Yüksek Lisans Tezi

Erdem ARSLAN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2011

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ALTI BACAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN TASARIMI VE DİNAMİK ANALİZİ

Hazırlayan
Erdem ARSLAN

Danışman
Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2011

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ALTI BACAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN TASARIMI VE DİNAMİK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Erdem ARSLAN

Danışman
Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Temmuz 2011
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Erdem ARSLAN

İmza : 

Altı Bacaklı Yürüyen Robotun Tasarımı ve Dinamik Analizi adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Erdem ARSLAN

Danışman

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Mekatronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM danışmanlığında **Erdem ARSLAN** tarafından hazırlanan **"Altı Bacaklı Yürüyen Robotun Tasarımı ve Dinamik Analizi"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Mekatronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

19/07/2011

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Üye : Doç. Dr. Cem SİNANOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. İkbal ESKİ

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 26/07/2011 tarih ve 2011/250-04 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

26/07/2011

Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

"Altı Bacaklı Yürüyen Robotun Tasarımı ve Dinamik Analizi" konulu tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam sayın Prof.Dr. Şahin Yıldırım'a teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışması boyunca bana verdikleri maddi ve manevi destekten dolayı tüm aileme, çalışmamın her aşamasında görüş ve önerileriyle bana destek olan değerli hocalarım Prof.Dr. İbrahim Uzmay'a ve Yrd.Doç.Dr. Selçuk Erkaya'ya ve yine desteklerinden ötürü değerli arkadaşlarım Arş.Gör. Sertaç Savaş'a, Arş.Gör. Ömer Faruk ERGİN'e ve Arş.Gör. Emir Esim'e teşekkür ederim.

Erdem ARSLAN

Temmuz, 2011

ALTI BACAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN TASARIMI VE DİNAMİK ANALİZİ

Erdem ARSLAN
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2011
Tez Danışmanı: Prof.Dr. Şahin YILDIRIM

KISA ÖZET

Hareketin esnek bir şekilde gerçekleştirilmesi açısından mobil robotlar arasında bacaklı robotların önemli bir yeri vardır. Tasarlanacak olan robotun dinamik parametreleri (uzuv boyutları, kütle gibi) bu esnekliği doğrudan etkilemektedirler. Ayrıca bacaklı robotların sahadaki uygulanmalarında, işlem hızının yetersiz olması ve güç gereksiniminin yüksek olması gibi birçok problem ortaya çıkabilmektedir.

Bu çalışmada tasarlanacak olan bacaklı mobil robotun, istenilen hareketi verimli ve hızlı bir şekilde gerçekleştirmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, öncelikle altı bacaklı bir robotta verimli bir hareket sağlayabilecek bir mekanizma tasarımı gerçekleştirilmiş ve dinamik hesaplamalar için gerekli olan parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır. Daha sonra özellikle yürüyen robotlar konusunda uygulanabilen dinamik metotlar ayrıntılı olarak tanıtılmıştır. Bu metotlar arasından, önerilecek olan kılavuzlu çalışma algoritmasına uygunluğundan dolayı Newton-Euler algoritması tercih edilmiştir. Algoritmanın ikinci aşamasına geçmeden önce hesaplanması gereken, ters kinematik, hız ve ivme dağılımı gibi aşırı işlem yükü oluşturan hesaplamalar için, dinamik simülasyon programından faydalanılmıştır. Belirlenen bu dinamik parametreler kullanılarak robotun hareketini gerçekleştirecek tahrik bileşenleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu tahrik bileşenleri dinamik simülasyon programında modellenen robot üzerine uygulanarak, dinamik analizden önce yapılan hesaplamalarda kullanılan referans yörünge ile dinamik analizden sonra model üzerinden üretilen yörüngenin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Bacaklı robot tasarımı, dinamik analiz, dinamik simülasyon, yürüyen robot.

THE DESIGN AND DYNAMIC ANALYSIS OF SIX LEGGED WALKING ROBOT

Erdem ARSLAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, June 2011

Thesis Supervisor: Prof.Dr. Şahin YILDIRIM

ABSTRACT

Legged robots have a significant place among mobile robots, in terms of performing movement flexibly. The dynamics parameters (like part dimensions, mass) of the designing robot affect this flexibility directly. Besides in the field applications of legged robots, too many problems could be come up like inadequate speed of processing and high power requirement.

In this study it has been aimed to the designed legged robot perform a desired motion efficiently and fastly. For that purpose, at first it has been performed a mechanism design which can provide an efficent movement and the definition of required parameters for dynamic calculation has been elicited. Afterwards the methods that especially applicable on walking robots has been described in detail. Among these methods, due to guided running algorithm Newton-Euler algorithm has been chosed on account of suitability. It has been benefitted by dynamic simulation programme before the second phase of the algorithm for the calculation that places a overmuch burden on process, like inverse kinematics, velocity and acceleration distribution. Activation components for movements of robot , has been calculated by the use of indicated dynamic parameters. By applying this acquired incitation components to the dynamic model on simulation programme, it has been perfomed a comparison between the referance trajectory used on calculations that made before dynamic analysis and the trajectory that produced on the model after dynamic analysis.

Keywords: Legged robot design, dynamic analysis, dynamic simulation, walking robot.

İÇİNDEKİLER

ALTI BACAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN
TASARIMI VE DİNAMİK ANALİZİ

Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI iii
KABUL VE ONAY SAYFASI iv
ÖNSÖZ v
KISA ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR VE SİMGELER x
TABLOLAR LİSTESİ xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ xiv

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM:

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Kullanım Alanları 4
1.2. Yapılan Çalışmalar 4

2. BÖLÜM:
YÜRÜYEN MOBİL ROBOTLAR

2.1. Yürüyen Mobil Robotlar 12
2.2. Yürüyen Mobil Robotların Tarihsel Gelişimi 14
2.3. Doğada Görülen Hareket Sistemleri 18

3. BÖLÜM:
ABYMR TASARIMI

3.1. Seçim Parametreleri..... 23
3.2. Tasarım Aşamaları 30

4. BÖLÜM:
ABYMR'NİN DİNAMİK ANALİZİ

4.1. Dinamik Parametreler 42
4.2. Dinamik Metotlar..... 45
4.2.1. ZMP Modeli 47
4.2.2. SLIP Modeli 51
4.2.3. Lagrange Metodu 55
4.2.4. Newton-Euler Metodu..... 59
4.3. Newton-Euler Algoritmasının Uygulanması 63
4.4. Kılavuzlu Çalışma Algoritması..... 67

5. BÖLÜM:
SİMÜLASYON SONUÇLARI

5.1. Simülasyon Programları..... 69
5.2. Analizde Elde Edilen Denklemlerin Uygulanması..... 75
5.3. Simülasyon Sonuçları 80

SONUÇ..... 86
KAYNAKLAR 88
ÖZGEÇMİŞ..... 93

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	Anlamı	Birimi
ABYMR	Altı Bacaklı Yürüyen Mobil Robot	
DARPA	İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı (ISAPA)	
SLIP	Yay Yüklü Ters Sarkaç (YYTS)	
PD	Oransal ve Diferansiyel Kontrolör	
ANFIS	Ağ Tabanlı Bulanık Mantık	
MB	Çoklu gövde (Multibody)	
NASA	Amerikan ulusal uzay ajansı	
TARDEC	Mekanize Araştırma Geliştirme ve Mühendislik Merkezi	
GE	General Electric (Şirket)	
ZMP	Sıfır Moment Noktası (Zero Moment Point)	
SLIP	Yay Yüklü Ters Sarkaç (Spring Loaded Inverted Pendulum)	
COP	Basınç Merkezi (Center of Pressure)	
ASLIP	Asimetrik Yay Yüklü Ters Sarkaç (Asymmetric Spring Loaded Inverted Pendulum)	
LASLIP	Bacaklı Asimetrik Yay Yüklü Ters Sarkaç (The Legged Asymmetric Spring Loaded Inverted Pendulum)	
PUMA	Programlanabilir üniversal montaj makinesi (Programmable universal machine for assembly)	
F_{in}	Giriş kuvveti	(N)
L_{in}	Giriş uzvu uzunluğu	(m)
F_o	Çıkış kuvveti	(N)
L_o	Çıkış uzvu uzunluğu	(m)
X	Altın oran	
τ_e	Tahrik kuvvetleri	(N.m)
j^T	Jakobiyen matrisinin transpozesi	
F	Dış kuvvetler	(N)
q	Pozisyon	(m)

$\dot{q}$	Hız	(m/s)
$\ddot{q}$	İvme	(m/s²)
D	Kütle matrisi	
H	Koriolis ve merkezkaç kuvvetinin etkisini ifade eden matris	
C	Yerçekiminin etkisini ifade eden matris	
g	Yerçekimi ivmesi	(m/s²)
x	X yönündeki pozisyon	(m)
p	ZMP noktasının pozisyonu	(m)
M	Arabanın kütlesi	(kg)
$\ddot{x}$	X yönündeki ivmelenme	(m/s²)
z_c	Arabanın Z yönündeki pozisyonu	(m)
$P_{zmp}(t)$	ZMP noktası pozisyonunun zamana bağlı fonksiyonu	(m)
p_x	Üç boyutlu uzayda ZMP noktasının X yönündeki bileşeni	(m)
p_y	Üç boyutlu uzayda ZMP noktasının Y yönündeki bileşeni	(m)
$\ddot{x}_A$	ASLIP metodu kullanan tek bacağa sahip bir modelde kütle merkezinin X yönündeki ivmelenmesi	(m/s²)
$\ddot{y}_A$	ASLIP metodu kullanan tek bacağa sahip bir modelde kütle merkezinin Y yönündeki ivmelenmesi	(m/s²)
$\ddot{\theta}_A$	ASLIP metodu kullanan tek bacağa sahip bir modelde kütle merkezinin Z ekseni etrafındaki açısal ivmelenmesi	(1/s²)
τ_A	ASLIP metodu kullanan tek bacağa sahip bir modelde bacaktaki tork	(Nm)
l	SLIP modeldeki sarkaç uzunluğu	(m)
k	SLIP modeldeki yay sabiti değeri	(N/m)
θ	SLIP modeldeki açısal pozisyon değişimi	(deg)
R_{1x}	Üç kütleli yürüme sistemindeki bacak ucundaki kontak kuvvetinin X yönündeki bileşeni	(N)
R_{1y}	Üç kütleli yürüme sistemindeki bacak ucundaki kontak kuvvetinin Y yönündeki bileşeni	(N)
φ	Üç kütleli yürüme sistemindeki bacak açısı	(deg)
M	Üç kütleli yürüme sistemindeki bacağa uygulanan tork	(Nm/rd)
ψ	Üç kütleli yürüme sistemindeki gövde açısı	(deg)

$\mathcal{L}$	Lagrange terimi	
K	Kinetik enerji	(J)
V	Potansiyel enerji	(J)
Q	Tahrik kuvvetleri	(Nm)
v	Lineer hız	(m/s)
w	Açısal hız	(1/s)
I	Atalet tensörü	
r	Referans noktaya göre yerçekimi ivmesi yönündeki mesafe	(m)
H	Koriolis ve merkezkaç kuvvetinin etkisini ifade eden matris	
H_{ijk}	Christoffel gösterimi	
Γ	Tahrik kuvvetleri	(Nm)
λ	Lagrange çarpanı	
c	Lagrange metodundaki sınırlama matrisi	
$\hat{Z}$	Newton-Euler algoritmasındaki sınırlama matrisi	
R	Dönme matrisi	
P	Kütle merkezinin pozisyonu	(m)
N	Üç boyutlu atalet momenti vektörü	(Nm)
F	Üç boyutlu atalet kuvveti vektörü	(N)
n	Bağ noktasında görülen üç boyutlu tork vektörü	(Nm)
f	Bağ noktasında görülen üç boyutlu kuvvet vektörü	(N)
N_{AI}	A uzvunun kütle merkezindeki atalet momentleri vektörü	(Nm)
N_A	P_A bağ noktasında görülen bağ momentleri	(Nm)
N_{Cont}	Bacak ucunda görülen kontak momentleri	(Nm)
F_{AI}	A uzvunun kütle merkezindeki atalet kuvvetleri vektörü	(N)
F_{Cont}	Bacak ucunda görülen kontak kuvvetleri	(N)
F_A	P_A bağ noktasında görülen bağ kuvvetleri	(N)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Bacaklı robotların tekerli robotlara göre avantajları……. 13
Tablo 2.2. Karada yaşayan canlılardaki hareket sistemleri…...……..... 18

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1. Bigdog bacaklı mobil robotun test esnasında görünümü ……..…….. 2
Şekil 2.1. Chebyshev'e ait mekanizmanın yörüngesi ……... 14
Şekil 2.2. Chebyshev mekanizması kullanan robotun çizimi ……..….. 15
Şekil 2.3. Rygg tarafından 1893 yılında patenti alınmış mekanik at…….. 16
Şekil 2.4. General Motors firması tarafından yapılan yürüyen kamyon…… 17
Şekil 2.5. Boston Dynamics firması tarafından yapılan Bigdog robotu…… 17
Şekil 2.6. Bacak sayılarına göre doğada bulunan canlıların sınıflandırılması…… 19
Şekil 2.7. Böcek bacağındaki hareket (a) Bacağın parçaları, (b) Böceğin yürümesi, (c) Tork dağılımı…..……... 20
Şekil 2.8. Bacak konfigürasyonları (a) Düztaban , (b) Kedi yürüyüşü, (c) Balerin yürüyüşü……..……..... 21
Şekil 3.1. Hamamböceğindeki uzuvlar……... 24
Şekil 3.2. Hayvanlarda bacak yapısı (a) Köstebek ön bacağı, (b) At bacağı…….. 25
Şekil 3.3. İnsan kolundaki altın oran…….. 26
Şekil 3.4. Altın oranın açıklanabileceği doğru parçası……... 26
Şekil 3.5. Zielinska ve Heng'in denediği konfigürasyonların uygulandığı bacak….. 27
Şekil 3.6. Bacak konfigürasyonları için FEMUR/TIBIA oranının toplam motor gücüne etkisi……..…… 28
Şekil 3.7. Galileo Galilei tarafından önerilen benzeşmeye (similitude) göre çizilen iki kemik……..... 29
Şekil 3.8. Gövde tasarımının izometrik görünüşü…….. 31
Şekil 3.9. Gövde tasarımının profil görünüşü……. 31
Şekil 3.10. Gövde tasarımının teknik resmi…….…….……. 32
Şekil 3.11. COXA uzvu tasarımının izometrik görünüşü……...…… 33
Şekil 3.12. COXA uzvu tasarımının profil görünüşü……...…….. 33
Şekil 3.13. COXA uzvu tasarımının teknik resmi…….. 34
Şekil 3.14. FEMUR uzvu tasarımının izometrik görünüşü…… 35
Şekil 3.15. FEMUR uzvu tasarımının profil görünüşü……...…… 35
Şekil 3.16. FEMUR uzvu tasarımının teknik resmi…… 36
Şekil 3.17. TIBIA uzvu tasarımının izometrik görünüşü……... 37
Şekil 3.18. TIBIA uzvu tasarımının teknik resmi……... 38

Şekil 3.19. Robotun montaj sonrası halinin izometrik görünüşü……... 39
Şekil 3.20. Robotun montaj sonrası halinin teknik resmi……... 40
Şekil 4.1. Sekiz bacaklı robot için standart yürüyüş düzeni……..……..…….. 45
Şekil 4.2. Yer ile temas halinde oluşan eşdeğer kuvvet……....……... 47
Şekil 4.3. Araba-masa tablası problemi için ZMP'nin bulunması……..….... 48
Şekil 4.4. Statik denge koşulları a) Tek bacak temas halinde b) İki bacak temas halinde …….……...……... 49
Şekil 4.5. Çok Kütleli bir sistem için ZMP'nin üç boyutlu olarak belirlenmesi..…. 50
Şekil 4.6. Ters sarkaç modelleri a)SLIP b)ASLIP(Monoped- Biped) c) LASLIP…. 51
Şekil 4.7. SLIP modeline göre dengelenecek sistem, a) Robot resmi b) Kinematik model…….……. 53
Şekil 4.8. Üç kütleli yürüme sistemi……...…… 54
Şekil 4.9. Lineer ve açısal ivmelerden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin uzuvda gösterimi……...……..... 60
Şekil 4.10. Uzuvdaki kuvvet dengesi……...…….. 61
Şekil 4.11. Newton-Euler algoritmasına ait tahrik ve atalet kuvvetleri……...……... 63
Şekil 4.12. Uzuv gösteriminde tahrik ve atalet kuvvetler……...…… 65
Şekil 4.13. Hesaplama metodu ile robot kontrolü……...……... 68
Şekil 5.1. Simülasyon programların sıralı olarak çalışma görünümü …...……. 69
Şekil 5.2. Şekil 6.2. MSC-ADAMS programında modellenen 6 bacaklı yürüyen robot yapısı ve uygulanan harici torkların etkisi …….……..…… 71
Şekil 5.3. Robotun gövdesinin kütle merkezinin X yönündeki değişimi……...… 72
Şekil 5.4. TIBIA uzvunun yer ile temasında oluşan Y yönündeki kuvvet……..….. 72
Şekil 5.5. TIBIA-FEMUR mafsalındaki açısal değişim……...…….. 73
Şekil 5.6. FEMUR uzvunun kütle merkezinde Z yönündeki pozisyon değişimi….. 73
Şekil 5.7. FEMUR uzvunun X ekseni yönündeki lineer momentumun değişimi….. 74
Şekil 5.8. Şekil 6.8. Simulink'te analiz modeli görünümü……..... 76
Şekil 5.9. Analiz modelindeki birinci alt sistem (subsystem1)…….. 78
Şekil 5.10. Analiz modelindeki ikinci alt sistem (subsystem2)…….. 79
Şekil 5.11. Hareket yönüne göre sağ arka bacaktaki COXA-FEMUR mafsalı için belirlenmiş tork değeri……..……..……..…… 80
Şekil 5.12. Hareket yönüne göre sağ ön bacaktaki COXA-gövde mafsalı için belirlenmiş tork değeri……..…….…….. 81

Şekil 5.13. Hareket yönüne göre sol arka bacaktaki TIBIA-FEMUR mafsalı için belirlenmiş tork değeri…….…….. 81
Şekil 5.14. Belirlenen torkların MSC-ADAMS kontrol modülüne uygulanması….. 82
Şekil 5.15. MSC-ADAMS kontrol modülünün iç yapısı(Adamssub)…… 83
Şekil 5.16. Referans yürümedeki X ekseni ile analiz sonrası yürümedeki X eksenindeki hareket……..…….. 84
Şekil 5.17. Referans yürümedeki Z ekseni ile analiz sonrası yürümedeki Z eksenindeki hareket ……...……. 84
Şekil 5.18. Referans yürümedeki Y ekseni ile analiz sonrası yürümedeki Y eksenindeki hareket. ……..……. 85
Şekil 5.19. Referans yürümedeki Y ekseni etrafındaki yönlenme ile analiz sonrası yürümedeki yönlenme ……..…….. 85

GİRİŞ

Mobil robotlar belirli bir noktaya bağlı kalmaksızın kendi çalışma ortamında serbestçe dolaşabilme kabiliyetine sahip robotlardır. Mobil robotların bu özelliği, endüstriyel robotların aksine işin sisteme gelme zorunluluğunu ortadan kaldırmaktadır. Gelişen teknolojik imkânlar ile birlikte mobil robotların kullanılabileceği alan sayısı da gittikçe artmaktadır. Mobil robotlar kara, hava, deniz, uzay gibi birçok farklı ortama uygun olarak tasarlanabilmektedirler.

İnsansız hava araçlarından, dünya dışı gezegenlere gönderilen robotlara kadar geniş bir alanda kullanım imkânı bulabilen mobil robotlar, çevresel ekipmanlarını (sensörler) kullanarak, değişen çevresel şartlarda bile yapması gereken işi daha doğru olarak gerçekleştirebilmektedirler.

Bacaklı mobil robotlar, hareketin zor gerçekleştirilebildiği arazi koşullarında da kullanılabilmesinden dolayı, mobil robotlar arasında oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Tekerli sistemlerin aksine, dağlık arazilerde bile hareket edebilme kabiliyetine sahip yürüyen mobil robotlar, mayın ve tehlikeli madde temizleme, savunma, taarruz gibi birçok askeri operasyonda kullanılabilmektedir [1]. Çoğu zaman doğadaki canlı örneklerden yola çıkarak yapılan tasarımlar kullanılarak, yapılması gereken zorlu hareketlerin robotlar tarafından doğru ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi sağlanmaktadır.

Askeri operasyonlarda kullanılabilen dört bacaklı bir mobil robotun, engebeli zeminlerdeki hassasiyetinin belirlenmesi için gerçekleştirilen test işlemi Şekil G.1'de görülmektedir.



Şekil G.1. Bigdog bacaklı mobil robotun test esnasında görünümü [1].

Günümüzde bacaklı mobil robotlar verimli bir şekilde kullanılamamaktadırlar. Bunun temelde iki sebebi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi bacaklı mobil robotun hareket kontrolü için hesaplanması gereken dinamiğin son derece karmaşık olması ve lineer olmayan karakteristiğe sahip denklemlerin çözümü için çok fazla hesaplama gerektirmesidir. Son yıllarda artan işlemci hızları ile bu probleme kısmi olarak çözüm sağlanılmaya çalışılmıştır. Fakat yüksek serbestlik derecesine sahip bacaklı mobil robotların dinamik hesaplamaları için hala ciddi miktarlarda işlem hızlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bir diğer temel problem ise tekerli mobil robotlara nazaran daha çok güç ihtiyacı olan bacaklı mobil robotlara uygun güç ve tahrik sistemlerinin gerçekleştirilememesidir. Son yıllardaki teknolojik gelişmelerle birlikte yüksek tork ve düşük hız seçeneği sunabilen, kontrolü kolay SERVO motorların geliştirildiği gibi diğer taraftan yapay kas gibi birçok eleman geliştirilerek bacaklı robotların hareketini mümkün kılabilecek mekanizmalar oluşturulmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada robotun esnek bir şekilde hareket etmesine imkân sağlayacak ABYMR tasarlandıktan sonra, istenilen hareketi sağlayacak tahrik bileşenlerinin bulunması için dinamik analiz gerçekleştirilecektir. Dinamik analizin hızlı bir şekilde yapılabilmesi için simülasyon programı ile beraber kullanılabilecek bir sistem önerilecektir.

Daha sonra yapılan dinamik hesaplamalar neticesinde, elde edilen tork değerleri robotun simülasyon modeli üzerine uygulanacak, belirlenen referans yörünge ile simülasyon sonucunda elde edilen yörüngenin karşılaştırılması yapılacaktır.

Bu tez çalışması, 5 bölümden oluşmaktadır. 1. bölümde bacaklı mobil robotlar üzerine son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar üzerinde durulmuştur. 2. bölümde bacaklı robotların tarihsel gelişimi ve doğada görülen bacaklı hareket sistemleri açıklanmıştır. 3. bölümde ABYMR tasarımında uzuv boyutları, kütle gibi tasarım parametrelerin nasıl seçildiği üzerinde durulmuş, daha sonra altı bacaklı bir mobil robota ait sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. 4. bölümde yürüyen robotların dinamik analizinde kullanılan dört temel metottan ayrıntılı olarak bahsedilerek yapılacak olan dinamik analizde hangi metodun uygulanacağı belirlenmiştir. Daha sonra Newton-Euler yöntemi ile yapılacak dinamik analizi ve simülasyon programını bir arada kullanan bir dinamik model önerilmiştir. 5. bölümde simülasyon programı vasıtası ile önerilen dinamik modelden elde edilen sonuçlar simülasyon ortamındaki robota uygulanarak önerilen dinamik metodun doğruluğu gösterilmeye çalışılmıştır.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Kullanım Alanları

Teknolojik imkânların gelişmesi ile birlikte geçmişte gerçekleştirilmesi hayal olarak görülen insansı robotlar günümüzde uygulamaya geçirilebilmektedirler. Endüstriyel robotların aksine sabit bir bölgede çalışma sınırı olmayan mobil robotların bu özelliği, robotların birçok uygulamada kullanılabilmesine imkân sağlamaktadır. Başta askeri amaçlı olmak üzere; sağlık, taşıma, temizlik, hizmet gibi birçok alanda kullanılan mobil robotlar sayesinde, insanların yapması zor ya da imkânsız olan birçok iş mobil robotlara yaptırılabilmektedir.

Uygulamada kullanılan mobil robotların tahriki genelde iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlardan birincisi hareketin bir teker vasıtası ile gerçekleştirildiği mobil robotlardır. Tekerli mobil robotların kullanılabilmesi için düz veya düze yakın bir arazi gerekmektedir. Hızlı hareketin gerektiği, ev veya fabrika gibi zeminin düz olduğu yerlerde, bu tip robotlar tercih edilmektedir. Arazi şartlarının zor olduğu, robotun dış koşullara göre adaptif olarak hareket etmesi gereken yerlerde tekerli mobil robotlar yerine bacaklı robotlar tercih edilmektedir. Bacaklı robotlarda hareket işlemi, insan hareketinde olduğu gibi hareketli uzuvlar ile gerçekleştirilmektedir. Bu robotların tasarımında doğadaki canlıların hareket yapılarından örnek alınmaktadır.

1.2. Yapılan Çalışmalar

Mobil robotların verilen karmaşık görevleri hızlı ve doğru bir şekilde yerine getirebilme kapasitesi, otomasyonun yüzlerce farklı alanlara uygulanabilmesini mümkün kılmaktadır. Mobil robotlar arasında tekerli mobil robotlar, düzgün olmayan arazilerde hareket edememe probleminden dolayı her yerde kullanılamamaktadırlar.

Engeller karşısında adaptif olarak kontrol edilebilen karmaşık süspansiyon sistemleri kullanarak tasarlansalar bile her arazi koşulunda ilerleme sağlayamamaktadırlar. Arazi koşullarının tam olarak bilinmediği ve tekerli mobil robotların hareket etmelerinin mümkün olmadığı durumlarda bacaklı mobil robotlar tercih edilmektedir. Bu sebeple yürüyen robotlar alanında son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır.

Scarfogliero ve arkadaşları doğadan ilham alınan bacaklı robotlarda uyumlu mafsal ve elastik enerji depolanması kullanımı isimli çalışmayı gerçekleştirmişlerdir [2]. Bu çalışmada zıplayarak hareket eden küçük hayvanlardan esinlenilmiş, elastik enerji depolama ve bırakma mekanizması kullanılarak zıplama işleminin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Uyumlu olarak çalışan ön bacaklar tamamen pasif olup inme esnasında çarpma enerjisinin etkisini azaltmıştır. Çalışmada sistemde kullanılacak yay ve sönüm elemanı değerlerinin belirlenmesinde çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılmıştır.

Ghorbani ve Wu yay sabiti ayarlanabilen yapay tendonlar üzerinde çalışmışlardır [3]. Yürüyen robotlarda bilekte kullanılan ayarlanabilir yay sabiti elemanın etkileri üzerinde durmuşlardır. Yapay kas modeline benzer bir sistem geliştirmeye çalışan araştırmacılar yapay tendonlar için üç farklı tasarım gerçekleştirmiş ve bunların kontrolü için gerekli olan matematiksel modeli oluşturmuşlardır. Tasarımı yapılan üç farklı sistem ayrı olarak iki bacaklı yürüme için temas fazında simüle edilmiş, yay sabitini doğru bir şekilde ayarlayabilmek adına oldukça önemli bir katkı sağlanmıştır.

Delcomyn ve Nelson biomimetik altı bacaklı bir robotun mimarisi isimli çalışmayı gerçekleştirmişlerdir [4]. Amerikan hamam böceğinden (Periplaneta-americana) esinlenilerek tasarladıkları robotta uzuv boylarının seçimi ve yerleşimi böceğin yapısına benzer bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan sistemde tahrik için kasların yerini tutacak pnömatik eyleyiciler ve çeşitli sensörler bulunmaktadır. Çalışmada bacağın yere temas edip etmediğini anlamak için bacağın değişik noktalarında strain-gage elemanı kullanmışlardır. Bu strain-gage elemanları yürüme esnasında adım atma fazında bacağı koyabileceği bir yeri bulana kadar sinirsel kontrolöre yardımcı olmaktadırlar.

Zielinska ve Heng çok amaçlı dört bacaklı robotun tasarımını gerçekleştirmişlerdir [5]. Çalışmada uzuv sayısı, uzuv boyları, kütleler, çalışma hızları gibi birçok tasarım parametresinin seçimi ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Tasarım çok yönlülüğe izin verecek şekilde gerçekleştirilerek çeşitli yürüme tarzları (sürüngen tipi, böcek tipi) sistem üzerinde denenmeye müsait kılınmıştır. Sistem üzerinde değişik bacak konfigürasyonlarında motor gücü ihtiyacının karşılaştırması yapılarak tasarımlar arasındaki farklılıklar gösterilmeye çalışılmıştır.

Chatzakos ve Papadopoulos zıplayarak hareket eden elektriksel tahrikli bir robotun parametrik analizleri ve tasarımı konusunda çalışmışlardır [6]. Düzlemsel hareket şartında istenilen performans kriterlerine göre tasarım parametreleri belirlenmeye çalışılan robotta, deneysel çalışmalar, zemin yüzey özellikleri, teknolojik ve ekonomik kısıtlamalar göz önünde bulundurarak seçim yapılmaya çalışılmıştır. Yapılan parametrik çalışma sayesinde çeşitli grafikler kullanılarak bir çeşit tasarım rehberi oluşturulmuştur.

Barreto ve arkadaşları altı bacaklı bir robotun kinematik ve dinamik analizini gerçekleştiren bir model geliştirmişlerdir [7]. Serbest cisim diyagramı metodu olarak adlandırdıkları bir dinamik modeli oluşturup simüle etmişlerdir. Geliştirilen modelde ayak ile zemin arasındaki etkileşim göz önünde bulundurulmuş, matematiksel çözümleme için gerekli olan 24 adet dinamik eşitlik Newton metodu ile çözülmüştür.

Altı bacaklı bir robotta, bacak ve mafsal kuvvetlerinin optimum olarak hesaplanması için Roy ve arkadaşları [8] altı bacaklı bir robotun kontrolünde gerekli olan kinematik ve dinamik hesaplamaları gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra bacak kuvvetlerinin minimize edilmesi ve tork kuvvetlerini minimize edilmesi arasındaki farkı karşılaştırmalı olarak göstermişlerdir.

Edgington ve arkadaşları ise bacaklı robotlar için dinamik hareket modellenmesi isimli çalışmayı yapmışlardır [9]. Adım hareketinin tahmini olarak modellenmesinde dinamik gaussiyen karışım modeli algoritmasını geliştirmişlerdir. Metotlarının kapasitesini ve kalitesini artırmak için algoritmadaki parametrelerin seçimi için çeşitli teknikler uygulamışlardır. Geliştirmiş oldukları algoritmayı kinematik olarak oldukça kompleks bir yapısı olan sekiz bacaklı bir robot üzerinde standart bir veri seti kullanarak uygulamışlardır.

Soygüder yaptığı çalışmada [10] zıplayarak yürüyen çok bacaklı robotların dinamik modelinin çıkarılması ve yapay zeka algoritmaları ile denetimini gerçekleştirmiştir. Zıplayarak yürüme için hesaplanması gereken işlemlerde çözümü mümkün olduğunca basitleştirmek için kütle-yay ters sarkaç (SLIP) benzetimini kullanmıştır. Hem quadrupedal (dört bacaklı), hem de hexapod (altı bacaklı) bir robotun zıplayarak yürümesine ait dinamik modelini oluşturarak, sırası ile PD denetim algoritması, bulanık mantık denetim algoritması ve ağ tabanlı bulanık mantık (ANFIS) denetim algoritması ile kontrolü gerçekleştirmiştir.

Başka bir çalışmada Höpler ve arkadaşları bacaklı robotlarda yörünge optimizasyonu ve kontrolü için nesne yönelimli dinamik modelleme isimli çalışmayı gerçekleştirmişlerdir [11]. Çalışmada bacaklı robot uygulamalarında gerekli olan çeşitli mekanik modelleme ihtiyaçlarının giderilmesi için, mimarinin nesne yönelimli olarak modellenmesi ve geliştirilmesinden bahsedilmiştir. Dinamik hesaplamaların zorluğu mekanik modeller çıkarılarak gösterildikten sonra, robot kontrol uygulamalarında kaçınılmaz olan çok gövdeli (MB) dinamik modele ait hesaplar, nesne yönelimli bir mimaride oluşturulmuştur.

Georgiades ve arkadaşları su altında hareket edebilen altı bacaklı bir robota ait simülasyonu gerçekleştirmişlerdir [12]. Simülasyonu gerçekleştirilen robotta hareketin sağlanması için osilasyonlu hareket eden altı palet bulunmaktadır. Çalışmada su altı harekete dair, hidrodinamik ve hidrostatik kaldırma kuvvetleri göz önünde bulundurularak ayrıntılı bir dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde ettikleri nümerik çözümlere ait simülasyon sonuçlarını 3dMax® grafik ve animasyon yazılımı ile görsel olarak sunmuşlardır.

Vidoni ve Gasparetto örümcek tipi bir robotta verimli bacak duruşu ve kuvvet dağılımı problemini irdelemişlerdir [13]. Çalışmada robota ait farklı duruş pozisyonları için statik analiz gerçekleştirildikten sonra ayrı durumlar için problemin çözümü optimize edilmeye çalışılmıştır. Robotun yavaş hareketi durumunda statik çözümün yeterli olacağını düşündükleri için robotun ivmelenmesinden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin etkili olduğu dinamik bir çözüme geçmemişlerdir.

Erden ve Leblebicioğlu yaptıkları çalışmada altı bacaklı bir robotun mafsallarına uygulanması gereken torkların minimizasyonunda, değerlerin karelerinin toplamının küçültülmesi şeklinde bir yöntem izlemişlerdir [14]. Robotun yürüdüğü zemine bağlı olarak, kuvvet ve tork dağılımının uygun şekilde yapılması enerji verimliliği açısından önem teşkil etmektedir. Bu amaçla burgu dağıtımı olarak adlandırılan bir yöntem geliştirilmiş ve enerji verimliliği açısından burgu dağıtımı yönteminin daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Henaff ve arkadaşları iki bacaklı bir robotta dengenin online olarak sağlanabilmesi için, sürekli zamanlı yinelemeli sinir ağı modeli ve zamanda geri yayılımlı dinamik algoritmalarını uygulamışlardır [15]. Çalışmada yürüme sırasında dengelemenin robotun üst gövdesi tarafından yapıldığını varsayan Henaff ve arkadaşları, alt parçalar ve üst parçaların birbirleri ile etkileşimli olarak çalıştığını varsayarak dıştan gelen bozucu faktörleri sensörler ile ölçmüş, sürekli zamanlı yinelemeli sinir ağı modeli ve zamanda geri yayılımlı dinamik algoritmaları vasıtası ile kontrol etmeye çalışmışlardır.

Filho ve Prajoux dört bacaklı bir robotta yürüme kontrolünü ve kuvvet dağıtımını kural tabanlı bir yapıda gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmeye çalışılmışlardır [16]. Yükseklik kontrolünün yapıldığı sistemde giriş-çıkış linearizasyonunu kullanılmış, optimum şekilde çalışan lineer bir kontrölör oluşturulmaya çalışılmıştır. Bunun yanında kontrolde kullanılan kuvvet dağılımı yaklaşımı, sisteme esneklik ve uyum sağlayabilme özelliği katmıştır. Çalışmada kural tanımlamalara ve bacak kuvvetlerine ait hesaplamalar ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Huang ve Nonami tasarımını önceden gerçekleştirdikleri COMET-I adındaki robot üzerinde, antipersonel mayın algılama için nörohibrit, pozisyon ve kuvvet kontrollü yürüme sistemini gerçekleştirmişlerdir [17]. Çalışmada YSA çıkışını, pozisyon ve kuvvet kontrolörlerinden gelen çıkışlar ile birleştirerek bacaklara uygulamışlardır. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde, nörohibrit kontrolörün kullanıldığı durumdaki pozisyon hatalarının diğer kontrollerin uygulandığı durumdaki robot pozisyon hatalarına göre üstünlüğünü göstermişlerdir.

Benzer alandaki bir çalışma Santos ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [18]. Bu çalışmada önceden tasarımını yaptıkları SILO6 isimli altı bacaklı bir mayın imha robotunun sahip olduğu özellikler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Antipersonel bir mayını algılayabilecek ve tespit edebilecek bir sensör taşıyan yürüyen robotun verimli ve etkin bir şekilde çalışabilmesi için gereken sistem özellikleri irdelenmeye çalışılmıştır.

Başka bir çalışmada ise bir DARPA projesi olan SCORPION isimli sekiz bacaklı robotun yürümesinde bacaklardaki senkron hareketin sağlanabilmesi için biyomimetik bir kontrol şeması oluşturulmuştur. Hareket düzeni oluşturulurken doğadaki birçok temel canlı üzerinde görülen yapılar, esnek bir biçimde birleştirilmeye çalışılmıştır [19]. Daha sonra Klaassen ve arkadaşları, tasarladıkları bu hareket düzenini MSC-ADAMS isimli dinamik analiz programı üzerinde simüle etmişlerdir.

Uzundere, sekiz bacaklı bir robotun tasarımı ve modellenmesi isimli çalışmayı gerçekleştirmiş ve bu çalışmada robotun lokomasyonu için gerekli olan bacak yapısı, hareket düzeni gibi konuları irdelemiştir [20]. Sekiz bacaklı robotun tasarımında doğada bulunan dış iskeletli canlılardan akrebi model olarak seçmiştir. Bacakların hareketini sağlayacak mekanik sistemin tasarımını gerçekleştirdikten sonra, sistemde kullanılan elemanların mekanik dayanımlarını belirlemek için sonlu elemanlar metodu ile tasarlamış olduğu parçaları analiz etmiştir. Mantıksal katmanlar olarak adlandırdığı robot kontrol sistemini oluşturmak için sensörler, data iletişimi ekipmanları, motorlar gibi elemanlar arasında hiyerarşik bir düzen kurmuştur.

Başka bir çalışmada, Kaplan [21] altı bacaklı mini bir robotun konum tespiti ve haritalama işlemini gerçekleştirmiştir. Bir otonom mobil robotun çalışma ortamı içerisindeki engellere çarpmaksızın güvenilir bir şekilde hareket edebilmesi ve verilen bir görevi yerine getirebilmesi için etkin bir yön bulma ve konum belirleme sistemine sahip olması yanında, çevresinin bir haritasına da sahip olması gerekir. Bu işlem için gerekli olan klasik sistemlerin yürüyen bir robot üzerine yüklenmesi oldukça güç bir işlemdir. Kaplan bu çalışmada sistem için gerekli olan sensörleri ve hantal olan yapıları küçültmüş, kontrol elemanını aynı zamanda haberleşme amacı için kullanarak bilgisayar üzerinde haritalama işlemi için bir program geliştirmiştir. Haritalama için gerekli olan gereksinimleri belirleyerek işlemi detaylı olarak irdelemiştir.

Darıcı [22] dört bacaklı robotlarda yürüme analizi ve yol izleme konusunda çalışmıştır. Çalışmada dört bacaklı robotta yürüme teknikleri için gerekli olan parametreler MATLAB programı vasıtası ile hesaplanmıştır. Dört bacaklı robota ait dinamik model ise MSC-ADAMS programı kullanarak oluşturulmuştur. Ardından üç farklı dört bacaklı yürüyüş yöntemi açıklanmış ve bunların simülasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Daha sonra mobil robotlar için geliştirilen bir yol izleme yöntemi açıklanmış ve bu yöntem dört bacaklı mobil robot modelinde uygulanarak simülasyon sonuçlarında yer verilmiştir. Ayrıca simülasyon sırasında MSC-ADAMS programından faydalanılarak robotun kütle merkezinin konum ve oryantasyonu (z ekseni ile yaptığı açı) geri besleme ile alınmış, yol izlenirken oluşan konum ve oryantasyon hataları kapalı çevrim kontrol ile azaltılmaya çalışılmıştır.

Başka bir çalışmada ise Erden altı bacaklı yürüyen makine isimli çalışmayı doktora tezi olarak gerçekleştirmiştir [23]. Beş bölümden oluşan doktora tezinin birinci bölümünde yürüyüş biçimleri tanımlanarak, yürüyüşün düzgünlüğünü belirleyen kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Tezin ikinci bölümünde pekiştirmeli öğrenme içeren serbest yürüme algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma Robot-EA308 üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanmış, sağladığı kararlılık gelişimi, farklı hızlar arasında yumuşak geçiş yapabilme ve arka bacaklardan birinin arızalanması durumunda beş bacaklı yürümeyi öğrenerek uyum sağlayabilme özellikleri gözlenmiştir. Tezin üçüncü bölümünde üç eklemli bir robot bacağının ileri atılımı için yörünge optimizasyonu ve kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dördüncü bölümde, her bir bacağında üç eklemi bulunan altı bacaklı bir robotun tam kinematik ve dinamik formülasyonu, çıkarılmıştır. Destek fazında robot duruşunu belirleyen tork dağıtımı yaklaşımının, yaygın olarak kullanılan kuvvet dağıtımı yaklaşımından daha verimli sonuç verdiği gösterilmiştir. Tezin son bölümünde ise dalgalı yürüyüşler için enerji verimliliği analizi gerçekleştirilmiştir.

Çok modlu bir mobil robotun kinematik ve dinamik modellenmesi ve tasarımı konulu çalışma, Tunç tarafından gerçekleştirilmiştir [24]. Mobil robotların hareket kabiliyetinin yüksek olma ihtiyacından yola çıkarak yapılan tasarımda dört adet palet tıpkı bir yürüyen robotun bacak mekanizmasındaki gibi tek nokta etrafında üç serbestlik dereceli harekete izin verecek şekilde gövdeye bağlanmıştır. Tasarımda prototip üretiminde zorluklarla karşılaşmamak amacı ile ticari olarak hazır bulunabilen bileşenler kullanılmaya çalışılmıştır. Çalışmada robotun tasarımı gerçekleştirildikten sonra

tasarlanmış parçaların sonlu elemanlar metodu ile yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Robotun hareketini sağlamak için çok yönlü tekerleklerin kinematik hesaplamalarına benzer bir hesaplama yapılmıştır. Temel dinamik hesaplama metotları tanıtıldıktan sonra dinamik hesapların ve simülasyon çalışmasının yapılabilmesi için robot MSC-ADAMS programında modellenmiştir. Robot kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için, MSC-ADAMS programında oluşturulan dinamik model kullanılarak (MATLAB-SIMULINK programında), değişik arazi koşulları ve hareket durumları için simüle edilebilir bir model geliştirilmeye çalışılmıştır.

Yürüyen robotlarda ağır yüklerin taşınması gerekildiği durumlarda genellikle hidrolik tahrik tercih edilmektedir. Bununla birlikte elektro-hidrolik servo sistemleri; yüksek derecede nonlinearite, hidrolik özelliklerin değişmesi, akışın gecikmesi ve elektromanyetik valflerdeki ölü bölge gibi birçok nedenden dolayı çeşitli sorunları barındırmaktadır. Barai ve Nonami [25] bu sorunlara çözüm olarak, klasik kontrol tekniklerinin kullanılması halinde çok büyük hataların oluşacağından, kompleks veya tam olarak tanımlanmamış sistemlerin modellenmesinde kullanılan bulanık mantık kontrolünü önermişlerdir.

2. BÖLÜM

YÜRÜYEN MOBİL ROBOTLAR

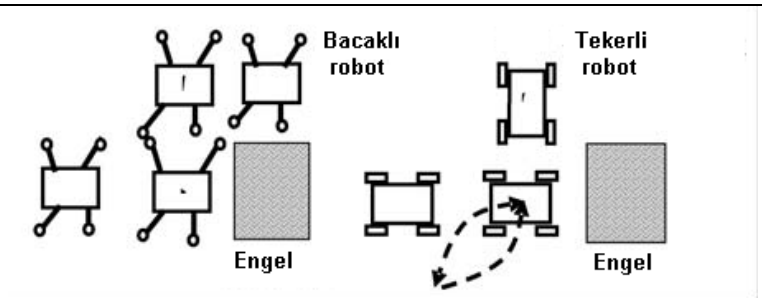
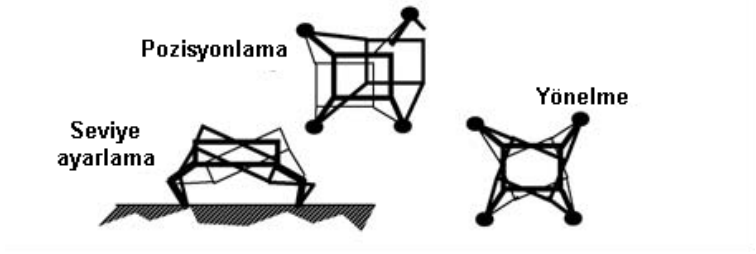
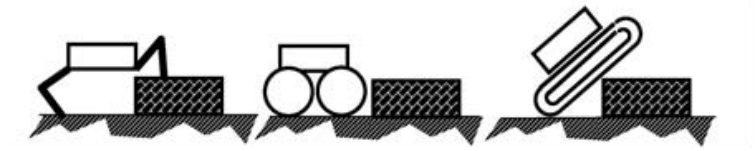
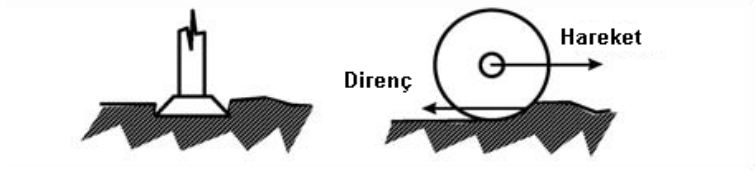
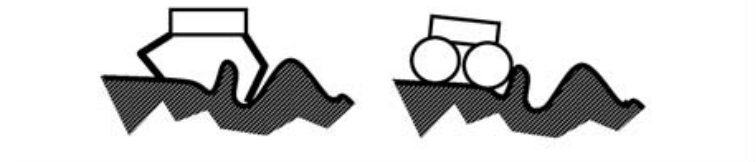
2.1. Yürüyen Mobil Robotlar

Bacaklı mobil robotlar, hareketlerini düz olmayan arazi koşullarında bile esnek bir şekilde gerçekleştirebilme özelliğine sahip olmalarından dolayı mobil robotlar arasında oldukça önemli bir yer tutmaktadırlar. Doğal ortamında hızlı ve verimli bir şekilde hareket edebilen canlıların incelenmesi, mobil uygulamalarda kullanılacak olan bacaklı robotların tasarımında oldukça önemli rol oynamaktadır.

Amerikan ordusunun tahminine göre tekerlekli araçlar dünya üzerindeki yerlerin %50'sine erişebilmektedir [7]. Düz olmayan arazilerde hareket eden bacaklı mobil robotların tekerlekli mobil robotlara göre hareket kabiliyeti daha yüksektir. Bir engel ile karşılaştıklarında tekerlekli mobil robotun geri dönüp manevra alması gerekirken bacaklı robotlarda bu işlem yana adım atarak daha kısa sürede halledilebilmektedir. Bunun yanında engelin fazla yüksek olmadığı durumlarda, bacaklı robotların engeli üzerinden geçerek aşabilmesi tekerlekli mobil robotlara göre daha kolay olmaktadır.

Tekerlekli mobil robotlarda, harekete karşı gösterilen zeminden kaynaklanan yüksek direnç bacaklı mobil robotlarda oldukça düşük olarak görülmektedir. Ayrıca robot tarafından zeminde oluşturulan deformasyon da buna bağlı olarak daha az olmaktadır. Engelli arazi koşullarında çalıştırılan tekerlekli mobil robotların ortalama hızları engeller yüzünden düşük olmaktadır. Bacaklı robotlarda ise bu hız yapısal olarak esnek hareketleri gerçekleştirebilmeye müsait olmasından dolayı daha yüksek seviyelere çıkabilmektedir. Tablo 2.1'de bacaklı mobil robotların tekerlekli mobil robotlara göre üstünlükleri gösterilmiştir.

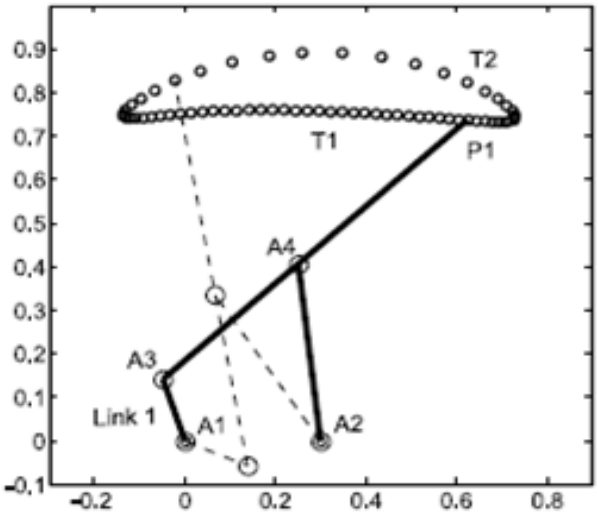
Tablo 2.1. Bacaklı robotların tekerli robotlara göre avantajları [26].

Mobilite	
	
Engel aşma	
Aktif süspansiyon	
Doğal arazi (süreksiz arazi)	
Sıkışma ve Kayma	
Çevresel zarar	
Ortalama hız	

Bunun yanında bacaklı hareket mekanizmalarının bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi hareketin tekerlekli mobil robotlara göre daha kompleks olarak gerçekleştirilmesidir. Hareketin yapısal olarak gerçekleştirilebilmesi için tekerlekli sistemlerde sadece döner bir mafsala bağlı bir disk gerekli iken, bacaklı robotlarda birden çok uzuv ve mafsala ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden bacaklı mobil robotlarda kullanılması gereken sensör sayısı tekerlekli mobil robotlara göre daha fazladır. Maliyeti doğrudan yükselten bu eleman fazlalığının yanında mafsal noktalarında tahrik için gereken tork değerlerinin yüksek olması da bacaklı robotların oluşturulmasında ciddi bir problem yaratabilmektedir.

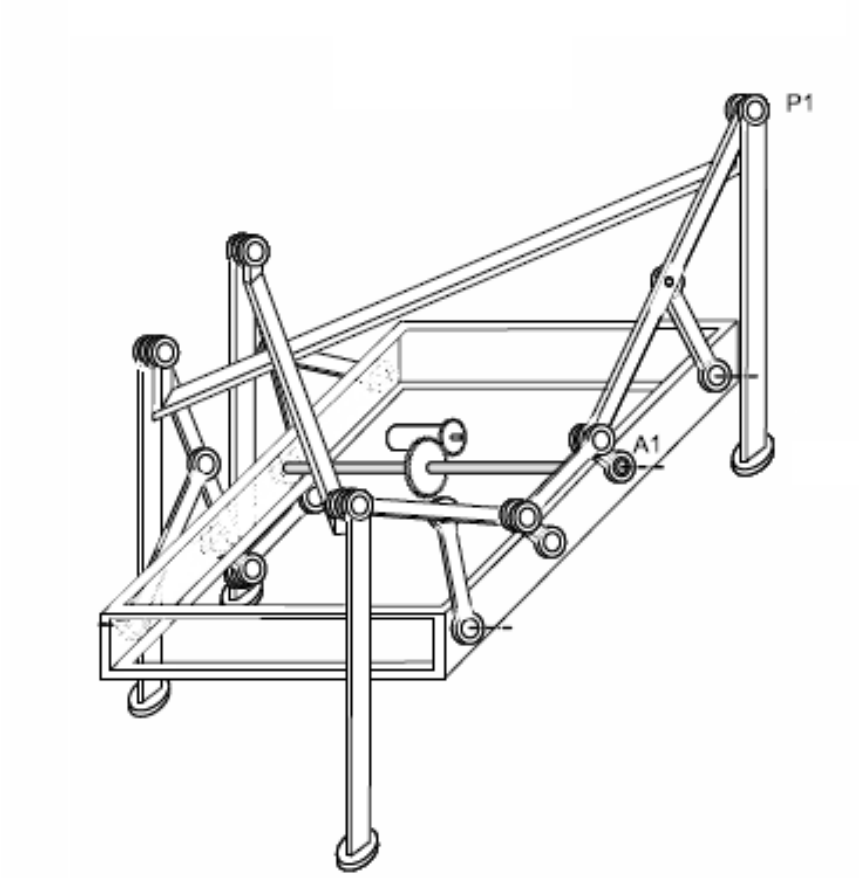
2.2. Yürüyen mobil robotların tarihsel gelişimi

Bacaklı mobil robotlarda yapılan ilk çalışma bundan yaklaşık 150 yıl önce California valisi Leland Stanford'un Eadweard Muybridge'i dörtnala koşan atları incelemesi için görevlendirmesi ile başladı [10]. Tarihte ilk yürüyen sistem ise 1870'li yıllarda Chebyshev tarafından gerçekleştirilmiştir [26]. Yürüme sistemi Şekil 2.1'de gösterildiği gibi dört uzuvlu bir mekanizmadan oluşmaktadır. Birinci uzvun A1 ekseni etrafında dönmesi ile mekanizmanın P1 ucu döngünün belirli zamanlarında T1 ve T2 yörüngelerini izlemektedir. Bu basit mekanizmayı kullanarak yürümenin destek (stance) ve adım (swing) fazları arasında zamana bağlı olarak geçiş yapılabilmektedir.



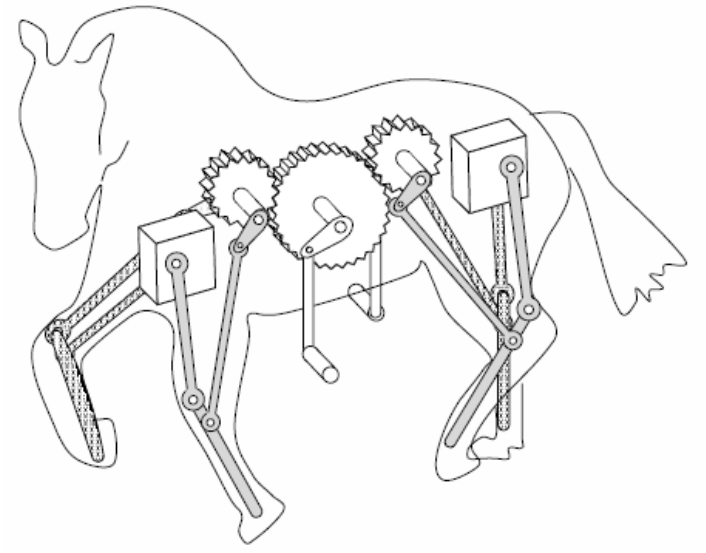
Şekil 2.1. Chebyshev'e ait mekanizmanın yörüngesi [26]

Bu mekanizmalar belirli bir faz sıralamasında, farklı bacaklarda konumlandırılırlarsa yürüme sağlayabilen bir sistem gerçekleştirilmiş olacaktır. Şekil 2.2'de Chebyshev mekanizmalarının farklı fazlarda, dört bacağa yerleştirildiği bir robot örneği görülmektedir.



Şekil 2.2. Chebyshev mekanizması kullanan robotun çizimi [26]

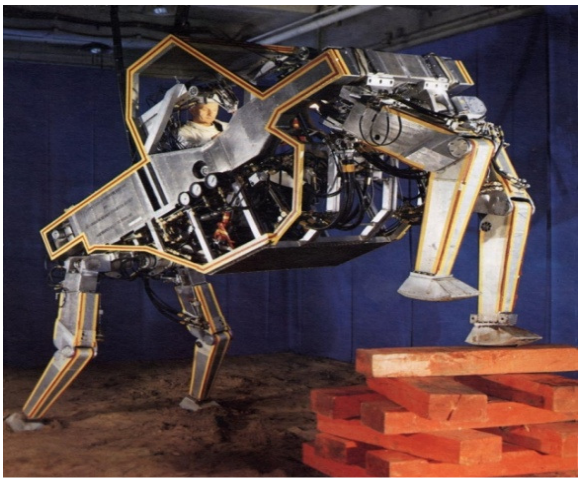
Bunun yanında yürüyen robotlar alanında bir diğer kilometre taşı da, L.A. Rygg tarafından 1893 yılında mekanik at başlığıyla birleşik devletler patent ofisine yapılan başvurudur. Sürücünün pedalları çevirmesi ile güç sağlanan mekanik atta, krankların ve mekanizma uzuvlarının hareketinin bacaklar vasıtası ile harekete dönüştürülmesi hedeflenmiştir. Mekanizmanın üretilip üretilmediğinden emin olunmamasına rağmen, bu patentin yürüyen robotlar alanında, alınılan ilk patent olduğu düşünülmektedir. Şekil 2.3'te Rygg tarafından önerilen bu mekanik attan esinlenilerek yapılan bir çizim görülmektedir.



Şekil 2.3. Rygg tarafından 1893 yılında patenti alınmış mekanik at [26]

1940'lı yıllara gelindiğinde araştırmacılar, yürüyen robotların uygulama alanları üzerine araştırmalara yönelmişlerdir. İlk olarak Birleşik Krallık olmak üzere birçok devlet, savaş araçları ve uzay keşifleri gibi birçok değişik alanda, yürüyen makinelerin kullanılabileceğini öngörmüşlerdir. Dikkate alınabilecek ilk ciddi yürüyen robot, bacakları bağımsız olarak hareket edebilecek bir yapıda, (1940 Birleşik Krallık'ta) geliştirilmiştir. Hutchinson ve F.S. Smith tarafından gerçekleştirilen tasarımda, robotun yatay ve dikey yönde hareket etmesini sağlamak için sadece iki adet hidrolik eyleyici bulunmaktaydı. Daha sonra robotun telli olarak bir operatör tarafından kontrol edilen 60 cm boyundaki küçültülmüş bir modelini kurmuşlardır. O zamanlarda İkinci Dünya Savaşı'nın patlak vermesi ile İngiliz Savaş Bürosu bu tür bir çalışma ile ilgilenemez olmuş ve sonuçta bu çalışmaları da durdurmuştur.

Son 25 yılda yapılan teorik araştırmalarda NASA ve Birleşik Devletler ordusunun destekleri önemli bir rol oynamıştır. Birleşik Devletler TARDEC'te çalışan Polonyalı mühendis M.G. Bekker'in yaptığı çalışmalar sayesinde, 1962 yılında General Electric Şirketi ile birlikte GE yürüyen kamyon geliştirilmiştir. Üç metrelik boyu ile 1400 kg ağırlığa sahip yürüyen kamyon, 90 beygirlik bir gaz motoru ile hareket ettirilmekteydi. 12 serbestlik derecesine sahip makinede, kontrollerin tamamı bir operatör tarafından pedallar vasıtası ile gerçekleştiriliyordu [26]. Şekil 2.4'te General Motors tarafından 1962 yılında üretilen yürüyen kamyona ait bir resim görülmektedir.



Şekil 2.4. General Motors firması tarafından yapılan yürüyen kamyon [27]

2005 yılına gelindiğinde teknolojik imkânların artması ile birlikte özellikle güvenlik için kullanılan bomba imha sistemlerinde yürüyen robotlar kullanılmaya başlanmıştır. Bunun yanında mayınlı arazilerde robotun yerle temas alanının az olması, hareket ettiği çevrede robotun mayına basma ihtimalini azaltmaktadır. Bu sebepten dolayı mayın temizleme işlemlerinde kullanılmak üzere SILO6 gibi birçok robot tasarlanmıştır [18]. Boston Dynamics firması, 2008 yılında Bigdog [1] adında askeri operasyonlarda mühimmat ve teçhizat taşıma işleminde kullanılan dört bacaklı yürüyen bir robot geliştirmiştir. Amerikan ordu envanterinde Bigdog robotunun bulunduğu bilinmektedir. Şekil 2.5'te Boston Dynamics firması tarafından üretilen bacaklı mobil robota ait bir resim görülmektedir.



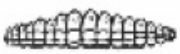
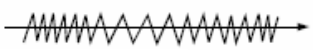
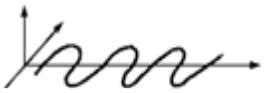
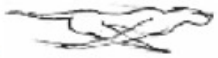
Şekil 2.5. Boston Dynamics firması tarafından yapılan Bigdog robotu [28]

Yürüyen robotlar alanında bugüne kadar, bunlara benzer birçok tasarım ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Günümüzde yapılan çalışmalar ise daha çok, robotun dengesinin kendisi tarafından sağlandığı, güç tüketimini optimize etmek adına hassas dinamik kontrol sistemlerinin kullanıldığı yapılara yönelmiştir.

2.3. Doğada Görülen Hareket Sistemleri

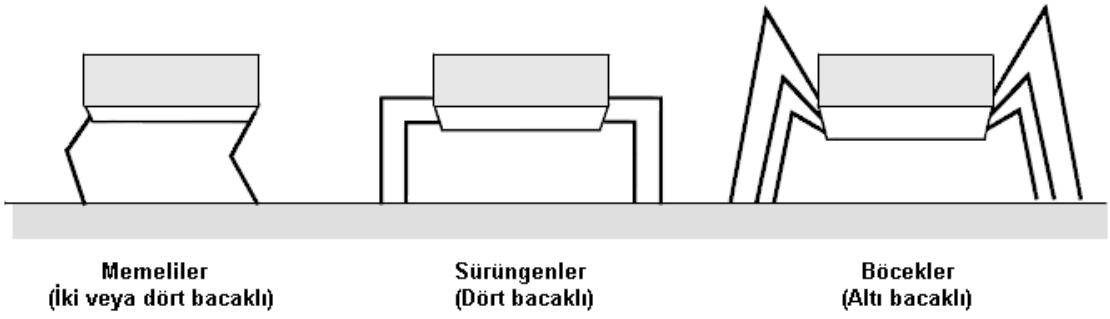
Günümüzde yaşanan teknolojik gelişmelerin birçoğu doğadan esinlenerek yapılan çalışmaların bir sonucudur. Uçak tasarımı konusunda bile araştırmacılar, kuşların aerodinamik yapılarını incelemiş daha sonra yapılan kanat tasarımlarında bu minvalde değişikliklere gitmişlerdir. Doğada bulunan canlılar , hareketlerini verimli bir şekilde gerçekleştirmeye imkan tanıyan, hareket sistemlerine sahiptirler. Bu hareket sistemleri karada, denizde ve havada hareket eden sistemler olmak üzere üç gruba ayrılabilmektedirler. Tablo 2.2'de karada yaşayan canlılarda görülen hareket, tipleri, harekete gösterilen direnç ve hareketin temel kinematiğine ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.2. Karada yaşayan canlılardaki hareket sistemleri [29].

Hareket tipi	Harekete gösterilen direnç	Hareketin temel kinematiği
Sürünme 	Sürtünme kuvvetleri	 Eksenel titreşim
Kayma 	Sürtünme kuvvetleri	 Yönlü titreşim
Koşma 	Kinetik enerji kaybı	Çok uzuvlu sarkaç 
Zıplama 	Kinetik enerji kaybı	Çok uzuvlu sarkaç 
Yürüme 	Yerçekimi kuvvetleri	Çokgenin yuvarlanması 

Karada yaşıyan canlıların hareketleri beş grup altında toplanılabilmektedir. Bunlardan birincisi sürünme hareketidir. Buna örnek olarak solucan veya salyangozların hareketi verilebilir. Hareket, vücudun tamamı yerle temas halindeyken vücudun eksenel olarak baştan sona titreşimi ile gerçekleştirilir. Bir diğer karasal hareket sistemi ise yılanların kullandığı hareket biçimi olan kaymadır. Bu hareket şeklinde hayvanın vücudu tamamen yerle temas halindedir. Gövde yönlü bir şekilde konumlandığından dolayı, yapılan küçük hareketler yılanın tamamının doğrusal yönde ilerlemesini sağlamaktadır. Diğer hareket sistemleri ise bacaklı canlılarda görülen koşma, zıplama ve yürüme hareketleridir.

Karada hareket eden canlılardaki bir diğer önemli farklılık da, canlılarda bulunan bacakların sayısı ve bu bacakların canlılar üzerinde nasıl konumlandığıdır. Karada hareket eden canlılar bacak sayılarına veya bacakların gövde üzerindeki konumlanmasına göre değişik şekillerde sınıflandırılabilmektedirler. Şekil 2.6'da bacak sayılarına göre doğada bulunan canlıların sınıflandırılması görülmektedir.

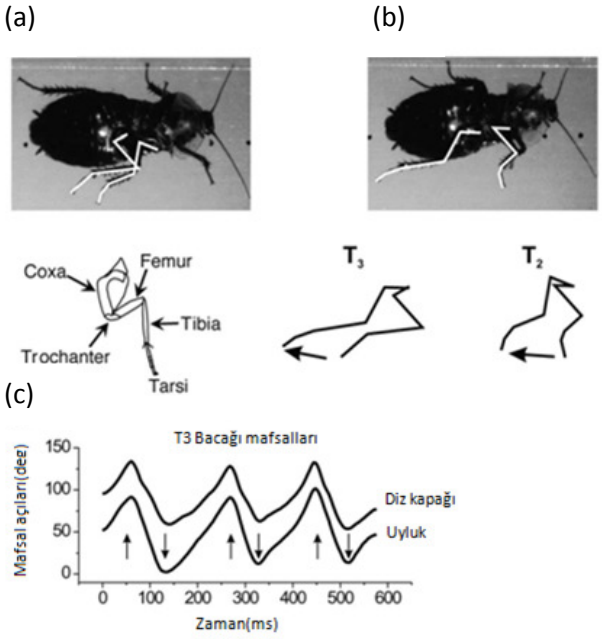


Şekil 2.6. Bacak sayılarına göre doğada bulunan canlıların sınıflandırılması [29].

Doğada bulunan canlılar arasında memeliler iki veya dört bacak sayısına sahip olabilmektedirler. Memeli canlılarda bacaklar gövdenin altında olacak şeklide gövdeye bağlanmaktadır. Bu konfigürasyon sayesinde memeli canlılar hızlı hareket edebilme özelliği kazanmaktadırlar. Buna karşın hareket esnasında, dengeyi korumak için yere temas eden ayakların oluşturmuş olduğu alanın içinde kalması gereken ağırlık merkezinin, taban alanının dışına çıkarak canlının dengesinin bozulma ihtimali, diğer konfigürasyonlara oranla daha fazla olmaktadır.

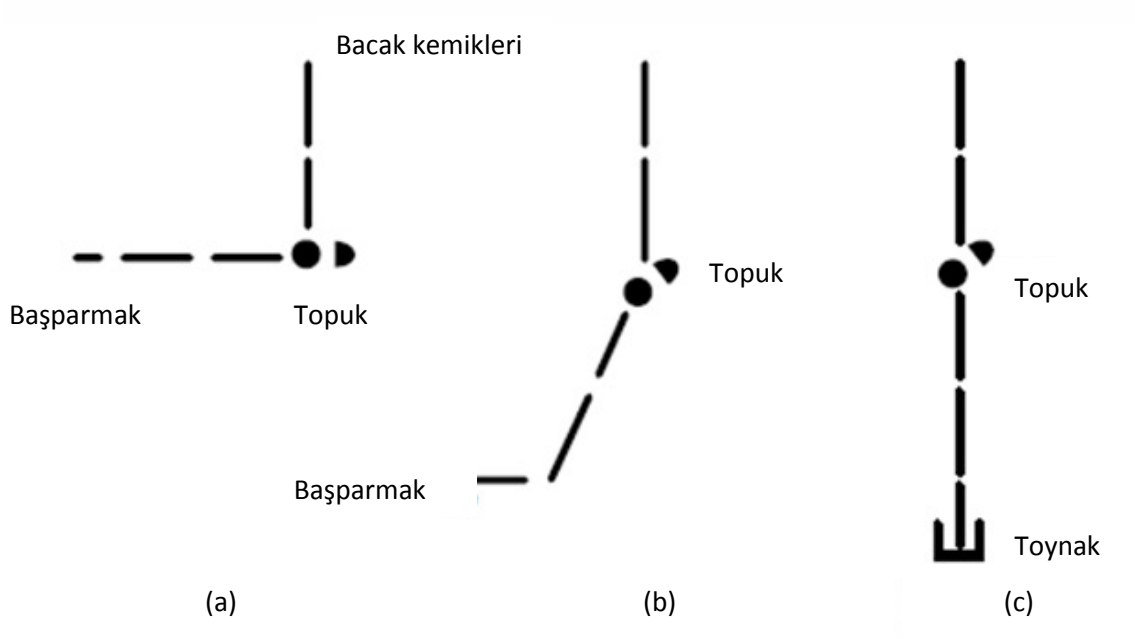
Bunun yanında diğer konfigürasyonlara göre zemin ile gövdenin arasında daha fazla mesafenin olması, sıcakkanlı olan memelilerin yerden gelecek sıcak ya da soğuğa karşı kolayca korunabilmelerini sağlamaktadır. Sürüngenlerde bacak sayısı dört olarak görülmektedir. Bacakların gövde ile olan bağlantısı, memeli canlılardan farklı olarak gövdenin yan tarafından başlamaktadır. Canlının hareketi esnasında dengesizliğinin oluşabilme ihtimalini azaltan bu konfigürasyon, böceklerde de görülmektedir. Sürüngenlerden farklı olarak böceklerde bacaklar gövde seviyesinden daha yukarı çıkmaktadırlar. Altı veya daha çok bacak sayısına sahip olan böcekler, gövde ağırlığının küçük olması sebebi ile dış iskelet sayesinde ağırlıklarını taşıyabilmektedirler.

Canlılarda görülen bacak yapısı genel olarak beş uzuvdan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi COXA olarak isimlendirilen bacağın tamamının gövdeye bağlandığı uzuvdur. Gövde ile bacak arasında bağlantı sağlayan, uyluk kemiği olarak da bilinen TROCHANTER bulunmaktadır. Uyluk kemiği ile diz kapağı arasında kalan bacağın üst kısmı FEMUR diz kapağı ile ayağın alt kısmı arasında kalan bölge TIBIA olarak adlandırılır. Ayağın yerle temas ettiği en alt kısmı ise TARSI olarak adlandırılır. Şekil 2.7 (a)'da bir böceğe ait resim üzerinde bacağın parçaları gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Böcek bacağında hareket (a) Bacağın parçaları,
(b) Böceğin yürümesi, (c) Tork dağılımı [30].

Canlıları bacak yapılarına göre sınıflandırmadaki bir diğer yaklaşım da bacağın yer ile temas eden son uzvunun diğer uzuvlara göre konumlanmasıdır. Bu sınıflandırmaya göre canlılar üç gruba ayrılabilmektedirler. Bunlardan birincisi düztaban olarak adlandırdığımız bacak konfigürasyonudur. Bu konfigürasyonda yürüme esnasında TARSI uzvunun tamamı yerle temas halindedir. Başparmak ile topuk noktasının ikisinin de yere temas ettiği bu konfigürasyona örnek olarak, yürüme halindeki insan ayağının yapısı verilebilir. Şekil 2.8 (a)'da düztaban (plantigrade) konfigürasyonu görülmektedir.



Şekil 2.8. Bacak konfigürasyonları, (a) Düztaban, (b) Kedi yürüyüşü, (c) Balerin yürüyüşü [31].

Bir diğer bacak konfigürasyonu şekli de, şekil 2.8. (b)'de görülen parmak ucunda (digitigrade) yürüme biçimidir. Bu konfigürasyona sahip bir canlı yapıya örnek olarak kedilerin ayak yapısı gösterilebilir. Bu konfigürasyonda TARSI uzvu ile TIBIA uzvunun birbirlerine göre duruş pozisyonları arasında bir açı vardır. Bu durumda yer ile temas eden sadece başparmaktır. Topuk bu konfigürasyonda yere temas etmemektedir. Bu yapıya başka bir örnek olarak insanın koşma durumundaki ayak konfigürasyonu verilebilir. Koşma durumunda insan ayağında, parmak uçları yer ile temas ederken, topuk yer ile temas etmemektedir. Koşma hızı arttıkça yer ile arasında mesafe bulunan topuk noktası daha yukarılara çıkmaktadır.

Balerin duruşu (unguligrade) olarak bilinen ayak konfigürasyonunda ise topuk, başparmak ve üst kemikler aynı düzlemde bulunmaktadır. Balerinlerin yapmış olduğu en zor hareketlerden biri olan bu duruş şekli canlılar arasında geyikteki gibi toynağa sahip hayvanlar arasında görülmektedir. Bu duruşa ait konfigürasyon Şekil 2.8. (c)'de görülmektedir.

3. BÖLÜM

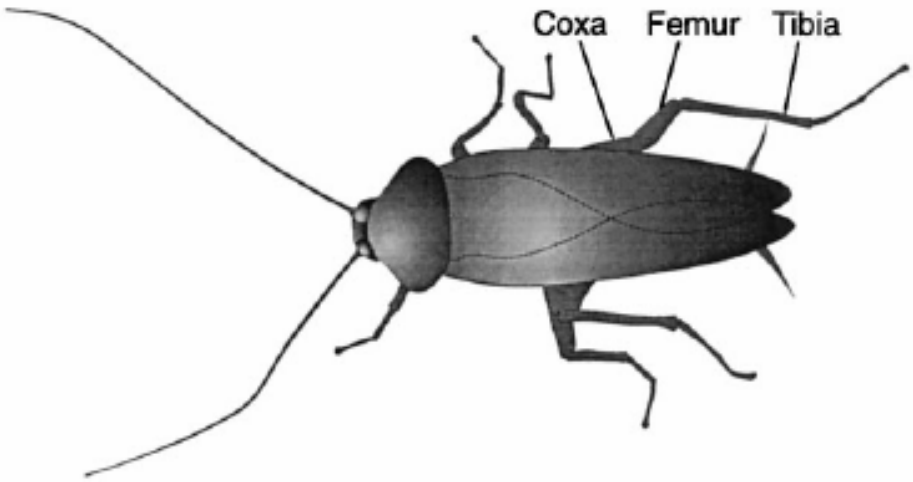
ABYMR TASARIMI

3.1. Seçim Parametreleri

Mobil robot tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi, robotun hareketini etkin bir şekilde gerçekleştirebilmesine imkân sağlayabilecek bir sistem tasarımı ortaya koyabilmektir. Bu bağlamda uzuv sayısı, ağırlık, bacak tasarımı gibi birçok parametre birbirleriyle uygun olarak seçilmek zorundadır. Yürüyen robotlarda bacak sayısının yüksek seçilmesi sisteme kararlı ve dengeli bir biçimde hareket etme kabiliyeti sağlarken, buna karşın robot ağırlığını da artırmaktadır. Robot ağırlığının artması durumunda, sistemi hareket ettirecek elemanların tahriki için gereken güç miktarı ağırlıkla doğru orantılı olarak artmaktadır. Güç gereksinimindeki bu artış, gezginlik özelliğine sahip bacaklı mobil robot üzerinde problemlere yol açabilmektedir.

Yürüyen mobil robotta kullanılacak olan bacak yapısında, uzuv sayısının fazla seçilmesi robotun hareket esnekliğini artırırken, zaten oldukça zor olan yürüyen robot dinamiği ve kontrolü hesaplamalarında önemli bir problem teşkil edecektir. Bu yüzden yapılacak olan bacak tasarımında, düşük uzuv sayısı ve serbestlik derecesine sahip fakat yüksek performans gösterebilecek bir yapı tercih edilmelidir. Özellikle dengenin oldukça önem arz ettiği yürüyen robot tasarımında dengesizlik ihtimalini azaltmak için, böceklerde görülen altı bacaklı konfigürasyon tercih edilecektir.

Bacakların gövde üzerinde konumlandırılmasında, bacakların her hangi birinde arıza olabilme ihtimaline karşın simetrik bir yaklaşım izlenecektir. Her bir bacak için gerekli olan mafsal sayısı, robotun hareketini üç boyutlu uzayda herhangi bir yönde gerçekleştirebilmesini sağlayabilmek için üç olarak seçilecektir. Şekil 3.1'de görülen hamamböceği bacağı yapısındaki COXA, FEMUR, TIBIA uzuvları esas alınarak, her bir bacakta kullanılacak olan uzuv sayısı üç olarak tercih edilecektir.



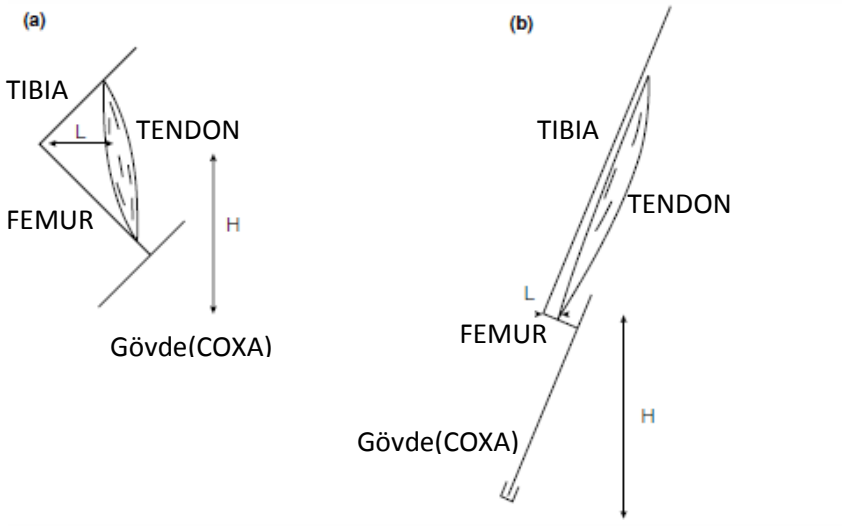
Şekil 3.1. Hamamböceğindeki uzuvlar [4].

Robot bacağında kullanılacak uzuvların boyutlandırılmasında temelde iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan birincisi doğadaki canlıları inceleyerek bacağın hızı ve bacağın sağlayabileceği kuvvetin arasındaki ilişkiye benzer bir şekilde tercih yapmaktır. İkinci yaklaşımda ise yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında güç ihtiyacının daha az olacağı konfigürasyonlar tercih edilmeye çalışılır.

Tahrikin TENDON tarafından gerçekleştirildiği bir mafsal kas sisteminde kolun en uç noktası ile TENDON'un bağlı olduğu nokta mafsal noktası etrafında dönen bir manivela sistemi gibi düşünebilir [31]. Birinci derece bir manivela sistemi için destek noktası etrafında moment eşitliği yazılacak olursa (3.1) denkleminde görülen eşitlik elde edilmiş olacaktır.

$$F_{in} x L_{in} = F_o x L_o \tag{3.1}$$

Bu eşitlikte görülen giriş uzvu L_{in} ve çıkış uzvu L_o'ın boylarının oranı giriş kuvveti ile çıkış kuvveti arasındaki orana eşittir. Canlılar arasından örnek vermek gerekirse köstebeğin ön bacaklarının oldukça kısa olduğu görülecektir. Şekil 3.2 (a)'da görülen, köstebeğin koluna ait kas mafsal sisteminde TENDON'un bağlı olduğu nokta ile mafsal noktası arasındaki mesafe bacak uzunluğundan daha fazladır. Bu anatomik özellik sayesinde TENDON'da kasılma sonucu oluşan küçük bir kuvvete karşın bacağın en uç noktasında daha fazla kuvvet oluşmaktadır. Fakat bu durumda bacağın uç noktasının hareket hızı TENDON'un kasılma hızından daha yavaş olacaktır.



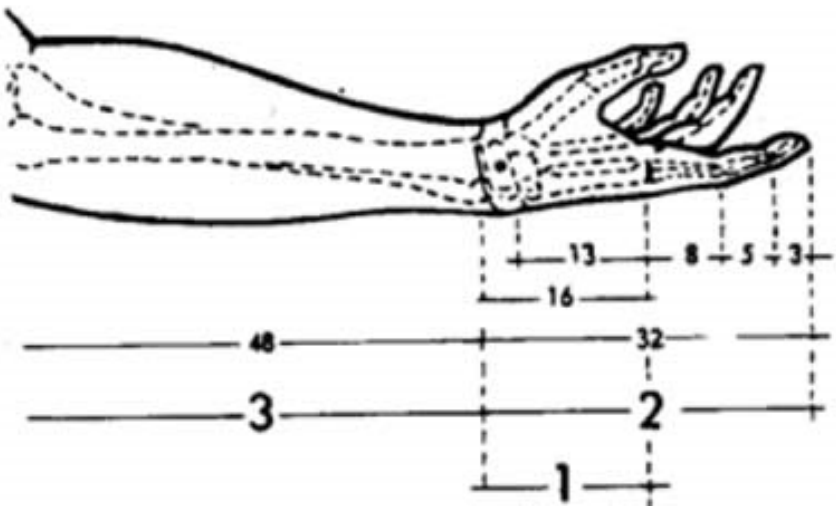
Şekil 3.2. Hayvanlarda bacak yapısı (a) Köstebek ön bacağı,
(b) At bacağı [31].

Bilindiği üzere köstebekler kısa fakat güçlü ön bacaklara sahiptirler. Daha uzun bacak boyuna sahip canlılara örnek olarak atları verebiliriz. Şekil 3.2. (b)'de at bacağına ait bir kas sistemi görülmektedir. Bu kas sisteminde TIBIA uzvunun boyunun, FEMUR uzvunun boyuna oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Bu oranın büyük olması bacağın uç noktasının çok hızlı hareket etmesine imkân sağlarken, aktarılması gereken kuvvetin, kasta oluşan kuvvetten daha az olmasına sebebiyet vermektedir. Bu özellikler de atlara hızlı bir hareket kabiliyeti sağlamaktadır.

Canlılarda hareketi sağlayan kaslardaki tendonların yerine, tasarlanacak robotta motorlar kullanılacaktır. Motorlar tarafından tahrik edilen mafsalların oluşturacağı torklar, tendonlarda olduğu gibi bacağı hareket ettirebilecek bir kuvvet oluşturacaktır. Yürüyen mobil robotlarda bacağın hareket hızının düşük olmasının yaratacağı problem ile hareketi sağlayacak olan kuvvetin düşüklüğü durumunda oluşabilecek problemler arasında karşılaştırma yapılacak olursa, düşük kuvvet probleminin daha önemli olduğu görülecektir.

Ayrıca robotun kararlı ve doğru bir şekilde hareket edebilmesi için, kuvvet ihtiyacı oldukça önem teşkil etmektedir. Bundan dolayı robot tasarımı yapılırken, Şekil 3.2. (a)'da ki köstebek bacağı yapısında olduğu gibi, uzuv boyları birbirine yakın seçilmeye çalışılacaktır.

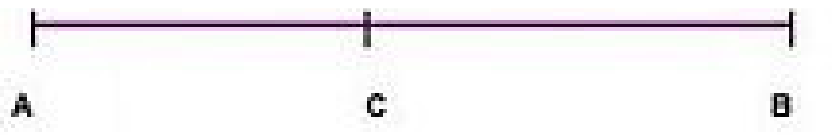
Kuvvet ve hız aktarımı açısından oldukça önemli olan TIBIA ile FEMUR arasındaki oranın belirlenmesi için tarihte uygulanan metotlardan en ilginci şüphesiz altın orandır. Doğada bulunan canlılar üzerinde birçok parametre arasındaki ilişki altın oran ile ifade edilebilmektedir. Şekil 3.3'te görülen resimde insana ait bir elde, uzuvların boyları arasındaki ilişkinin altın oranla açıklanabileceği gösterilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.3. İnsan kolundaki altın oran [32].

Bir doğru parçasının (AB) altın oran'a uygun biçimde iki parçaya bölünmesi gerektiğinde, bu doğru öyle bir noktadan (C) bölünmelidir ki; küçük parçanın (AC) büyük parçaya (CB) oranı, büyük parçanın (CB) bütün doğruya (AB) oranına eşit olsun. Bahsedilen şartı sağlayan altın oranın belirleneceği eşitlik denklem (3.2)'de gösterilmiştir. Şekil 3.4'te bahsedilen durumun görülebileceği bir doğru parçası görülmektedir.

$$1 + \frac{1}{X} = X \quad X = 1.618 \tag{3.2}$$

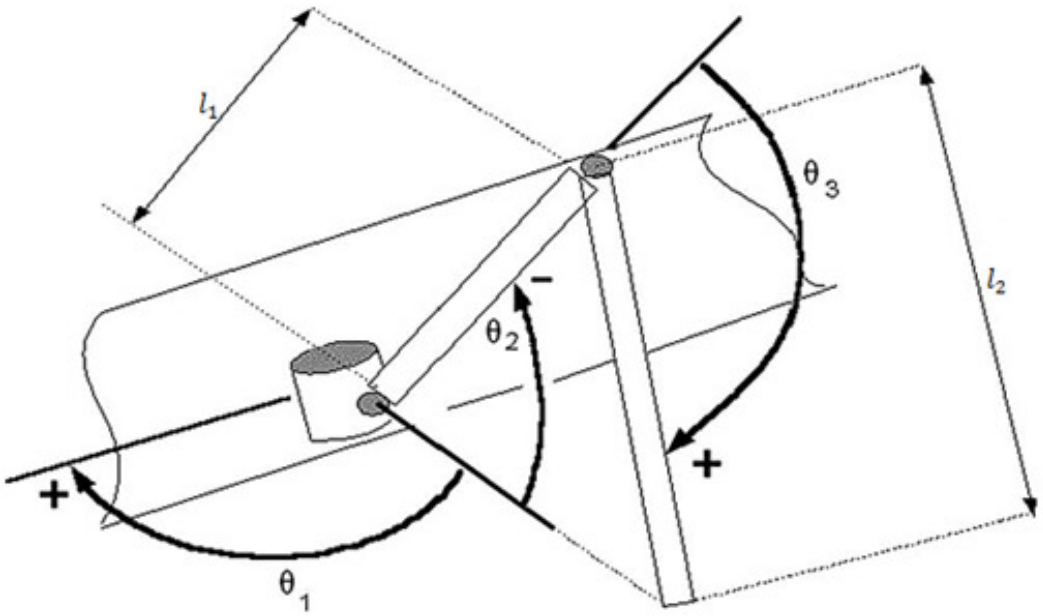


Şekil 3.4. Altın oranın açıklanabileceği doğru parçası.

TIBIA ile FEMUR uzuvları arasındaki oranın belirlenmesinde deneysel sonuçlardan da faydalanılabilmektedir. Zienlinska ve Heng [5] yapmış oldukları çalışmada birçok bacak konfigürasyonu ve uzuv parametresinin denenebileceği bir robot tasarlamışlardır. Motorların tahriki için gereken güç tüketiminin daha düşük olmasını hedefleyen araştırmacılar, temelde üç tip bacak konfigürasyonu; böcek, sürüngen ve memeli bacak yapıları için yedi adet konfigürasyonu uzuv boyları için test etmişlerdir.

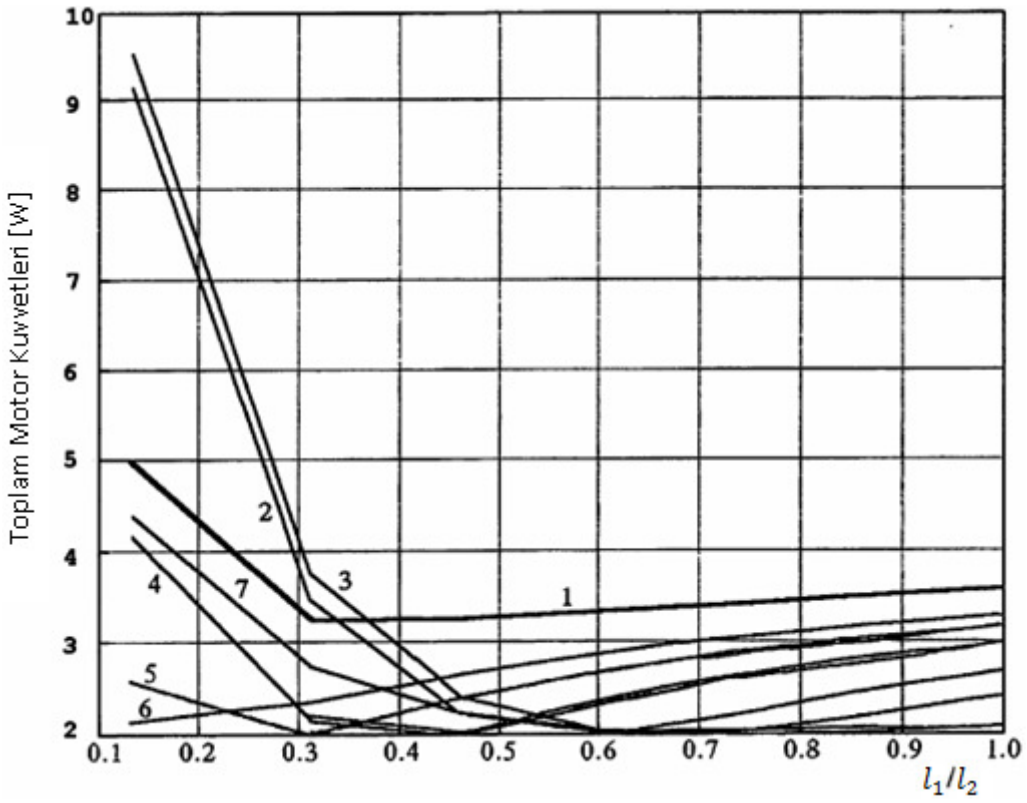
1. Konfigürasyon: θ_1= 42º, θ_2= -45 º, θ_3= 98 º (Böcek yapısı)
2. Konfigürasyon: θ_1= 42 º, θ_2= 0 º, θ_3= 90 º (Sürüngen yapısı)
3. Konfigürasyon: θ_1= 42 º, θ_2= 10 º, θ_3= 80 º (Sürüngen yapısı)
4. Konfigürasyon: θ_1= 42 º, θ_2= -10 º, θ_3= 92 º (Böcek-Sürüngen yapısı)
5. Konfigürasyon: θ_1= 42 º, θ_2= -20 º, θ_3= 94 º (Böcek yapısı)
6. Konfigürasyon: θ_1= 42 º, θ_2= 30 º, θ_3= 50 º (Sürüngen-Memeli yapısı)
7. Konfigürasyon: θ_1= 42 º, θ_2= -30 º, θ_3= 96 º (Böcek yapısı)

Yürüme esnasında destek (support) fazında bacakların duruş açıları göz önünde bulundurularak, farklı yapılar için belirlenmiş açılar, Şekil 3.5'te görülen Zielinska ve Heng'in üzerinde değişik konfigürasyonları denedikleri bacağa uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Zielinska ve Heng'in denediği konfigürasyonların uygulandığı bacak [5]

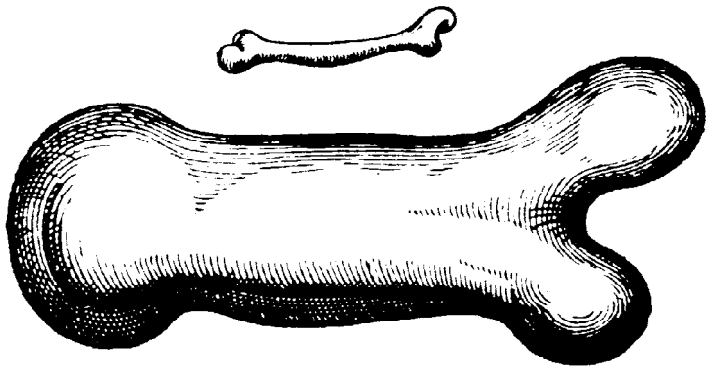
Zielinska ve Heng yaptıkları çalışmada, farklı yapılar için FEMUR, TIBIA oranının değişiminin toplam motor gücü üzerindeki etkisini grafiksel olarak göstermişlerdir. Toplam motor gücünün minimizasyonu hedef alınarak yapılacak tasarımda, bacakta bulunan uzuv boylarının belirlenmesinde bu grafiksel gösterim rehber olarak kullanılabilmektedir. Şekil 3.6'da farklı bacak konfigürasyonları için FEMUR/TIBIA oranının değişiminin toplam motor gücü üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 3.6. Bacak konfigürasyonları için FEMUR/TIBIA oranının toplam motor gücüne etkisi [5]

Tasarlayacağımız robotta belirlenecek olan en önemli parametre FEMUR/TIBIA oranıdır. Bu oran belirlenirken, bugüne kadar yapılmış çalışmalarda araştırmacıların ortaya koymuş olduğu teorik ve deneysel sonuçlar göz önünde bulundurularak bir tercih yapılacaktır. Tasarım esnasında bu oranın değeri altın oranın bir ile bölünmüş hali olan 0.61 değerine eşit alınacaktır. Bu sayede hem köstebek bacağının kas yapısında olduğu gibi kuvvet aktarımını artırmak için uzuv boyları birbirlerine yakın seçilmiş, hem de böcek konfigürasyonu seçilecek robotta Zielinska ve Heng'in ortaya çıkardığı deneysel sonuçlara uygun bir tercih yapılmış olacaktır.

Doğadaki canlılardan örnek alınarak bir sistem tasarımı gerçekleştirirken dikkate alınması gereken en önemli unsurlardan biri de benzeşim (similitude) yapılan sistemlerin boyutlarıdır. Şekil 3.7'de Galileo Galilei tarafından ortaya çıkarılmış benzeşim kuralına uygun çizilen iki adet kemik resmi görülmektedir.



Şekil 3.7. Galileo Galilei tarafından önerilen benzeşmeye (similitude) göre çizilen iki kemik [33]

Kare-küp yasası olarak bilinen yasada sistemin kendi ağırlığını taşıyabilecek boyutlarda tasarlanmasının gerekliliği öne çıkmaktadır. En temel mukavemet problemlerinden biri olan, eksenel yükleme durumunda kirişin boyutlandırılması problemi bu yasanın çıkış noktasıdır. Mukavemette kiriş üzerinde yatay olarak her hangi bir düzlemde görülen gerilme ağırlığın alana bölünmesi ile bulunur. Bir kiriş sisteminde kirişin çapında iki katlık bir büyütme yapılmak istense kirişin alanı karesel olarak dört kat, hacmi de kübik olarak sekiz kat artacaktır. Bu durumda benzeşimden önceki kiriş sistemi ile benzeşimden sonraki kiriş sistemi üzerinde görülen gerilim arasında iki kat fark oluşacaktır. Bu problemden dolayı malzemenin karakteristiğine göre, belki sistem kendi ağırlığını bile taşıyamayabilecektir. Bu problemi önlemek için iki çözüm mevcuttur. Bunlardan birincisi Şekil 3.7'deki orantısız kemikte de görüldüğü gibi, kiriş çapını artırmaktır. Örneğin bir sivrisineğe ait bacak sistemi altı kat büyütülmek istense sivrisineğin ağırlığı hacmin büyümesi ile birlikte otuz altı kat artacaktır. Bu durumda sistemdeki elemanların boyutları aynı oranda artırılırsa sistem kendi ağırlığını bile taşıyamayacaktır. Bu probleme getirilebilecek başka bir çözüm de robotun yapımında kullanılacak olan malzemenin mukavemetinin artırılmasıdır. Verimlilik açısından böcek yapısı tercih edilecek olan tasarımda, sistemin kendi ağırlığını taşıyabilmesi için daha mukavim malzemelerin kullanılması gerekmektedir.

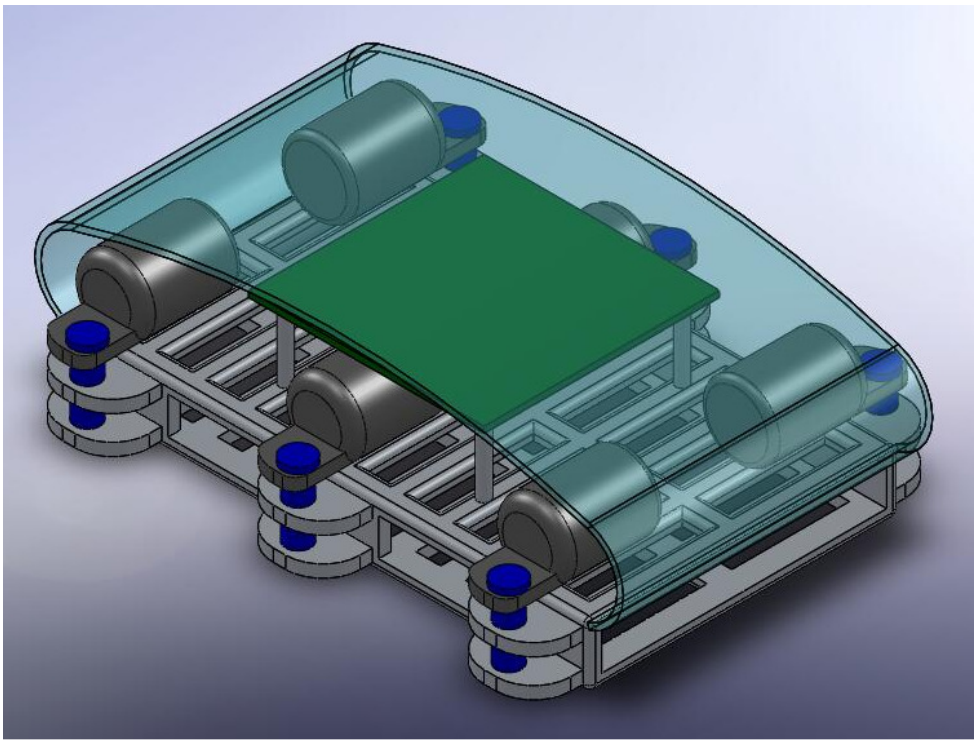
3.2. Tasarım Aşamaları

Bu bölümde yürüme özelliğine sahip altı bacaklı bir mobil robot için tasarım gerçekleştirilecektir. Yapılacak olan robot tasarımında yukarıda anlatılanlar ışığında bazı belirlemelere gidilecektir. Robotun tasarımı yapılırken, doğadaki canlılardan esinlenilerek, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi böceklerde görülen konfigürasyon tercih edilecektir. Dengenin oldukça kolay sağlanabildiği bu konfigürasyonda, gövde yapısı, bacağın iki uzvu olan TIBIA ve FEMUR uzuvlarının birleşim noktasından daha aşağıda olacaktır. Robotun tasarımında bu şekilde bir yapı kullanılarak robotun devrilme olasılığının azaltıldığı gibi, diğer konfigürasyonlara göre mafsalların tahriki için gerekli olan tork ihtiyacı da azaltılmış olacaktır [5].

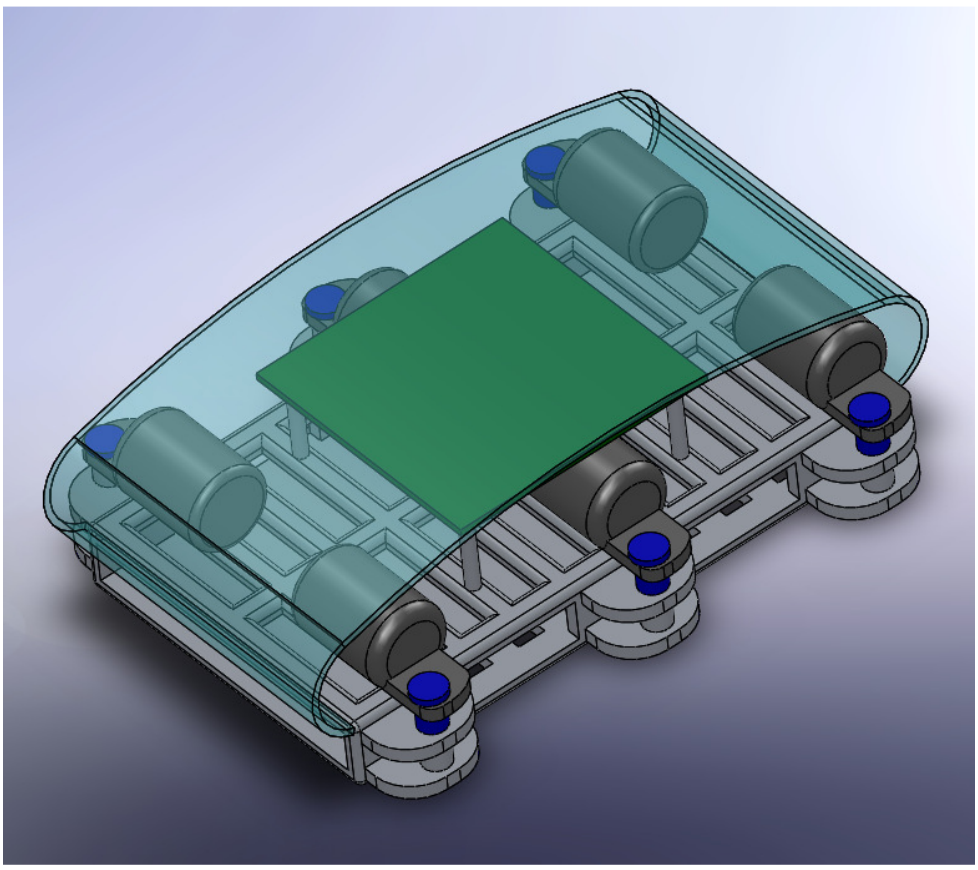
Bacak sayısı altı olan robotta, her bir bacağın istenilen hareketi kısıtlamalar olmaksızın gerçekleştirebilmesi için, bacak başına üçer serbestlik derecesi kullanılacaktır. Bu sayede değişik arazi koşulları altında çalışabilen, toplamda on sekiz serbestlik derecesine sahip robot, her bir bacağını birbirinden bağımsız olarak kontrol edebilecektir. Bacaklar hareket esnasında birbirlerinin dinamik etkilerini kompanze edebilmeleri için, özdeş olarak tasarlanacaktır. Gövde üzerinde bacakların konumlandırılması aynı sebepten dolayı simetrik olarak gerçekleştirilecektir.

Tasarlanacak olan robot gövdesinin boyutları 42 cm x 25 cm olacaktır. Bacak boyları ve pozisyonları gibi diğer tasarım parametreleri bu temel ölçüte göre belirlenecektir. Yürüyen mobil robotun gövde tasarımında hem ağırlıktan tasarruf emek için, hem de azaltılan bu ağırlıkların sağlamlığı etkilememeleri için kafes tipi bir tasarım tercih edilecektir.

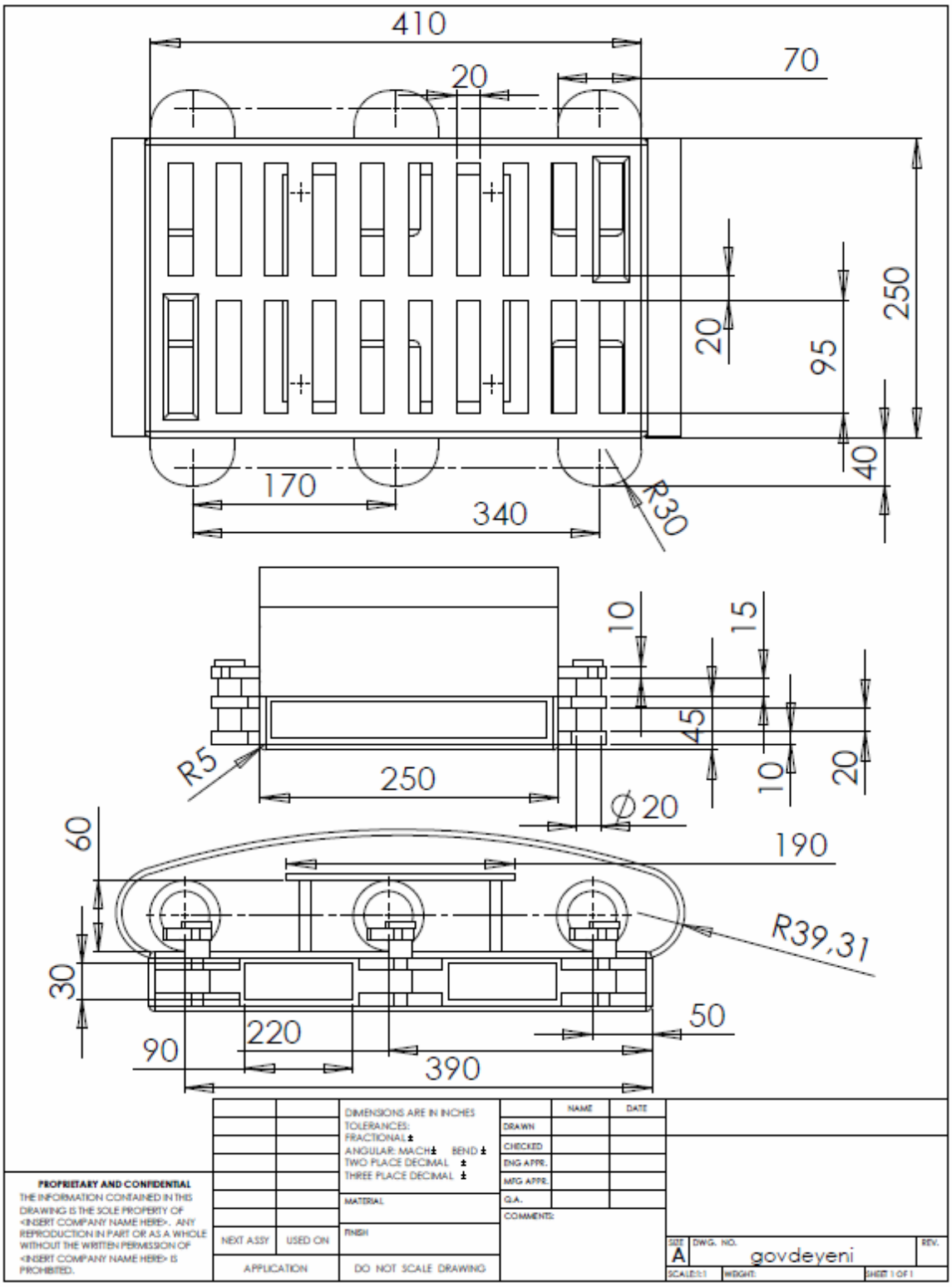
Gövde üzerine bağlanacak uzuvların tahrik edilmesinde kullanılacak olan elemanların dinamik etkilerinin de göz önünde bulundurulması amacı ile tasarımda motorlara yer verilecektir. Aynı şekilde motorların kontrolünde kullanılacak olan elektronik sistemler ve bataryalar için ağırlıkları temsilen bir kart, gövde tasarımında olacaktır. Gövde üzerinde bulunan elemanların dış etkilerden korunabilmeleri için gövde üzerinde şeffaf bir kapak yapılacaktır. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da belirtilen bu özelliklere sahip bir gövde tasarımı görülmektedir. Bu tasarıma ait teknik resim Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.8. Gövde tasarımının izometrik görünüşü.

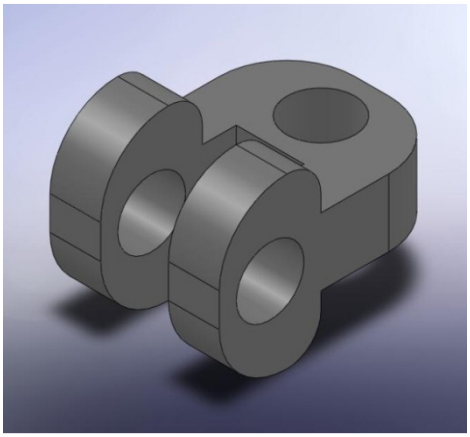


Şekil 3.9. Gövde tasarımının profil görünüşü.

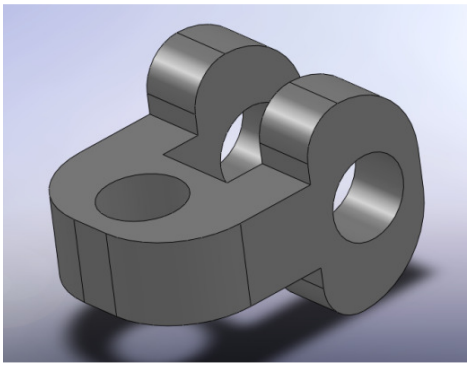


Şekil 3.10. Gövde tasarımının teknik resmi.

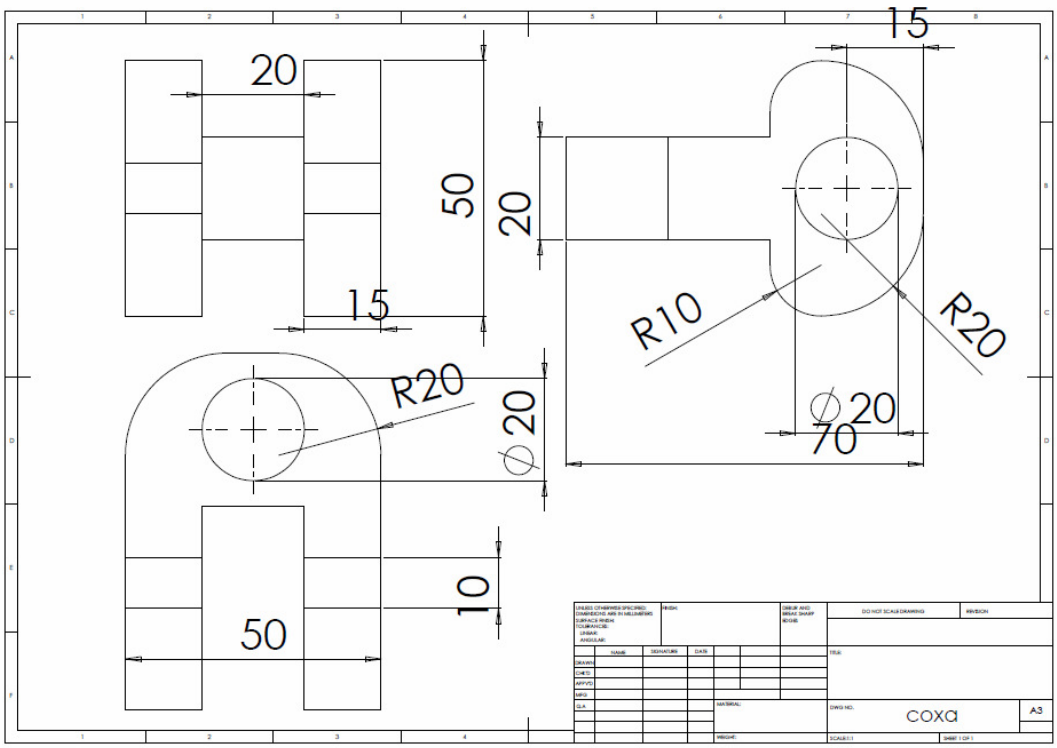
Şekil 3.1'de görülen böcek bacağı anatomisindeki COXA uzvu, gövde ile bacağın tamamı arasındaki hareket aktarımını sağlayacak olan kalça kemiği uzvudur. Gövde ile bacak arasında bağlantı sağlayan bu uzuv, bacağın hareket ekseni ile gövdenin hareket ekseni arasındaki açıyı kompanze edebilmek için dönme eksenleri arasında 90 derecelik bir fark oluşturacak şekilde tasarlanacaktır. Bahsedilen özelliklere sahip bir yapı gerçekleştirmek amacı ile Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de görülen COXA uzvu tasarlanmıştır. Bacağın tamamını döndürecek olan bu uzvun tahriki için uygulanması gereken tork, diğer mafsal noktalarına uygulanması gereken tork değerinden daha büyük olacaktır. Yüksek tork sağlayabilen daha ağır bir motorun dönen bacak üzerinde bir yük oluşturmaması için, bu uzvun tahrikinde gövdede bulunan bir motor kullanılacaktır. Bu yüzden bu eleman sadece taşıyıcı bir vazife görecektir. Şekil 3.13'de COXA uzvunun tasarımına ait teknik resmi görülmektedir.



Şekil 3.11. COXA uzvu tasarımının izometrik görünüşü.



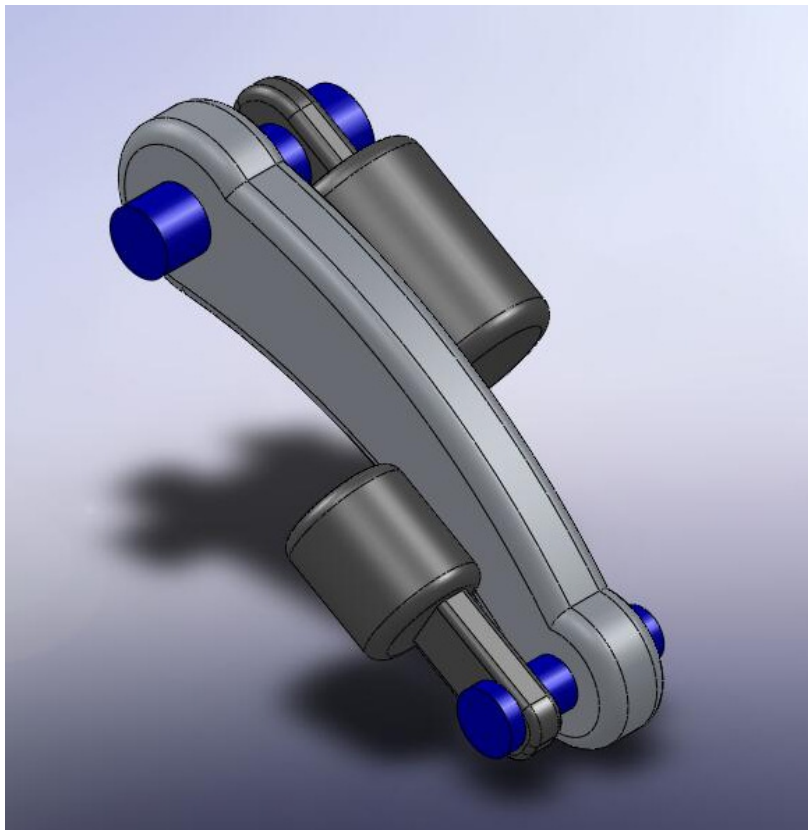
Şekil 3.12. COXA uzvu tasarımının profil görünüşü.



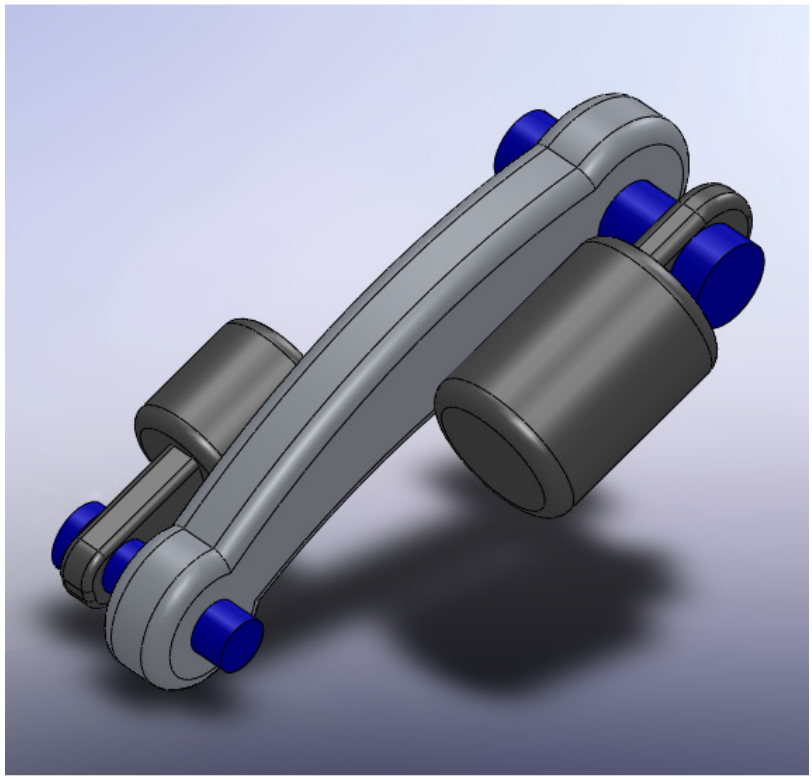
Şekil 3.13. COXA uzvu tasarımının teknik resmi.

Bacak anatomisinde FEMUR ve TIBIA uzuvlarının toplamının büyük olması bacağın bir adımda ulaşabileceği alan kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca adım boyunun büyük olması robotun ulaşabileceği hız miktarını da yükseltmektedir. Fakat yürüme sırasında adım boyunun büyük olması, yürüme esnasında hareketli bacağın destek fazındaki bacağa daha çok yaklaşmasına sebebiyet verecektir. Bu durumda özellikle yumuşak yüzeyli arazilerde gövdenin ağırlığının etkisi belli bölgelerde gereğinden fazla basınç oluşturacaktır [5]. Bu şekilde oluşabilecek problemlerin engellenebilmesi için tasarımda FEMUR ve TIBIA uzuv boylarının toplamı gövde boyundan daha küçük seçilecektir.

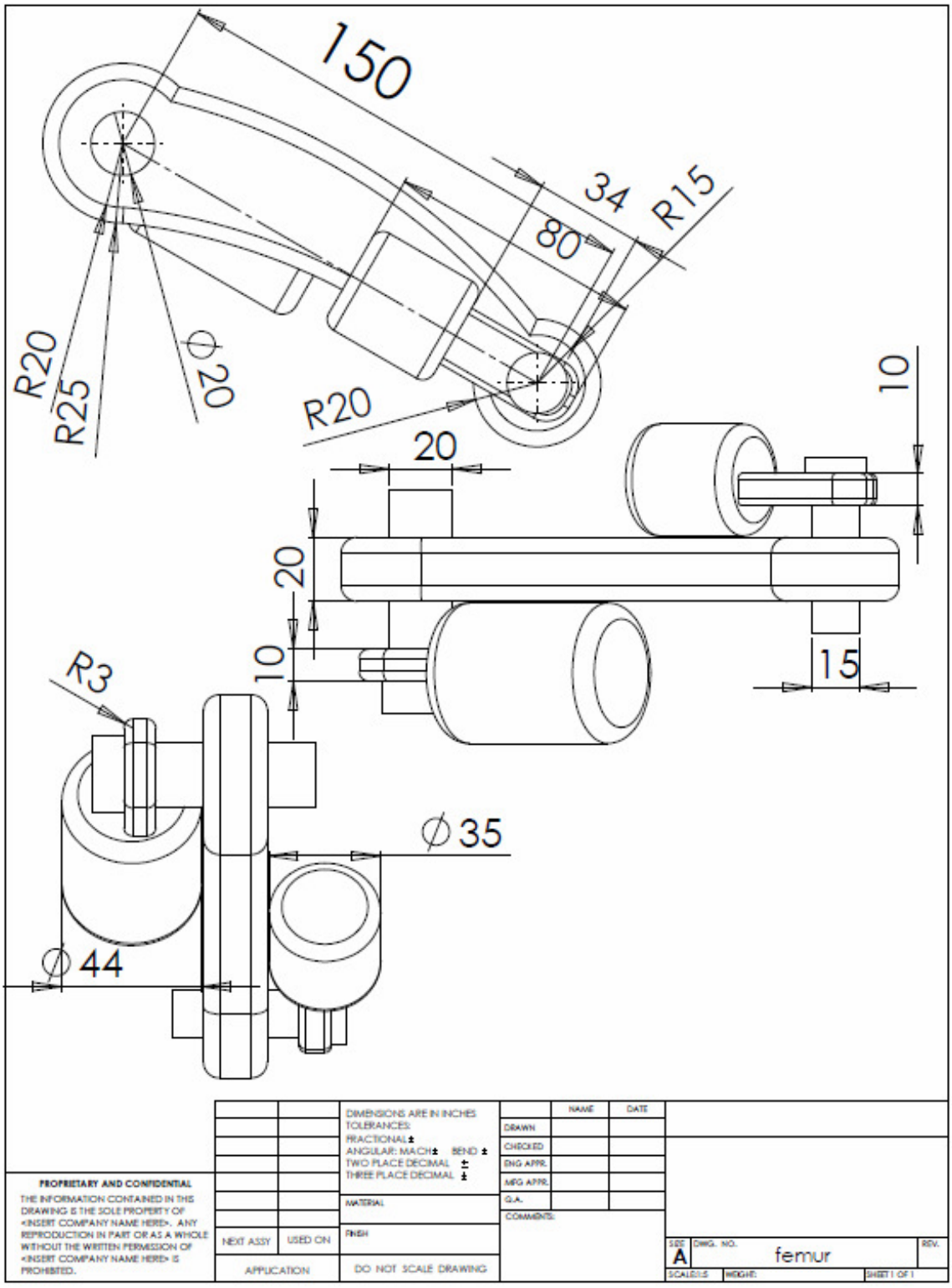
Daha önce seçim parametreleri bölümünde FEMUR ve TIBIA uzuv boylarının oranı 0.61 olarak belirlenmişti. Şekil 3.10'da görülen gövde tasarımına ait teknik resim çiziminde gövde boyu 420 mm olarak görülmektedir. Bu veriler ışığında FEMUR uzvunun uzunluğunun maksimum 160 mm olması, TIBIA uzvunun uzunluğunun ise maksimum 260 mm olması gerekmektedir. FEMUR uzvu için yapılan tasarım izometrik ve profil resimleri Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te görülmektedir. Bu uzvun tasarımına ait teknik resim Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.14. FEMUR uzvu tasarımının izometrik görünüşü.



Şekil 3.15. FEMUR uzvu tasarımının profil görünüşü.



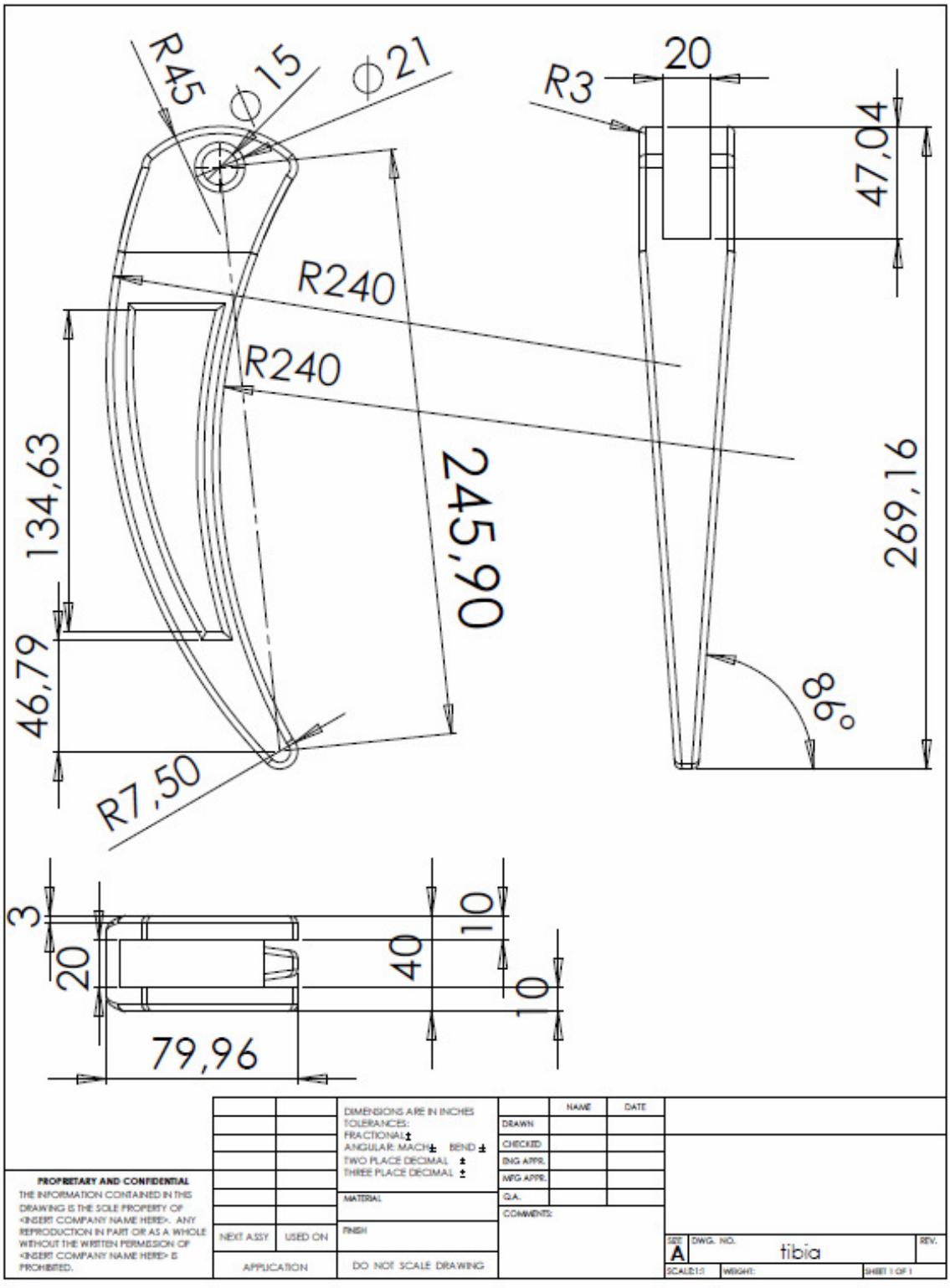
Şekil 3.16. FEMUR uzvu tasarımının teknik resmi.

Gövde boyuna ve uzuvlar arası orana göre belirlenen FEMUR uzvunun boyu 150 mm olarak seçilmiştir. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi uzuv boyu, COXA uzvu ile bağlantı sağlayan yataklamanın merkezi ile TIBIA uzvu ile bağlantı sağlayan yataklamanın merkezi arasındaki mesafe olarak belirlenmiştir.

FEMUR uzvu tasarlanırken, robot hareketinde beklenmeyen ani yüklere parçanın daha çok mukavemet gösterebilmesi için kavisli bir yapı tercih edilmiştir. FEMUR ve TIBIA uzuvlarının tahriki için kullanılacak olan motorlar FEMUR uzvu üzerine simetrik olarak yerleştirilmiştir. Bunun en büyük katkısı, motorların karşılıklı olarak yerleştirilmesi halinde atalet kuvvetlerinin eşdeğerinin etki edeceği nokta olan parçanın ağırlık merkezinin yerinin, mafsallar arasındaki doğru üzerinde kalmasını sağlamasıdır. Bu sayede eksen kaçıklığından kaynaklanan dinamik olumsuzluklar daha tasarım aşamasındayken engellenmiş olacaktır. TIBIA uzvu için yapılan tasarıma ait izometrik görünüm ve teknik resim Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de görülmektedir.



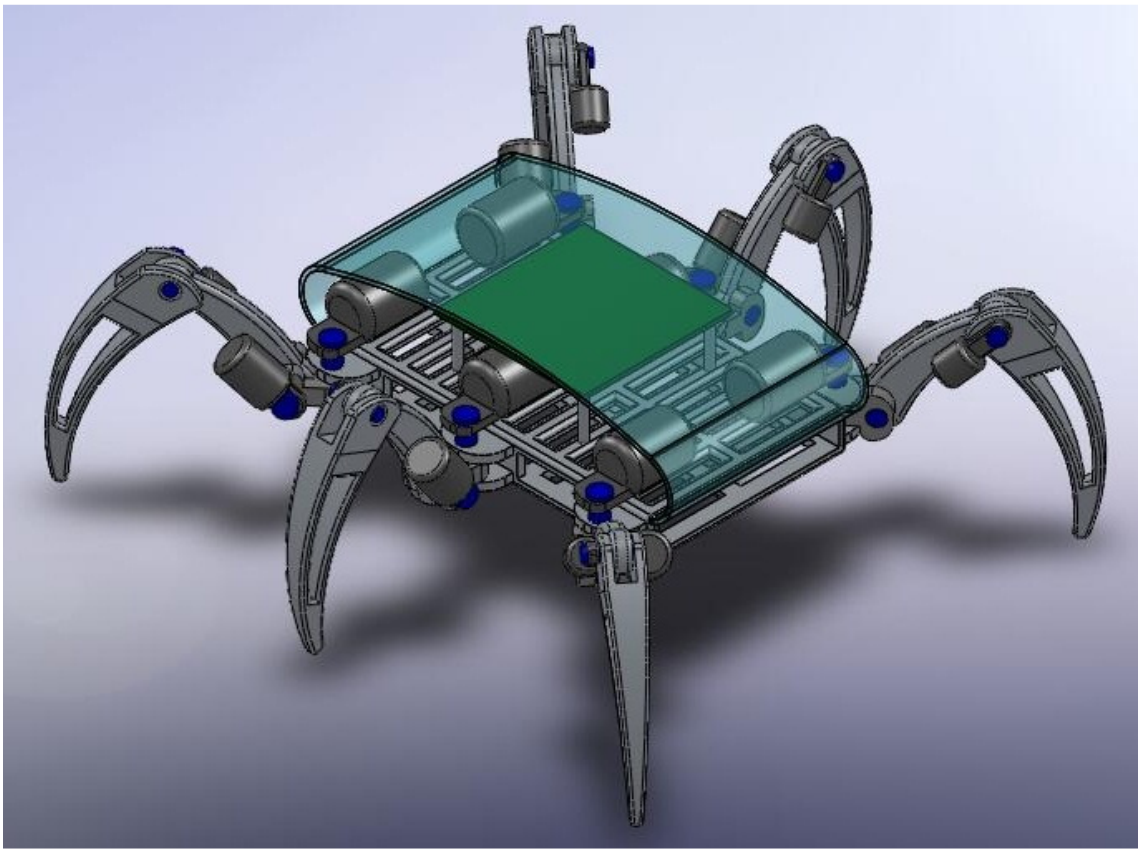
Şekil 3.17. TIBIA uzvu tasarımının izometrik görünüşü.



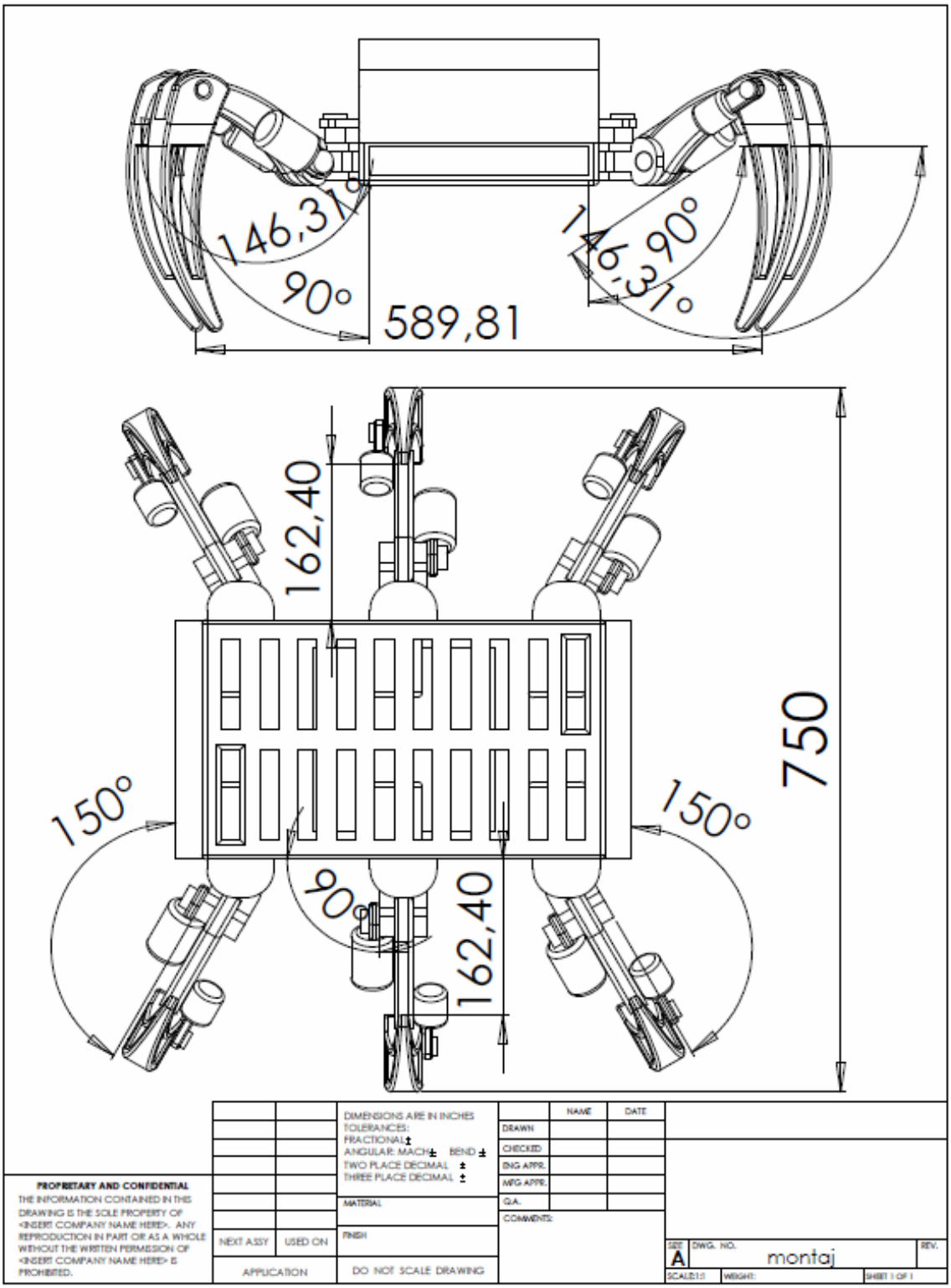
Şekil 3.18. TIBIA uzvu tasarımının teknik resmi.

TIBIA uzvu tasarlanırken uzuv boyu, FEMUR uzvu ile bağlantı sağlayan yatak noktası ile yer ile teması sağlayan çemberin merkez noktası arasındaki mesafe olarak belirlenmiştir. FEMUR uzvunda olduğu gibi bu uzvun da ani yükler altında deformasyona uğramaması için tasarımda kavisli bir yapı tercih edilmiştir. Yer ile temas eden son uzuv olan bu parçanın tasarımında hem dinamik olumsuzluklardan kaçınmak hem de motor tarafından uygulanması gereken tork değerini azaltmak için, uzvun sağlamlığını fazla etkilemeyecek şekilde bir kütle boşaltması yapılmıştır.

Sonuç olarak robot tasarımı için gerekli olan tüm belirlemeler yapılmış ve altı bacağa sahip bir robot montajı gerçekleştirilmiştir. Her bir bacak için daha önceden tasarımı yapılmış olan elemanlar, özdeş olarak kullanılarak robot montajı gerçekleştirilmiştir. Yapılmış olan montaj resmi ve bu montaj işleminin sonunda oluşan yapıya ait teknik resim Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de görülmektedir.



Şekil 3.19. Robotun montaj sonrası halinin izometrik görünüşü.



Şekil 3.20. Robotun montaj sonrası halinin teknik resmi.

Şekil 3.20 de görüldüğü gibi tasarlanmış olan robot 750mm x 590mm bir baskı alanına sahiptir. Tasarım 1060 alüminyum alaşım malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan robot toplam 6.87 dm^3 hacme sahiptir. Toplam 18.5 kg ağırlığa sahip robotta gövde ağırlığı 9.2 kg, her bir bacağın ağırlığı ise 1.55 kg dır. Tasarım yapılırken motor ve kapak gibi elemanlar da göz önünde bulundurulmuş, gerçek elemanların ağırlığına yakın değerler seçilmeye çalışılmıştır.

4. BÖLÜM

ABYMR'NİN DİNAMİK ANALİZİ

4.1. Dinamik Parametreler

Yürüyen mobil robotlar konusunda araştırma yapılan en önemli alanlardan birisi de robot dinamiği konusudur. Sistemin dinamik parametrelerine göre, hareket için gerekli olan tahrik değerlerinin hesaplanması işlemi, robot dinamiğinin temelini teşkil etmektedir. Statik durumdaki denge şartlarına ek olarak dinamik analizde, cismin şekilsel yapısı ve kütlesinden kaynaklanan çeşitli atalet etkilerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu yüzden dinamik analize başlamadan önce tasarımı yapılmış olan robotun uzuvlarının şekilsel ve yapısal konstrüksiyonundan kaynaklanan dinamik parametrelerinin tariflenmesi gerekmektedir.

Robot dinamiği temel olarak, hareket ile kuvvetler arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir yapıya sahiptir [26]. Bir robota ait dinamik modelin oluşturulmasında;

1) Robotun pozisyonları, hızları ve ivmelenmeler,
2) Mafsallara ve endefektöre uygulanan kuvvetler,
3) Robot manipülatöre ait uzuv kütlesi, boyutları, atalet tensörü gibi parametreleri,

arasındaki matematiksel ilişki bulunmaya çalışılır. Yürüyen mekanik sistemlerde bacaklar gövde ile birbirlerine bağlı iken aynı zamanda kapalı bir kinematik zincir oluşturacak şekilde zemin ile de birbirlerine bağlıdırlar. Bu yüzden bu sistemlerde diğer parametrelerin yanında ayak ile zemin arasında oluşacak kontak kuvvetlerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Genel olarak D'Alambert'in dinamik denge prensibinden yola çıkılarak yapılan dinamik analizler sonucunda, robotun dinamik etkilerinin tanımlanabileceği standart bir robot dinamiği denklemi elde edilmeye çalışılır. Bu eşitliğin genel hali denklem (4.1)'de görülmektedir.

$$\tau_e - j^T F = D(q)\ddot{q} + H(q,\dot{q}) + C(q) \quad (4.1)$$

Denklemde görülen q ifadesi genelleştirilmiş koordinat sisteminde değişkenleri ifade etmektedir. Eşitlikte q ifadesi n adet terimden oluşmaktadır. Örnek olarak olarak altı adet döner mafsala sahip antromorfik bir PUMA robot kol için q ifadesi (6x1) boyutunda bir vektördür. Bu matristeki her bir satır, o serbestlik derecesi için kullanılan açı değişimini temsil etmektedir. D matrisi kütle matrisi olarak bilinmektedir. Bu matris dinamik denklem üzerinde her bir uzvun öz ve ortak (mutual) kütle etkilerinin temsil edildiği (nxn) boyunlarında bir kare matristir. Newton'un ikinci yasasına benzer bir şekilde, denklemde kütlesel etki ile sistem değişkenlerinin ivmesinin çarpımı atalet kuvvetinin dinamik etkisini oluşturmaktadır.

D matrisindeki diyagonal elemanlar uzvun kütlesinin kendisine ait dinamik etkilerini temsil ederken, matriste bulunan diğer elemanlar ise uzuvların kütlelerinin birbirlerine olan etkilerini temsil etmektedirler. Bu matriste bulunan terimlere ait değerler robotun o anki sistem değişkenlerine bağlı olarak değişmektedir. Denklemde bulunan H matrisi ise sistemde oluşan Coriolis ve merkez kaç kuvvetlerinin etkilerini temsil etmektedir. Bu matris (nx1) boyutlarında bir vektör ile temsil edilmektedir.

C matrisi (nx1) boyutlarında bir vektördür. Sistem değişkenlerine bağlı olarak değişen bu vektörün terimleri, sistem üzerindeki yerçekimi ivmesinin etkisini ifade etmektedir. τ_e ifadesi tahrik noktalarından sisteme uygulanan kuvvetleri, denklemde bulunan F ifadesi ise kontak kuvvetlerini temsil etmektedir. Denklemde bulunan J matrisi ise kontak kuvvetlerinin genelleştirilmiş koordinat düzlemine çevrilmesini sağlayan bir matristir.

Denklemin yapısı D'Alambertin dinamik denge prensibi olarak bilinen denklem (4.2)'de görülen yapıya uymaktadır. Sisteme dışarıdan uygulanan kuvvetler; atalet etkileri, Koriolis ve merkezkaç kuvvetleri ve yerçekimi kuvvetlerinin toplamına eşitlendiği zaman sistem dinamik olarak dengelenmiş olacaktır. Bu prensipten yola çıkarak yapılan dinamik analizlerle standart robot dinamiği denklemi elde edilmeye çalışılmaktadır.

$$\sum_{i=1}^{N} \left(F_i - m_{\mathrm{i}} \frac{\mathrm{d}^2 \mathrm{x}^{\mathrm{i}}}{\mathrm{dt}^2} \right) . \delta x^i = 0 \tag{4.2}$$

1742 yılında Jean Le Rond D'Alembert tarafından, sanal iş prensibine ivmelenmeden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin eklenmesi ile genelleştirlmiş sanal iş prensibi elde edilmiştir [34]. Bu prensipte sisteme etki eden kuvvetler tarafından yapılan iş ile atalet kuvvetlerinin yaptığı iş cebrik olarak toplanırsa sıfıra eşit olacağı ifade edilmektedir. Bir diğer ifadeyle, sisteme etki eden kuvvetler ve atalet kuvvetlerinin toplamı sıfır olmak zorundadır. Bu prensipten yola çıkılarak yapılan dinamik analizler sonucunda, robotun yeni konumlanmasını sağlayacak olan tahrik bileşenleri elde edilmeye çalışılmaktadır.

Bunun yanında denklem (4.1)'de görülen standart robot dinamiği denkleminin tanımlanması problemini kolaylaştırmak için [26] Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerinin etkilerinin ihmal edilebildiği yüksek çevrim oranına sahip mafsallar kullanılabilmektedir. Fakat hesaplamalarda kolaylık sağlayan bu yöntem mafsallardaki sürtünme veya elastisite gibi problemlerden dolayı tam bir çözüm sağlayamamaktadır.

Dinamik parametrelerin tanımlanmasında bir diğer problem de kontak kuvvetlerinin belirlenmesi problemidir. Yürüme esnasında bacak transfer fazında iken kontak kuvvetleri sıfır olmaktadır. Fakat bacağın destek fazında kontak kuvvetlerinin değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu problemin çözümü için genel olarak kullanılabilen üç metod mevcuttur [26]. Bu metotlar;

1) Robota ait enerji fonksiyonunun minimize edilmesinde Lagrange çarpanları kullanmak (Dettman,1988),
2) Yer ile zemin arasındaki etkileşimi belirlemek için bacak ve gövde pozisyonlarına göre statik kuvvetleri tanımlayan denklemleri çözmek (Manko,1992),
3) Ayakucunda oluşan kontak kuvvetlerini ölçebilen temas sensörleri kullanmak (Zhou et al.,2000) .

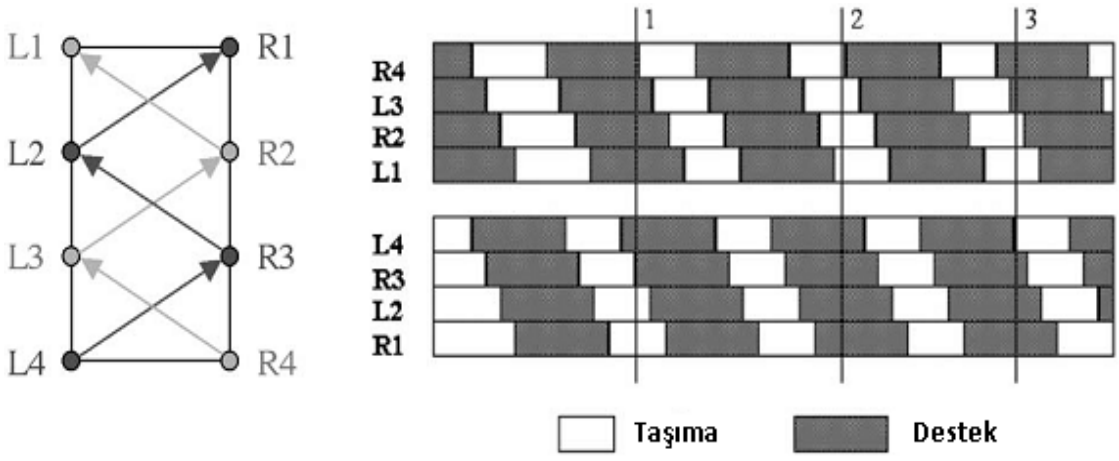
Bu üç metot arasından, dinamik analizde önerilecek olan kılavuzlu çalışma algoritmasına uygunluğundan dolayı üçüncü metot seçilecektir. Ayak ucunda oluşacak kontak kuvvetlerinin belirlenmesi için modelde sensörlere yer verilecektir.

4.2. Dinamik Metotlar

Dinamik analizleri kolay bir şekilde gerçekleştirebilmek için günümüze kadar birçok metot geliştirilmeye çalışılmıştır. Özellikle dinamik olarak modellenmesi oldukça zor olan sistemlerde dinamik hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi için çeşitli yaklaşımsal metotlar denenmiştir. Yaklaşımsal metotlar arasında, bacak kütlesinin düşük seçilmesi durumunda, bacakların oluşturacağı dinamik etkilerin az olmasından dolayı, dinamik etkilerin dikkate alınmadığı çalışmalar da mevcuttur [19,22,35-38]. Bu çalışmalarda, yürüyüş (gait) analizi olarak bilinen yöntemler kullanılarak, sadece gövdenin dengeli ve hızlı bir şekilde hareket etmesi hedeflenmektedir.

Bir böceğin yapısı düşünüldüğünde bacak kütleleri gövde kütlesine göre yok sayılabilecek kadar küçük değerlere sahiptirler. Bu yüzden bacak oldukça yüksek ivmelerde bir hareket gerçekleştirse bile bacak üzerinde oluşacak atalet kuvvetlerinin hareket sistemi üzerinde oluşturacağı etki yok sayılabilecek kadar azdır.

Bu yüzden bu tarz çalışmalarda sadece gövdenin ivmelenmesinden kaynaklanan atalet kuvvetleri hesaba katılmaktadır. En hızlı ve dengeli yürüyüş düzenini bulabilmek için, bacağın yerle temas süresi, havada geçirdiği süre ve adım boyu gibi çeşitli parametreler, ayarlanmaya çalışılmaktadır. Şekil 4.1'de sekiz bacaklı bir robotun standart yürüyüş düzenine ait yürüme yapısı görülmektedir.



Şekil 4.1. Sekiz bacaklı robot için standart yürüyüş düzeni [19].

Bunun yanında yaklaşımsal metotlar arasında, denklem (4.1)'de görülen terimlerin analitik olarak hesaplanmasının oldukça zor ya da mümkün olmadığı durumlarda, bacak duruşlarına göre kuvvet dağılımı değerlerinin belirlenmesi için çeşitli eğitimsel metotlar ve optimizasyon algoritmaları kullanılabilmektedir [8,13,14,16,23]. Bu algoritmalarda genel olarak robotun hareketi için uygulanması gereken kuvvetlerin minimizasyonu veya bacak ile zemin arasında kayma olmamasını sağlayan kontak kuvvetlerinin minimizasyonuna göre bir optimizasyon gerçekleştirilmektedir.

Robot hareketi için gerekli olan mafsal kuvvetlerinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer metot ise hareketin dinamiğinin yaklaşımsal olarak çözülmesidir [9,17]. Bu metotlarda robota ait dinamik parametreler, geri beslemeli bir kontrölör vasıtası ile sürekli olarak dinamik hesaplamalara dâhil edilmektedir. Bir önceki durum ile mevcut durum arasındaki ilişkiler lineer bağıntılarla modellenebileceği gibi robotun bir sonraki konumunun hesaplanmasında olasılıksal metotlar da kullanılabilmektedir.

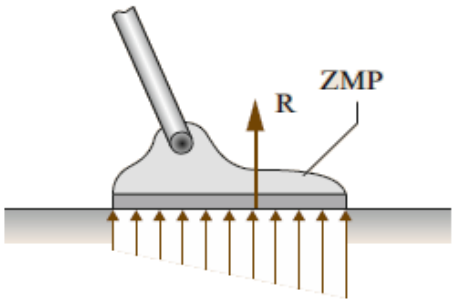
Bu metotların yanında, yürüyen robotlara ait dinamik hesaplamaların gerçekleştirilebileceği, özel olarak geliştirilmiş modeller de mevcuttur. Bu modellerde, belirlenmiş olan dinamik parametreler ışığında, bacaklı robotların bazı temel sistemlere olan benzerliklerinden faydalanılarak sistemin dinamik cevapları bulunmaya çalışılmıştır. Özellikle yürüyen robotların dinamik analizinde kullanılmak üzere geliştirilmiş olan iki modelden (ZMP ve SLIP modelleri), bölüm 4.2.1 ve bölüm 4.2.2'de ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

Çok kütleli mekanik sistemlerin (MB) dinamik etkilerinin, sistemin hareketi üzerine etkilerinin tam olarak anlaşılabilmeleri için, sentetik ve analitik olarak hesaplanabilen iki metot mevcuttur [39]. Analitik olan metotta kapalı sistem yaklaşımı (enerjinin korunumu) esas alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Denklem (4.2)'de görülen D'Alambert eşitliğinden elde edilen denklemlerin türetilmesi, robot dinamiğinde Lagrange metodu olarak bilinmektedir. Bu metotta, sistemin kinetik enerjisi ile potansiyel enerjisi arasındaki farkın, mekanik sistemin hareketi esnasında harcanan atalet etkileri ve uygulanan tahrik bileşenlerinden kaynaklanan enerjiye eşit olması kabulünden faydalanılmaktadır. Bu yöntem bölüm 4.2.3'te ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

Sentetik yaklaşımda ise harekete ait diferansiyel eşitlikler türetilirken, lineer momentum prensibi (Newton'un ikinci yasası) ve açısal momentum prensibi (Euler) sisteme ait bütün uzuvlara uygulanmaktadır. Newton-Euler metodu olarak bilinen bu algoritma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada sistemin hareketi esnasında kütle merkezlerinde oluşacak olan atalet ve yerçekimi etkilerinin belirlenmesi için hız ve ivme dağılımı gerçekleştirilmektedir. İkinci aşamada, belirlenen bu ataleti, yerçekimi etkilerini ve dış kuvvetleri yenebilecek mafsal tahrik bileşenlerinin elde edilmesi için her bir uzva ayrı olarak D'Alambertin dinamik denge prensibi uygulanmaktadır. Bu yöntem bölüm 4.2.4'te ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

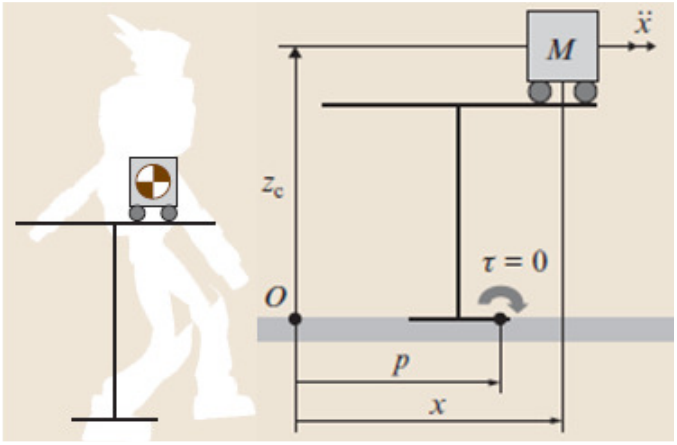
4.2.1. ZMP Modeli

Sıfır moment noktası olarak bilinen bu model Vukobratovic ve Stepanenko tarafından 1972 yılında geliştirilmiştir [40]. Bu metotta öncelikle yer ile temas halinde olan bacağın veya bacakların zemin yüzeyine etki eden kuvvetlerinin eşdeğeri bulunmaya çalışılır. Bu nokta zemin tarafından bacağa uygulanan kuvvetlerin basınç merkezi (COP) olarak da adlandırılabilmektedir [41]. Robotun dinamik olarak dengeli bir hareket gerçekleştirebilmesi için D'Alambert'in dinamik denge prensibinde olduğu gibi bu nokta etrafında, sisteme ait diğer elemanlar tarafından oluşturulan momentlerin toplamının sıfıra eşit olması gerekmektedir. Genellikle bu metodun uygulanacağı robot üzerindeki uzuvlardan birisi dengeleyici eleman olarak seçilmektedir. Diğer uzuvların yörüngeleri kinematik olarak belirli iken, dengeleyici elemanın yörüngesi bu metot kullanarak belirlenmektedir. Şekil 4.2'de tek bir bacağın yer ile teması durumunda oluşan eşdeğer kuvvet görülmektedir.



Şekil 4.2. Yer ile temas halinde oluşan eşdeğer kuvvet.

Yer ile temas halinde zeminin bacağa uygulamış olduğu tepki kuvvetlerinin bileşkesinin R olduğu varsayılırsa, bu nokta etrafında yazılacak moment toplamlarının sıfıra eşit olması gerekmektedir. Şekil 4.3'te basit bir araba-masa (cart-table) problemi için sıfır moment noktası (ZMP) modellenmeye çalışılmaktadır.



Şekil 4.3. Araba-masa tablası problemi için
ZMP'nin bulunması [41].

Şekil 4.3'te görülen düzlemsel problemde p noktası etrafında moment ifadesi yazılacak olursa denklem (4.3)'te görülen eşitlik elde edilmiş olacaktır.

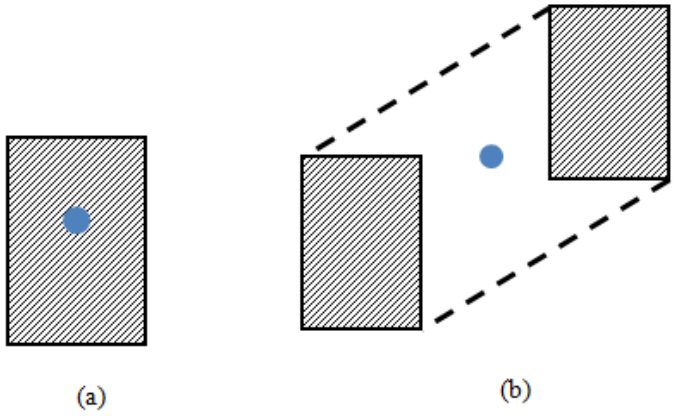
$$\tau = -Mg(x - p) + M\ddot{x}z_c \tag{4.3}$$

Denklem (4.3)'te belirlenen p noktasının sıfır moment noktası olduğu kabulü yapılırsa, bu nokta etrafında yazılacak olan momentlerin toplamının sıfıra eşit olması gerekmektedir. Gerekli sadeleştirmeler gerçekleştirildikten sonra sıfır moment noktasının pozisyonunun, diğer parametrelere bağlı olan hali denklem (4.4)'te görülmektedir.

$$p = x - \frac{z_c}{g}\ddot{x} \tag{4.4}$$

Bu sistemin dinamik olarak dengeli bir şekilde hareket ettirilmesi istenirse, daha önceden belirlenmiş bir x yörüngesi için, dinamik denge koşulları için yazılan denklemde, kütlenin ivmelenmesi dengeleyici bir parametre olarak kullanılabilmektedir.

Mobil olarak hareket edebilen sistemler üzerinde birçok denge kriteri tanımlanabilmektedir. Değişik arazi koşulları ve robot konfigürasyonları için kullanılabilen denge kriterleri, temelde statik ve dinamik denge koşulları olarak iki bölümde incelenebilmektedir [26]. Yürüme esnasında statik denge koşulunun sağlanabilmesi için, hareket boyunca robotun tüm uzuvları tarafından oluşturulan ağırlık merkezinin zemin üzerindeki izdüşümü, robotun yer ile temas sağlayan bacaklarının oluşturacağı konveksin dışına çıkmamalıdır. Şekil 4.4'te tek ve çift bacak temas hali için statik denge koşulunun sağlanabileceği alanlar görülmektedir.

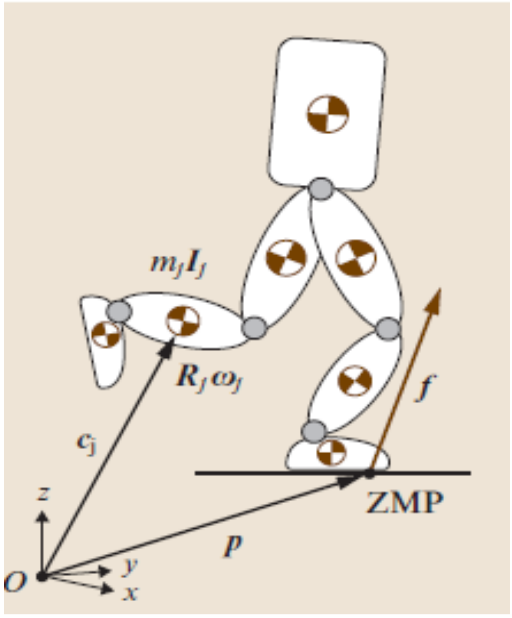


Şekil 4.4. Statik denge koşulları, a) tek Bacak temas halinde,
b) iki Bacak temas halinde.

Dinamik denge koşulunun sağlanabilmesi için hareketin atalet etkilerinin de göz önünde bulundurulabileceği ZMP, FRI [42] gibi metotlar kullanılmaktadır. Bu metotların uygulanabilmesi için robotun tam olarak tahrik edilebilmesi(fully-actuated) ve robotta bulunan tüm mafsalların pozisyonlarının kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Yetersiz tahrikli (under-actuated) mekanizmalarda veya tork kontrollü robotlarda bu metotlar uygulanamamaktadır [41]. Dinamik yürüme şartlarında sistemin ağırlık merkezinin destek noktalarının oluşturduğu konveks alanın dışına çıkabilmesi mümkündür. Bu yürüme şeklinde hareketin verimli bir şekilde sağlanabilmesi için denklem (4.5)'te görülen, bir önceki ZMP ile bir sonraki ZMP arasındaki mesafe minimize edilmeye çalışılmaktadır.

$$\int_{t^i}^{t^f} \left\| P_{zmp}(t) - P_{zmp}^{d}(t) \right\|^2 dt \tag{4.5}$$

Statik yürümede hareket herhangi bir anda durdurulduğunda mekanizma dengededir. Dinamik yürümede ise mekanizma dinamik etkiler göz önünde bulundurularak bir dengeleme yapıldığı için bu durum geçerli değildir [43]. Dinamik yürümede hareketin kararlılığı, statik yürümede olduğu gibi hesaplanan ZMP'nin izdüşümünün yer ile temas eden bacakların oluşturduğu konveksin sınırlarına yakın olmasına bağlıdır. Bu yüzden hareket yörüngesi boyunca seçilecek olan ZMP'lerin bu alana yakın olması gerekmektedir [40]. Şekil 4.6'da çok kütleli bir için ZMP'nin üç boyutlu olarak belirlenebileceği bir sistem örneği görülmektedir.



Şekil 4.5. Çok kütleli bir sistem için ZMP'nin üç boyutlu olarak belirlenmesi [41].

Şekil 4.6'da görülen çok kütleli sistemin çözümü hakkında detaylı bilgi için [41] numaralı referans incelenebilir. Sistemdeki dinamik parametrelerin hesaplanması sonucunda elde edilecek olan noktanın zemin üzerindeki izdüşümüne ait pozisyonlar denklem (4.6) ve denklem (4.7)'deki gibi elde edilmiştir.

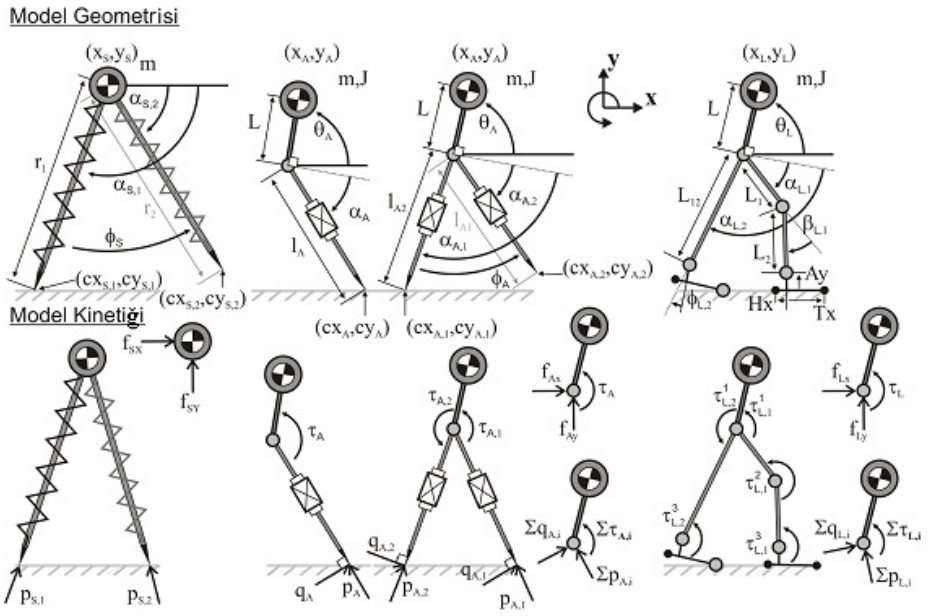
$$p_x = \frac{Mgx + p_z \dot{p}_x - \dot{\mathcal{L}}_y}{Mg + \dot{p}_z} \tag{4.6}$$

$$p_y = \frac{Mgy + p_z \dot{p}_y - \dot{\mathcal{L}}_x}{Mg + \dot{p}_z} \tag{4.7}$$

Bu metodun uygulanmasında dinamik parametreler, önceden belirlenmiş ZMP noktalarına göre elde edilmektedir. Dış ortamda çalışan robotların, çevre ile etkileşimlerinden dolayı oluşabilecek olumsuz dinamik etkiler, önceden belirlenememektedir. Bu durum robot hareket halindeyken devrilme veya ters dönme gibi istenilmeyen sonuçlara sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca metodun tork kontrollü sistemlere uygulanamıyor olması, robot üzerinde enerji tasarrufu sağlayabilecek tork optimizasyonu tekniğinin kullanılabilme ihtimalini ortadan kaldırmaktadır. Metodun bu olumsuzluklarından dolayı, tasarlanmış robot üzerinde yapılacak olan dinamik analizde bu metot kullanılmayacaktır.

4.2.2. SLIP Modeli

Genellikle zıplayarak yürüyen robotlar için kullanılan bu dinamik modelde hedeflenen, mobil robotun yay yüklü ters bir sarkaca benzerliğinden faydalanılarak kolay bir çözüm elde etmeye çalışmaktır. Bu modelde gövdenin tamamı ayak uzvu etrafında dönen bir sarkaca benzetilmektedir. ZMP algoritmasında olduğu gibi D'Alambert'in dinamik denge prensibinden yola çıkılarak yapılan analiz sonucunda, mafsallar tarafından uygulanması gereken tork değerleri belirlenmeye çalışılmaktadır. Şekil 4.6'da değişik ters sarkaç modelleri görülmektedir.



Şekil 4.6. Ters sarkaç modelleri a)SLIP b)ASLIP(Monoped- Biped) c)LASLIP [44].

Bu modeller arasında en basit olanı SLIP modeldir. Tek bir kütleye bağlı iki yaydan oluşan bu modelde, gövdenin dinamik etkilerini temsil eden ivmelenmeler belirlenirken, bacakların açıları ve yayların pozisyonlarından faydalanılmaktadır. ASLIP modelinde zemin ile teması sağlayan bacaklar, yay mekanizmasına ek olarak, teleskobik bir eleman olarak da düşünülmektedirler. LASLIP olarak bilinen modelde ise bacak mekanizması eklemli bir yapıda düşünülmektedir [44].

Yay yüklü ters sarkaç metodunun uygulanmasında, modellenecek olan sistemin yapısına ve karmaşıklığına göre, yapılacak belirli kısıtlamalar çerçevesinde yukarıdaki sistemlerden biri tercih edilmektedir. SLIP ve ASLIP modelde sistemin dinamik etkisini oluşturan parametre sayısı kısmen az iken LASLIP modelde sistemin dinamik etkisini oluşturan parametre sayısı oldukça fazladır. Denklem (4.8)-(4.10) arasında görülen eşitlikler ASLIP metodu kullanan tek bacağa sahip bir modelde, kütle üzerinde görülen ivmelenmeleri ifade etmektedir [44].

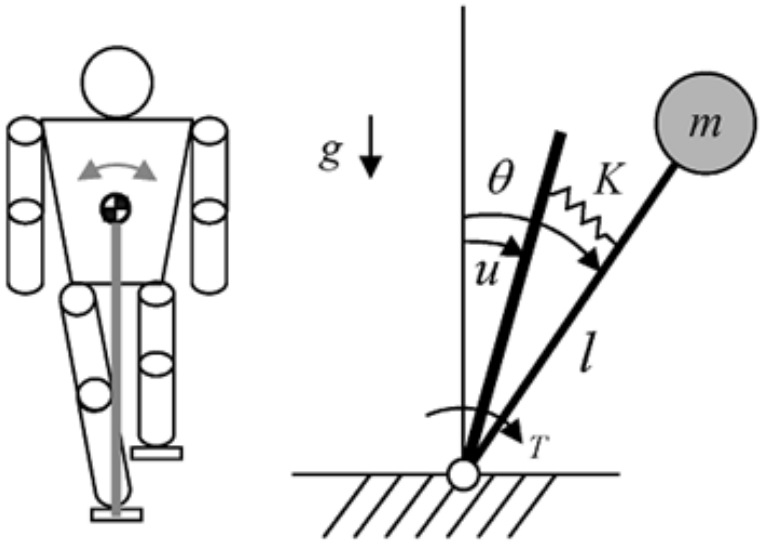
$$\ddot{x}_A = \frac{1}{m}\sum_{\mathrm{i}=1}^{n}\left(-\mathrm{p_{A,i}}\sin\left(\theta+\alpha_{\mathrm{A,i}}\right)+\frac{\tau_{\mathrm{A,i}}\cos\left(\theta+\alpha_{\mathrm{A,i}}\right)}{\ell_{\mathrm{A,i}}}\right) \tag{4.8}$$

$$\ddot{y}_A = \frac{1}{m}\sum_{\mathrm{i}=1}^{n}\left(\mathrm{p_{A,i}}\cos\left(\theta+\alpha_{\mathrm{A,i}}\right)+\frac{\tau_{\mathrm{A,i}}\sin\left(\theta+\alpha_{\mathrm{A,i}}\right)}{\ell_{\mathrm{A,i}}}\right) \tag{4.9}$$

$$\ddot{\theta}_A = \frac{1}{j}\sum_{\mathrm{i}=1}^{n}\left(\tau_{\mathrm{A,i}}\frac{\ell_{\mathrm{A,i}}-\mathrm{L}\sin(\alpha_{\mathrm{A,i}})}{\ell_{\mathrm{A,i}}}-\mathrm{Lp_{A,i}}\cos(\alpha_{\mathrm{A,i}})\right) \tag{4.10}$$

Bu metodu kullanan dinamik modellerde hedeflenen, daha önceden belirlenmiş bir yörüngede sistemi hareket ettirmek için uygulanması gereken tahrik miktarının belirlenmesidir. Örneğin dinamik analizi gerçekleştirilecek olan sistem tek bacaklı bir ASLIP modeli kullanarak modellenecek olursa, daha önceden belirlenen yörünge ve ivmelenme şartlarını sağlayacak tahrik bileşenleri $\tau_{\mathrm{A,i}}$ değerlerinin hesaplanmasında (4.8)-(4.10) arasındaki denklemlerin kapalı formda çözülmesi ya da denklemlerin tahrik bileşenlerine göre tekrar türetilmesi gerekecektir. Ayrıca bacak sayısının çok olması durumunda, kuvvetlerin uzuvlara dağılımının belirlenememesi probleminden dolayı her durum için dinamik denge şartı yazmak mümkün olamayabilecektir. Bir diğer ifade ile bacak sayısının fazla olduğu durumlarda torkları ifade eden denklemler türetilemeyebilecektir. Bu yüzden bu metotların çözümünde, farklı durumlarda farklı çözümleme ihtiyacı gerektiren parçalı bir dinamik hesaplama yöntemi gerekmektedir.

Karmaşık sistemlerde uygulanması oldukça zor olan bu model, uzuv sayısı sınırlandırılmış, basit olarak modellenebilen sistemlerin dinamik hesaplamalarında daha çok tercih edilmektedir. ASLIP ve LASLIP modellerine ait dinamik eşitliklerin çıkarılmasına ait detaylı bilgi için [44] numaralı referans incelenebilir. SLIP modelin türetilme işlemini açıklayabilmek için en basit örnek olan tek bir serbestlik derecesine sahip yay yüklü ters sarkaç mekanizmasının dengelenme işleminden bahsedilecektir. Şekil 4.7'de SLIP modeline göre dengelenecek robota ait resim ve kinematik model görülmektedir.



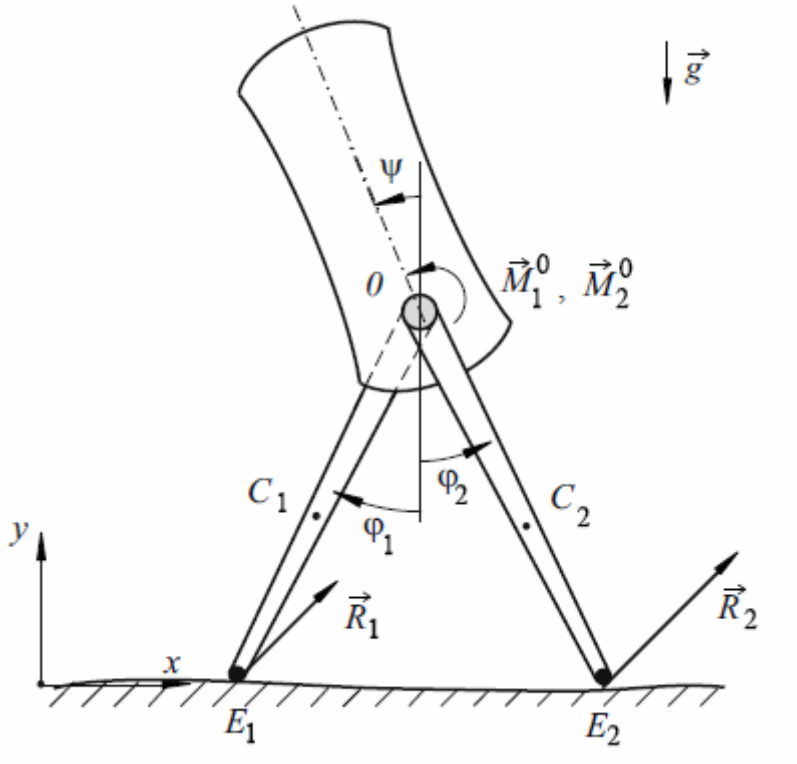
Şekil 4.7. SLIP modeline göre dengelenecek sistem,
(a) robot resmi (b) kinematik model.

Şekil 4.7'de görülen robotta uzuvların tamamı tek bir kütle olarak modellenmiştir. Robotun tek parça halinin kütle merkezi, ayak etrafında dönen yay sabitine sahip bir ters sarkaç mekanizması olarak düşünülmüştür. Zemin ile temas eden ayak etrafında düzlemsel bir denge yazılacak olursa denklem (4.11)'de görülen eşitlik elde edilmiş olacaktır. Bu eşitlikten tork ifadesi çekilecek olursa, pozisyon ve türevlerinin değişimine göre denklem (4.12)' deki gibi elde edilmiş olacaktır.

$$ml^2\ddot{\theta} - mgsin(\theta) + k(u - \theta) - T = 0 \tag{4.11}$$

$$T = mgl\theta - ml\ddot{\theta} = k(\theta - u) \tag{4.12}$$

Ters sarkaç mekanizmasının kullanıldığı daha karmaşık bir yürüyen sistem örneği olarak Şekil 4.8'de görülen üç kütleli yürüme sistemi verilebilir. Bu sistem bir üst kütle ve bu üst kütleye döner mafsallarla bağlı iki bacaktan oluşmaktadır. Düzlemsel bir hareket gerçekleştiren sistemde tahrik unsuru olarak bacaklara $M_1{}^0$ ve $M_2{}^0$ torkları uygulanmaktadır. Üç kütleli yürüme sistemine ait model Şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.8. Üç kütleli yürüme sistemi [39].

Sisteme ait dinamik eşitlikler yazılacak olursa, pozisyonlara bağlı olarak dengeyi sağlayabilecek tork bileşenleri denklem (4.13)'deki gibi elde edilmiş olacaktır. Bacaklar birbirlerine simetrik olarak hareket ettikleri için, elde edilecek denklemler birbirinin aynısı olacaktır. Bu yüzden ikinci denkleme hesaplamada yer verilmemiştir. Bu sisteme ait dinamik analiz hakkında daha detaylı bilgi edinebilmek için [39] numaralı referans incelenebilir.

$$J^0\ddot{\varphi}_1 + m\rho\ddot{x}_0 cos\varphi_1 + m\rho\ddot{y}_0 sin\varphi_1 + mg\rho sin\varphi_1 = M_1{}^0 + l(R_{1x}cos\varphi_1 + R_{1y}sin\varphi_1) \quad (4.13)$$

Tork ifadelerinin ayrı denklemler halinde elde edilebildiği bu metotta, modelleme esnasında bazı kısıtlamalara gitmek gerekmektedir. Örneğin iki bacaklı yürümeye ait Şekil 4.8'de görülen model üç parçalı olarak seçilmiştir. Biped yürümeye ait bu modelin basit analizler için doğru sonuç vermesine karşın daha karmaşık durumlar incelenmek istendiğinde bu basit model çok da iyi sonuçlar vermemektedir. Bu yüzden daha karmaşık yapılar incelenmek istendiğinde beş veya daha fazla parçalı yürüme sistemi modelleri tercih edilmektedir [45]. Sistemlerin karmaşıklaşması ile tork denklemlerinin harici olarak elde edilememesi, bu metodun karmaşık sistemlere uygulanmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu sebepten dolayı tasarımı yapılan ABYMR'nin dinamik analizinde bu metot kullanılmayacaktır.

4.2.3. Lagrange Metodu

Bu metotta hedeflenen sistemin toplam kinetik enerjisi ile toplam potansiyel enerjisi arasındaki farktan faydalanarak, robotun dengeli bir şekilde hareket etmesi için gerekli tork değerlerini üretmektir. Enerjinin korunumu ilkesi ve denklem (4.2)'de görülen D'Alambert denge prensibinden faydalanılarak elde edilen lagrange eşitlikleri [34] denklem (4.14) ve (4.15)'te görülmektedir.

$$\mathcal{L} = K - V \tag{4.14}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = Q_i \qquad i = 1,2,..n \tag{4.15}$$

Denklemde görülen K ifadesi sistemin toplam kinetik enerjisini, U ifadesi ise sistemin toplam potansiyel enerjisini temsil etmektedir. Bu iki enerji arasındaki fark $\mathcal{L}$ ile gösterilen Lagrange ifadesini temsil etmektedir. Denklem (4.14)'te elde edilen ifade denklem (4.15)'teki Lagrange dinamik eşitliğinde yerine koyulacak olursa, eşitliğin açık hali (4.16) denklemindeki gibi olacaktır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial K}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} = Q \tag{4.16}$$

Denklem (4.16)'da görülen kinetik enerjiye ait türevsel terimler, sistemde bulunan atalet kuvvetlerinin dinamik etkilerini temsil ederken, potansiyel enerjiye ait türevsel ifadeler ise sistemin yerçekimi ivmesinden kaynaklanan, ağırlığın dinamik denklem üzerindeki etkisini temsil etmektedir. Lagrange dinamiği eşitliğinden faydalanılarak denklem (4.1)'de görülen terimlerin nasıl bulunacağı tanımlanacaktır [46].

Çok gövdeli (MB) bir sistemde toplam kinetik enerjinin hesaplanabilmesi için denklem (4.17)'de görülen matrisyel formdaki kinetik enerji formülünden yararlanılır. Bu denklemde q ifadesi sistemde bulunan kütlelerin, kütle merkezlerinde görülen lineer ve açısal hızları, terimlerinde barındıran bir vektördür. Denklemde bulunan D ifadesi ise daha önce denklem (4.1)'de görülen karesel kütle matrisini temsil etmektedir.

$$K = \frac{1}{2}\dot{q}_i{}^T D \dot{q}_i \tag{4.17}$$

Sisteme ait kinetik enerji ifadesinin toplam halde yazılabilmesi için her bir uzva ait lineer ve açısal hızlardan kaynaklanan enerjilerin ayrı olarak toplanması gerekmektedir. Kütle matrisinin değerini denklemden çekebilmek için hız ifadeleri vektörel olarak ayrılmalıdır. Bu işlemin gerçekleştirilmesi denklem (4.18)-(4.21) arasındaki eşitliklerde gösterilmektedir.

$$\mathrm{K} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{n}(\mathrm{K}_{\mathrm{i}}) \tag{4.18}$$

$$\mathrm{K} = {}^1\!/_2 \sum_{\mathrm{i}=1}^{n} \left({}^0\mathrm{v}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{T}}\, \mathrm{m}_{\mathrm{i}}\, {}^0\mathrm{v}_{\mathrm{i}} + \frac{1}{2}\, {}_0\mathrm{w}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{T}}\, {}^0\mathrm{I}_{\mathrm{i}}\, {}_0\mathrm{w}_{\mathrm{i}} \right) \tag{4.19}$$

$$\mathrm{K} = {}^1\!/_2 \sum_{\mathrm{i}=1}^{n} \left((\mathrm{J}^{\mathrm{i}}{}_{\mathrm{Di}} \dot{q}_i)^{\mathrm{T}}\, \mathrm{m}_{\mathrm{i}}\, (\mathrm{J}^{i}{}_{\mathrm{Di}} \dot{q}_i) + \frac{1}{2} (\mathrm{J}^{i}{}_{\mathrm{Ri}} \dot{q}_i)^{\mathrm{T}}\, {}^0\mathrm{I}_{\mathrm{i}}\, (\mathrm{J}^{i}{}_{\mathrm{Ri}} \dot{q}_i) \right) \tag{4.20}$$

$$K = {}^1\!/_2\, \dot{q}_i{}^T \left(\sum_{\mathrm{i}=1}^{n} \left(\mathrm{J}^{i}{}_{\mathrm{Di}}^{\mathrm{T}} \mathrm{m}_{\mathrm{i}} \mathrm{J}^{i}{}_{\mathrm{Di}} + \frac{1}{2} \mathrm{J}^{i}{}_{\mathrm{Ri}}^{\mathrm{T}}\, {}^0\mathrm{I}_{\mathrm{i}} \mathrm{J}^{i}{}_{\mathrm{Ri}} \right) \right) \dot{q}_i \tag{4.21}$$

Sistemde bulunan kütlelere ait toplam potansiyel enerji ifadesi denklem (4.22)'de görülmektedir. Başlangıçta kabul edilen sıfır noktasındaki eksen takımına göre yazılan potansiyel enerji eşitliğinde; r mesafeyi, g yerçekimi ivmesini, m ise uzvun kütlesini tanımlamaktadır.

$$V = \sum_{i=1}^{n}(V_i) \quad = \sum_{i=1}^{n} -(m_i {}^0g^T {}^0r_i) \tag{4.22}$$

Standart robot dinamiği denklemindeki terimler, kinetik ve potansiyel enerji ifadelerinin Lagrange dinamik denkleminde yerine yazılmaları ile elde edilecektir. Denklemlerin çıkarılmasına dair detaylı bilgi için [46] numaralı referans incelenebilir. Kinetik enerji ifadesinden doğrudan elde edilen karesel kütle matrisi, denklem (4.23)'te görülmektedir.

$$D = \sum_{i=1}^{n} \left({}^{i}J_{Di}^{T} m_i {}^{i}J_{Di} + \frac{1}{2} {}^{i}J_{Ri}^{T} {}^0I_i {}^{i}J_{Ri} \right) \tag{4.23}$$

Bu matriste J ifadesi, robota ait uzuvların kütle merkezlerinin hızları arasındaki ilişkiyi tanımlayan jakobiyen matrisidir. Hız dağılımına göre kütle merkezlerinde oluşan lineer ve açısal ivmelerden kaynaklanan kütlesel ataletin etkisini belirleyen bu matrisin hesaplanmasında, denklemin her bir uzva ayrı olarak uygulanarak toplam değerinin alınması gerekmektedir.

Sistemde oluşacak olan coriolis ve merkezkaç kuvvetlerinin dinamik etkilerinin tanımlanması için standart robot dinamiği denkleminde C matrisi kullanılmıştır. Denklem (4.16)'da görülen Lagrange ifadesinde kinetik enerjiye ait türev terimleri sistemdeki atalet kuvvetlerini tanımlamaktadır. Daha önce de hesaplanan kütle matrisi yardımı ile birinci derece atalet kuvvetleri hesaplanarak bu türevsel ifadeden çıkarılacak olursa, sonuç olarak ikinci derece atalet kuvvetleri olan koriolis ve merkezkaç ivmelerinin etkisi bulunmuş olacaktır. H matrisi ile gösterilecek bu ifade ile (5,1) denklemindeki C matrisi arasındaki dönüşüm denklem (4.24)'de gösterilmektedir.

$$H(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} \tag{4.24}$$

H matrisi hesaplanırken kütlesel ataletin ifade edildiği daha önceden elde edilen D matrisindeki terimlerden faydalanılacaktır. Bu hesaplama yapılırken christoffel sembolleri olarak bilenen operatör kullanılacaktır. Bu işlemlerden sonra elde edilen eşitlik denklem (4.25)'de görülmektedir.

$$H_{ijk} = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{\partial D_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial D_{jk}}{\partial q_i} \right) \tag{4.25}$$

Robot dinamiği eşitliğindeki hesaplanacak son terim olan ve yerçekimi etkisini ifade eden G matrisinin hesaplanmasında, sistemin toplam potansiyel enerji ifadesinden faydalanılacaktır. Denklem (4.26)'da görülen eşitlikte J matrisi uzuvların pozisyonları ile referans pozisyon arasındaki dönüşümü sağlayan matristir. Denklem (4.26)'da ağırlığın dinamik denklem üzerindeki etkisini oluşturan G matrisinin hesaplanması gösterilmiştir.

$$G_i = \sum_{j=1}^{n} \left(m_j g^T J_{Dj}^{(i)} \right) \tag{4.26}$$

Yapılacak olan dinamik analizde Lagrange metodunun uygulanabilmesi için denklemlerden de görüldüğü gibi, daha önceden sistemdeki hız ve pozisyonlara ait ifadelerin çözülmesi gereklidir. Sabit bir noktaya bağlı olan robot manipülatörler için bu işlem oldukça kolay bir şekilde uygulanabilirken, on sekiz serbestlik derecesine sahip gezgin bir robot için bu işlemin geçekleştirilmesi oldukça zordur. Bunun yanında kontak kuvvetlerinin denkleme etkisinin ifade edilebilmesi için, Lagrange çarpanları terimi olarak bilinen terimlerin önceden belirlenmeleri gerekmektedir. Kontak kuvvetlerinin hesaba katılarak yazıldığı Lagrange eşitliği denklem (4.27)'de görülmektedir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}^i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q^i} = \Gamma_i - \sum_{j=1}^{m} \left(\lambda_j c_{ji} \right) \tag{4.27}$$

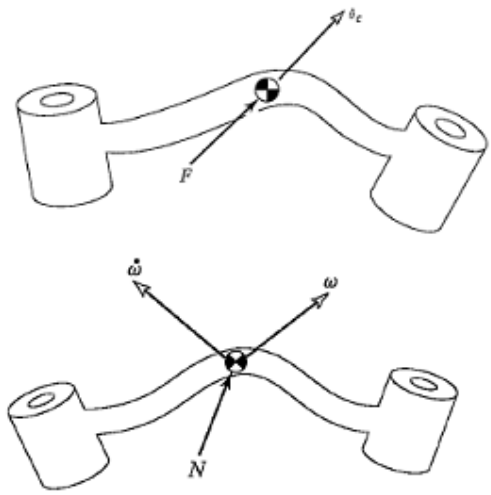
Denklem (4.27)'de görülen Γ terimi tahrik kuvvetlerini, λ terimi lagrange çarpanlarını, C terimi ise sınırlama matrisini ifade etmektedir. Robotun hareketi boyunca değişecek λ terimlerinin, dinamik değişikliklere göre hesaplanmaları veya ölçülmeleri gerekmektedir [47]. Ölçülecek olan değerlerin denkleme uygulanması durumunda, lagrange metodu ile elde edilecek standart robot dinamiğine ait terimlerin, kontak kuvvetinin bir fonksiyonu şeklinde yazılması gerekmektedir. Bu işlemin uygulanmasında, denklemlerin karışık olmasından dolayı, dinamik denklemlerin yapısının sistemin kontrol hızına olumsuz bir etkisi olacaktır.

Dinamik hesaplamalarda lagrange çarpanlarının hesaplanması yolu tercih edilecek olursa, kontak kuvvetlerinin belirlenebilmesi için sayısal bir çözücü kullanılacaktır. Genellikle uygulamalarda kullanılan ekipmanlar, ayrık çözüm sağlayan sabit adımlı bir çözücü kullanmaktadırlar. Darbe durumunda kontak etkisi önceden belirlenemediği için bu metot ile yapılacak olan dinamik analiz, ani değişimler için çözüm üretemeyecektir. Hem bu sebeplerden, hem de önerilecek olan kılavuzlu çalışma algoritmasına uygun olmamasından dolayı, ABYMR için gerçekleştirilecek dinamik analizde bu metot kullanılmayacaktır.

4.2.4. Newton-Euler Metodu

Bu metodun uygulanmasında, D'Alambert'in dinamik denge prensibi, her bir uzuv için yinelemeli olarak kullanılmaktadır [48]. Algoritma temel olarak iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde belirli bir referans noktasının hız, pozisyon ve ivme değişkenleri kullanılarak, referans noktadan sistemin uç noktasına doğru, hız ve ivme dağılımları yapılmaktadır. Daha sonra belirlenen bu hız ve ivme değerlerinden, hareket esnasında sistemde oluşan atalet kuvveti bileşenleri hesaplanmaktadır.

Algoritmanın ikinci bölümünde, robotun hareket etmesi için uygulanması gereken tahrik kuvvetleri değerleri belirlenirken, D'Alambert denge prensibi her bir uzva ayrı olarak uygulanacaktır. Dıştan içe doğru gerçekleştirilen bu adımda, daha önceden belirlenmiş bir yörünge hareketi için, dinamik parametrelere göre üretilmiş tahrik bileşenlerinin elde edilmesine çalışılmaktadır. Şekil 4.9'da bir uzuv üzerinde kütle merkezine etki eden lineer ve açısal ivmelerden kaynaklanan atalet kuvvetleri gösterilmektedir.



Şekil. 4.9. Lineer ve açısal ivmelerden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin uzuvda gösterimi [48].

Algoritmanın birinci aşamasında, robotun hareketi sırasında oluşacak olan atalet kuvvetlerinin belirlenebilmesi için, lineer ve açısal hız dağılımlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla referans olarak kabul edilen noktaya bağlı ilk uzuvdan, mekanizmanın en uç noktasındaki uzvuna kadar, (4.28)-(4.31) denklemleri ile ifade edilen işlemler sırası ile uygulanmalıdırlar.

$$^{i+1}w_{i+1} = {}^{i}_{i+1}R\,{}^{i}w_i + \dot{\theta}_{i+1}\,{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \tag{4.28}$$

$$^{i+1}\dot{w}_{i+1} = {}^{i}_{i+1}R\,{}^{i}\dot{w}_i + {}^{i}_{i+1}R\,{}^{i}w_i\, x\dot{\theta}_{i+1}\,{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1}\,{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \tag{4.29}$$

$$^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i}_{i+1}R\left({}^{i}\dot{w}_i x\,{}^{i}P_{i+1} + {}^{i}w_i x\left({}^{i}w_i x\,{}^{i}P_{i+1}\right) + {}^{i}\dot{v}_i\right) \tag{4.30}$$

$$^{i+1}\dot{v}_{C\,i+1} = {}^{i+1}\dot{w}_{i+1} x\,{}^{i+1}P_{C_{i+1}} + {}^{i+1}w_{i+1} x\left({}^{i+1}w_{i+1} x\,{}^{i+1}P_{C_{i+1}}\right) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \tag{4.31}$$

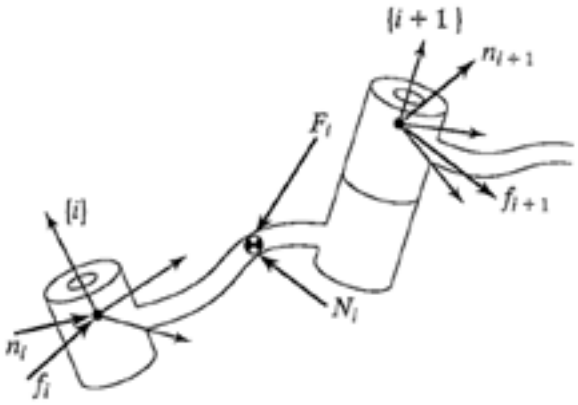
Daha sonra bu denklemlerle belirlenen lineer hız, açısal hız, lineer ivme ve açısal ivme değişkenleri yardımıyla, hareket esnasında kütle merkezlerinde oluşacak olan atalet kuvvetleri hesaplanacaktır. Newton'un ikinci kanunu uygulanarak lineer atalet kuvveti bileşenleri hesaplanacaktır. Bu kanunda, cismin üzerinde görülen lineer momentumun değişiminin, cisme uygulanan kuvvete eşit olduğu ifade edilmektedir. Newton'un ikinci kanunu (matrisyel formda) denklem (4.32)'de görülmektedir.

$$^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1}{}^{i+1}\dot{v}_{C\,i+1} \tag{4.32}$$

Denklem (4.32)'de görülen $\dot{v}_C$ terimi, ilgili uzvun kütle merkezinde görülen ivmeyi ifade etmektedir. Eşitlikte görülen m terimi uzvun kütlesini, F terimi ise uzuv üzerinde oluşacak olan lineer atalet kuvvetlerini ifade etmektedir. Newton'un ikinci yasasındaki lineer momentum ile atalet kuvvetleri arasındaki ilişkiye benzer bir şekilde, dönen cisimler için açısal momentum ve atalet momentleri arasında da bir ilişki vardır. Euler denklemi olarak bilinen bu denklemde, uzvun şekilsel yapısını tarifleyen atalet tensörü ile açısal ivmelerin çarpımı uzuv üzerinde görülen birinci derece atalet momentine eşit olmaktadır. Açısal hızlar ve atalet tensörü yardımıyla elde edilen ikinci derece atalet momentleri, daha önce belirlenmiş birinci derece atalet momenleri ile toplanacak olursa, uzuv üzerinde görülen toplam atalet kuvveti bulunmuş olacaktır. Newton-Euler dinamik analiz metodunda kullanılan Euler denkleminin matrisyel formda ifade edilmiş hali denklem (4.33)'de görülmektedir.

$$^{i+1}N_{i+1} = {}^{C_{i+1}}I_{i+1} + {}^{i+1}\dot{w}_{i+1} + {}^{i+1}w_{i+1}x^{C_{i+1}}I_{i+1}{}^{i+1}w_{i+1} \tag{4.33}$$

Denklemde görülen I terimi cisme ait atalet tensörünü, w terimi cismin kütle merkezininin açısal hızını, N terimi ise uzuv üzerinde oluşan atalet momentlerinin toplamını temsil etmektedir. Sistemin hareketi esnasında oluşacak olan atalet terimleri belirlendikten sonra sırası ile her bir uzvu için ayrı olarak D'Alambert'in denge prensibinin uygulanması gerekmektedir. Şekil 4.10'da denklemlerin çıkarılmasında kullanılacak olan, uzuvdaki kuvvet dengesi şartı görülmektedir.



Şekil 4.10. Uzuvdaki kuvvet dengesi [48].

Sistemde kullanılan bütün uzuvların iki bağlantı noktasına sahip olduğu düşünülmektedir. D'Alambert'in dinamik denge prensibine göre uzvun tüm bağlantı noktalarından uzva uygulanan kuvvet bileşenlerinin toplamının, uzuv üzerinde hareket esnasında görülen atalet bileşenlerine eşit olması gerekmektedir. Algoritmanın dıştan içe doğru çalışacak bu adımında, bir sonraki uzva uygulanması gereken kuvvet ve tork değerlerinin önceden bilinmesi gerekmektedir. Bilinen bu kuvvet değerleri ile atalet etkileri toplanacak olursa, dinamik denge prensibine göre, bir önceki bağ noktasından uzva uygulanması gereken tork ve kuvvet bileşenleri belirlenmiş olacaktır. Denklem (4.34) ve (4.35)'de bir sonraki bağ noktasındaki kuvvetler ile atalet terimlerinin toplanması ile bir önceki bağ noktasına uygulanması gereken kuvvet bileşenlerinin elde edilmesi gösterilmektedir.

$$f_i = {}^{i}_{i+1}R^{i+1}\, f_{i+1} + {}^{i}F_i \tag{4.34}$$

$${}^{i}n_i = {}^{i}N_i + {}^{i}_{i+1}R^{i+1}\, n_{i+1} + {}^{i}P_{C_i} x {}^{i}F_i + {}^{i}P_{i+1} x {}^{i}_{i+1}R^{i+1}\, f_{i+1} \tag{4.35}$$

Robotun dinamik olarak dengede kalabilmesi için bağ noktalarından uygulanması gereken kuvvetleri belirledikten sonra, mafsallar tarafından uygulanması gereken tork bileşenlerine geçiş yapılmalıdır. Bu amaçla bağ noktalarında görülen mafsalların kayar veya döner olma durumuna göre denklem (4.36) veya (4.37)'de görülen eşitliklerle tahrik bileşenleri hesaplanmalıdır. Denklemde görülen ${}^{i}\hat{Z}_i$ terimi mafsalın kısıtlamalarını tanımlarken, τ_i terimi ise uygulanması gereken tork veya kuvvet bileşenlerini tanımlamaktadır.

$$\tau_i = {}^{i}n_i^T\, {}^{i}\hat{Z}_i \tag{4.36}$$

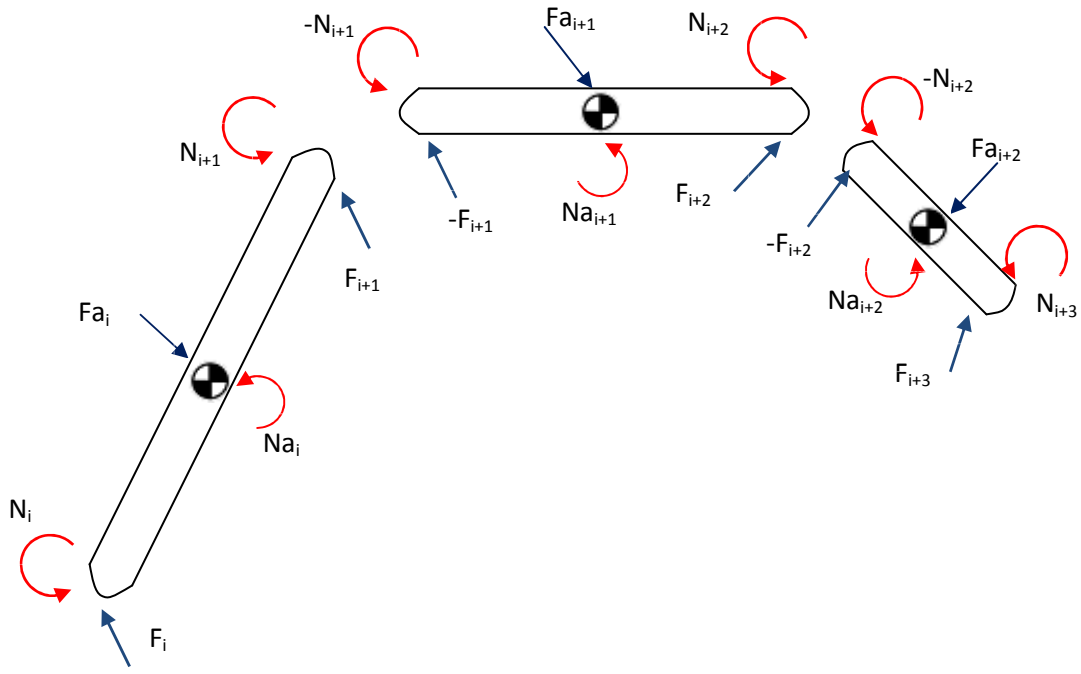
$$\tau_i = {}^{i}f_i^T\, {}^{i}\hat{Z}_i \tag{4.37}$$

Algoritmanın sıralı ve basit bir şekilde uygulanabiliyor olması, özellikle karmaşık hesaplamalar gerektiren yüksek serbestlik derecesine sahip yürüyen robotlarda kolayca kullanılabilmesine imkân sağlamaktadır. Bunun yanında algoritmanın ilk aşamasında hız ve ivme dağılımının hesaplanmasında simülasyon programlarının kullanılabiliyor olması, yüksek serbestlik derecesine sahip yürüyen robotlarda elzem olan hesaplama hızının artmasına katkı sağlamaktadır. Bu sebeplerden dolayı ABYMR için yapılacak olan dinamik analizde bu metot tercih edilecektir.

4.3. Newton-Euler Algoritmasının Uygulanması

Daha önceki bölümde de bahsedildiği gibi bu algoritma iki aşamadan oluşmaktadır. Algoritmanın birinci aşamasında daha önceden belirlenen bir yürüme yörüngesi için hız ve ivmelerin dağılımı gerçekleştirilecek; ikinci aşamasında ise hareket esnasında oluşacak olan atalet kuvvetlerine göre tahrik bileşenleri üretilecektir. Algoritmanın birinci bölümündeki hız ve ivme dağılımını gerçekleştirmek için MSC-ADAMS isimli dinamik analiz programından faydalanılacaktır.

Daha önceden belirlenmiş beş adımlık bir referans yürüme yörüngesi için, tüm uzuvlara ait ivme ve hız dağılımları program vasıtası ile zamana bağımlı bir fonksiyon olarak ölçülecektir. Bu hız ve ivme dağılımlarının yanında bacağın ucunda oluşacak olan kontak kuvvetlerinin elde edilmesinde yine simülasyon programından faydalanılacaktır. Bacaklarda kullanılan uzuvlar ve bunların sıralaması özdeş olduğu için formülasyon tek bir bacak üzerinde gösterilecektir. Hesaplamalar yapılırken altı her bir bacak için on sekiz tork değeri zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilecektir. Bir bacak yapısı üzerinde, Newton-Euler algoritmasına ait tahrik ve atalet kuvvetleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Newton-Euler algoritmasına ait tahrik ve atalet kuvvetleri.

Şekil 4.11'de görülen bacak sistemi için sıralı bir şekilde birinci uzuvdan başlayarak son uzva kadar D'Alambert'in dinamik denge prensibi uygulanacaktır. Şekilde gösterilen bağ noktalarındaki tork ve kuvvet değerlerinin belirlenmesinde, (4.38)-(4.40) arasındaki eşitlikler her bir uzva sıralı olarak uygulanmalıdır.

$$N_i = N_{A_i} + {}_{i+1}^{i}R^i . N_{i+1} + i_{P_{C_i}} x\, F_{A_i} + i_{P_{C_i}} x_{i+1}{}^{i}R^i . F_{i+1} \tag{4.38}$$

$$F_i = {}_{i+1}^{i}R^i . F_{i+1} + F_{A_i} \tag{4.39}$$

Bağ noktalarında oluşan kuvvet ve tork değişkenleri elde edildikten sonra hareket esnasında dinamik dengeyi koruyabilecek gerekli tahrik değerlerinin belirlenmesinde mafsallardaki sınırlamayı tanımlayan ${}^{i}\hat{Z}_i$ matrisinden faydalanılacaktır. Bu işleme ait eşitlik denklem (4.40)'da görülmektedir.

$$\tau_i = N_i{}^{T} .\ {}^{i}\hat{Z}_i \tag{4.40}$$

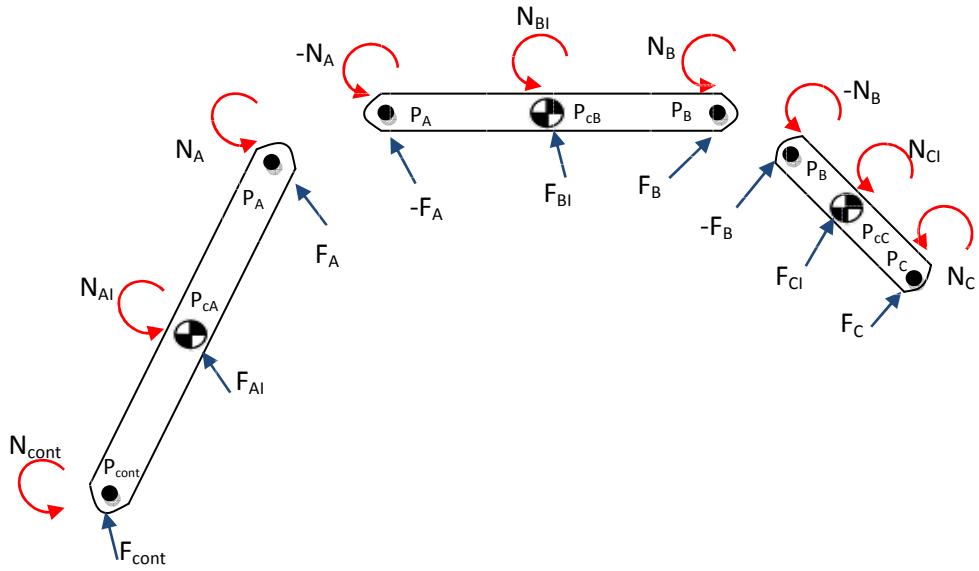
Denklem (4.38)-(4.40) arasındaki eşitlikler sisteme uygulanırken denklemde bulunan bazı terimlerin önceden tanımlanması gerekmektedir. Bu tanımlamalara ait eşitlikler denklem (4.41)-(4.43) ile ifade edilmiştir.

$$N_i = \begin{bmatrix} T_{Xi} \\ T_{Yi} \\ T_{Zi} \end{bmatrix} \quad F_i = \begin{bmatrix} F_{Xi} \\ F_{Yi} \\ F_{Zi} \end{bmatrix} \quad {}_{i+1}^{i}R^i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad i_{P_{C_i}} = \begin{bmatrix} P_{cx} \\ P_{cy} \\ P_{cz} \end{bmatrix} \tag{4.41}$$

$$F_{A_i} = \begin{bmatrix} m_i . a_{x_i} \\ m_i . a_{y_i} - m_i . g \\ m_i . a_{z_i} \end{bmatrix} \tag{4.42}$$

$$N_{A_i} = {}^{C_{i+1}}I_{i+1} + {}^{i+1}\dot{w}_{i+1} + {}^{i+1}w_{i+1} x {}^{C_{i+1}}I_{i+1}\, {}^{i+1}w_{i+1} \tag{4.43}$$

Yukarıdaki denklemler sisteme uygulanırken daha anlaşılabilir bir tork ifadesi yazabilmek için bacağın üç uzvu olan TIBIA, FEMUR ve COXA uzvunu temsilen Şekil 4.12'deki A, B ve C uzuvları kullanılmıştır. Tork ve kuvvetler, şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Uzuv gösteriminde tahrik ve atalet kuvvetleri.

Newton-Euler algoritmasının ikinci aşaması uygulanırken dıştan içe doğru kuvvetler dengesi yazılacaktır. Öncelikle yer ile temas eden P_{cont} noktasındaki kontak kuvvetleri doğrudan simülasyon programından elde edilecektir. A uzvunun kütle merkezindeki atalet kuvvetleri elde edilirken, programdan zamanın bir fonksiyonu olarak alınan hız ve ivme bileşenleri (4.42) ve (4.43) eşitliklerinde yerine koyulacaktır. Daha sonra P_A noktasından uygulanması gereken kuvvetler bu uzuv için yazılan denge denkleminden elde edilecektir. Hareket esnasındaki A uzvuna ait moment denge şartından faydalanılarak yazılan A noktasından uygulanması gereken tork değerleri denklem (4.44) ile ifade edilmektedir.

$$N_A = N_{AI} + N_{Cont} + \binom{PcA\ ile\ PA}{arası\ mesafe} xF_{AI} + \binom{PA\ ile\ Pcont}{arası\ mesafe} xF_{Cont} + N_{Ayay} \qquad (4.44)$$

Bu eşitlik yazılırken tork ve pozisyon tanımlamalarının aynı çerçevede olmasını sağlamak için dönme matrislerinden faydalanılmaktadır. Beş bileşenden oluşan bu tork değeri yazılırken, mafsalda bulunan döner yay elemanının oluşturmuş olduğu tork, kütle merkezinde oluşan atalet momenti ve bir sonraki noktadan uygulanan N_{cont} bileşeni bağ noktasına doğrudan etki etmektedir. Kütle merkezinde oluşan atalet kuvvetleri ve bir sonraki uzuvdan uygulanan F_{cont} bileşeni bulunduğu pozisyona bağlı olarak vektörel bir çarpım şeklinde denkleme etki etmektedir. Kuvvetin pozisyon ile vektörel olarak çarpılması durumu bir nokta etrafında yazılan moment ifadesi gibi düşünülebilir.

Hareket esnasında A uzvundaki kuvvet dengesi göz önünde bulundurulacak olursa, dinamik dengeyi koruyabilecek bir önceki uzuvdan uygulanması gereken bağ kuvvetlerinin eşitliği denklem (4.45)'de görüldüğü gibi oluşacaktır.

$$F_A = F_{Cont} + F_{AI} \tag{4.45}$$

Dinamik kuvvet dengesi şartına göre P_A noktasındaki kuvvet, P_{cont} noktasındaki F_{cont} ve A uzvunun kütle merkezinde oluşan atalet kuvvetlerinin toplamı şeklinde hesaplanabilmektedir. Bu kuvvetler yazılırken değişkenlerin aynı çerçevede olmasını sağlamak amacı ile dönme matrisi kullanılacaktır.

A noktasındaki bağ kuvveti bileşenleri elde edildikten sonra Newton'un üçüncü yasasından faydalanılacaktır. Bu yasaya göre bir cisme yapılan her etki karşısında ters yönlü ve eşit bir tepki oluşturmaktadır. A uzvuna ait bağ noktasında oluşan kuvvetlerden, aynı bağ noktasına bağlı B uzvunda oluşacak tepki kuvvetlerine geçişte, daha önce bu bağ noktası için hesaplanan F_A ve N_A değerlerinin negatifleri alınacaktır.

Diğer uzuvlara ait kuvvet bileşenleri hesaplanırken aynı yaklaşım izlenecektir. Bir önceki bağ noktasında elde edilen kuvvetler ve momentler yardımı ile bir sonraki bağ noktasında dinamik denge şarıtna göre uygulanması gereken bağ kuvvetleri belirlenmiş olacaktır. Diğer bağ noktalarında oluşacak olan kuvvetlerin belirlenmesi için sırası ile (4.46)-(4.49) denklemleri arasındaki eşitlikler uygulanmalıdır.

$$N_B = N_{BI} + N_A + \binom{PcB\ ile\ PB}{arası\ mesafe} xF_{BI} + \binom{PB\ ile\ PA}{arası\ mesafe} xF_A + N_{Byay} \tag{4.46}$$

$$F_B = F_A + F_{BI} \tag{4.47}$$

$$N_C = N_{CI} + N_B + \binom{PcC\ ile\ PB}{arası\ mesafe} xF_{CI} + \binom{PC\ ile\ PB}{arası\ mesafe} xF_B + N_{Cyay} \tag{4.48}$$

$$F_C = F_B + F_{CI} \tag{4.49}$$

Tamamı döner mafsala sahip robot için tüm bağ noktalarındaki kuvvetler belirlendikten sonra, robota ait tahrik bileşenleri elde edilirken (4.51)-(4.53) denklemleri kullanılacaktır. Tahrik bileşenlerinin hesaplanması için gerekli eşitlikler (4.50)-(4.52) arasında görülmektedir.

$$\tau_i = {N_i}^T . i_{\hat{Z}_i}({}^i_{i+1}R^i) \tag{4.50}$$

$$N_A = \begin{bmatrix} T_{XA} \\ T_{YA} \\ T_{ZA} \end{bmatrix} \qquad N_B = \begin{bmatrix} T_{XB} \\ T_{YB} \\ T_{ZB} \end{bmatrix} \qquad N_C = \begin{bmatrix} T_{XC} \\ T_{YC} \\ T_{ZC} \end{bmatrix} \tag{4.51}$$

$$T_1 = N_A . \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad T_2 = N_B . \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad T_3 = N_C . \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.52}$$

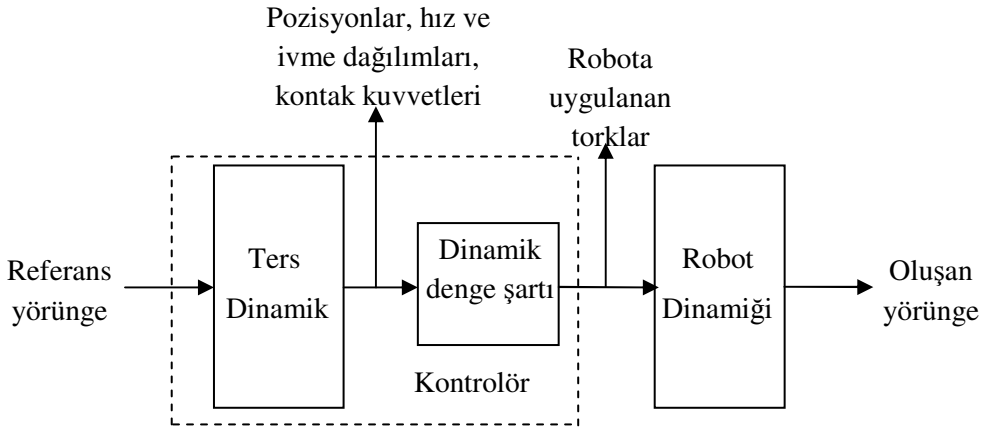
4.4. Kılavuzlu Çalışma Algoritması

Yapılan dinamik analizde, karmaşık sistemlere bile hızlı bir şekilde uygulanabilmesinden dolayı Newton-Euler metodu tercih edilmiştir. Bu algoritma uygulanırken ilk adımda hız ve ivme dağılımları yapılırken, ikinci adımda ise D'Alambert'in dinamik denge prensibinden faydalanarak kuvvetler belirlenmektedir. Algoritmada işlem yükünü artıran en önemli kısım hız ve ivmelerin dağılımının belirlenmesidir. Bu işlem yapılırken öncelikle belirli bir referans yörüngeye göre ters kinematik işlemi gerçekleştirilmelidir.

Ters kinematik işleminde gövdenin belirli bir konuma gidebilmesi için, gerekli olan mafsal pozisyon bileşenleri tanımlanmaya çalışılmaktadır. Belirli bir noktaya sabitlenmiş endüstriyel robotlar için bile bazı durumlarda ters kinematik işlemi, kapalı formda bir denklem olarak elde edilemeyebilmektedir. Aşırı-tahrikli (Redundant) ve holonomik olmayan kısıtlara sahip on sekiz serbestlik derecesi bulunan yürüyen bir mobil robotta, bu işlem için kapalı formda bir eşitlik elde edilmesi oldukça zordur.

Ters kinematik işlemi sonrasında yörünge şartlarını sağlayabilen, mafsallara ait pozisyon değişkenlerinin elde edilmesinin ardından, hareket sırasında uzuvlar üzerinde oluşacak lineer ve açısal hızlar tanımlanmalıdır. Uygulamada Jakobiyen matrisi olarak bilinen matris sayesinde bu ilişki tanımlanabilmektedir. On sekiz serbestlik derecesine sahip robotta 6x18 boyutlarında olacak matrisin oluşturulması oldukça zor bir işlemdir.

Bu algoritmada analitik bir metot yerine, hesaplamada ağır yük taşıyan ters kinematik, ileri yönlü hız-ivme dağılımı ve kontak kuvvetlerinin belirlenmesi problemlerinin çözümünde, önden koşturulan bir ters dinamik modeli kullanılacaktır. Simülatör yardımı ile tanımlanan referans yörüngeden, ters dinamik sonucunda elde edilmesi gereken mafsal ve uzuv pozisyonları, lineer ve açısal hız-ivme dağılımları ve zemin ile bacaklara arasında oluşacak olan kontak kuvvetleri elde edilmiş olacaktır. Hesaplama metodu ile robot kontrolüne ait diyagram Şekil 4.13'te görülmektedir.



Şekil 4.13. Hesaplama metodu ile robot kontrolü.

Kılavuzlu çalışma algoritması olarak tanımlanan metotta, ters dinamiğin simülatöre hesaplatılmasından sonra bu bileşenleri kullanarak dinamik denge şartı yazılacak olursa, referans yörüngenin gerçekleştirilebilmesi için robota uygulanması gereken tork bileşenleri elde edilmiş olacaktır. Daha sonra elde edilen bu tork değerleri, dinamik simülasyon programında modellenmiş olan robot üzerine uygulanarak, referans yörüngeye benzer bir hareket gerçekleştirilmiş olacaktır.

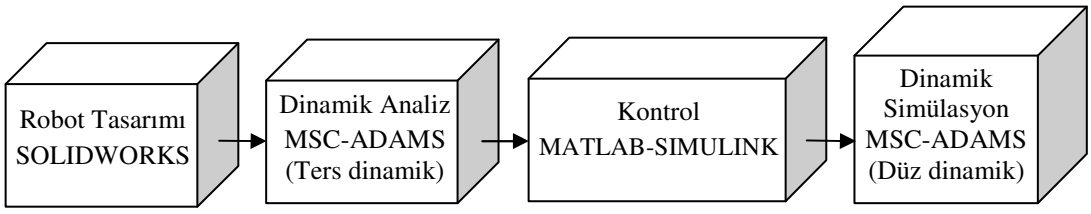
Sonuç olarak önerilen bu metot ile dinamik analizde oldukça fazla işlem yükü oluşturan ters dinamik problemi, sabit adımlı bir çözücü (Solver) kullanan genelleştirilmiş bir dinamik analiz programında hızlı ve doğru bir şekilde çözülmüş olacaktır. Bunun yanında çözücüye ait adım boyu, gerçek zamanlı çalışmaya uygun seçilerek, Şekil 4.13'te açık çevrimi görülen yapının, geri beslemeli bir kontrolörde kullanılabilmesi mümkündür. Bu sebeple önerilen hesaplama metodunun, gerçek bir bacaklı mobil robot üzerinde hızlı ve doğru bir kontrol sağlaması beklenmektedir.

5. BÖLÜM

SİMÜLASYON SONUÇLARI

5.1. Simülasyon Programları

Bu bölümde öncelikle simülasyonun gerçekleştirileceği programlar üzerinde durulacaktır. Burada daha önce SOLIDWORKS programında bir montaj halinde çizilen robot, dinamik analiz modelinin oluşturulması için MSC-ADAMS programına aktarılacaktır. Daha sonra programda belirlenen dinamik değişkenler, MSC-ADAMS kontrol modülü kullanılarak MATLAB-SIMULINK platformuna taşınacaktır. Bu programda, aktarılan verilerden D'Alambert denge prensibi yardımıyla, tahrik için gerekli tork değerleri hesaplanacaktır. Daha sonra bu değerlerin dinamik simülasyon için tekrar MSC-ADAMS programındaki dinamik modele uygulanması ile kontrol sonucundaki gövde yörüngesi elde edilecektir. Şekil 5.1'de görülen akış diyagramında simülasyon programlarının sıralı olarak çalışma şekli açıklanmıştır.



Şekil 5.1. Simülasyon programların sıralı olarak çalışma görünümü.

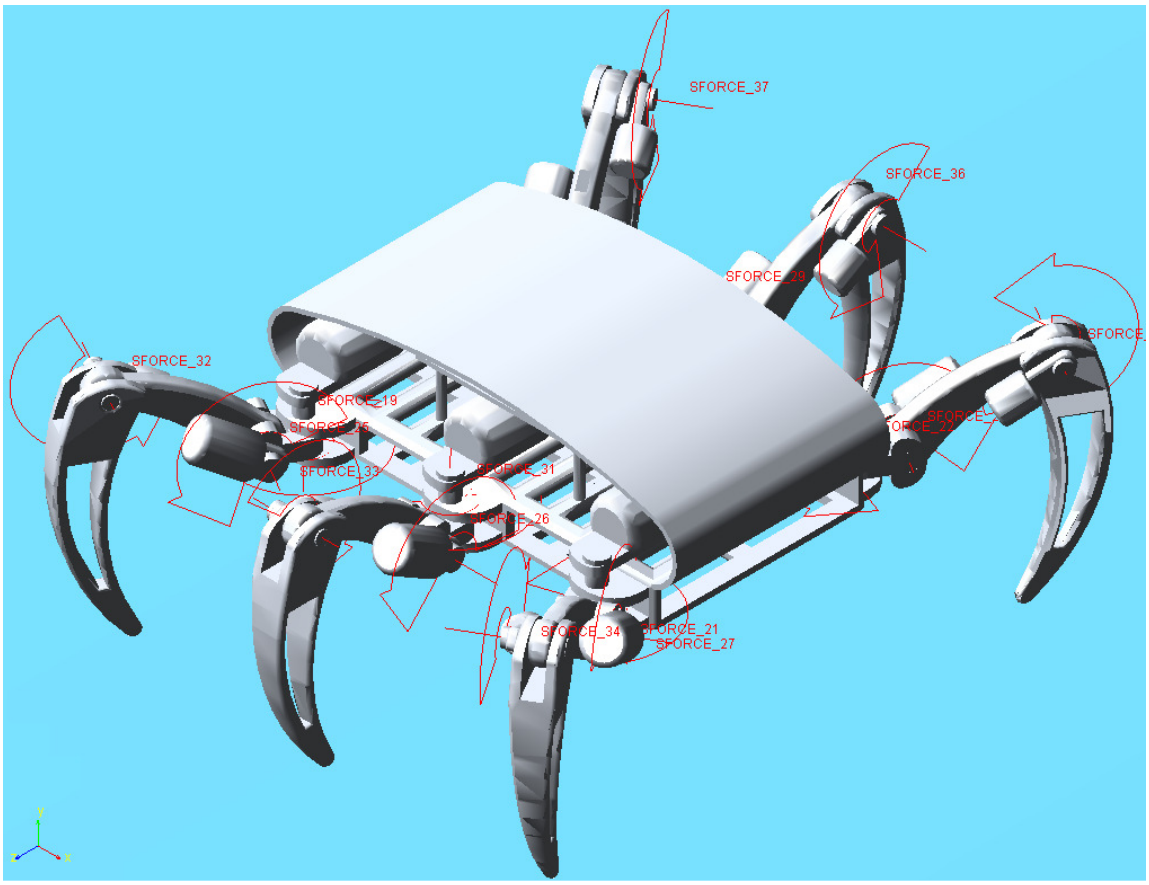
İlk olarak, SOLIDWORKS programı ile üç boyutlu bir montaj dosyası olarak tasarımı gerçekleştirilen robot, genelleşmiş bir kayıt formatı olan Parasolid formatında kaydedilecektir. Robotun uzuv kütlelerinin dinamik analiz programında bilinebilmesi için çizim esnasında katı modele ait gövde malzemesi olarak 1060 alaşımlı alüminyum tercih edilmiştir.

2.7 kg/m³ yoğunluğuna sahip bu malzemeye göre, her bir uzva ait, kütleler ile uzvun şekilsel yapısını tarifleyen atalet tensörleri SOLIDWORKS programı ile belirlenmiştir. Daha sonra MSC-ADAMS programındaki modelde robota ait mafsallar oluşturulmuş ve zemin ile teması bulunan ayaklar arasında kontaklar tanımlanmıştır. Mafsalların tamamı döner mafsallar olarak seçilirken, ayaklar ile zemin arasındaki statik sürtünme katsayısı 0.9, dinamik sürtünme katsayısı ise 0.8 olarak tanımlanmıştır. Ayak ile zemin arasındaki ilişkiyi tanımlayan yay sabiti ve sönüm katsayısı 10^8 ve 10^4 olarak belirlenmiştir. Robotun hareketi esnasında kararsızlığa gitmemesi için bütün mafsallarda yay değeri 1 Nm/deg ve sönüm değeri 0.1 Nms/deg olan döner (torsional) spring elemanları kullanılmıştır.

Algoritmanın doğruluğunu sınayabilmek için toplam on sekiz serbestlik derecesine sahip robota, hız dağılımlarının gerçekleştirilebileceği bir yörünge tanımlamak gerekmektedir. Standart tripod yürüme olarak bilinen yürüme düzeni için, otuz saniyelik beş adımdan oluşan bir yürüme yörüngesinde robot ileri yönde 25 cm hareket ettirilecektir. Bu amaçla, referans yörüngeyi sağlayıp bu yörünge üzerinden hız-ivme dağılımları, kontak kuvvetleri ve ters kinematiğe ait verilerin elde edilmesi için, sisteme harici olarak tork bileşenleri uygulanmıştır.

Tezin kapsamında hareket planlamaya dair bir konu olmadığı için, harici tork değerleri referans yürümenin elde edilmesi amacı ile sadece bu aşamada kullanılmıştır. Robota ait ters dinamik hesaplamaların tamamlanmasından sonra dinamik simülasyon aşamasında bu harici tork değerleri kullanılmayacaktır. Şekil 5.2'de MSC-ADAMS programında modellenen yapı üzerinde, harici olarak uygulanan harici torklar resim üzerinde gösterilmiştir.

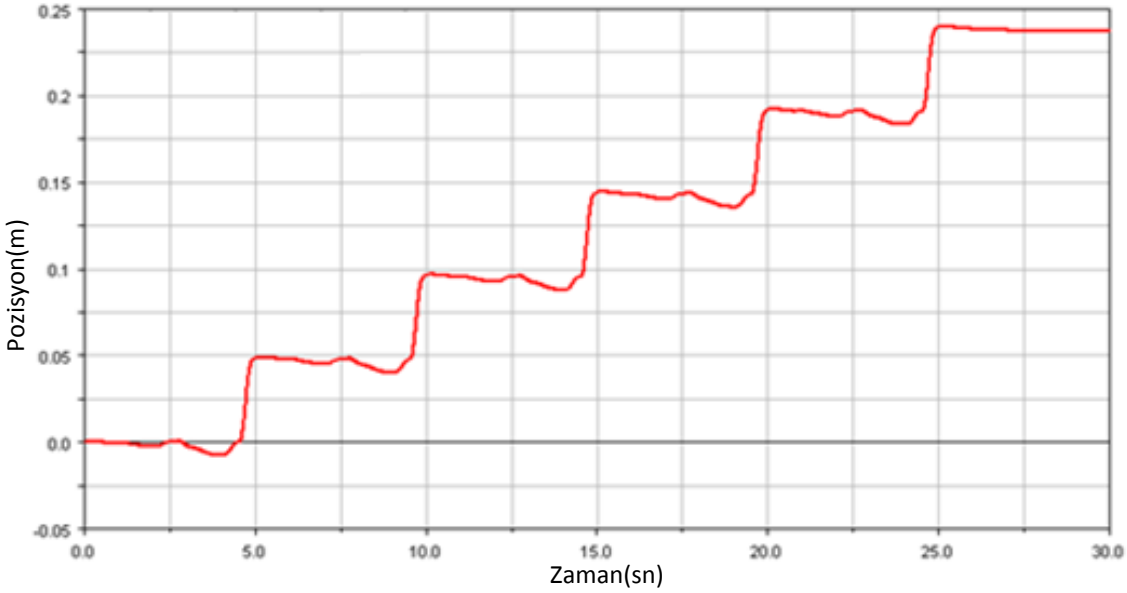
MSC-ADAMS programında kontaklar, mafsallar gibi dinamik parametreler model üzerinde tanımlandıktan sonra standart bir tripod yürüme yörüngesi için tork bileşenleri zamanın bir fonksiyonu olarak girilmiştir. Bu yürüme şeklinde her bir adım üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada robotun bir yanındaki iki bacakla onun karşısındaki orta bacağın yer ile teması kesilerek bu üç bacak, adım sonrasındaki konumuna getirilmektedir. İkinci aşamada ise, birinci aşamada yeni konumuna taşınmayan üç bacağın yeni konumuna taşınması gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.2. MSC-ADAMS programında modellenen 6 bacaklı yürüyen robot yapısı ve uygulanan harici torkların etkisi.

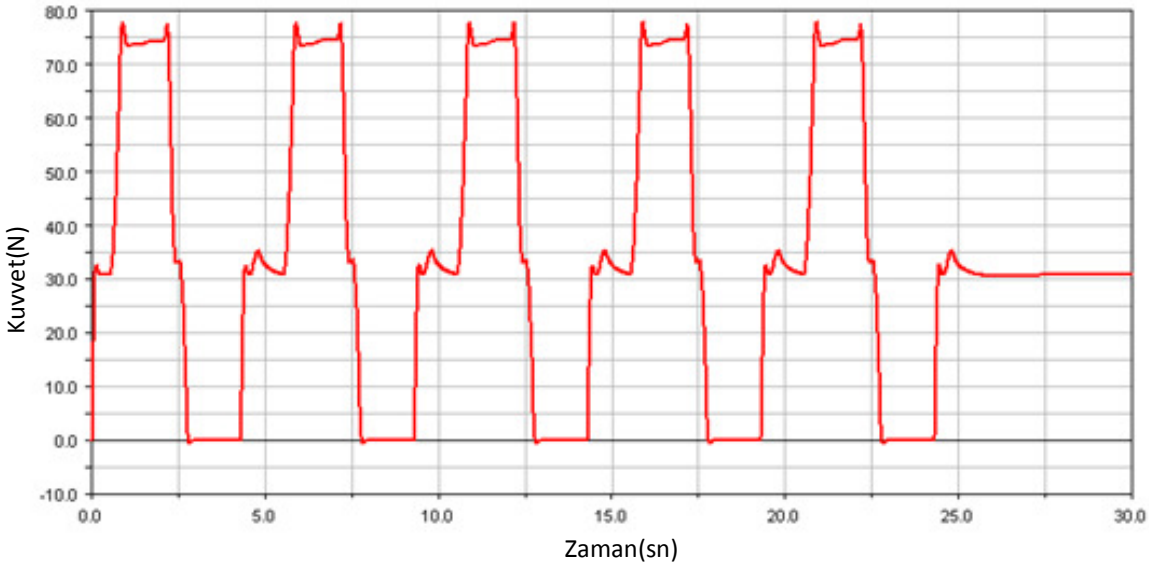
Adımın son aşamasında ise gövde pozisyonu bacaklara göre eski konumuna getirilmektedir. Bu sayede robot gövdesi bacak taşıma mesafesince ilerlemiş olmaktadır. Bu yürüme şeklinde, robotun toplam ağırlık merkezinin, yer ile temas eden bacakların oluşturduğu taban alanının dışına çıkmamasından dolayı, yürüme esnasında herhangi bir devrilme olayı ile karşılaşılmamaktadır.

Belirlenen yürüme şeklini sağlayan harici torkların modele uygulanmasından sonra, robot otuz saniye süre için simüle edilmiştir. Bu simülasyon sonucunda robot üzerinde oluşan pozisyon, hız, ivme ve kuvvetler gibi birçok bileşen için hesaplanmış değerler kayıt edilmiştir. Şekil 5.3'te beş adımlık bir yürüme için yapılan otuz saniyelik simülasyonun sonucunda, robotun gövdesinin kütle merkezinin X yönündeki değişimi zamana bağlı olarak gösterilmektedir.



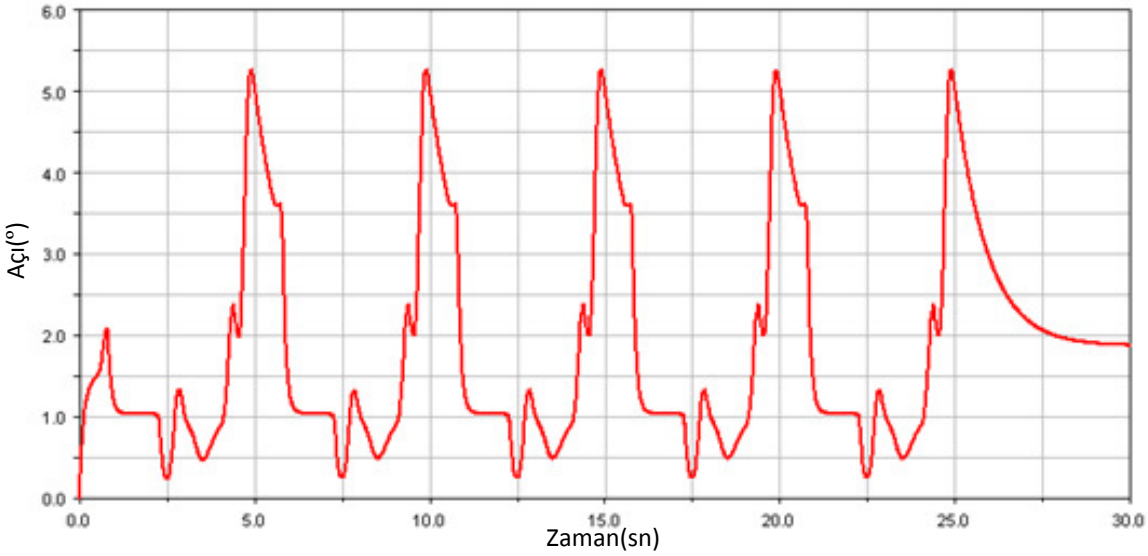
Şekil 5.3. Robotun gövdesinin kütle merkezinin X yönündeki değişimi.

Bu simülasyon sırasında oluşan verilerden bir kısmı örnek olarak burada gösterilecektir. Şekil 5.4'te yer ile kontağı olan, robot üzerindeki TIBIA uzuvlarından hareket yönüne göre sol orta tarafta bulunan bacağın yer ile temasında oluşan Y yönündeki kuvvet bileşeninin zamana bağlı değişimi görülmektedir.

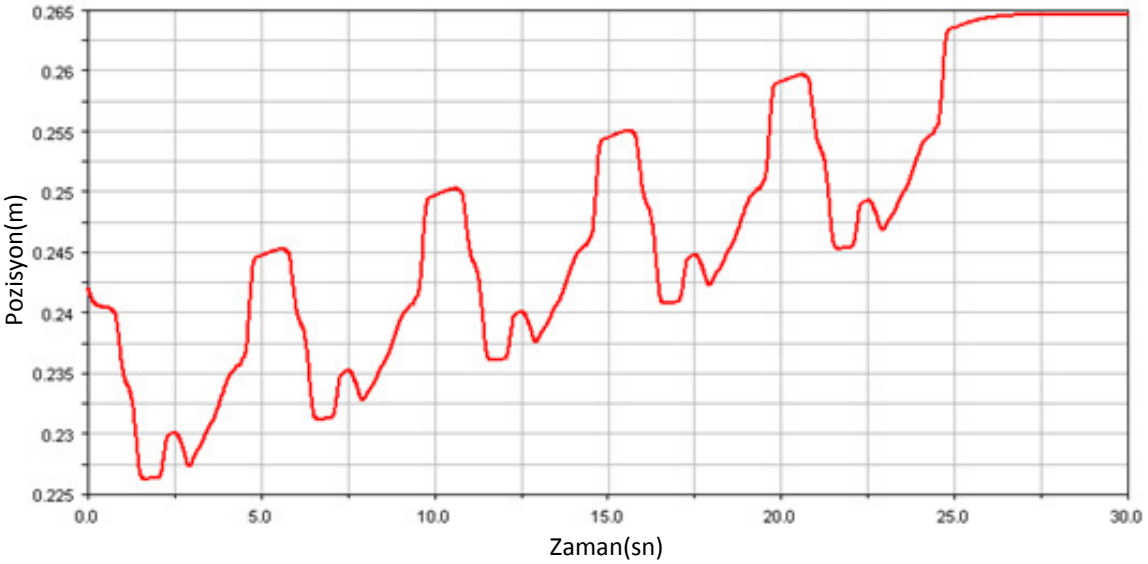


Şekil 5.4. TIBIA uzvunun yer ile temasında oluşan Y yönündeki kuvvet.

Şekil 5.5'te hareket yönüne göre sol ön bacaktaki TIBIA-FEMUR uzuvları arasında bulunan mafsaldaki açısal değişimin zamana bağlı grafiği görülmektedir.

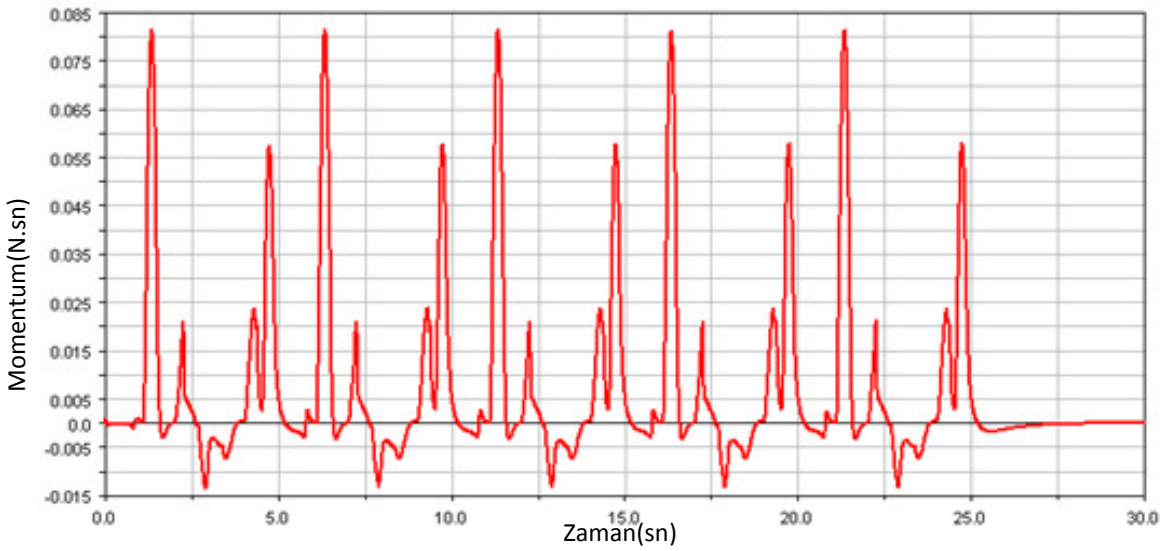


Şekil 5.5. TIBIA-FEMUR mafsalındaki açısal değişim.



Şekil 5.6. FEMUR uzvunun kütle merkezinde Z yönündeki pozisyon değişimi.

Şekil 5.6'da hareket yönüne göre sağ orta bacaktaki FEMUR uzvunun kütle merkezinde oluşan Z yönündeki pozisyon değişimi görülmektedir. Şekil 5.7'de aynı uzvun X ekseni yönündeki lineer momentumun değişimi zamana bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 5.7. FEMUR uzvunun X ekseni yönündeki lineer momentumun değişimi.

Kılavuzlu çalışma algoritmasının ilk aşamasında, Şekil 5.3'deki yürüme yörüngesini elde etmek için, simülasyon aşamasındaki robota harici tork değerlerinin uygulanması ile robot üzerinde oluşan hız-ivme dağılımı, kontak kuvvetleri, pozisyonlar gibi birçok parametre elde edilmiştir. Otuz saniyelik simülasyon yapılırken, çözücü için sabit adım zamanı 0.006 saniye olarak belirlenmiştir. Hesaplama süresi ve çözüm kalitesi arasındaki ilişki değerlendirildiğinde, simülasyon aşamasında belirlenmesi gereken bu adım zamanının, uygun bir değerde olduğu görülmüştür.

Şekil 5.1'de görülen yapıya uygun olarak ters dinamik sonucu elde edilen bu veriler robotun kontrolünün gerçekleştirileceği MATLAB-SIMULINK programına taşınacaktır. Bu veriler aktarılırken MSC-ADAMS programındaki Postprocessor modülünden faydalanılacaktır. Analiz esnasında elde edilen veriler bu modülde grafiksel olarak çizdirildikten sonra veriler standart bir kayıt formatında dışarı aktarılacaktır. Daha sonra MATLAB-SIMULINK programında uzuvlar üzerinde görülen lineer ve açısal momentumun zamana bağlı değişimlerinin türevleri alınarak hareket esnasında oluşacak atalet kuvvetleri ve momentlerinin belirlenmesi sağlanacaktır. Kontrol öncesinde gerekli olan tork değerleri hesaplatılırken, taşınan bu verilerden ve D'Alambert'in dinamik denge şartından faydalanılacaktır. Elde edilen bu tork değerleri MATLAB-SIMULINK platformundaki ADAMS-CONTROL bloğuna uygulanacak ve dinamik simülasyon işlemi gerçekleştirilecektir.

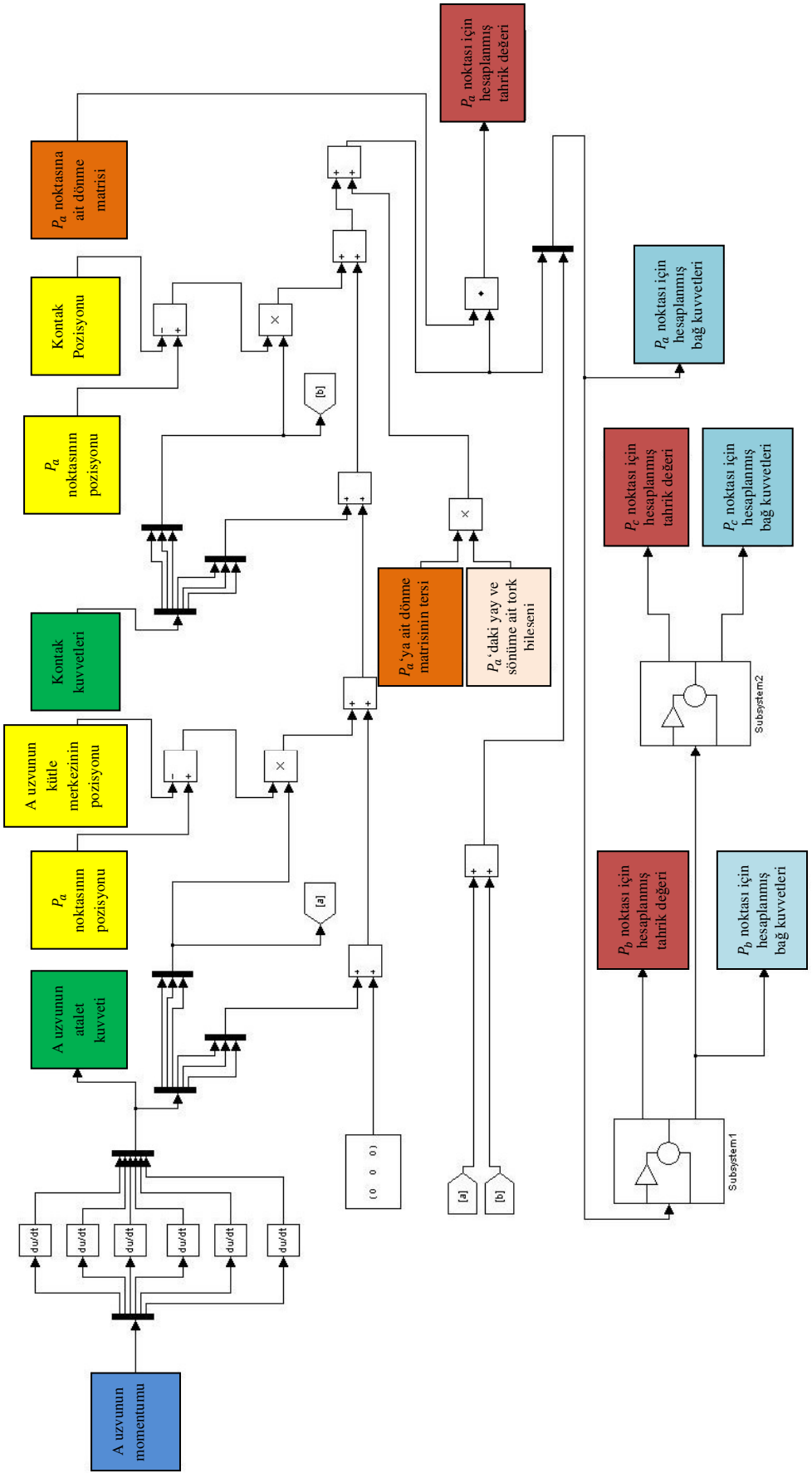
5.2. Analizde Elde Edilen Denklemlerin Uygulanması

Bu bölümde dinamik denge şartına göre her bir bacak için ayrı olarak yazılan tork eşitliklerinin uygulaması gerçekleştirilecektir. Bacağın en uç noktasından gövdeye doğru sırasıyla yazılan dinamik denge denklemleri ile mafsalların bulunduğu bağ noktalarındaki kuvvetler belirlenecektir. Daha sonra belirlenen bu bağ kuvvetlerinden sınırlama matrisleri yardımı ile tahrik bileşenleri elde edilecektir. Robot, üç boyutlu uzayda hareket ettiği için hesaplamalar kartezyen koordinatlarda gerçekleştirilecektir. Bu koordinat sistemine göre yapılacak hesaplamalarda her bir bağ noktasında üçü eksenel kuvvetler ve üçü eksenler etrafındaki torklar olmak üzere altı bileşen bulunmaktadır.

Dinamik analiz sonucunda elde edilen, (4.44) ve (4.49) arasındaki eşitlikler her bir bacaktan toplanan datalar için ayrı olarak uygulanacaktır. Şekil 5.8'de bu verilerin uygulanacağı model görülmektedir. Bu modelde TIBIA uzvunun kütle merkezinde oluşan atalet kuvvetleri belirlenirken, data toplama aşamasında elde edilen lineer ve açısal momentum değişiminin zamana göre türevi alınarak cismin kütle merkezinde oluşan atalet kuvvetleri bulunacaktır. Data toplama esnasında bu ölçüm global eksen takımına göre yapıldığı için, bu veriler herhangi bir dönme matrisi ile çarpılmayacaktır.

Denklem (4.44)'deki, P_a noktasındaki bağ kuvvetlerinin torklarına ait eşitlik yazılırken, hareket esnasında TIBIA uzvunun kütle merkezinde oluşan atalet momentleri toplama direkt olarak etki edecek, kütle merkezinde görülen atalet kuvvetleri, P_a ile P_{ca} arası mesafe ile vektörel olarak çarpılacaktır. Atalet kuvvetlerine uygulanan vektörel çarpım işlemi bir nokta etrafındaki kuvvetin nokta üzerinde oluşturacağı moment etkisine benzetilebilir.

Daha sonra elde edilen bu toplama, TIBIA uzvunun ucunda görülen kontakt bileşenleri etki edecektir. Bu bileşenler toplama eklenirken atalet bileşenlerine uygulanan işleme benzer bir prosedür uygulanacaktır. Bu anlamda hareket esnasında oluşan kontakt momentleri eşitliğe doğrudan eklenecek, kontak kuvvetleri ise P_a ile P_{cont} arası mesafe ile çarpılarak eşitliğe eklenecektir. Data toplama aşamasında pozisyonlar ve kuvvet bileşenlerinin global eksene göre elde edilmesinden dolayı bu terimlere herhangi bir dönme matrisi uygulanmayacaktır. Modelde görülen pozisyonlar, zamana bağlı değişim gösteren üç terimli bir vektördür.

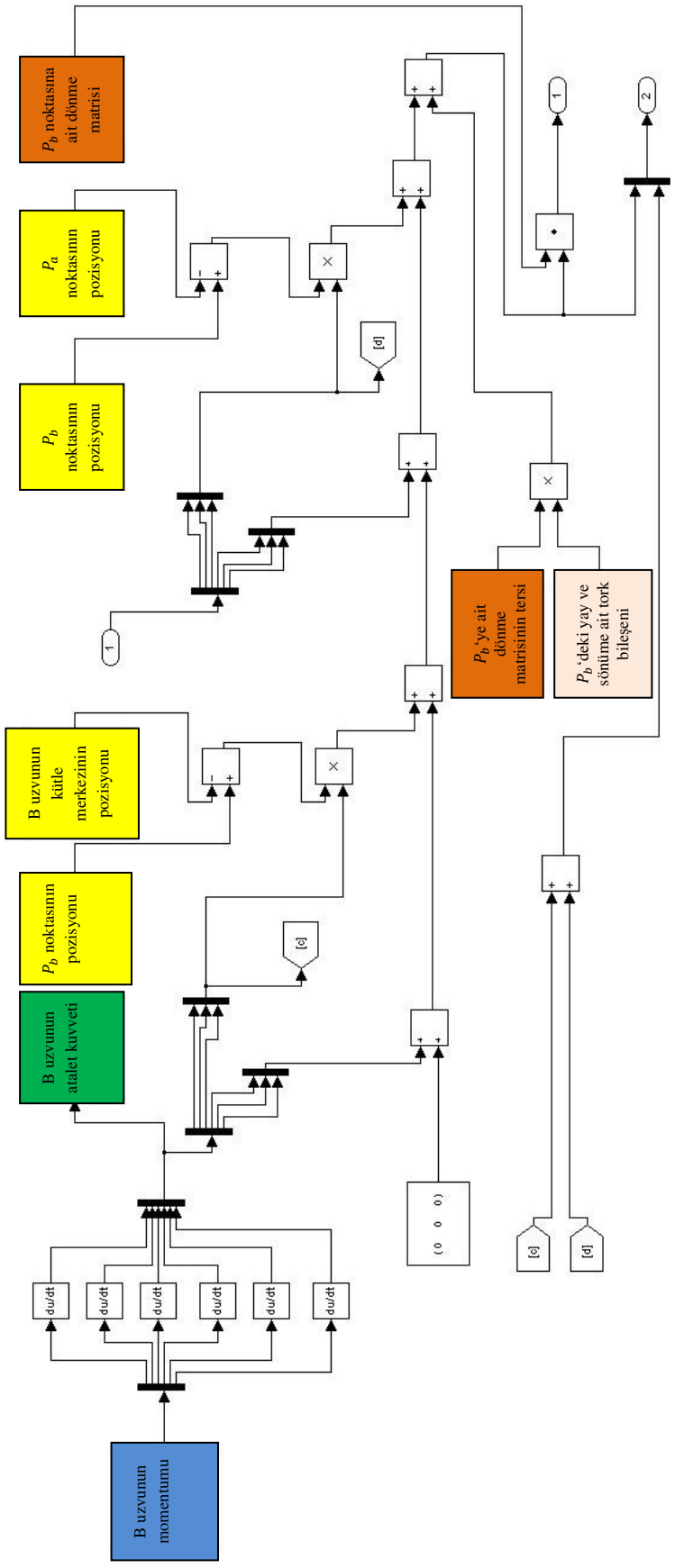


Şekil 5.8. Simulink'te analiz modeli görünümü

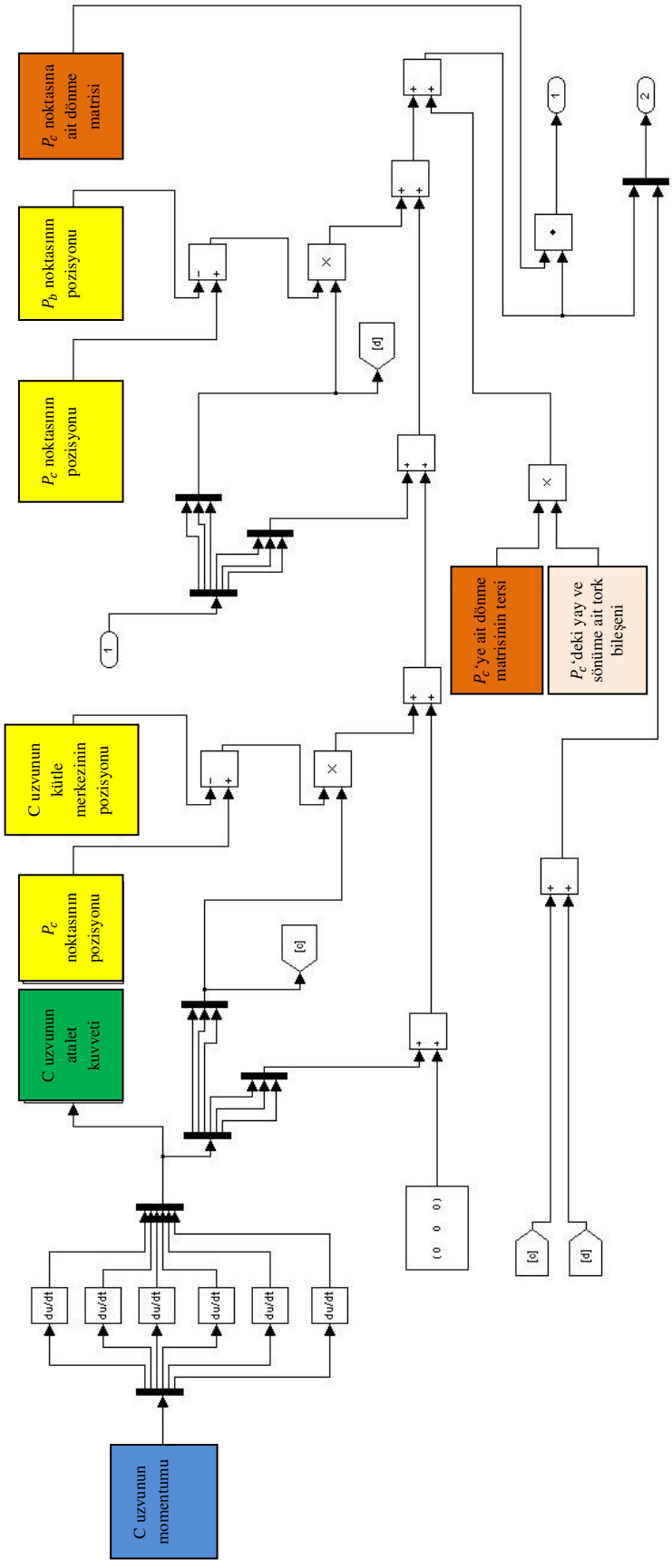
Mafsallarda kullanılan döner yay elemanlarının hareket esnasında oluşturdukları tork değerlerinin toplama eklenmeden önce dönme matrisinden geçirilmeleri gerekmektedir. Ters dinamiğin simülasyonu aşamasında yayların hareket esnasında ürettikleri torklar yayın bağlı olduğu çerçeveye göre üretilmektedir. Hesaplamaların global eksende gerçekleştirilmesinden dolayı yayda oluşan bu değerin yönlenmesinin (oryantasyon) referans eksen takımının yönlenmesine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla yön kosinüsleri (direction cosines) olarak bilinen 3x3 boyutunda bir dönme matrisi kullanılacaktır. Döner yay elemanı P_a noktasındaki eksen takımı üzerinde sadece Z ekseni etrafında bir tork oluşturduğu için bu noktadan global eksene yapılacak dönüşümde, matrisin sadece r_{13} - r_{23} - r_{33} terimleri kullanılacaktır. Bu dönüşüm için modelde döner yay elemanının oluşturmuş olduğu tork ile zamana bağlı bu terimler vektörel olarak çarpılmaktadır.

Kontak kuvvetleri ve atalet kuvvetlerinin mafsaldaki bağ noktasında oluşturduğu kuvvetler hesaplanırken denklem (5.45)'te olduğu gibi doğrudan bir toplam gerçekleştirilecektir. İşlem sonunda, modeldeki bir bağ noktası için referans eksen takımına göre yazılmış altı bileşenden oluşan bir kuvvet vektörü elde edilmiştir. Bu bağ kuvvetlerinden faydalanılarak, sırası ile Altsistem1 ve Altsistem2 de bulunan modellerde FEMUR ve COXA uzuvları için dinamik denge şartı yazılacak ve bu sayede bacakta bulunan ikinci ve üçüncü mafsallardaki bağ kuvvetleri hesaplanmış olacaktır. Bu alt sistemlerin içyapısı şekil 5.9 ve 5.10'da verilmiştir.

Yürüyen robota ait bacaklarda bulunan her bir bağ noktası için bağ kuvvetleri elde edildikten sonra bu değerlerden sınırlama ve dönme matrisleri yardımı ile tahrik bileşenleri hesaplanmıştır (Denklem 4.50). Öncelikle referans eksen takımına göre bulunan bağ kuvvetlerinin yönlenmesinin, tahrik kuvvetinin uygulanacağı P_a noktasında bulunan eksen takımının yönlenmesine dönüştürülmesi gerekmektedir. Mafsalın yapısını tarifleyen sınırlama matrisi daha önce denklem (4.52)'de görüldüğü gibi sadece Z yönünde bir değere sahiptir. Bu yüzden bağ noktalarında elde edilen torklar, tahrikin yapılacağı eksen takımına dönüştürülürken sadece Z ekseni bileşeni dikkate alınacaktır. Bu amaçla yön kosinüsleri matrisindeki r_{31} - r_{32} - r_{33} değerleri alınacak, referans eksen takımına göre belirlenen bağ torkları ile skaler olarak çarpılacaktır. Bu skaler çarpımın sonucunda tek bir bileşenden oluşan tahrik değişkeni bulunmuş olacaktır.



Şekil 5.9. Analiz modelindeki birinci alt sistem (subsystem1).

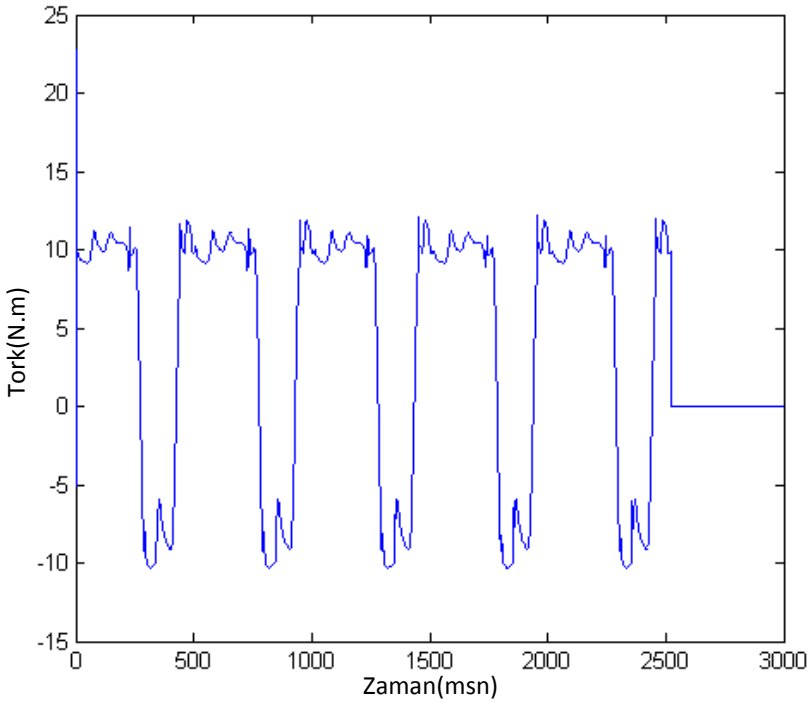


Şekil 5.10. Analiz modelindeki ikinci alt sistem (subsystem2).

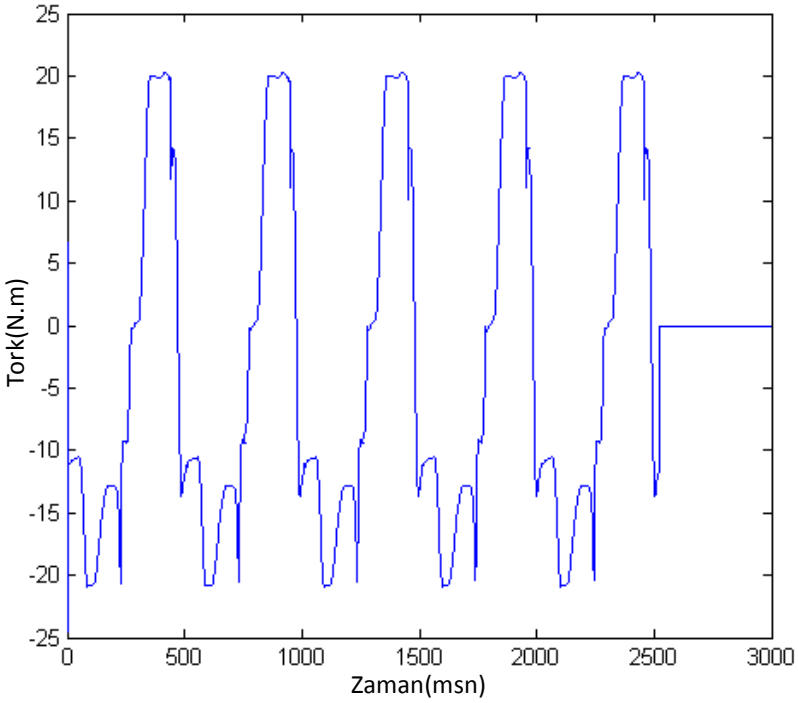
5.3. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, oluşturulan modele, daha önce Newton-Euler denkleminin ilk aşamasındaki simülasyon programı ile elde edilen pozisyon bileşenleri ve dönme matrisleri gibi değişkenler uygulanacak, dinamik olarak dengeli bir hareketi sağlayacak tork bileşenlerinin elde edilmesi gerçekleştirilecektir. Daha sonra elde edilen bu tork değerleri MATLAB-SIMULINK programındaki MSC-ADAMS kontrol bloğuna uygulanacaktır.

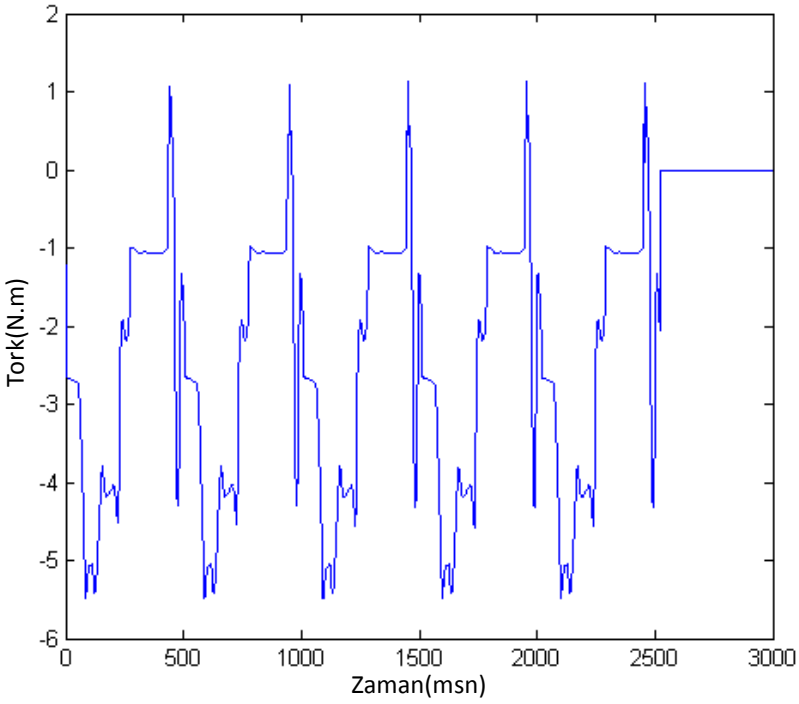
Daha önceki bölümde elde edilen modele, altı bacak için ayrı olarak toplanmış veriler uygulanarak simülasyon altı defa çalıştırılacaktır. Bacak yapıları ve uzuvların hesaplamaya katılma sıraları aynı olduğu için dinamik analizde aynı modül kullanılabilmektedir. Referans yürüme ile analiz sonrasında elde edilen torkların uygulandığı yürüme durumlarının aynı koşullar altında karşılaştırılabilmesini sağlamak amacı ile dataların toplanmasının sağlandığı ters dinamik işlemindeki gibi, toplam otuz saniyelik bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Dinamik hesaplamalar sonucunda elde edilen toplam on sekiz tork değerinden üçünün zamana bağlı grafikleri Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te görülmektedir.



Şekil 5.11. Hareket yönüne göre sağ arka bacaktaki COXA-FEMUR mafsalı için belirlenmiş tork değeri.



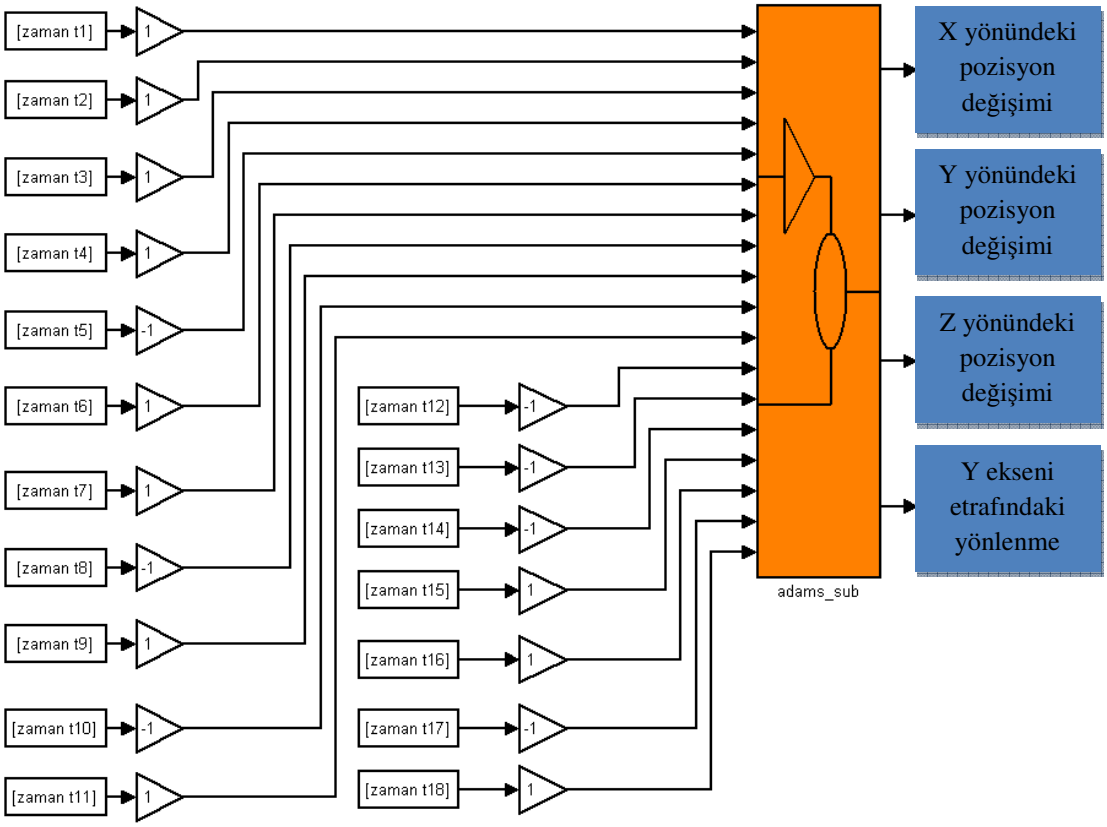
Şekil 5.12. Hareket yönüne göre sağ ön bacaktaki COXA-gövde mafsalı için belirlenmiş tork değeri.



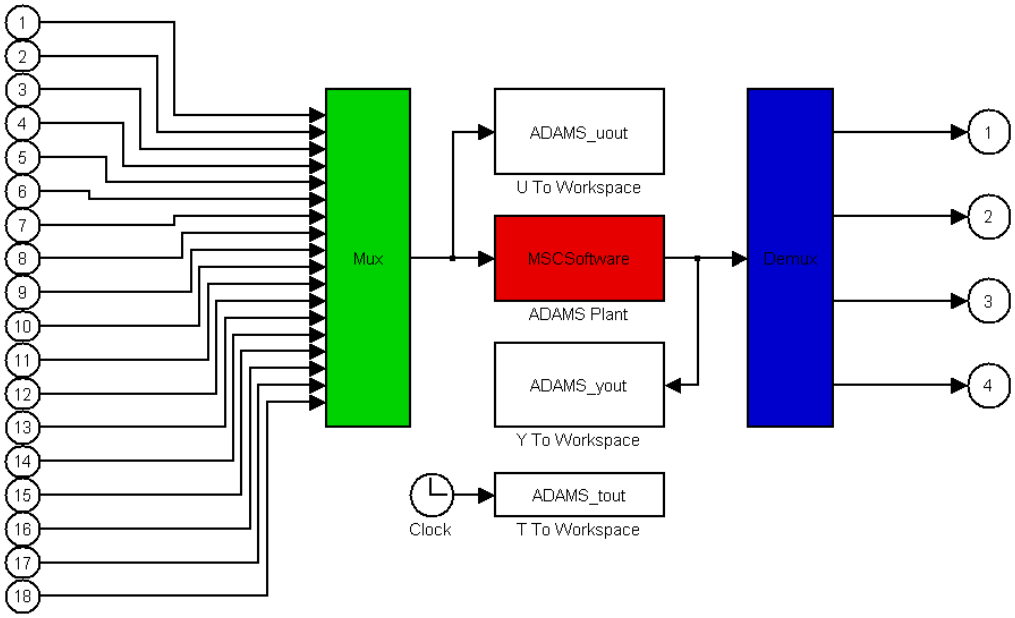
Şekil 5.13. Hareket yönüne göre sol orta bacaktaki TIBIA-FEMUR mafsalı için belirlenmiş tork değeri.

Elde edilen bu on sekiz tork değeri sisteme uygulandığında, sonuçların görülebilmesi için MSC-ADAMS kontrol bloğunun olduğu bir uygulama modeli oluşturulacaktır. Oluşturulacak bu modelde toplam on sekiz adet giriş bulunurken, analizin doğruluğunun belirlenebilmesi için gövde parçasının kütle merkezi pozisyonunun, referans eksen takımına göre X, Y ve Z yönündeki hareketleri ile Y ekseni etrafındaki dönmesine dair dört adet çıkış bulunmaktadır.

Daha önceki aşamalarda olduğu gibi bu aşamada da toplam otuz saniyelik bir simülasyon gerçekleştirilecektir. Hareket sırasında oluşacak olan kontak ve dinamik etkilere göre zamanın fonksiyonu olarak hesaplanan tork bileşenleri modele uygulanarak Şekil 5.13'te görülen kontrol yapısının son aşaması gerçekleştirilmiş olacaktır. Şekil 5.14'te MSC-ADAMS kontrol bloğunun bulunduğu modele ait bir resim bulunmaktadır. Şekil 5.15'te ise modelde adams_sub bloğu olarak görülen alt sistemin açık hali verilmiştir.



Şekil 5.14. Belirlenen tork değerlerinin MSC-ADAMS kontrol modülüne uygulanması.

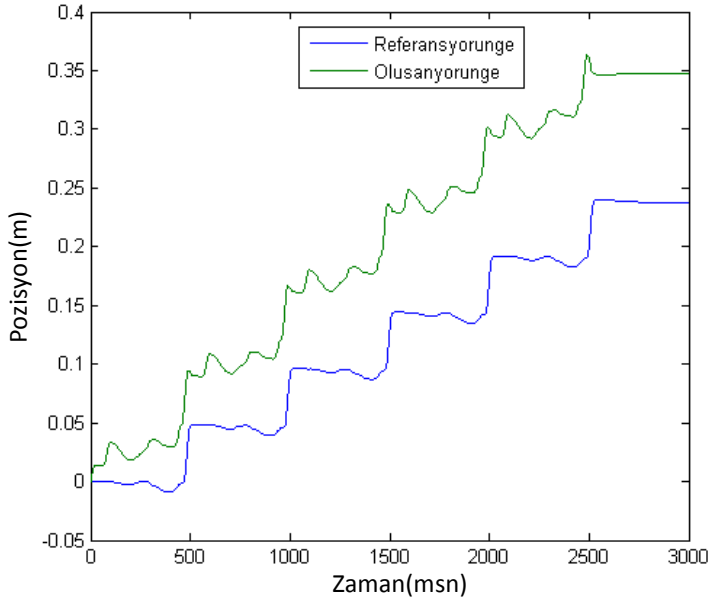


Şekil 5.15. MSC-ADAMS kontrol modülünün içyapısı (Adamssub).

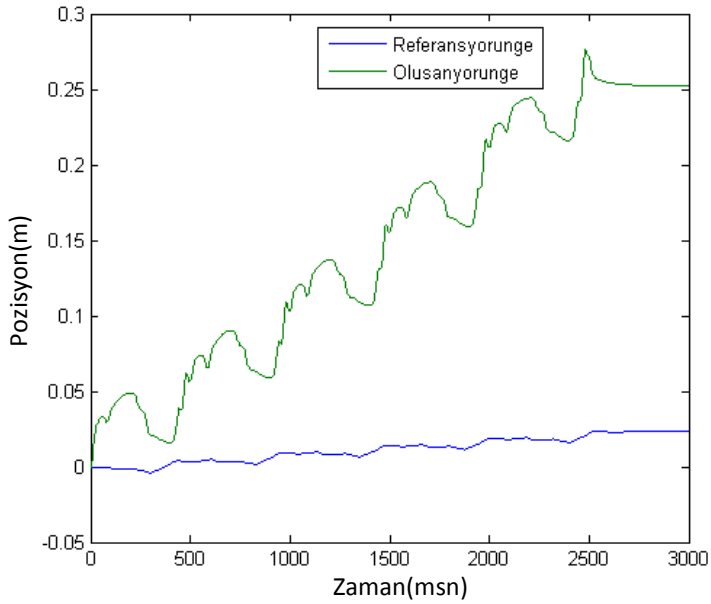
Simülasyona dair ayarlar Adamssub alt programında bulunan ADAMS Plant bloğunda yapılarak, hareketin simülasyonunun görsel olarak gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Toplam otuz saniyelik simülasyon sonucunda oluşan veriler MATLAB programında kaydedilmiş, dinamik hesaplama öncesinde üretilen referans yörünge ile dinamik hesaplama ile uygulanan kontrol işlemi sonucunda oluşan yörüngenin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırma Şekil 5.16-5.19 arasında bulunan grafikler üzerinde görülmektedir.

Simülasyon sırasında oluşturulan animasyonda, analiz öncesinde referans olarak kullanılan yörüngeye yakın bir hareket gözlemlenerek grafiksel sonuçlar kaydedilmiştir. Yapı olarak benzer sonuç gösteren bu grafiklerde, analiz sonrasında referans yürümeye göre daha çok salınım ve pozisyon hatası gösteren bir yürüme elde edilmiştir. Bunun yanında yürüme esnasında Z yönünde 25 cm'lik bir kayma ve Y ekseni etrafında 18º'lik bir dönme gerçekleşmiştir. Bu bozuklukların en büyük sebebi kontrolün açık çevrim olarak otuz saniye boyunca simüle edilmesidir. Hareketin başlangıcında yapılan hesaplamada birinci saniye sonunda yapılan küçük bir hata (error) hareketin sonunda hesaplanmayan büyük hatalara dönüşebilmektedir. Bu yüzden kontrolün gerçekleştirileceği gerçek sistemde, geliştirilen kılavuzlu çalışma algoritmasının geri beslemeli bir yapıda kullanılması gerekmektedir.

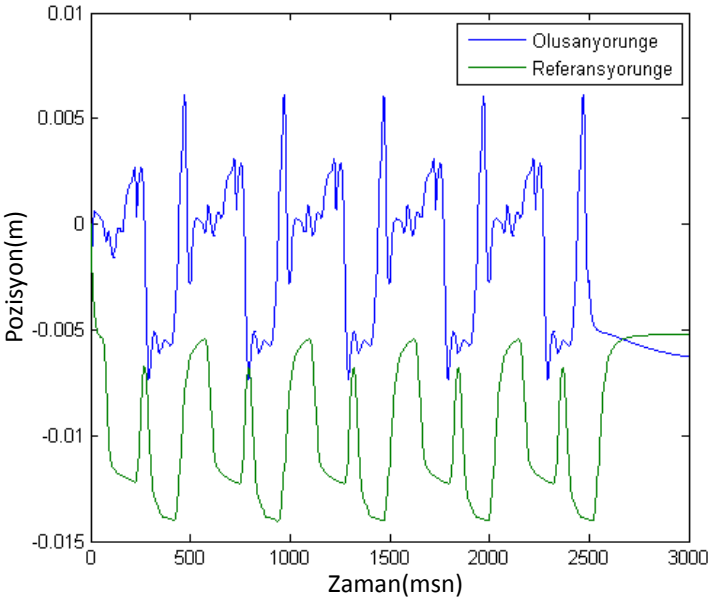
Geliştirilen algoritmanın hızlı işlem kabiliyeti sayesinde hareket esnasında oluşan istenmeyen kaymalar ve dönmeler engellenmiş olacaktır. Animasyon sırasında referans yörüngeye benzer bir hareket gözlenmesi ve simülasyon sırasında X yönünde istenen harekete yakın bir sonuç elde edilmesi geliştirdiğimiz teorinin doğruluğunu ortaya koymaktadır.



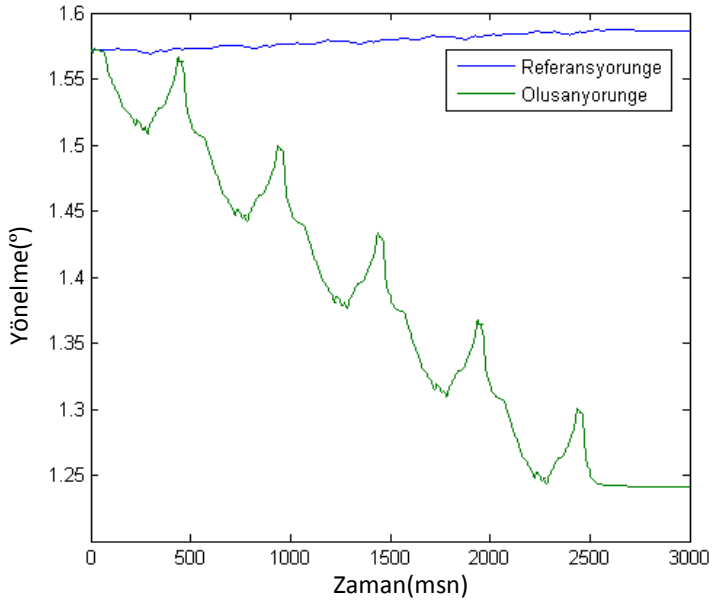
Şekil 5.16. Referans yürümedeki X ekseni ile analiz sonrası yürümedeki X eksenindeki hareket.



Şekil 5.17. Referans yürümedeki Z ekseni ile analiz sonrası yürümedeki Z eksenindeki hareket.



Şekil 5.18. Referans yürümedeki Y ekseni ile analiz sonrası yürümedeki Y eksenindeki hareket.



Şekil 5.19. Referans yürümedeki Y ekseni etrafındaki yönlenme ile analiz sonrası yürümedeki yönlenme

SONUÇ

Bu tez çalışmasında altı bacaklı yürüyen bir robotun tasarımı ve dinamik analizi 3 adet yazılım yardımı ile yapılmıştır. Robot tasarımı aşamasında enerji verimliliği, bacak hızı ve kuvveti arasındaki ödünleşim göz önünde bulundurularak uzuv boyları, şekilsel yapı gibi tasarım parametreleri ayarlanmaya çalışılmıştır. Bu parametrelerin belirlenmesinden sonra, SOLIDWORKS programı kullanılarak, altı bacaklı böcek konfigürasyonunda on sekiz serbestlik derecesine sahip toplam on dokuz uzuvdan oluşan bir robot tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Daha sonra robotun dinamik analizinin gerçekleştirilebilmesi için, özellikle yürüyen robotların dinamik hesaplamalarında kullanılan dört temel metot ayrıntılı olarak tanıtılmıştır. Sırası ile tanıtılan bu metotların, on sekiz serbestlik derecesine sahip yürüyen mobil robotun dinamik analizinde kullanılması durumunda, gerekli olan işlem yükleri ve gerçeklenebilir olma şartları irdelenmiştir. Ardından bu metotlar arasından hem kolay bir şekilde sisteme uygulanabilmesinden hem de robot kontrolünde oldukça ciddi problemler yaratabilen işlem hızını düşürmesinden dolayı, Newton-Euler metodu tercih edilmiştir.

İki kısımdan oluşan bu algoritma uygulanırken, ilk aşamadaki hız-ivme dağılımları ve kontak kuvvetlerinin belirlenmesinde MSC-ADAMS dinamik simülasyon programından faydalanılmıştır. Daha önce SOLIDWORKS programında tasarımı gerçekleştirilen yürüyen robot, MSC-ADAMS programına aktarılarak dinamik olarak modellenmesi sağlanmıştır. Mafsallar, yay ve sönüm elemanları gibi dinamik yapıların tanımlandığı bu programda, oluşturulan otuz saniyelik simülasyonda, ileri yönde 25 cm öteleme sağlayan beş adımdan oluşan bir referans yörünge gerçekleştirmek için robot mafsallarına harici tork değerleri uygulanmıştır.

MSC-ADAMS programında belirlenen referans yörüngeyi gerçekleştiren bir yürüme sağlandıktan sonra, modelin ters dinamik hesaplamalarında kullanılabilmesi amacı ile dinamiğe ait datalar ADAMS-Postprocessor modülü kullanılarak MATLAB-SIMULINK platformuna gönderilmiştir. Bu platformda otuz saniyelik simülasyon sırasında modelden, algoritmanın ikinci aşamasında kullanılacak olan hız-ivme dağılımları, pozisyonlar, kontak kuvvetleri gibi değişkenler, zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir.

Newton-Euler algoritmasının uygulanmasının ikinci aşamasında, kaydedilen bu verilerden ve dinamik denge şartından faydalanılarak, referans hareketi sağlayabilecek tahrik bileşenleri elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu tahrik değerleri MATLAB-SIMULINK platformundaki ADAMS-CONTROL bloğu ile harici kuvvetlerin kaldırılmış olduğu yürüyen robot modeline uygulanmıştır. Uygulanan bu değerler ile birlikte model üzerinde referans yörüngenin tanımlandığı noktanın hareketi gözlemlenmiştir. Hesaplamaya başlarken belirlenen referans yörünge ile hesaplama sonrasında elde edilen torkların model üzerinde tekrar simüle edilmesi sonucunda elde edilen yörüngenin birbirleriyle karşılaştırılmasından sonra, yapılan dinamik analizin doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak verimli bir şekilde hareket edebilme kapasitesine sahip bir ABYMR tasarımı yapılmıştır. Tasarımdan elde edilen parametreler sayesinde, yürüyen robotların kontrolünde ciddi bir problem oluşturan dinamik analiz problemi için kılavuzlu çalışma algoritması isimli bir metot geliştirilmeye çalışılmıştır. Sabit adımlı çözücüler kullanan dinamik modeller ile robot kontrolünde gecikmeler oluşturabilen ters dinamik işlemi çözülmeye çalışılmıştır. Yapılan bu dinamik analiz işleminin hızlı olarak gerçekleştirilebilmesi, metodun gerçek-zamanlı bir robot üzerinde uygulanabilmesini mümkün kılmaktadır. Yapılan otuz saniyelik dinamik analizin sonucunda elde edilen değerlerin, bu çalışma algoritmasının açık çevrimli haline uygulanmasıyla, istenmeyen bazı kayma ve dönme durumları ile birlikte referans harekete benzer bir hareket gerçekleştirilmiştir. İşlem hızının yüksek olmasından dolayı, açık çevrim olarak gerçekleştirilen bu kontrol işlemine, PID, YSA, ANFIS gibi değişik geri beslemeli kontrol organlarının uygulanmasıyla bu hatanın giderilmesi beklenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R., The BigDog Team, 2008. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control,Seoul, Korea.
2. Scarfogliero, U., Cesare, S., Dario, P., 2009. The use of compliant joints and elastic energy storage in bio-inspired legged robots. **Mechanism and Machine Theory, 44**: 580-590.
3. Ghorbani, R., Wu, Q., 2009. Adjustable stiffness artificial tendons: Conceptual design and energetics study in bipedal walking robots. **Mechanism and Machine Theory, 44**: 140-161.
4. Delcomyn, F., Nelson, M.E., 2000. Architectures for a biomimetic hexapod robot. **Robotics and Autonomous Systems, 30**: 5-15.
5. Zielinska, T., Heng, J., 2003. Mechanical design of multifunctional quadruped. **Mechanism and Machine Theory, 38**: 463-478.
6. Chatzakos, P., Papadopoulos, E., 2009. Bio-inspired design of electrically-driven bounding quadrupeds via parametric analysis. **Mechanism and Machine Theory, 44**: 559-579.
7. Barreto, J., Trigo, A., Menezes P., Dias, J., Almeida, A.T., 1998. FED-the free body diagram method kinematic and dynamic modeling of a six legged robot. Advanced Motion Control, AMC '98-Coimbra International Workshop: 423–428.
8. Roy, S.S., Singh, A.K., Pratihar, D.K., 2011. Estimation of optimal feet forces and joint torques for on-line control of six-legged robot. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing:** doi:10.1016/j.rcim.2011.03.002
9. Edgington, M., Kassahun, Y., Kirchner, F., 2009. Dynamic motion modelling for legged robots. Intelligent Robots and Systems, IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on: 4688 – 4694.
10. Soygüder S., 2009. Zıplayarak yürüyen çok bacaklı robotların dinamik modeli ve yapay zeka algoritmaları ile denetimi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, 502 s.

11. Höpler, R., Stelzer, M., Stryk, O., 2004. Object-oriented dynamics modeling for legged robot trajectory optimization and control. In Process IEEE Conference on Mechatronics and Robotics (MechRob): 972-977.

12. Georgiades, C., Nahon, M., Buehler, M., 2009. Simulation of an underwater hexapod robot. **Ocean Engineering, 36**: 39-47.

13. Vidoni, R., Gasparetto, A., 2011. Efficient force distribution and leg posture for a bio-inspired spider robot. **Robotics and Autonomous Systems, 59**: 142-150.

14. Erden, M.S., Leblebicioğlu, K., 2006. Altı-bacaklı robotta burgu kuvvetlerinin dağıtımı (Torque distribution for a six-legged robot). 14. IEEE Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, Antalya.

15. He´naff, P., Scesa, V., Ouezdou, F.B., Bruneau, O., 2011. Real time implementation of CTRNN and BPTT algorithm to learn on-line biped robot balance: Experiments on the standing posture. **Control Engineering Practice, 19**: 89-99.

16. Filho L.S.M., Prajoux R., 2000. Locomotion control of a four-legged robot embedding real-time reasoning in the force distribution. **Robotics and Autonomous Systems, 32**: 219-235.

17. Huang, Q.J., Nonami, K., 2003. Humanitarian mine detecting six-legged walking robot and hybrid neuro walking control with position/force control. **Mechatronics, 13**: 773-790.

18. Santos, P.G., Cobano, J.A., Garcia, E., Estremera, J., Armada, M.A., 2007. A six-legged robot-based system for humanitarian demining missions. **Mechatronics, 17**: 417-430.

19. Klaassen, B., Linneman, R., Spenneberg D., Kirchner, F., 2002. Biomimetic walking robot SCORPION: Control and modeling. **Robotics and Autonomous Systems, 41**: 69-76

20. Uzundere, C.M., 2007. Sekiz bacaklı mobil robotun mekanik tasarımı, modellenmesi ve lokomasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 79 s.

21. Kaplan, B., 2006. Localization of Six-Legged Mini Robots and Mapping. İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology, M.Sc. Thesis, İstanbul, 85 s.

22. Darıcı, O., 2008. Dört bacaklı mobil robotlarda yürüme analizi ve yol izleme. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 84 s.

23. Erden, M.S., 2006. Six-Legged Walking Machine: The Robot-EA308, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ph.D. Thesis, Ankara, 170 s.

24. Tunç, B., 2008. Kinematical and dynamical modelling and design of a multimodal mobile robot. İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology, M.Sc. Thesis, İstanbul, 89 s.

25. Barai, R.K., Nonami, K., 2007. Optimal two-degree-of-freedom fuzzy control for locomotion control of a hydraulically actuated hexapod robot. **Information Sciences, 177**: 1892-1915.

26. Santos, P.G., Garcia, E., Estremera, J., 2006. Quadrupedal Locomotion. Springer-Verlag London Limited, Germany, 272 pp.

27. Bekker, M.G. 1968, GE Walking Truck http://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/project .archive/Image.Archive/other.robots/Mosher.GE.walking.truck.jpg, (Erişim Tarihi: Mayıs 2011).

28. Byl, K., 2008. Metastable Legged Robot Locomotion, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Ph.D. Thesis, Massachusetts, 215 s.

29. Siegwart, R., Nourbakhsh, I.R., 2004. Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press, 336 pp.

30. Ritzmann, R.E., Quinn, R.D., Fischer, M.S., 2004. Convergent evolution and locomotion through complex terrain by insects, vertebrates and robots. **Arthropod Structure & Development, 33**: 361–379.

31. Jurd, R.D., 2004. Animal Biology. BIOS Scientific Publishers, New York, 313 pp.

32. Lawlor, R., 1982. Sacred Geometry Philosophy and Practice. Thames and Hudson, China, 114 pp.

33. Steadman, P., 1979. The Evolution of Designs: Biological analogy in architecture and the applied arts, Routledge, New York, 311 pp.

34. Brizard, A.,J., 2005. Introduction to Lagrangian and Hamiltonian Mechanics. Department of Chemistry and Physics Saint Michael's College, Lecture note, Colchester, 220 pp.

35. Erden, M.S., Leblebicioğlu, K., 2007. Free gait generation with reinforcement learning for a six-legged robot. **Robotics and Autonomous Systems, 56**: 199-212.

36. Pratihar, D.K., Deb, K., Ghosh, A., 2002. Optimal path and gait generations simultaneously of a six legged robot using a GA-fuzzy approach. **Robotics and Autonomous Systems, 41**: 1-20.

37. Estremera, J., Cobano, J.A., Santos, P.G., 2010. Continuous free crab gaits for hexapod robots on a natural terrain with forbidden zones: An application to
. humanitarian demining. **Robotics and Autonomous Systems, 58**: 700-711.

38. Yi, S., 2010. Reliable gait planning and control for miniaturized quadruped robot pet. **Mechatronics, 20**: 485-495.

39. Zimmermann, K., Zeidis, I., Behn, C., 2009. Mechanics of Terrestrial Locomotion. Springer, Berlin, 288 pp.

40. Vukobratovic, M., Borovac, B., 2004. Zero moment point-thirty five years of its life, **International Journal of Humanoid Robotics, 1**: 157-173.

41. Siciliano, B., Khatib, O., 2008. Handbook of Robotics. Springer, Würzburg,1628 pp.

42. Goswami, A., 1999. Foot rotation indicator (FRI) point: A new gait planning tool to evaluate postural stability of biped robots. Proceedings of the 1999 IEEE lnternational Conference on Robotics & Automation Detroit, Michigan.

43. Yapıcı, K., O., 2008. Dört 14 serbestlik dereceli iki ayaklı bir robotun dinamik yürüme hareketinin kontrolü. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 113 s.

44. Millard, M., 2011. Mechanics and Control of Human Balance. University of Waterloo, Systems Design Engineering, Ph.D. Thesis, Ontario, Canada, 173s.

45. Borzova, E., Hurmuzlu, Y., 2004. Passively walking five-link robot. **Automatica, 40**: 621 - 629.

46. Jazar, R.,N., 2007 Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control. Springer, New York, 688 pp.

47. Caux, S., Zapata, R., 1999. Modeling and control of biped robot dynamics. **Robotica, 17**: 413–426.

48. Craig, J.,J., 2005. Introduction to Robotics Mechanics and Control, Pearson Education International, USA, 408 pp.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Erdem ARSLAN
Uyruğu: Türkiye (TC)
Doğum Tarihi ve Yeri: 5 Mart 1986, Kayseri
Medeni Durumu: Bekâr
Tel: +90 5363305353
email: erdemarslan@erciyes.edu.tr
Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü 38039 Talas/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans(ÇAP)	E.Ü. M.F. Makine Mühendisliği	2009
Lisans	E.Ü. M.F. Elektronik Mühendisliği	2008
Lise	Kırşehir Fen Lisesi, Kırşehir	2003

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2008- Halen	E.Ü. Mekatronik Mühendisliği	Araştırma Görevlisi
2009	Cardiff University	Konuk Araştırmacı

YABANCI DİL

İngilizce(ileri), Almanca(başlangıç)

PROJELER

1. SANTEZ Projesi, Esnek Üretim Hattının Optimum Tasarımı ve Otomasyonu (2009-2011)