bacağa bağlanmış hareket sağlayıcılar (20 watt doğru akım motoru, konik dişli, çelik kablolar ve yaylar), kalça hareket mekanizması, kontrolcü ve sinyal işleme parçaları bacağa eklenmiştir. Mil ile kısıtlanmış gerçek zamanlı bir işletim sistemi olan bilgisayarda uygulanan bir kontrolcü ile donatılmış bu zıplayan robot üzerinde deney gerçekleştirmiştir.



**Şekil 1.26:** Berkemeier ve Desai'nin tasarımı [38]

Böylelikle tek bacaklı zıplayan robot tasarımları zaman içerisinde, basit bir prizmatik çubuktan normal bir insan ayağı görünümüne gelmiştir. Zamanla elde edilen bu değişim süresince tek ayaklı robotun temel matematiksel işlemleri de gelişme göstermiştir. İki ayaklı yürüyen bir insansı robot yapılabilmesi için bacak hareketlerinin yürüyüş problemleri tek ayaklı robotların gelişimiyle belli ölçüde çözüme kavuşmuştur. Yalnız sadece matematiksel denklemler ve tasarım yeterli olmamakla beraber sistemlerin çalıştırılabilmesi için kontrol sistemine de ihtiyaçları vardır [38].

## 2. MEKANİK YAPI

### 2.1 Düzlemsel Tek Bacaklı Robot Mekanizması

1980'lerin başında Marc Raibert bacaklı robot laboratuvarında bir dizi çok başarılı zıplayan robot çalışması yapmıştır. Bunlar insanların robotlardan ileri seviyede marifetli ve dinamik hareketler yapma konusundaki beklentilerini şekillendirmiştir. Bu robotların ilki, düzlemsel tek bacaklı zıplayan, dinamik dengenin özünü yakalayan ama çoklu bacak koordinasyonunun veya kompleks bacak kinematiklerinin karmaşıklığından kaçınan basit bir bacaklı sistemdir.

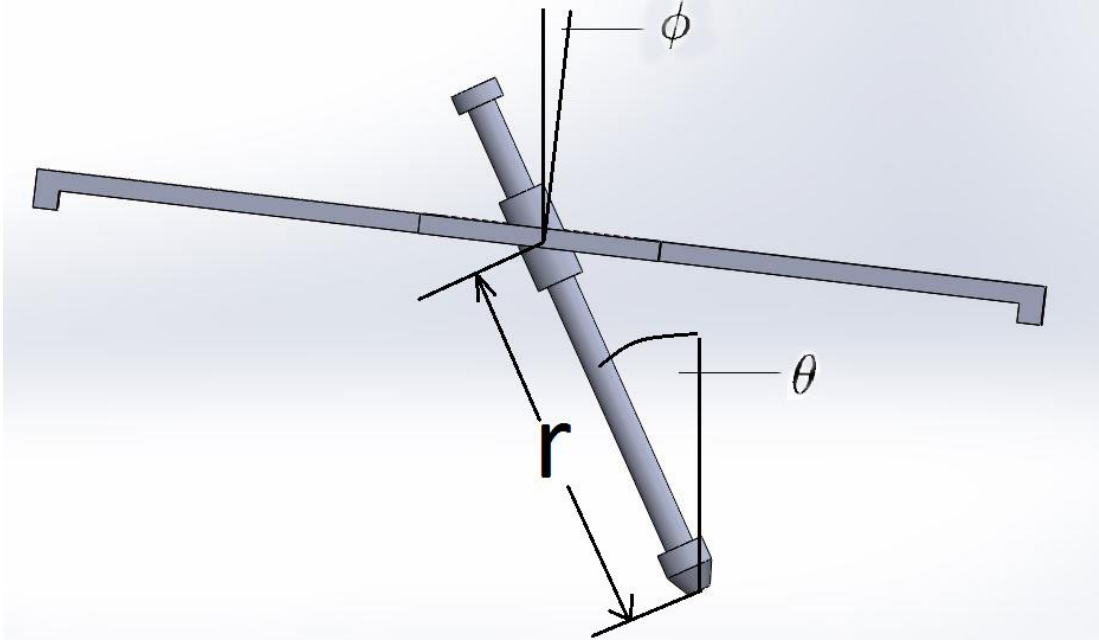
Robotun özel bir şekilde tasarlanmış dinamiklerinden dolayı Raibert'in ekibi sadece ön mühendislik sezgilerini kullanarak stabil zıplama için şaşırtıcı derecede basit bir kontrolcü tasarlayabilmişlerdir. Bundan 20 yıl sonra bile bu kontrolcü robotik koşma için en önde gelen kontrolcülerden birisidir. Bu kontrolcünün, beklenmedik bir şekilde çok az bir kısmı analitik olarak anlaşılabilmiştir. Tek gerçek analiz yükseklik kontrolcüsünün basitleştirilmiş bir fiziksel modeline Lyapunov fonksiyonu uygulayarak iç yüzünün anlaşılmasını sağlayan [34] tarafından yapılmıştır.

Raibert'in orijinal kontrolcüsü kalıcı durum zıplaması için iyi çalışmasına karşın, büyük etkili bozunumlardan sonra kendini toparlayamamaktadır. Raibert'in orijinal kontrolcüsünün optimal kontrol problemine yaklaşık bir çözüm olarak sunulacaktır. Raibert'in tasarımına dengeleme sistemi açısından farklı bir açıdan yaklaşım yapılmıştır. Daha önce tek bacaklı robotlarda dengeleme sistemi için kullanılmamış olan sıfır moment noktası yöntemi, tasarımı yapılan mekanizma üzerinden denklemleri çıkarılmıştır. Böylelikle sıfır moment noktasının hesabı yapılarak sistemin tek bacak üzerinde dengelenmesi sağlanmıştır.

### 2.2 Düzlemsel Tek Bacaklı Zıplayan Robot

Tasarımı yapılan tek bacaklı zıplayan robotun Şekil 2.1'de tanımlandığı üzere, toplam 10 durum değişkeni  $x = [q, \dot{q}]^T$  burada  $q = [x_{ft}; y_{ft}; \theta; \varphi; r]$  ve kalçadaki tork ile bacaktaki pnömatik yaydan gelen doğrusal kuvvet olmak üzere 2 kontrol

değişkeni  $u = [T_{kalça}, F_{bacak}]^T$  vardır. Hareket denklemleri şu sabitleri kullanmaktadır:  $m$  gövdenin kütlesi ve  $J$  ise kütle için yer temas noktasına göre eylemsizlik momentidir,  $m_l$  ve  $J_l$  bacağın kütlesi ve eylemsizlik momentidir,  $l_1$  ayaktan bacağın kütle merkezine olan uzaklıktır,  $l_2$  ise kalçadan gövdenin kütle merkezine olan mesafedir ve  $R = r - l_1$ 'dir.



Şekil 2.1: Düzlemsel tek ayaklı robot

Raibert'den düzeltmeler ile birlikte alınan zıplayan robotun hareket denklemleri şunlardır [35]:

$$(J_l - m_l R l_1) \ddot{\theta} \cos \theta - m_l R \ddot{x}_{ft} = \cos \theta (l_1 F_y \sin \theta - l_1 F_x \cos \theta - T_{kalça}) - R (F_x - F_{bacak} \sin \theta - m_l l_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta) \quad (2.1)$$

$$(J_l - m_l R l_1) \ddot{\theta} \sin \theta + m_l R \ddot{y}_{ft} = \sin \theta (l_1 F_y \sin \theta - l_1 F_x \cos \theta - T_{kalça}) + R (m_l l_1 \dot{\theta}^2 \cos \theta + F_y - F_{bacak} \cos \theta - m_l g) \quad (2.2)$$

$$(J_l + m R r) \ddot{\theta} \cos \theta + m R \ddot{x}_{ft} + m R \ddot{r} \sin \theta + m R l_2 \dot{\phi} \cos \phi = \cos \theta (l_1 F_y \sin \theta - l_1 F_x \cos \theta - T_{kalça}) + R F_{bacak} \sin \theta + m R (r \dot{\theta}^2 \sin \theta + l_2 \dot{\phi}^2 \sin \phi - 2 \dot{r} \dot{\theta} \cos \theta) \quad (2.3)$$

$$(J_l + mRr)\ddot{\theta}\sin\theta - mR\ddot{y}_{ft} - mR\ddot{r}\cos\theta + mRl_2\dot{\varphi}\sin\varphi = \sin\theta(l_1F_y\sin\theta - l_1F_x\cos\theta - T_{kal\ca}) - R(F_{bacak}\cos\theta - mg) - mR(2\dot{r}\dot{\theta}\sin\theta + r\dot{\theta}^2\cos\theta + l_2\dot{\varphi}^2\cos\varphi) \quad (2.4)$$

$$J_1l_2\ddot{\theta}\cos(\theta - \varphi) - JR\dot{\varphi} = l_2\cos(\theta - \varphi)(l_1F_y\sin\theta - l_1F_x\cos\theta - T_{kal\ca}) - R(l_2F_{bacak}\sin(\varphi - \theta) + T_{kal\ca}) \quad (2.5)$$

Yer parçalı doğrusal yay sönümleme sistemi olarak modellenmiştir. Yapılan tasarımda çıkarılan bu denklemler aynen geçerlidir. Tepki kuvvetleri denklemleri şu şekildedir:

$$F_x = \begin{cases} k_g(x_{ft} - x_{td}) - b_g \dot{x}_{ft} & y_{ft} < 0 \text{ için,} \\ 0 & \text{diğer durumlar için,} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$F_y = \begin{cases} k_g y_{ft} - b_g \dot{y}_{ft} & y_{ft} < 0 \text{ için,} \\ 0 & \text{diğer durumlar için,} \end{cases} \quad (2.7)$$

### 2.3 Raibert'in Üç kısımlı Kontrolcüsü

Bu çalışmada Raibert'in çalışması temel alınmıştır. Sistemin denklemlerinin çıkarılması için en basit model örnek alınmıştır. Raibert'in orijinal kontrolcüsü ileri hızı gövdenin yerden yüksekliğini ve zıplama yüksekliğini ayrı ayrı kontrol ederek problemi 3 kısma ayırmıştır. Bu işlem, bu değişkenlerden her birinin zıplama döngüsünün değişik fazları sırasınca yaklaşık olarak birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol edilebileceği gözlemine dayandırılmıştır. Bu fazların en önemlileri uçma, sıkıştırma ve itme fazlarıdır. Robot kalça çevresinde gövdenin eylemsizlik momenti, bacağın eylemsizlik momentinden çok daha büyük olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durum, uçuş fazı sırasında kalça torkunun bacağı, gövdenin yerden yüksekliğini değiştirmeden hareket ettirdiğini varsayılmasına izin vermiştir. Daha sonra ileri hız ayak yerleştirme ile kontrol edilmiştir: kalıcı durum zıplaması için ayağın yerde konumlandırılacağı pozisyonu kestirmek için simetri argümanı kullanılarak, bacağı doğru açığa hareket ettirmek için basit bir servo kontrolcüsü de kullanılmıştır.

Bacak yerdeyken kalçada oluşan dönme torkunun gövdenin dönmesine neden olduğu ama yer tepki kuvvetlerinin bacak açısını sabit tuttuğu varsayılmıştır. Yine

gövde açısını yaklaşık olarak istenen pozisyonda tutmak için basit bir servo kontrolcüsü kullanılmıştır. Son olarak zıplama yüksekliği itirme fazında sabit miktarda bir enerji enjekte edilerek kontrol edilmiştir. Enjekte edilen enerji miktarı sonuçta oluşan zıplama yüksekliği ile tek düze olarak ilişkilidir.

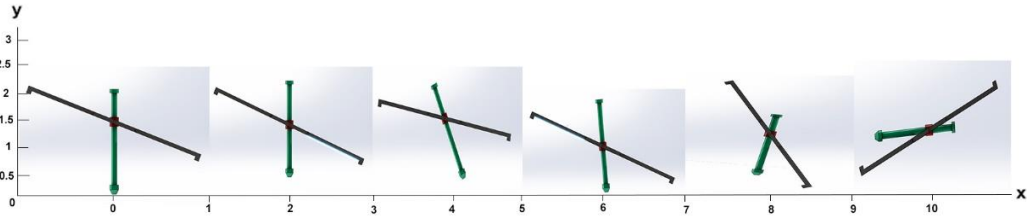
Gerçek robotta bu kontrolcü basit bir durum makinesi kullanılarak açılıp kapatılmıştır. [36]'da anlatıldığı üzere Raibert'in durum makinesi kontrolcüsünü otonom bir geri besleme prensibi  $u = \text{raibert}(x)$  kullanarak yakınsamak mümkündür. Robot ayak yerden yukarıdayken uçuş fazında ( $y_{ft} > 0$ ) ayak yerde ve bacak sıkışırken sıkıştırma fazında ( $y_{ft} = 0$  ve  $\dot{r} < 0$ ) ve ya herhangi bir başka zamanda bacak sıkışık durumda olduğunda itirme fazında ( $r < r_{s0}$  burada  $r_{s0}$  bacakta yayın boştaki uzunluğudur) herhangi bir bacak sıkıştırılmışken itirme fazında olacak şekilde nitelendirilir. Bu durum kontrol yasasını aşağıda verilen otonom denklemler ile yazmamızı sağlar.

$$T_{kalça}(\mathbf{X}) = \begin{cases} k_{fp} \left( \theta + \sin - 1 \left( \frac{\dot{x} T_s}{2r} + \frac{T_x(\dot{x} - \dot{x}_d)}{r} \right) \right) + b_{fp} \dot{\theta} & \text{Uçuş fazı} \\ k_{att} \left( \frac{\theta}{2} - \varphi \right) - b_{att} \dot{\varphi} & \text{Sıkıştırma ve Itme Fazı} \\ 0 & \text{Diğer Durumlar} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$F_{bacak}(\mathbf{X}) = \begin{cases} V_{çekme} & \text{Uçuş fazı} \\ V_{itme} & \text{Itme fazı} \\ 0 & \text{Diğer Durumlar} \end{cases} \quad (2.9)$$

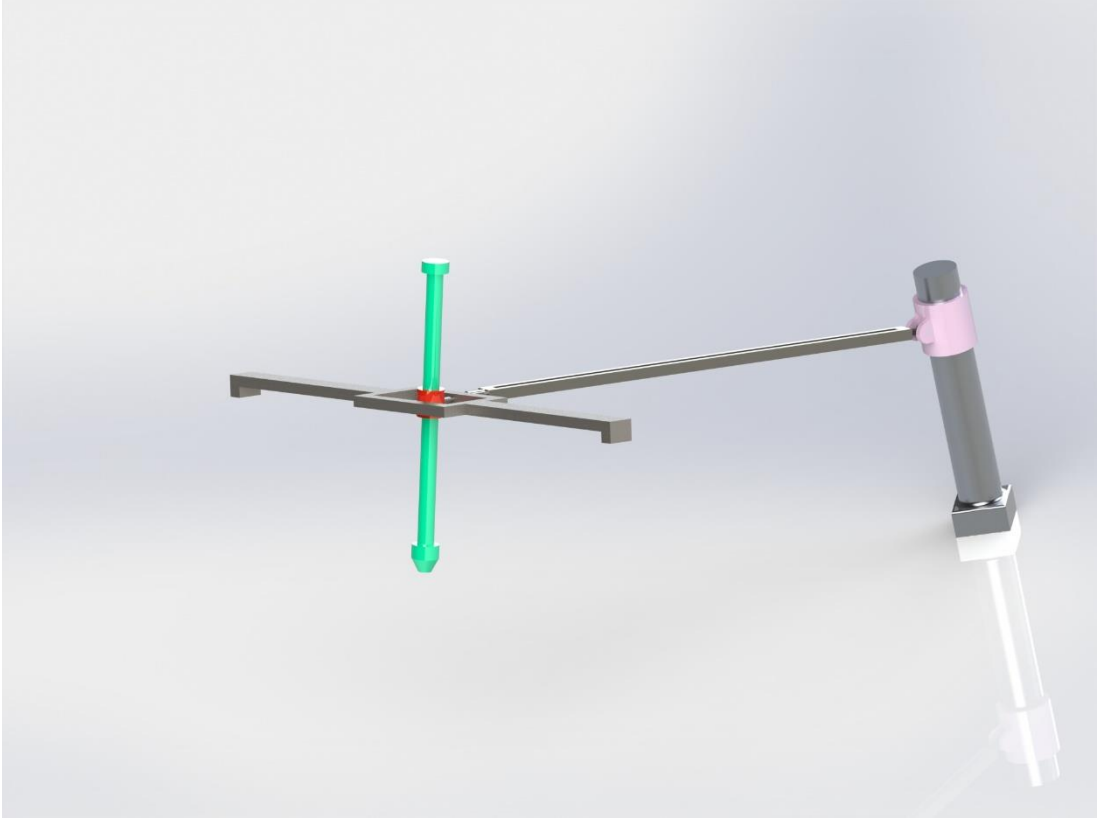
Burada  $\dot{x}$  vücudun kütle merkezinin ileri hızı ve  $\dot{x}_d$  istenen ileri hızdır.  $k_{fp}$ ,  $b_{fp}$ , ve  $k_x$  ayak yerleştirme kontrolcüsünün kazançlarıdır.  $T_s$  ise son duruş fazının süresidir. Son olarak,  $V_{itme}$  zıplama yüksekliği ile tek düze olarak ilişkili bir sabittir.

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi robot başlangıç koşulu olarak  $f_i \gg 0$  olduğu durumda orijinal kontrol denklemleri robotun düşmesini engelleyememektedir. Gövdenin büyük eylemsizlik kuvveti kalıcı durum yörüngesinin uçuş fazı sırasında sallanan bacağa etkisini asgari seviyeye indirmesini sağlar ama sonuç olarak kalça çevresindeki bozunumlarla başa çıkma problemini karmaşıktırır. Orijinal kontrol denklemleri basit doğrusal geri besleme ile zenginleştirilmiş. Kalıcı durum zıplama koşullarının analizine dayandırılmıştır ve denklemler bu tarz bozulmalardan dolayı bozulmalar karşısında robotun düşmesini engelleyememektedir. [37]’de daha kapsamlı bir kalça yer değiştirilmesi kullanımının gürbüzlüğü arttırdığı rapor edilmiştir, bu da doğrusal olmayan bir kontrolcünün durumu iyileştirebileceğini göstermektedir.



**Şekil 2.2:** Robotun hareketinin zamansal gösterimi

Şekil 2.3’de gösterildiği gibi tasarımı yapılan robot 2 boyutta hareket kabiliyetine sahip olup, bunlardan sadece x düzleminde hareketinin kontrolü yapılmaktadır. Y düzleminde aşağı ve yukarı hareket yapmaktadır. Bu hareket sabit bir kol vasıtasıyla dengelenmektedir.



**Şekil 2.3:** Tek bacaklı robotun tasarımı



### 3. SIFIR MOMENT NOKTASI

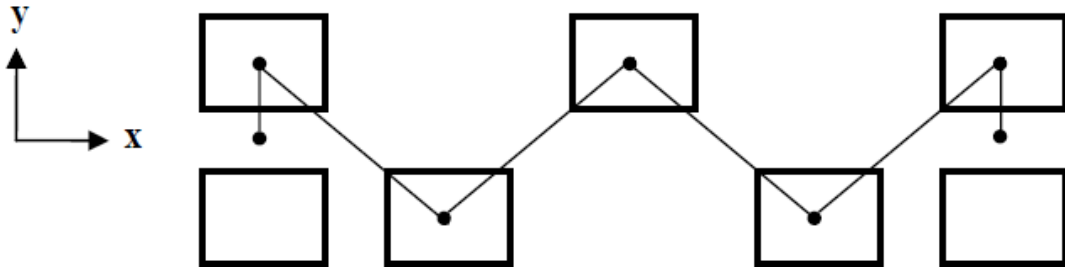
Yürüme eylemi sırasında sisteme etki eden kuvvetler yerçekimi ve atalet momentlerinin meydana getirdiği kuvvetler ile yerden gelen tepki kuvvetlerinden oluşur. Sisteme etki eden kuvvetler ile tepki eden kuvvetlerin momentlerinin sıfır olduğu noktaya sıfır moment noktası (Zero Moment Point) denir. Sistemin dengeli bir şekilde yürüebilmesi için, sıfır moment noktasının ayak destek çokgeni içerisinde yer alması gerekir [2].

#### 3.1 Statik Yürüme

Sistemin ağırlık merkezinin sabit hızla hareket ederken veya ivmelenmesi göz ardı edilebilecek düzeyde olduğunda, sıfır moment noktasının konumunun ağırlık merkezinin konumuna bağlı olarak gerçekleştirdiği yürüme şekline statik yürüme denir [3].

#### 3.2 Ağırlık Merkezi Yörüngesi

Sıfır moment noktası referansı, statik yürüme sırasında aşağı yukarı ağırlık merkezinin yer düzlemi üzerindeki yansımalarının takip ettiği yörüngededir. Bu sebeple ağırlık merkezine verilen yörünge sıfır moment noktasının takip etmesini istediğimiz referanstaki yörüngesi olmuş olacaktır. Sıfır moment noktası referansı Şekil 3.1'deki gibi verilmiştir.

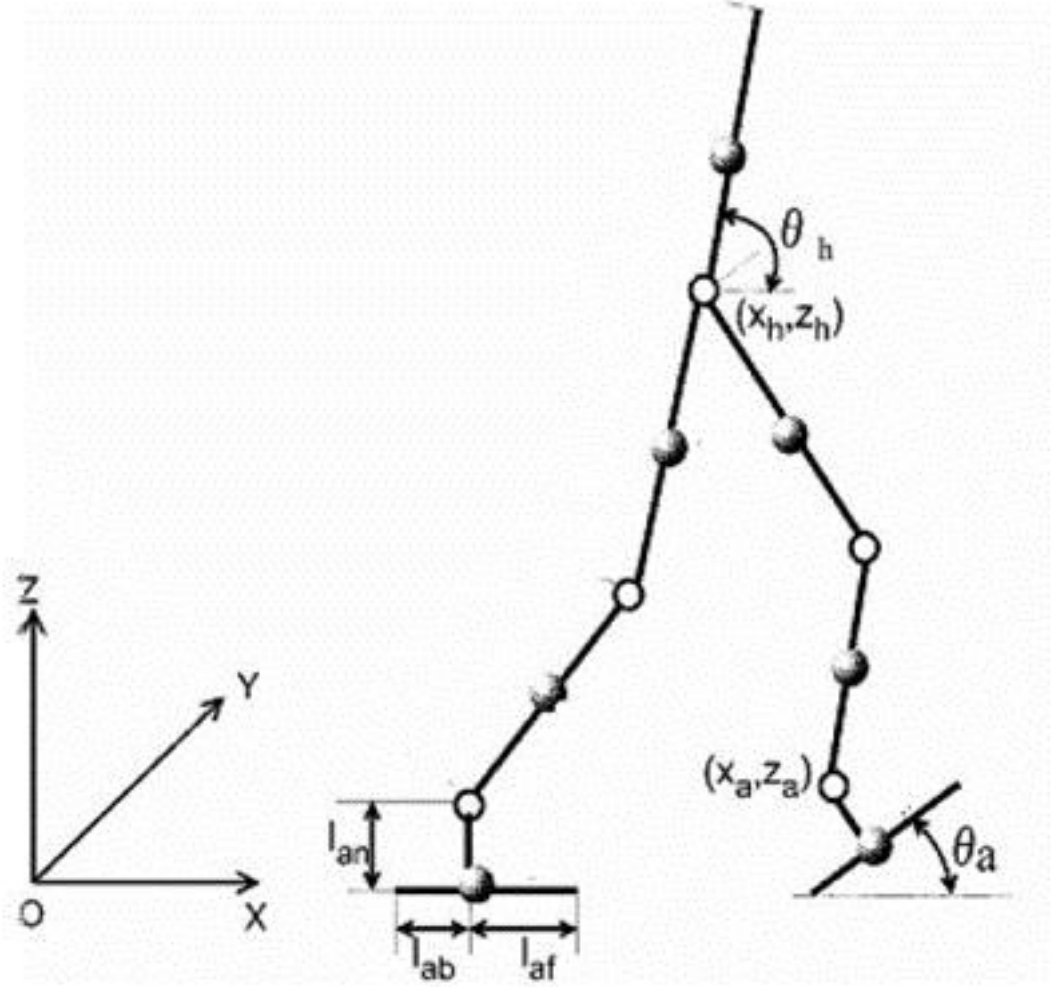


Şekil 3.1: Sıfır moment noktası referansı [3]

Şekil 3.1’de sıfır moment noktası referansı ağırlığı bir ayaktan ötekine transfer etmektedir. Gerçekleşen bu işlem yeterince yavaş olduğunda ağırlık merkezindeki ivmelenmeler küçük olacaktır ve sıfır moment noktası ise destek çokgeni içinde kalacaktır. Ağırlığın bir ayaktan diğerine transferi sırasında sistem ÇDF (çift destek fazı) durumundadır. Sistemin ağırlığının ayağın orta noktasına transferini takiben, diğer ayak ileri doğru konumlandırılır ve bu işlem ayaklar arasında sırasıyla devam eder. Böylelikle sistem yürüme hareketini gerçekleştirmiş olur. Sistem bu şekilde kararlı bir yürüme gerçekleştirmesine karşın yüksek hızlara çıkabilmek için dinamik yürümeye ihtiyaç duymaktadır [3].

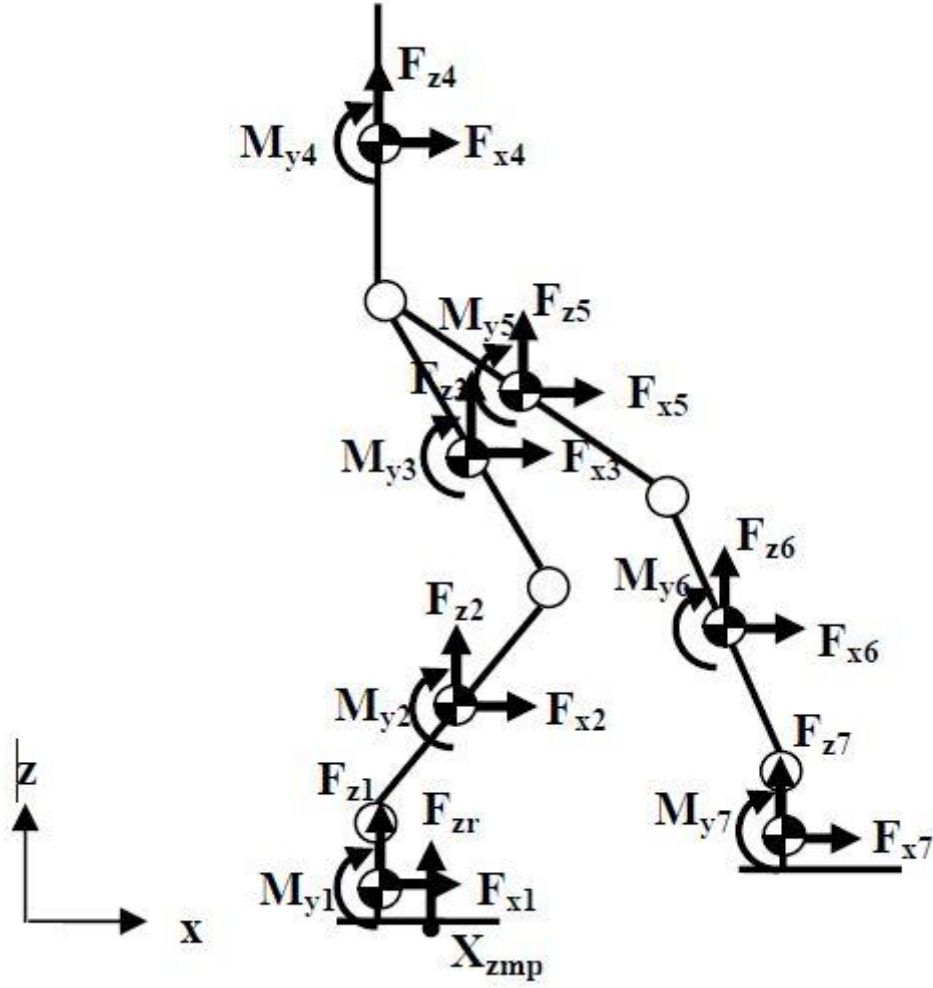
### **3.3 Dinamik Yürüme**

Statik yürüme, sistemin doğal haliyle dengede olduğu bir yürüme şeklidir. Bunu aksine dinamik yürümenin gerçekleşmesi için, sistemin bir kontrolcü tarafından dinamik etkiler oluşturularak dengelenmesi gerekmektedir. Sistemin kontrolü zorlaşsa da dinamik yürüme yüksek hızlara ulaşabilmek için gereklidir. Ağırlık yürüme sırasında bir ayaktan diğer ayağa transfer olurken TDK (tek destek fazı) durumundadır [2].



**Şekil 3.2:** İki ayaklı model [3]

Sıfır moment noktasının yer düzlemindeki konumu ise Şekil 3.3’de gösterildiği gibidir. Şekilde  $x$  düzlemi yatay eksen  $z$  düzlemi dikey eksen olup  $y$  düzlemi ise ilk iki eksene dik olan ve bu eksenlerin oluşturdukları düzlemden dışarı yöndedir.



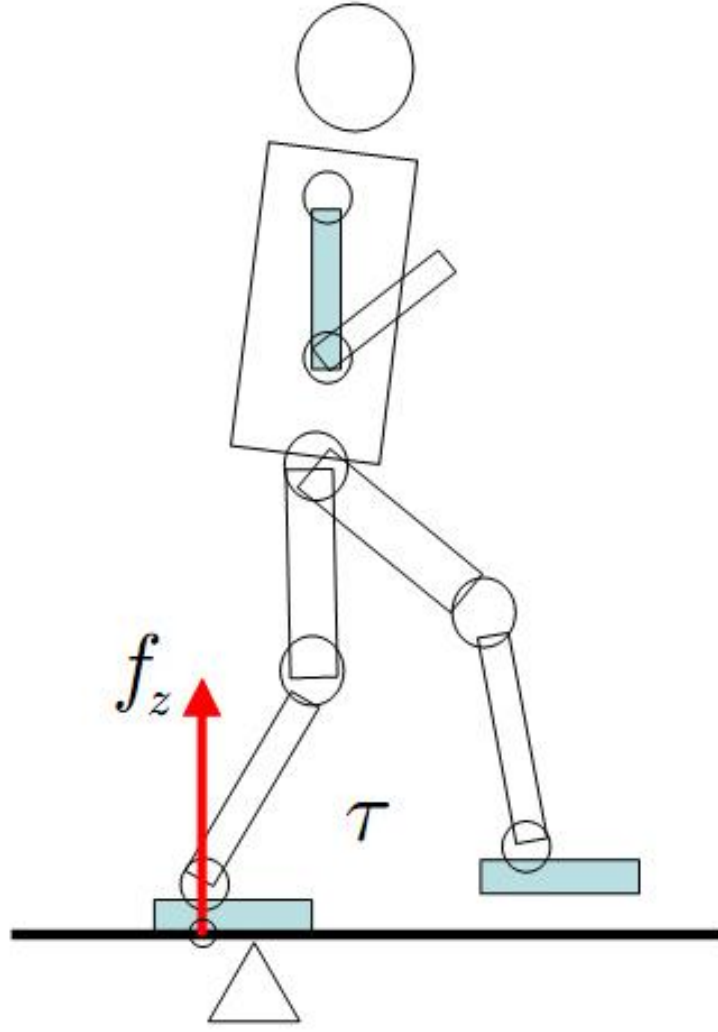
Şekil 3.3: Yer düzlemi gösterimi [2]

Şekilde verilen sistem için genel mekanizma denklemleri ise şu şekildedir.

$$X_{zmp} = \frac{\sum (F_{ix} Z_i - F_{iz} X_i) + \sum M_{iy}}{\sum (F_{iz})} \quad (3.1)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum (F_{iy} Z_i - F_{iz} X_i) + \sum M_{ix}}{\sum (F_{iz})} \quad (3.2)$$

Burada 2 boyuttaki sistem için sıfır moment noktasının hesaplaması yapılmıştır. Sıfır moment noktası hesaplanması sistemin ters kinematiğinin hesaplanması ile bulunabilir.

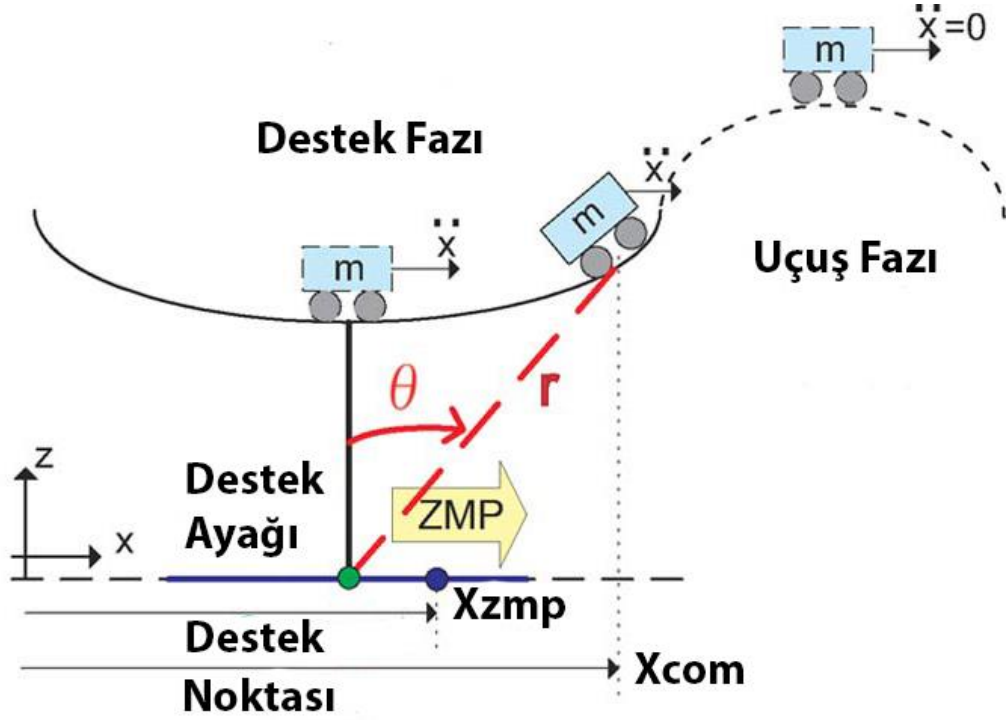


**Şekil 3.4:** Ters kinematik gösterimi

$$\begin{bmatrix} f_z \\ T \end{bmatrix} = TersDinamik(\dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}) \quad (3.3)$$

$$p = -\frac{T}{f_z} \quad (3.4)$$

Burada p sıfır moment noktası konumu gösterirken robotun konum hız ve ivmelerine göre ters kinematik çözümü yapılmıştır.



**Şekil 3.5:** Sıfır moment noktasının tek bacaklı robotta gösterilmesi [39]

Yapmış olduğumuz tasarımda, sistemin yapısı gereği motorlar sadece y ekseninde tork üretmektedir. Bu durum referans y eksenini açısal moment ifadesinin diğer düzlemlerden bağımsız olmasını sağlar. Bundan dolayı destek fazındaki hareketi rijit bir gövdenin sabit bir nokta etrafında dönmesi olarak ifade edebiliriz. Euler'in hareket denklemleri daha fazla öngörü sağlayabilir. Denklemler aşağıdaki gibidir.

$$I_{xx} \dot{\omega}_x - (I_{yy} - I_{zz}) \omega_y \omega_z = T_x \quad (3.5)$$

$$I_{yy} \dot{\omega}_y - (I_{zz} - I_{xx}) \omega_z \omega_x = T_y \quad (3.6)$$

$$I_{zz} \dot{\omega}_z - (I_{xx} - I_{yy}) \omega_x \omega_y = T_z \quad (3.7)$$

Bu denklemlerde;  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$  ve  $I_{zz}$  kütle merkezi civarındaki eylemsizlik matrisi köşegen elemanları;  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  ve  $\omega_z$  yuvarlanma, yunuslama ve yalpalama eksenleri üzerindeki açısal hızlar ve  $T_x$ ,  $T_y$  ve  $T_z$  eksenler üzerindeki torklardaki oran değişiklikleridir. x-z düzlemlerinde hareket kısıtlanmış olduğu için mekanik sistemimiz yuvarlanma ve yalpalama eksenleri üzerinde tork üretememektedir. Bu

sepebten  $T_x$ ,  $T_z$ ,  $\omega_x$  ve  $\omega_z$  sıfırlanır. Dahası mekanik sistem ne x-y ne de z-y düzleminde hareket edemediği için y eksenini için ZMP mevcut değildir.

Bu durumda yunuslama eksenindeki açısal momentin değişim oranı  $\dot{L}_y$  aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\omega_y = \dot{\omega}_y = 0 \quad (3.8)$$

$$\omega_y = \dot{\omega}_y = 0 \quad (3.9)$$

$$\omega_y = \dot{L}_y = I_{yy} \dot{\omega}_y = I_{yy} \ddot{\theta} \quad (3.10)$$

$\theta$  açısı ve yunuslama eksenini diagonal eylemsizlik elemanı  $I_{yy}$  terimleri cinsinden ifade edilmiş olduğundan dolayı açısal momentumu dinamik ZMP denkleminin içine katılmasını sağlar. Şekil 3.5’de gösterildiği gibi m kütlesi tek bacaklı robotun ağırlığı, g yer çekimi kuvveti olarak belirtirsek,  $L_y$  parametresi y eksenindeki dönme momentlerini temsil edmektedir [39].

$$\dot{L}_y = m x (\ddot{z} + g) - m X_{zmp} (\ddot{z} + g) - m x \ddot{z} \quad (3.11)$$

Burada x ve z ağırlık merkezinin konumlarını,  $\ddot{x}$  ve  $\ddot{z}$  ise ivmelenmeleri göstermektedir. Ağırlık merkezinin konumu ve ivmeler ise şu şekildedir.

$$\dot{L}_y = m x (\ddot{z} + g) - m X_{zmp} (\ddot{z} + g) - m x \ddot{z} \quad (3.11)$$

$$x = r \sin\theta \quad (3.12)$$

$$y = r \cos\theta \quad (3.13)$$

$$\ddot{x} = \ddot{r} \sin\theta + 2\dot{r}\dot{\theta} \cos\theta + r\ddot{\theta} \cos\theta - r\dot{\theta}^2 \sin\theta \quad (3.14)$$

$$\ddot{z} = \ddot{r} \cos\theta - 2\dot{r}\dot{\theta} \sin\theta - r\ddot{\theta} \sin\theta - r\dot{\theta}^2 \cos\theta \quad (3.15)$$

$$T_{zmp} = - (mr^2 + I_{yy}) \ddot{\theta} - 2mr\dot{r}\dot{\theta} + mgr \sin\theta \quad (3.16)$$

$$T_{zmp} = m X_{zmp} (\ddot{z} + g) \quad (3.17)$$

$$\dot{\theta}_{[k]} = \frac{\theta_{[k+1]} - \theta_{[k-1]}}{2\Delta k} \quad (3.18)$$

$$\ddot{\theta}_{[k]} = \frac{\theta_{[k+1]} - 2\theta_{[k]} + \theta_{[k-1]}}{\Delta t^2} \quad (3.19)$$

Üstteki denklemler ayrık alanda Euler türev tekniğini göstermektedir. Eğer denklemler birleştirilirse ve birleşim sonucunda  $\sin\theta \approx \theta$  olduğunu göz önüne alırsak aşağıdaki gibi tridiagonal denklemlerin genel formunu elde ederiz.

$$\ddot{\theta}_{[k]} = \frac{\theta_{[k+1]} - 2\theta_{[k]} + \theta_{[k-1]}}{\Delta t^2} \quad (3.19)$$

$$D_{[k]} = A_{[k]} \theta_{[k]} + B_{[k]} \dot{\theta}_{[k]} + C_{[k]} \ddot{\theta}_{[k]} \quad (3.20)$$

$$D_{[k]} = T_{zmp_{[k]}} = m(\ddot{z}_{[k]} + g) \quad (3.21)$$

$$\sigma_{[k]} = -\frac{mr^2_{[k]} + I_{yy_{[k]}}}{\Delta t^2} \quad (3.22)$$

$$A_{[k]} = \sigma_{[k]} + \frac{mr_{[k]}\dot{r}}{\Delta t} \quad (3.23)$$

$$B_{[k]} = -2\sigma_{[k]} + mgr_{[k]} \quad (3.24)$$

$$C_{[k]} = \sigma_{[k]} - \frac{mr_{[k]}\dot{r}}{\Delta t} \quad (3.25)$$

Denklemleri aşağıdaki gibi etkili bir şekilde çözülebilir.

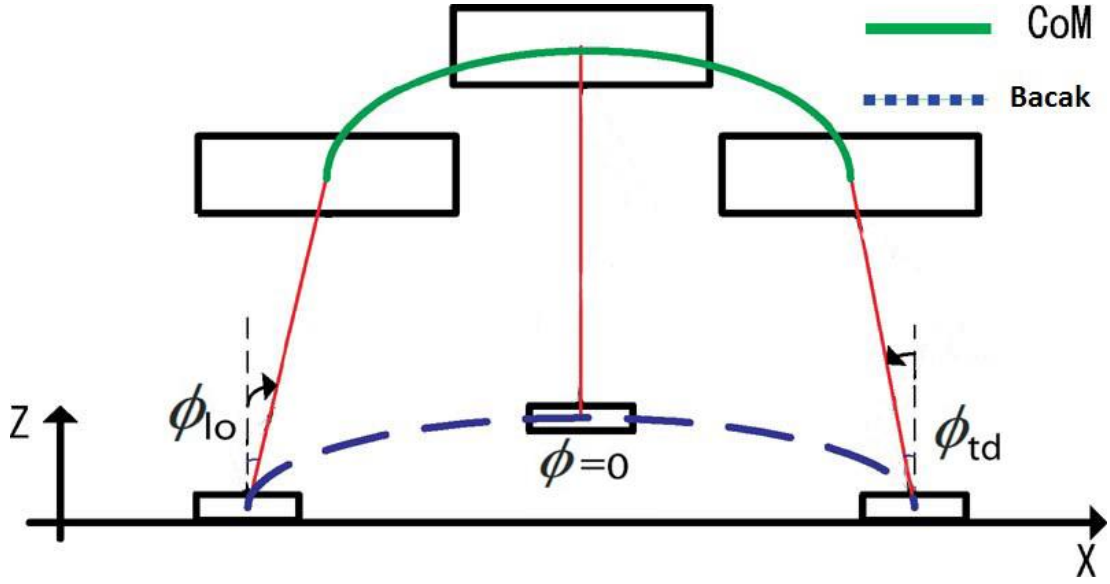
$$\begin{bmatrix} D_{[0]} \\ D_{[1]} \\ \vdots \\ D_{[p-1]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{[0]} & C_{[0]} & 0 & \cdots & 0 \\ A_{[1]} & B_{[1]} & C_{[1]} & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & A_{[p-2]} & B_{[p-2]} & C_{[p-2]} \\ 0 & \cdots & 0 & A_{[p-1]} & B_{[p-1]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{[0]} \\ \theta_{[1]} \\ \vdots \\ \theta_{[p-1]} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Denklemlerde  $p = (T_s / \Delta t)$   $\theta_{[p]}$   $\theta_{[p-1]}$  olarak gerekli yuvarlamalar yapılarak hesaplanabilir. Burada  $T_s$  destek fazı zamanını sembolize etmektedir. Son olarak sınır koşulları  $\theta_{[0]}$  ve  $\theta_{[p-1]}$  aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\theta_{[0]} = \varphi_{td} \quad (3.27)$$

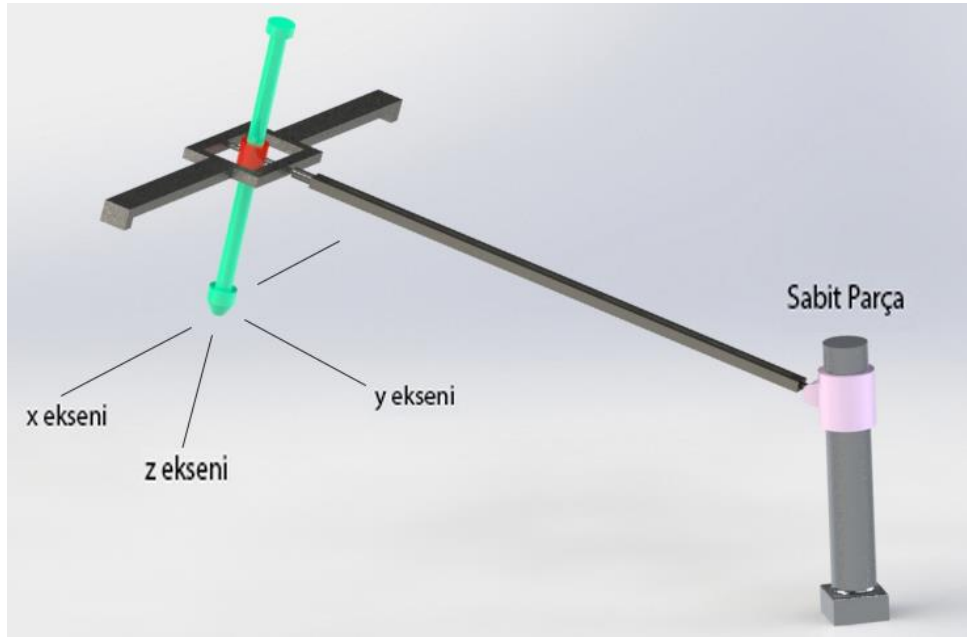
$$\theta_{[p-1]} = \varphi_{t0} \quad (3.28)$$





**Şekil 3.6:** Uçuş fazı gösterimi [39]

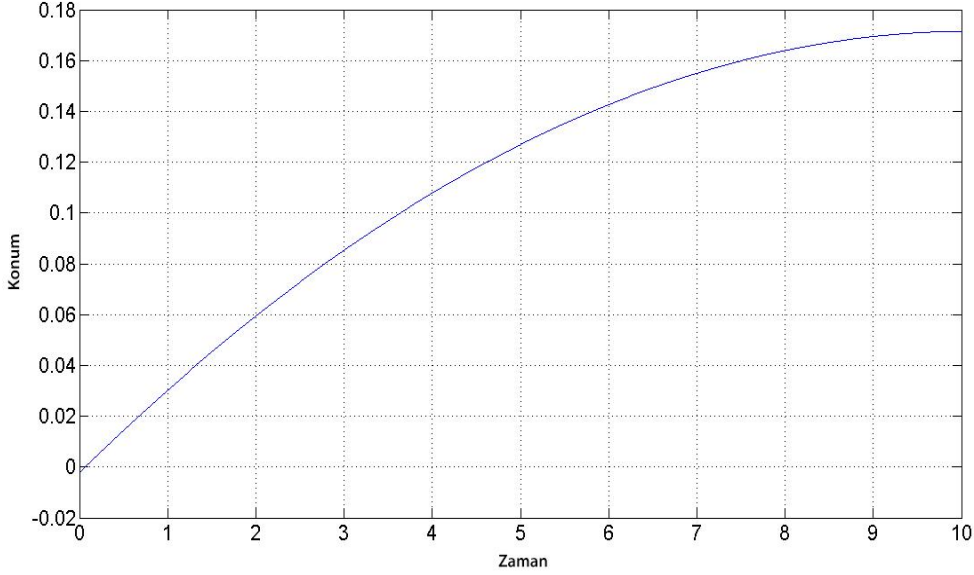
Bulanan sınır açıları, sistemin zıplayan bacağının sıfır moment noktası hesabına göre hangi konumda yere dokunması gerektiğini göstermektedir. Böylece zıplama işleminden sonra bacak hangi açıya konumlandırılırsa robot yere dokunduğunda düşmeden zıplamasına devam edebilir. Robotun zıplamanın dışında yapabileceği tek hareket zıplayan bacağın y düzleminde konumlandırılmasıdır. Şekil 3.6'da sistemin bir periyottaki hareketi ve bacak açıları gösterilmiştir.



**Şekil 3.7:** 3 eksenli görünüm

#### 4. TASARLANAN ROBOTUN TEMEL SİMULASYONU

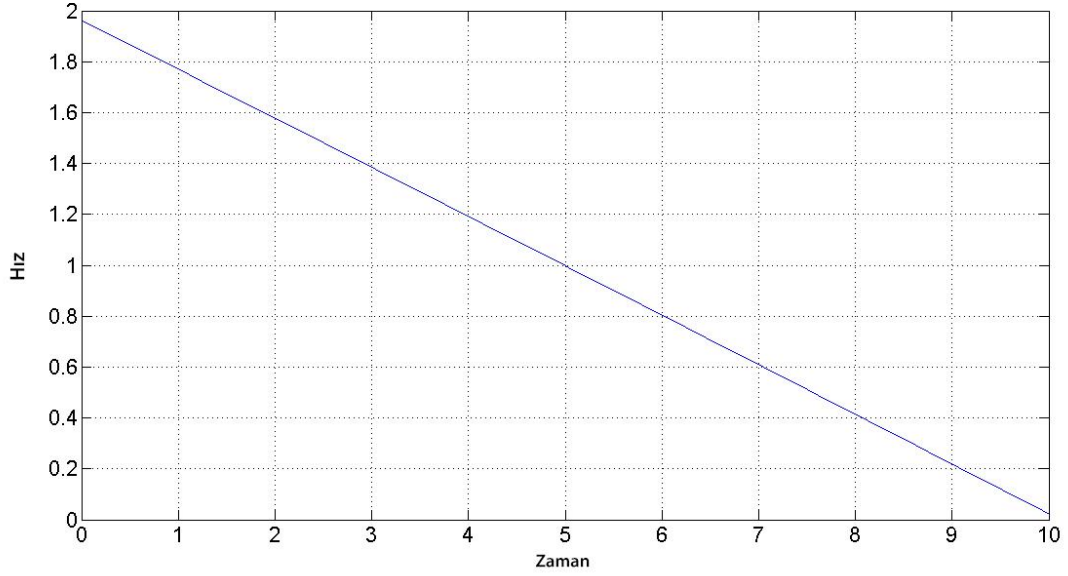
Bu bölümde daha önceki bölümlerde verilen denklemlerin bilgisayar ortamında analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Denklemlere ait deneysel sonuçlar olmadığı için bilgisayardaki simülasyon sonuçları üzerinden robota ait çıkarımlar yapılmıştır.



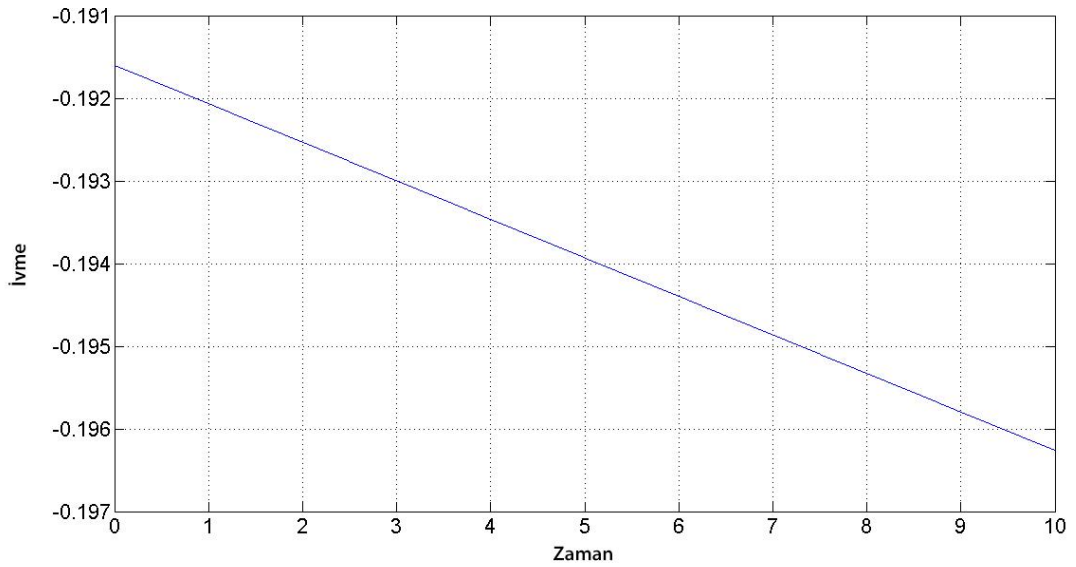
Şekil 4.1: Konum-zaman grafiği

Bilgisayar ortamında tasarımı yapılan sistem için kütsel özellikler ve boyutları tasarıma bağlı kalarak analizler yapılmıştır. Bu analizlerde temel olan denklemler 3.14-3.15 ve 3.1-3.2’de verilmiştir. Burada amaç denklemlerin sonuçlarını grafiksel olarak yorumlayabilmek ve sistemin davranışını görsel olarak analiz edebilmek içindir. Şekil 4.1’de robotun üst gövdesinin bacağa göre yaptığı göreceli açının değişiminin, analiz sırasında test için uygun olduğu düşünülmüştür. Burada robotun ayağının arkadan başlayarak zıpladığı ve öne doğru hareket ettiği senaryo düşünülmüştür. Bu hareket dikey eksene göre simetrik olduğundan basit olması açısından burada sadece robot ayağının dik eksenden öne doğru hareket esnasındaki konumu verilmiştir. Bu eğri oluşturulurken açının değişim noktaları tecrübeye dayalı olarak belirlenmiş ve 3. Dereceden bir polinom oluşturulmuştur. Bu sayede konumun zamanla değişiminin 1. ve 2. Türevlerinin alınmasında mümkün olması planlanmıştır. Bu eğri özel bir eğri olmayıp simülasyon amaçlı düşünülmüş bir eğridir. Pratik robot

uygulamasında diğerk şekilleri de incelenecektir. Bu eğriyle bağımlı olarak Şekil 4.2’de bacak-gövde açısah hızı, Şekil 4.3’de ise bacak-gövde açısah ivmesi verilmiştir. Bunlar konumun türevleri alınarak elde edilmiştir.



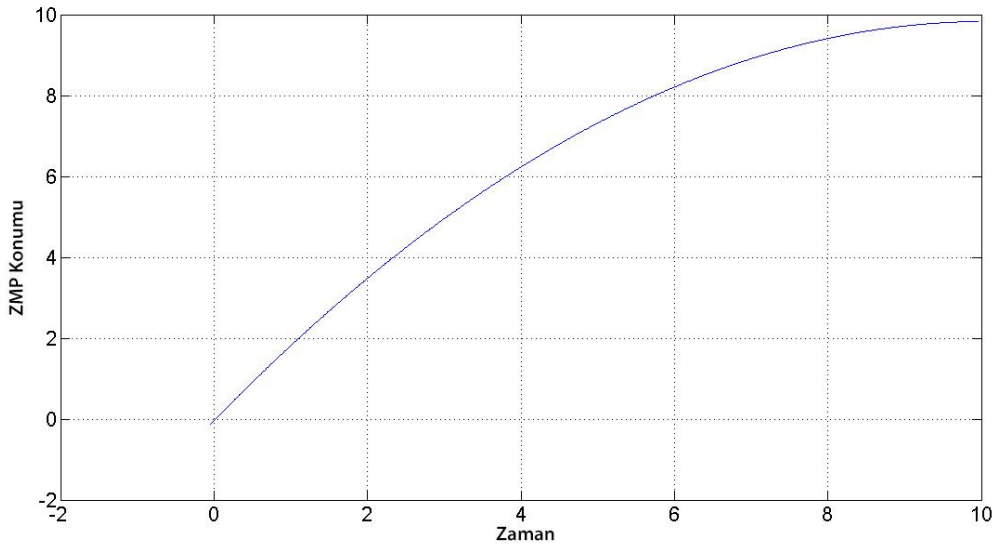
**Şekil 4.2:** Hız-zaman grafiğı



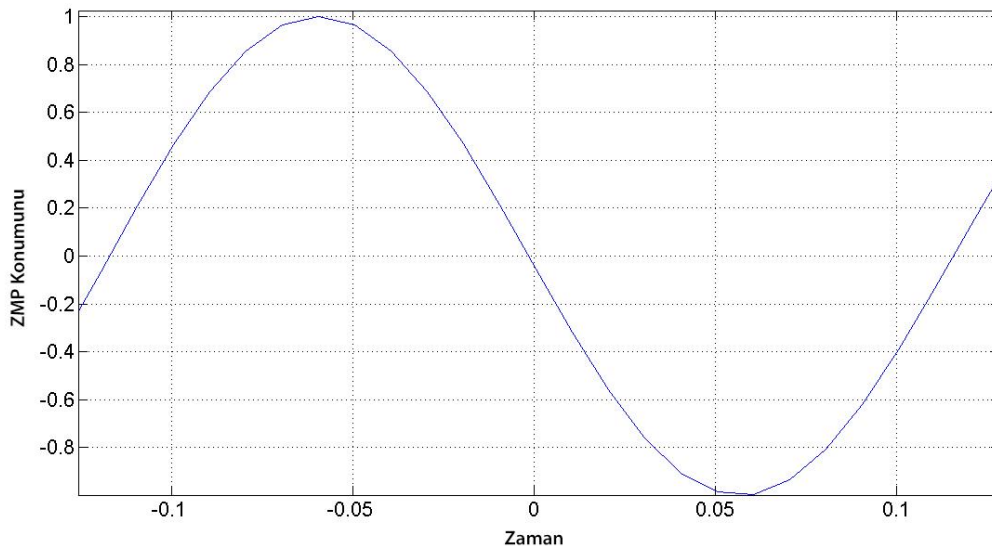
**Şekil 4.3:** İvme-zaman grafiğı

Bu bilgiler kullanılarak (konum, açısah hız, açısah ivme) 3.14 ve 3.15 numaralı denklemler ile robotun yüksekliğı tasarımda yapıldığı şekilde ve sıfır moment noktası (ZMP) ise 3.1 numaralı denklemdede verilmesi sonucunda Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’deki

grafikler elde edilmiştir. Şekil 4.4’de değişim yüksek mertebeden polinom olarak verilirken, Şekil 4.5’de temel periyodik sinyal olan sinüs sinyali seçilmiştir. İnsan yürümesinin de periyodik bir hareket olduğu düşünülürse Şekil 4.5’deki sinyalin önemi ortaya çıkar. Fakat periyodik yürümenin sonucunda kısa hareketler yapıyorsa, örneğin durduktan sonra sağa dönülmesi veya yarım adım atılması gibi durumlarda da Şekil 4.5’i takiben Şekil 4.4’deki gibi sıfır moment noktası (ZMP) yörüngesi çıkması beklenebilir.



**Şekil 4.4:** Sıfır moment noktasının zamanla değişimi



**Şekil 4.5:** Sıfır moment noktasının sinüs giriş cevabı

Bu çalışmada daha önceden de belirtildiği gibi literatürde verilen ve üzerinde çalışılan denklemlerin, prototip olarak kendimizin tasarladığı tek ayaklı robota uygulanması amaçlanmıştır. İki ayaklı yürüyen insansı bir robotun sıfır moment noktası denklemleri çıkarılarak yürütülmesi işlemi oldukça karmaşık bir işlemdir. Sistemin daha kolay çözümlenebilmesi için öncelikle tek ayaklı bir robot üzerinde sıfır moment noktası çözümlenmesi yapılmalıdır. Farklı hareket mekanizmaları ve eklem yapıları incelenerek yapılan tasarım için gerekli olan bilgiler ortaya konulmuştur. Yukarıda verilen denklemler diğer tüm tek ayaklı ve bizim robotumuz içinde ortaktır ve değişmezdir. Değişen şey ise robotun tasarımına bağımlı olarak kütleler, kütle uzunlukları, dönme merkezleri, atalet merkezleri, robotu süren motorun özellikleri ve kullanılan malzemedir.

Bu çalışmayı izleyecek araştırmalarımızda robotu sürmek için pnömatik sistemlerin geliştirilmesi düşünülmüştür. Bu sayede hızlı hareket edebilecek çok ayaklı robotik sistemlerin geliştirilebilmesi için bir kapı aralanmış olacaktır.

Ayrıca robotun çevresi ile etkileşimin sağlayacak algılayıcılar geliştirilmesi ve algılanan bu değerlerle robotun eklem yörüngelerinin gerçek zamanlı olarak değiştirilmesine imkân sağlanacak matematiksel yöntemlerin incelenerek gerçek zamanlı çalışabilecek mikro denetleyici ve bilgisayar sistemlerine adaptasyonu üzerine de çalışılması planlanmıştır. Böylelikle ileri safhalarda özgün robotik sistemlerin ülkemizde geliştirilmesi için önemli adımlar atılmış olacaktır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ayaklı robotların en temel problemleri dengeleme sistemleridir. Literatürde iki ayaklı yürüme sistematik olarak statik ve dinamik yürüme yöntemleri olarak denenmiştir. Statik yürüme robotun tasarımına bağlı olarak dengeleme için harici bir kontrolcüye ihtiyaç duymayabilirken, dinamik yürüme işlemi harici kontrolcü olmadan gerçekleştirilememektedir. Yürüyüş yöntemlerinin birbirlerine göre bir üstünlüğü olmamasına karşın, dinamik yürüme hareketi robotun konumdan ziyade hıza ihtiyacı olan durumlarda kullanıldığı görülmektedir. Hassas konumlandırma gerektiren durumlarda ise statik yürüme hareketi geçerlidir. Dinamik yürüme sırasında ağırlık merkezinin destek çokgeni içerisinde tutulabilmesi için yürüme yörüngelerinin hesaplanması gerekmektedir. Yörünge hesaplamaları ise sıfır moment noktasının yürüme esnasında çizeceği referans ile mümkündür.

Yapılan çalışma ile tek bacaklı bir zıplayan robotun dengeli bir zıplamayı gerçekleştirmesi için gerekli ağırlık merkezi konumunun hesaplanması ve zıplamayı gerçekleştiren bacağın gitmesi gereken konumun hesabı yapılmıştır.

Daha sonraki çalışmalarda bacak sayısı ve eklem sayısı arttırılıp, robotun 3 ekseninde de hareket etmesi hedeflenmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda 3 ekseninde dengeli zıplayabilen robotlar üretilmiş olup, farklı tasarımlara ve farklı hareket yapılarına sahip şekilde geliştirilmişlerdir. İlerleyen çalışmalarda robotun kendi dengeleme sistemine sahip bir şekilde özgün bir tasarım ile üretilmesi hedeflenmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Bicakcı, S., “İnsan Şeklinde Robotun Elektronik Devre Tasarımı, İmalatı ve İlgili Kontrol Yazılımının Yapılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, (2009).
- [2] Yapıcı, K. O., “14 Serbertlik Dereceli İki Ayaklı Bir Robotun Dinamik Yürüme Hareketinin Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sistem Dinamiği ve Kontrol Bilim Dalı, İstanbul, (2008).
- [3] Yazgan, A., Şen, S., “Biped İnsansı Modelin Malzeme Değişkenliğine Göre Kinetik ve Kinematik Analizdeki Farklılıkları”, Bitirme Projesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, (2010).
- [4] Robot,(20 Mayıs 2015), <http://en.wikipedia.org/wiki/Robot>, (23 Nisan 2015).
- [5] Vukobratovic, M. and Juricic, D., “A contribution to the synthesis of biped gait”, *Technical and Biological Problem of Control*,USSR (1968).
- [6] Vukobratovic M., Hristic D. and Stojiljkovic Z., “Development of active anthropomorphic exoskeletons”, *Medical and Biological Engineering*, 12, 66-80, (1974).
- [7] Kato, I., Ohteru, S., Kobayashi, H., Shirai, K. and Uchiyama, A., “Information-power machine with senses and limbs”, *Proc. CISM-IFTOMM Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators*, 12-24, Italy, (1973).
- [8] Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y. and Kato, I., “The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD”, *Proceedings of 1985 International Conference on Advanced Robotics*, 459-466, (1985).
- [9] Ogura, Y., Shimomura, K., Kondo, H., Morishima, A., Okubo, T, Momoki, S., Lim H. and Takanishi, A., “Human-like walking with knee stretched, heel-contact and toe-off motion by a humanoid robot”, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3976-3981, Beijing,China, (2006).
- [10] Akachi, K., Kaneko, K., Kanehira, N., Ota, S., Miyamori, G., Hirata, M., Kajita, S. and Kanehiro, F., “Development of humanoid robot hrp-3”, *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, 50-55, (2005).

- [11] Hirose M. and Ogawa, K., “Honda humanoid robots development”, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 11-19, (2007).
- [12] Ishida, T., “Development of a small biped entertainment robot qrio”, *Micro-Nanomechatronics and Human Science and The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics for Information-Based Society*, 23-28, (2004).
- [13] Pfeiffer, F., Loffler, K., Gienger, M. and Ulbrich, H., “Sensor and control aspects of biped robot Johnnie”, *International Journal of Humanoid Robotics (IJHR)*, 1-3, 481-496, (2004).
- [14] Lohmeier, S., Buschmann, T., Ulbrich, H. and Pfeiffer, F., “Modular joint design for a performance enhanced humanoid robot”, *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Aut.(ICRA)*, Orlando, USA, 88-93, (2006).
- [15] Park, J. L. I. W., Kim, J.Y. and Oh, J., “Mechanical design of humanoid robot platform khr-3 (kaist humanoid robot-3: Hubo)”, *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, 321-326, (2005).
- [16] Silva, F. M. And Machado J. A. T., “A Historical Perspective of Legged Robots”, *Department of Electrical Engineering Institute of Engineering of Porto*, 4200-072, Portugal, (2006).
- [17] Matsuoka K., “A mechanical model of repetitive hopping movements”, *Journal Biomech.*, 5, 251-258, (1980).
- [18] Raibert M. H., “Running with symmetry”, *International Journal of Robot. Res.*,5(4), 45-61, (1986).
- [19] Raibert M. H., Brown H. B. and Chepponis M., “Experiments in balance with a 3D one-legged hopping machine”, *International Journal of Robot Res.*, 3(2), 75-92, (1984).
- [20] Massachusetts Institute of Technology Leg Laboratory, “Leg laboratory robots,” <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/robots-main.html>, ( 20 Mays 2015).
- [21] Zeglin G., “Uniroo: A one legged dynamic hopping robot”, *B.S. Thesis Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, (1991).
- [22] Papantoniou K. V., “Electromechanical Design for an Electrically Powered, Actively Balanced One Leg Planar Robot”, *Proceedings of IROS, Workshop on Intelligence for Mechanical Systems*, Osaka, Japan, 1553-1560, (1991).
- [23] Prosser J. and Kam M., “Vertical Control for a Mechanical Model the One-Legged Hopping Machine”, *Proceedings of First IEEE Conference on Control Applications*, Dayton, USA, 136-141, (1992).



- [24] Prosser J. and Kam M., “Control of Hopping Height for a One- Legged Hopping Machine”, *Proceedings of Mobile Robots VII*, Boston, USA, 604-612, (1992).
- [25] Gregorio P., Ahmadi M. And Buehler M., “Experiments With an Electrically Actuated Planar Hopping Robot”, *Lecture Notes in Control and Information Sciences 200, Experimental Robotics III*, Springer-Verlag, New York, 269-281, (1994).
- [26] Rad H., Gregorio P. and Buehler M., “Design, Modeling and Control of a Hopping Robot”, *Proceedings of IROS*, Yokohama, Japan, 1778-1785, (1993).
- [27] Gregorio P., “Design, Control and Energy Minimization Strategies for an Electrically Actuated Legged Robot”, Master Thesis, McGill University, (1994).
- [28] Gregorio P., Ahmadi M. and Buehler M., “Experiments With an Electrically Actuated Planar Hopping Robot”, *In: Lecture Notes in Control and Information Sciences 200, Experimental Robotics III Springer - Verlag*, New York, 269-281, (1994).
- [29] Ringrose R., “Self-stabilizing running”, Ph.D. Thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, (1997).
- [30] Zhang W., Wang G., Chambers T. and . Simon W. E., “Toward a Folding-Legged Uniped That Can Learn to Jump”, *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Florida, USA, 4315-4319, (1997).
- [31] De Man H., Lefeber D. and Vermeulen J., “Control on Irregular Terrain of a Hopping Robot With One Articulated Leg”, *Proceedings of International Conference on Advanced Robotics: Workshop II: New Approaches on Dynamic Walking and Climbing Machines*, Monterey, USA, 72-76, (1997).
- [32] Brown B. and Zeglin G., “The Bow Leg Hopping Robot”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 781-786, (1998).
- [33] Zeglin G. and Brown H. B., “First Hops of the 3D Bow Leg”, *Proceedings of International Conference on Climbing and Walking Robots*, 357–364, France (2002).
- [34] Koditschek D. E. and Buehler M., “Analysis of a Simplified Hopping Robot. *International Journal of Robotics Research*, 10(6), 587-605. (1991).
- [35] Siciliano B. And Khatib O., “Handbook of Robotics”, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 361-389, (2008).

- [36] Buehler M. and Koditschek D. E., “Analysis of a Simplified Hopping Robot”, *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 817-819. (1988).
- [37] Vermeulen J., Lefeber D. and Man H. D., “A Control Strategy for a Robot with One Articulated Leg Hopping on Irregular Terrain”, *In Proceedings of the International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, Professional Engineering Publishing, 399- 406, (2000).
- [38] Sayyad,A.,Seth B. and Seshu P., “Single-legged hopping robotics research—A review”, *Robotica*, Volume 25,Issue 05, 587 - 613, (2007).
- [39] Uğurlu B., “ZMP-Based Online Jumping Pattern Generation for a One-Legged Robot”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Volume 57, Issue 5, (2010).
- [40] Kato, I., Ohteru, S., Kobayashi, H., Shirai, K. and Uchiyama, A., “Information-power machine with senses and limbs”, *In Proc. CISM-IFTOMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, Udine, Italy, 12–24, (1973).