İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRT BACAKLI MOBİL ROBOTLARDA YÜRÜME ANALİZİ VE YOL İZLEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik Müh. Osman DARICI

Anabilim Dalı: MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı: MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRT BACAKLI MOBİL ROBOTLARDA YÜRÜME ANALİZİ VE YOL İZLEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik Müh. Osman DARICI
(518051015)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008

Tez Danışmanı: **Prof.Dr. Hakan TEMELTAŞ**
Diğer Jüri Üyeleri: **Prof.Dr. Ata MUĞAN (İTÜ)**
Prof.Dr. Metin GÖKAŞAN (İTÜ)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında bana her zaman destek olan danışman hocam Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Yaşamım boyunca bana destek olan annem, babam ve kardeşime de teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2008 Osman DARICI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
SEMBOL LİSTESİ ix
ÖZET x
SUMMARY xi

1. GİRİŞ 1

2. DOĞADA GÖRLÜLEN BACAK YAPILARI 4

3. LİTERATÜRDE ÇALIŞMA YAPILAN YÜRÜYÜŞ TEKNİKLERİ 8
3.1. Yürümeye İlişkin Temel Kavramlar 8
3.2. İki Bacaklı (Biped) Yürüyüş 9
3.3. Dört Bacaklı (Kuadruped) Yürüyüş 10
3.4. Altı Bacaklı (Hekzapod) Yürüyüş 11
3.5. Sekiz Bacaklı (Oktapod) Yürüyüş 12

4. DÖRT BACAKLI YÜRÜYÜŞ YÖNTEMLERİ 14
4.1. Dört Bacaklı Kinematik Yapı 14
4.2. Dört Bacaklı Statik Yürüyüş Yöntemi 1 16
4.2.1. Dört Bacaklı Düz Yürüyüş 17
4.2.2. Dört Bacaklı Yönlü Yürüyüş 21
4.2.3. Kendi Ekseni ve Herhangi Bir Eksen Etrafında Dönme 27
4.3. Dört Bacaklı Statik Yürüyüş Yöntemi 2 33
4.4. Dört Bacaklı Dinamik Yürüyüş 35

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE YÜRÜYÜŞ YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI 38

6. SÜREKLİ FONKSİYONLARDAN OLUŞAN YOLLAR İÇİN İZLEME TEKNİĞİ GELİŞTİRİLMESİ 49
6.1. Wein-Garten Maps Yol İzleme Yöntemi 49
6.2. Yürüme Algoritmasının Uygulanışı ve Simülasyon Sonuçları 52

7. SONUÇLAR 63

KAYNAKLAR 65

EKLER **67**

ÖZGEÇMİŞ **68**

KISALTMALAR

KYA : Kritik Yön Açısı
ADM : Anlık Dönme Merkezi
KY : Kritik yön

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Yön açısı ve uygun adım sırası 23

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil A.1	**:** ADAMS-MATLAB veri alışverişi	67
Şekil 1.1	**:** Sekiz Bacaklı Mobil Robot "Akrep"	1
Şekil 1.2	**:** Dört Bacaklı Robot Tiyan VIII	2
Şekil 2.1	**:** Bir Aslanın İskelet Yapısı	4
Şekil 2.2	**:** Memeli ve sürüngen bacak yapı farkı	4
Şekil 2.3	**:** Timsahın yürüyüşü	5
Şekil 2.4	**:** Bir böceğin vücudu	5
Şekil 2.5	**:** Bir böceğin bacak yapısı	6
Şekil 2.6	**:** Üç serbestlik dereceli robot bacak	6
Şekil 2.7	**:** Dört Bacaklı Robot Modeli Adım atarken	7
Şekil 3.1	**:** Asimo ve P3	9
Şekil 3.2	: İki bacaklı yürüyüş	10
Şekil 3.3	: Dört Bacaklı Statik Yürüyüşte Bacak Adım Sıraları	10
Şekil 3.4	: Altı Bacaklı tripod yürüyüş	11
Şekil 3.5	: Akrep yürüyüşünün bacak zamanlamaları	12
Şekil 3.6	: Akrebin yürürken bacak adım sıralaması	12
Şekil 4.1	: Dört Bacaklı Temel Yapı	14
Şekil 4.2	: Bir bacağın kinematik yapısı	15
Şekil 4.3	: Başlangıç pozisyonunda dört bacaklı robot modeli	16
Şekil 4.4	: +y yönünde yürüyüş	18
Şekil 4.5	: Bir bacağın en büyük yanal gerilme uzunluğu	20
Şekil 4.6	: Yön açısı	21
Şekil 4.7	: Kritik yön doğruları	22
Şekil 4.8	: Statik yönlü yürüyüş	24
Şekil 4.9	: Kendi ekseni etrafında sola dönüş	28
Şekil 4.10	: Örnek bir dönme merkezi	30
Şekil 4.11	: Robotun bir dönme merkezi etfındaki hareketi	31
Şekil 4.12	: Örnek Dönme Merkezi	31
Şekil 4.13	: Dengenin kaybedildiği durum örneği	33
Şekil 4.14	: Dört Bacaklı statik yürüme	34
Şekil 4.15	: Dört Bacaklı dinamik yürüyüş	36
Şekil 4.16	: Dinamik yürüyüşte iki farklı adım uzunluğu	37
Şekil 5.1	: Bir numaralı statik yürüyüş yöntemi için bacak 1 ve bacak 3 birinci omuz eklemi pozisyonunun zamanla değişimi	38
Şekil 5.2	: Bir numaralı statik yürüyüş yönteminde robotun kütle merkezi pozisyonun zamanla değişimi	39
Şekil 5.3	: Bir numaralı statik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin x ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi	40
Şekil 5.4	: Bir numaralı statik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin z ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi	41

		Sayfa No
Şekil 5.5	: İki numaralı statik yürüyüş yöntemi için bacak 1 ve bacak 3 birinci omuz eklemi pozisyonunun zamanla değişimi	42
Şekil 5.6	: iki numaralı statik yürüyüş yönteminde robotun kütle merkezi pozisyonun zamanla değişimi	42
Şekil 5.7	: iki numaralı statik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin x ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi	43
Şekil 5.8	: İki numaralı statik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin z ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi	44
Şekil 5.9	: Dinamik yürüyüş yöntemi için bacak 1 ve bacak 3 birinci omuz eklemi pozisyonunun zamanla değişimi	44
Şekil 5.10	: Dinamik yürüyüş yönteminde robotun kütle merkezi pozisyonun zamanla değişimi	45
Şekil 5.11	: Dinamik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin x ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi	46
Şekil 5.12	: Dinamik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin z ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi	47
Şekil 5.13	: Dinamik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin z ekseninde pozisyonunun adım uzunluğu 100 mm iken zamanla değişimi	48
Şekil 6.1	: Örnek yol ve anlık dönme merkezleri	52
Şekil 6.2	: Örnek yol ve anlık dönme merkezleri	53
Şekil 6.3	: İzlenen yol sürekli eğri, izlenmesi gereken yol kesikli çigilerle gösterilmiştir	55
Şekil 6.4	: İzlenen yol sürekli eğri, izlenmesi gereken yol kesikli çigilerle gösterilmiştir	56
Şekil 6.5	: İzlenen yol sürekli eğri, izlenmesi gereken yol kesikli çigilerle gösterilmiştir	57
Şekil 6.6	: Robotun yol izlerken anlık durumu, robotun olması gereken nokta 1, ulaşması gereken nokta 2	58
Şekil 6.7	: Robot 2 numaralı noktaya ulaşmıştır	59
Şekil 6.8	: İzlenmesi gereken yol mavi eğri, izlenen yol yeşil eğri, kapalı çevrim ile izlenen yol ise kırmızı eğri ile gösterilmiştir	60
Şekil 6.9	: İzlenmesi gereken yol mavi eğri, izlenen yol yeşil eğri, kapalı çevrim ile izlenen yol ise kırmızı eğri ile gösterilmiştir.	61
Şekil 6.10	: İzlenmesi gereken yol mavi eğri, izlenen yol yeşil eğri, kapalı çevrim ile izlenen yol ise kırmızı eğri ile gösterilmiştir.	62

SEMBOL LİSTESİ

α_i	**:** Eklem Pozisyonu
γ	**:** Yön açısı
L_o	**:** Bir Bacağın Başlangıç Pozisyonundaki yanal uzunluğu
a_i	**:** Eklem Uzunluğu
β_i	**:** Eklem Pozisyonu
S	**:** Adım uzunluğu
N	**:** Birim normal vektör alanı
$\alpha(t)$	**:** Yörünge Fonksiyonu

DÖRT BACAKLI MOBİL ROBOTLARDA YÜRÜME ANALİZİ VE YOL İZLEME

ÖZET

Bu çalışmada dört bacaklı mobil robotlarda yürüyüş teknikleri açıklanmış, bu teknikler dört bacaklı bir robot modelinde simülasyonlarla gerçeklenmiş, ayrıca mobil robotlar için bir yol izleme yöntemi gerekli algoritma kurularak dört bacaklı mobil robot modelinde simulasyonlarda uygulanmış ve sonuçlar gösterilmiştir. Tüm yürüyüş ve yol izleme teknikleri için gerekli parametreler MATLAB ile hesaplanmıştır. Dört bacaklı robot modeli ADAMS dinamik simülasyon programında geliştirilmiştir. Bu çalışmanın dört, altı ve sekiz bacaklı mobil robot çalışmalarında ve literatürde sık çalışılmış mobil robotlarda davranış tabanlı kontrol yöntemlerinin kullanılmasına geçişte bir ön çalışma olması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında öncelikle yürümeye ilişkin temel kavramlar ve literatürde çalışılmış iki, dört, altı ve sekiz bacaklı yürüyüş yöntemleri hakkında genel bilgi verilmiştir. 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 sonuçlarına yer verilmiştir. Son olarak sonuçlar tartışılmıştır.

Yapılan simülasyonlarla dört bacaklı yürüme tekniklerinde eklem pozisyonları, robotun kütle merkezinin aldığı yol, pozisyon hataları zamanla değişen dalga şekilleri ile gösterilmiş ve bu yürüyüş tekniklerinin karşılaştırılması sağlanmıştır. Yol izleme tekniğinde ise simülasyonlar sonucunda robotun kütle merkezi pozisyonunun zamanla değişimi gösterilerek robotun verilen yolu ne yakınlıkta izlediği gösterilmiştir. Ayrıca simülasyon sırasında ADAMS simülasyon programından robotun kütle merkezi ve oriyantasyonu (z ekseni ile yaptığı açı) geri besleme ile alınmış, yol izlerken oluşan pozisyon ve oriyantasyon hataları kapalı çevrim kontrol ile azaltılmıştır, sonuçlar simülasyonlarla gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bacaklı mobil robotlar, yürüyüş, mobil robotlarda yol izleme

Bilim Kodu:

GAIT ANALYSIS AND PATH TRACKING FOR FOUR LEGGED MOBILE ROBOTS

SUMMARY

In this study, gait generation techniques for a four legged mobile robot are examined, these techniques were implemented on a four legged mobile robot model by simulations and a path tracking method for mobile robots were implemented on the four legged mobile robot model by developing the suitable algorithm. All of the parameters for gait generation and path tracking algorithm were developed in MATLAB. The four legged mobile robot model were developed in ADAMS dynamic simulation software. This study is intended to be a frame work for future quadruped, hexapod and octapod mobile robot researches and behaviour based control algorithms in mobile robotics.

In this study, firstly, a brief information is given about the fundamentals of gait generation and biped, quadruped, hexapod and octapod gait techniques which were previously studied. Than, three different quadruped gait generation methods are explanined and simulation results are given. Finally, a path tracking algortihm for mobile is implemented in the four legged robot model and simulation results and conclusion are given.

Joint positions, the position of the center of gravity of the robot and position errors are showed by the simulations for different quadruped gaits and the comparision of gaits are given. The simulation results of path tracking method showed the desired paths and tracked paths(the position of the center of gravity of the robot). The position of the center of gravity and the orientation angle of the robot were taken from ADAMS as feedbacks during the simulation. Feedback closed loop control was implemented and the position and orientation errors got smaller, it is showed by simulations.

Keywords: Legged mobile robots, gait generation, path tracking in mobile robots

Science Code:

1.GİRİŞ

Gün geçtikçe daha çok mobil robot kapalı alanlar dışına çıkıp, gerçek dünyada, özellikle engebeli arazide kullanılmaya başlamıştır. Bu durum geleneksel tekerlekli ve paletli mobil robot tasarımlarının zayıf yönlerini ortaya çıkarmış ve araştırmacıları daha farklı tasarımlara itmiştir. Çalışmalar sonunda mobil robotik için yeni bir dal ortaya çıkmıştır: "doğadan esinlenen mobil robot sistemleri". Doğadan esinlenme (biyomimetri) robotların tekerlek ya da paletler yerine bacaklarla tasarlanmasını sağlamıştır. Sonuçta ortaya farklı bacak sayılarında ve farklı kinematik bacak yapılarında robotlar ortaya çıkmıştır.

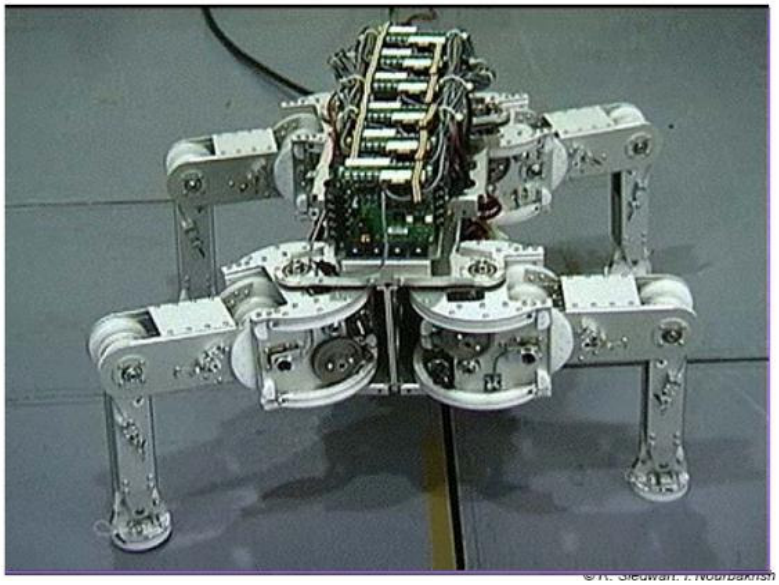


Şekil 1.1: Sekiz Bacaklı Mobil Robot "Akrep"

Şekil 1.1'de Almanya Fraunhofer Otonom Akıllı Sistemler Enstitüsü tarafından geliştirilen "akrep" görülmektedir. Akrebin yürüme paternleri gerçek akreplerin hareketlerinden esinlenerek oluşturlmuştur.

Genel olarak bacaklı mobil robotlar, paletli ve tekerleklilere göre daha karmaşık, daha az verimlidir. Bacaklı mobil robotların kullanımları sınırlıdır ve daha fazla enerji ihtiyaçları vardır. Bu tez avantajların yanında bacaklı mobil robotlar tekerli ve paletlilere göre daha fazla hareket kabiliyetine ve engebeli arazi çok daha kolay uyuma sahiptir.

Bacaklı mobil robot hareketinin temelini doğada görülen yürüyüş biçimleri oluşturur. Doğaya hâkim olan yürüyüş biçimleri iki bacaklı(biped) yürüyüş, dört bacaklı (kuadruped) yürüyüş, altı bacaklı (hekzapod) yürüyüş ve sekiz bacaklı (oktapod) yürüyüştür. Bu yürüş biçimlerinden dört bacaklı yürüyüş özellikle sürüngen ve memelilerde olmak üzere doğada en çok görülen yürüyüş biçimlerindendir ve araştırmacıların çok ilgisini çekmiştir.



Şekil 1.2: Dört Bacaklı Robot Titan VIII

Şekil 1.2'de Tokyo Araştırma Enstitüsü tarafından geliştirilen TITAN VIII görülmektedir. Titan'ın her bacağı 3 serbetlik derecesine sahiptir. Titan VIII çeşitli şekillerde yürüyebilmesinin yanında, tekerlekleri de olan hibrit bir robottur. Literatür incelendiğinde dört bacaklı birçok farklı robot tasarımının yapıldığı ve farklı yürüyüş tekniklerinin geliştirildiği görülmüştür.

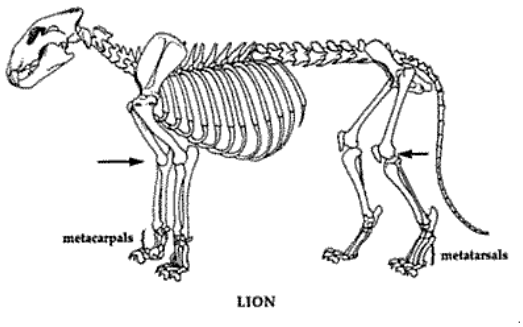
Bu çalışmanın amacı bazı dört bacaklı yürüyüş tekniklerinin açıklanması, bu tekniklerin ADAMS dinamik simülasyon programında kurulan dört bacaklı mobil robot modeline uygulanması, karşılaştırılması ve bu tekniklerden biri kullanılarak dört bacaklı robot modeline önceden belirlenen bir yörüngenin izletilmesidir. Dört bacaklı yürüyüş teknikleri için eklem pozisyonları kinematik olarak hesaplanmış ve 4 bacaklı robot modeline uygulanmıştır. Kinematik denklemlerin hesabı ve yürüme algoritmasının kurulmasında MATLAB kullanılmış, dört bacaklı robot modeli ise MATLAB/simulink'le sürülmüştür.

Tezin ilk bölümünde konu ana hatları ile tanıtılmış. İkinci bölümde hayvanların ve dört bacaklı mobil robotların bacaklarının kinematik yapıları hakkında bilgi verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde literatürde çalışma yapılan yürüyüş teknikleri anlatılmış. Dördüncü bölümde dört bacaklı robot modelinin kinematik yapısı ve üç farklı dört bacaklı yürüyüş tekniği açıklanmış. Beşinci bölümde dördüncü bölümde anlatılan tekniklerin simülasyon sonuçalarına yer verilmiştir. Altıncı bölümde dört bacaklı mobil robot modeli ile yol izleme anlatılmıştır. Yedinci bölümde de sonuç ele alınmıştır.

2. DOĞADA GÖRÜLEN BACAKLI YAPILAR VE ROBOT BACAKLARIN KİNEMATİK YAPILARI

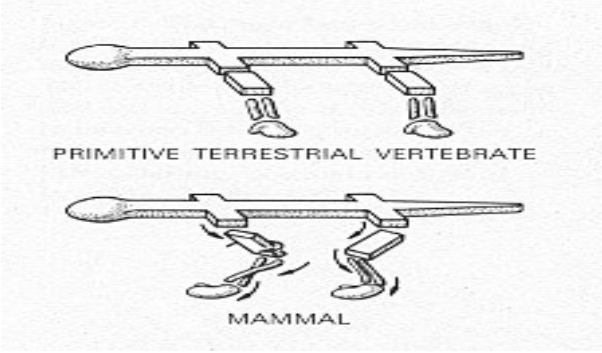
Doğada çok çeşitli bacak yapıları görülür. Omurgalı ve omurgasız hayvanların bacak yapıları bibirinden faklı olmak üzere, bunlar kendi içlerinde de farklı bacak yapılarına sahiptirler.

Omurgalı hayvanlardan sürüngenlerin bacakları gövdeden dışarı çıkmıştır. Memelilerde ise bacaklar öne doğru dönerler ve vücudu daha kolay taşımak için gövdenini hemen altına yerleşmişlerdir. Şekil 2.1'de ([9]) bir aslanın iskelet yapısı görülebilir.



Şekil 2.1: Bir aslanın iskelet yapısı

Memelilerde sürüngenlerin aksine dizler ve dirsekler daha dengeli ve güçlü yürüme için eğilmişlerdir. Söz edilen farklar şekil 2.2'de kabaca görülebilir.



Şekil 2.2: Memeli ve sürüngen bacak yapı farkı

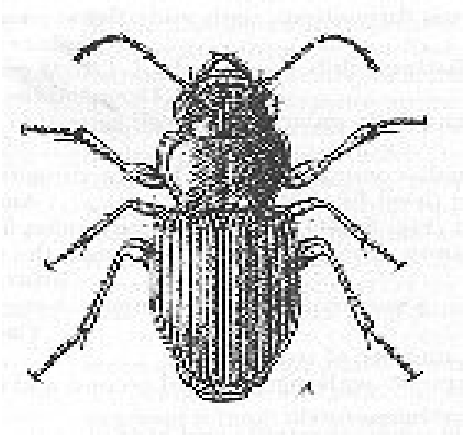
Bir timsahın yürüyüşü şekil 2.3'te görülebilir. Çapraz ön ve arka bacak çiftlerinden biri gövdeyi destekleyip ileri iterken, diğer çift havaya kalkıp adım atar.



Şekil 2.3: Timsahın Yürüyüşü

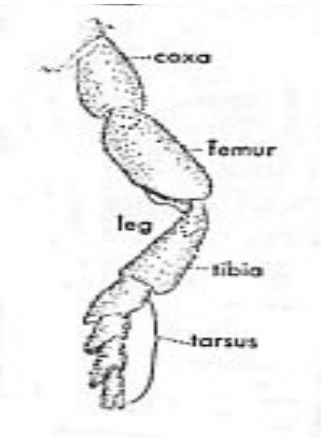
Omurgasızlar özellikle böcekler bacaklı mobil robot tasarımlarında önemli rol oynamışlardır. Doğada dört bacaklı böcek olmamakla birlikte altı ve sekiz bacaklı böceklerin incelenmesinde yarar vardır.

Böceklerde bacaklar şekil 2.4'te görüldüğü gibi gövdeden dışarı çıkmışlardır.



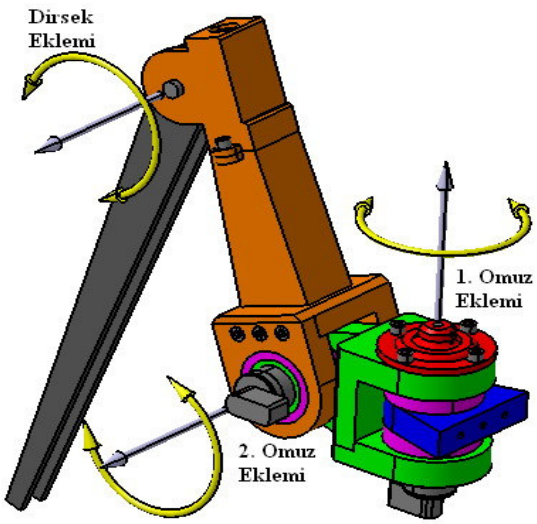
Şekil 2.4: Bir böceğin vücüdu

Böcek bacakları çeşitli segmentlere ayrılmışlardır ve bu segmentlerdeki yapılar hayvanın çevresine karşı duyarlı olmasını ve hareket kabiliyetini sağlarlar. Şekil 2.5'te örnek bir böcek bacağı görülebilir. Bu bacak yapıları böceklerin memeli ve sürüngenlere göre engebeli arazide daha rahat hareket etmelerini sağlar.



Şekil 2.5: Bir böceğin bacak yapısı

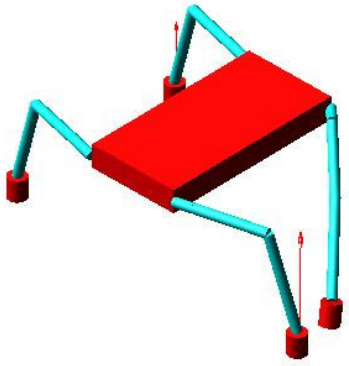
Yürümek için bir bacakta en az iki serbestlik derecesi gerekir. Bir serbestlik derecesi bacağı havaya kaldırmak, ikinci serbestlik derecesi ise havada olan bacağı ileri itmek, eğer bacak yerdeyse de gövdeyi ileri itmek için kullanılır. Genel olarak imal edilen robot bacaklar 3 serbestlik derecesine sahiptir. Şekil 2.6'da örnek bir 3 serbestlik dereceli robot bacak, [10], gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Üç serbestlik dereceli robot bacak

Üç serbestlik dereceli robot bacaklar, 2 serbestlik derecelilere göre daha fazla manevra kabiliyetine sahiptir. Bacağın zemine dokunduğu noktaya (bileğe) bir ya da daha fazla sebestlik derecesi konmuş bacak tasarımları olmakla birlikte serbestlik derecesinin 3'ten fazla olması yürüyüşü ve robotun kontrolünü zorlaştırdığından tercih edilmez.

Bu çalışmada da simülasyonların yapıldığı robot modelinde bacaklar 3 serbestlik derecesine sahiptir. Şekil 2.7'de dört bacaklı robot modeli adım atarken görülebilir.



Şekil 2.7: Dört bacaklı robot modeli adım atarken

3. LİTERATÜRDE ÇALIŞMA YAPILAN YÜRÜYÜŞ TEKNİKLERİ

Bu bölümde literatürde çalışılmış yürüyüş teknikleri ve hakkında temel bilgi verilecektir. Yürüyüş tekniklerine geçmeden çeşitli çalışmalar incelenerek elde edilen, [1-17], yürümeye ilişkin bazı ana kavramların anlatılmasında yarar vardır.

3.1 Yürümeye İlişkin Temel Kavramlar

Yürüyüşte bacak hareketleri temel olarak iki safhadan oluşur: destek safhası(stance) ve adım atma safhası (swing). Destek safhasında olan bacaklar gövdeyi destekler, gövdenin zemine mümkün olduğu kadar paralel kalmasını ve gövdenin zeminden yüksekliğinin korunmasını sağlar. Destek safhasındaki bacaklar bunları yaparken diğer taraftan da gövdeyi yürüme yönünde iterler, yani gövdenin ilerlemesini sağlarlar. Adım atma safhasındaki bacaklar ise havaya kalkıp, çoğu kez yürüyüş yönünde hareket ederler (ileri giderler). Bu bacaklar yere indiklerinde artık destek safhasına geçerler ve destek safhasındaki bacakalar da artık adım atma safhasına geçerler. Görüldüğü gibi adım atma safhasındaki bacakların gövdenin ilerlemesine hiçbir katkısı yoktur.

Gövdeye ait bir bacağın ya da bacak grubunun (örneğin altı bacaklı yürüyüşte gövdenin sağında birinci ve üçüncü bacak ve gövdenin solunda ikinci bacak) uygun adım sırasına göre havaya kalkma, ileri gitme ve yere inmesi için geçen süreye adım süresi denir ve t_s ile gösterilir. Tüm bacakların ya da bacak gruplarının t_s'leri toplamı bir "yürüyüş periodunu" oluşturur.

Bir yürüyüş periodunda yerde olan bacak sayısın toplam bacak sayısına oranına destek faktörü (duty factor) denir. Genel olarak şu söylenebilirki: bir yürüyüş periodunda destek faktörü ne kadar fazlaysa yürüyüş o kadar dengeli ve o kadarda yavaş olur.

Bir yürüyüş periodunda gövdeye havadan bakılınca yerde kalan bacakların uç noktalarının zemine iz düşümleri bir zeminde bir geometerik alan oluşturur. Örneğin

iki bacaklı yürümede iki bacakta yerdeyse bu bir doğru, tek bacak yerdeyse bu bir nokta olacaktır. 3.4'te anlatılacak olan altı bacaklı statik tripod yürümede (şekil 3.4) ve dört bacaklı statik yürümede bu alan bir üçgen(destek üçgeni) olacaktır.

Robotun ağırlık merkezi yürüyüş sırasında yukarıda anlatılan destek alanı içinde kalıyorsa bu yürüyüş çeşidine "statik" yürüyüş denir [4]. Ağırlık merkezinin içinde bulunduğu alana da "destek alanı" denir. Robotun ağırlık merkezi yürüyüş sırasında yerde olan bacakların uç noktalarının oluşturduğu alan dışında kalıyorsa ya da zaten yürüyüşün her anında böyle bir alan oluşmuyorsa (örneğin koşarken tüm bacakların havada olduğu anlar) bu yürüyüşe "dinamik" yürüme denir. Dinamik yürüyüşün diğer bir tanımıda [9], yürümenin herhangi bir anında durulursa dengenin kaybedilecek olmasıdır (yürürken bunu kendinizde deneyebilirsiniz). Tahmin edilebileceği gibi dinamik yürüyüşte dengeyi sağlama ve robot kontrolü daha zordur.

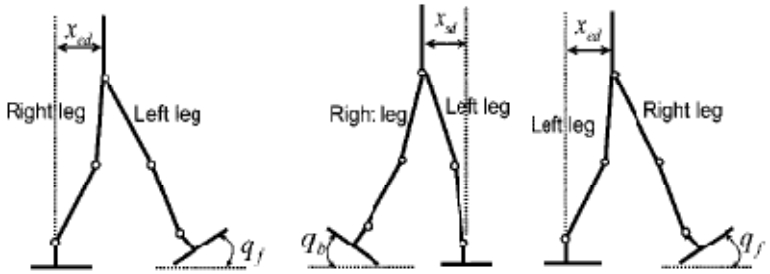
3.2 İki Bacaklı (Biped) Yürüyüş

İki bacaklı yürüyüş (insansı robotlar) mobil robotik araştırmacıları tarafından pek çok kez çalışılmıştır. İki bacaklı yürüyüş dört, altı, sekiz bacaklı yürüyüşe göre daha karmaşıktır. Şekil 3.1'de Honda tarafından geliştirilmiş P3 ve ASIMO görülmektedir.



Şekil 3.1: ASIMO ve P3

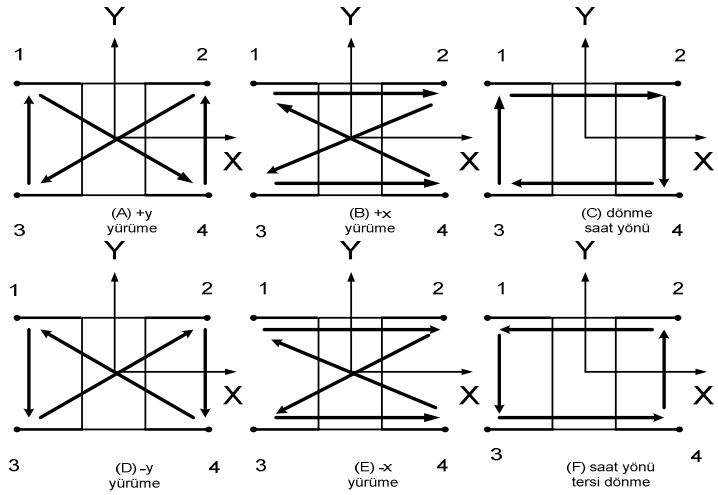
İki bacaklı yürüyüş iki kısımdan oluşur [11]: iki bacaklı destek kısmı ve tek bacaklı destek kısmı. İki bacaklı destek fazı adım atan ayağın topuğunun yere değmesi ile başlar ve arka ayağının parmak ucunun adım atmak için havaya kalkması ile biter. Tek bacaklı adım fazında bir bacak gövdeyi desteklerken diğer bacak adım atmak için havaya kalkıp ilerler. İnsanlarda iki bacaklı destek fazının yürüyüş periodunun %20'sini oluşturduğu görülmüştür. İki bacaklı yürüşü temel olarak gösteren şekil 3.2 [1]'ten alınmıştır.



Şekil 3.2: İki bacaklı yürüyüş

3.3 Dört Bacaklı Yürüyüş

Dört bacaklı yürüyüş bu tezde ayrıntılı olarak bölüm 4'te işlenmiştir. Dört bacaklı statik yürüme bacak adım sırası genel olarak şekil 3.3' teki basit 4 bacaklı robot modelinden görülebilir. Şekil 3.3'teki adım sıraları dört bacaklı statik yürüyüşe göredir ve destek faktörü 0.75'tir. $+y$ yönünde yürüme için uygun adım sıralaması 4-2-3-1 ya da 3-1-4-2, $+x$ yönünde yürüyüş için uygun adım sıralaması 3-4-1-2 ya da1-2-3-4, saat yönünde döme içinse sıralama 1-2-3-4 olabilir.

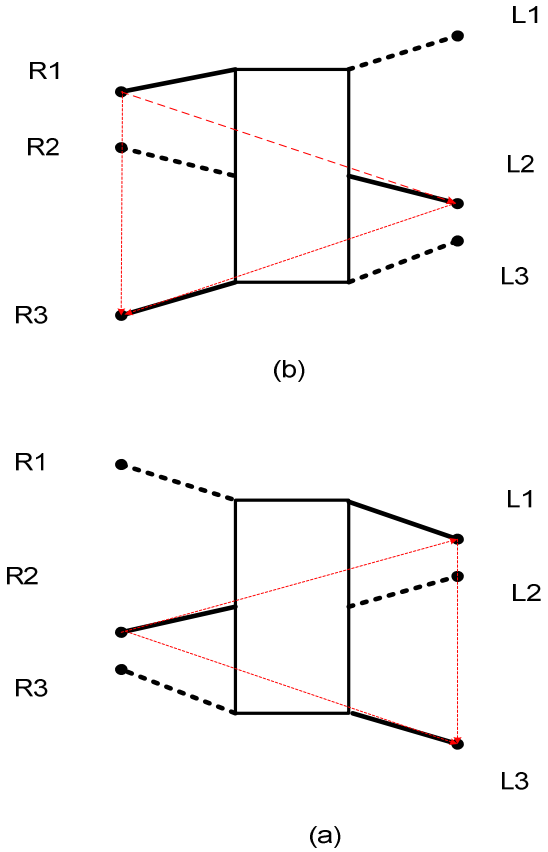


Şekil 3.3: Dört Bacaklı statik yürüyüşte bacak adım sıraları

3.4 Altı Bacaklı Yürüyüş

Böceklerin nerdeyse tamamı altı bacaklıdır, altı bacaklı yürüyüş omurgasızlar arasında en sık görülen yürüyüş şeklidir. Tripod, bacakların 3'erli gruplar halinde adım atması doğada en sık görülen altı bacaklı yürüyüştür. Şekil 3.4'te altı bacaklı tripod yürüyüş gösterilmiştir. Tripod yürümede destek faktör 3 bacak sürekli yerde ve 3 bacak sürekli havada olduğu için 0.5'tir.

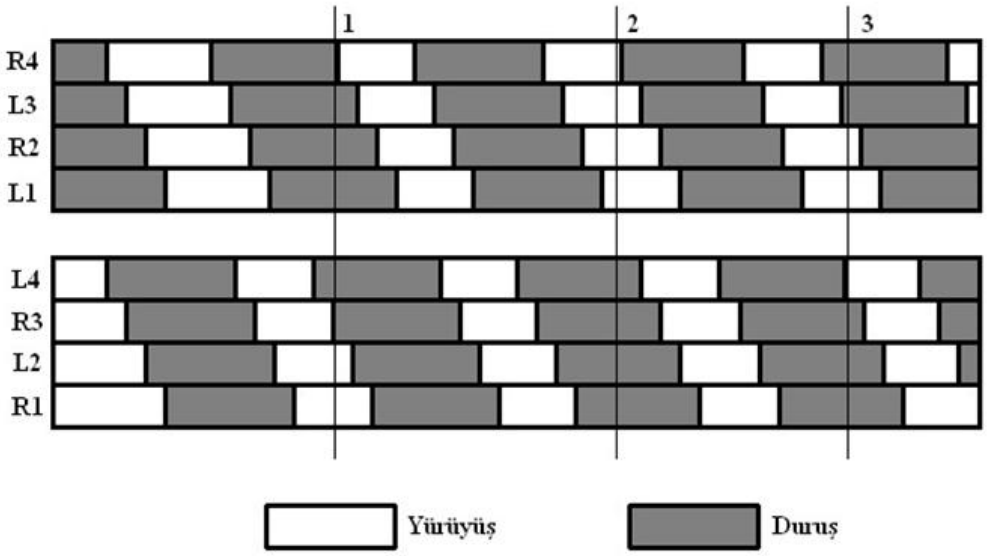
Şekil 3.4a'da R2, L1, L3 yerde kalıp gövdeyi destekleyip ileri itmiş ve destek üçgenini oluşturmuştur. R1, R3, L2 de havaya kalkıp adım atmışlardır. Şekil 3.4b'de R1, R3, L2 yerde kalıp gövdeyi destekleyip ileri itmiş ve destek üçgenini oluşturmuştur, L1, L3, R2 de havaya kalkıp adım atmışlardır.



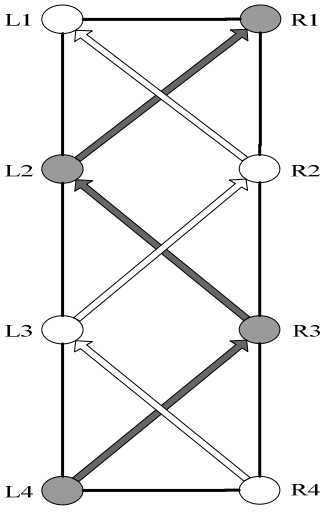
Şekil 3.4: Altı bacaklı tripod yürüyüş

3.5 Sekiz Bacaklı Yürüyüş

Sekiz bacaklı yürüyüş çalışmaları iki, dört ve altı bacaklı çalışmalardan daha azdır. Sekiz bacaklı yürüyüş doğada akrep ve örümceklerde görülür. [8]'de bir akrebin yürüyüşü incelenmiş ve şekil 1.1'de gösterilen akrep isimli robota gercek akrep yürüyüşü uygulanmıştır. Şekil 3.5 ve şekil 3.6'da [8], sırasıyla bir akrebin yürürken bacaklarının yerde ve havada olduğu zamanlamalar ve bacak adım sırlaması gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Akrep yürüyüşünün bacak zamanlamaları



Şekil 3.6: Akrebin yürüken bacak adım sırlaması

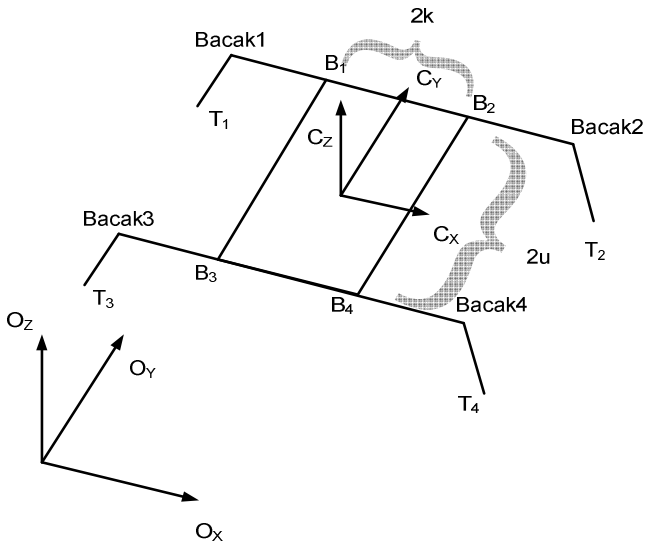
Şekil 3.5 ve 3.6'ya göre zıt taraflardaki bacaklar dörtlü gruplar (R1, L2, R3, L4 ve L1, R2, R3, L4) halinde hareket ederler. Bu bacak grupları içindeki bacaklar hep birlikte aynı anda hareket etmek yerine önden arkaya bakıldığında bir dalgaya benzer şekilde (faz farkıyla) hareket ederler. Bu şekil 3.5'ten görülebilir. Şekil 3.5 dikkatli incelenirse herhangi bir anda en az dört bacağın yerde olduğu görülürki bu destek faktörünün en az 0.5 (4:8) olduğunu ve destek alanınında en kötü durumda bile dörtgen olduğunu gösterir. Buradan akrebin yürürken dengesini hiçbir zaman yitirmeyeceği anlamı da çıkar.

4. DÖRT BACAKLI YÜRÜYÜŞ YÖNTEMLERİ

Dört Bacaklı yürüş için farklı araştırmacılar tarafından çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları ayrıntıları ile bu bölümde işlenmiştir. Bu yöntemlere geçmeden önce dört bacaklı robot modelinin kinematik yapısının incelenmesinde yarar vardır.

4.1. Dört Bacaklı Kinematik Yapı

Şekil 4.1 'de dört bacaklı robot basitleştirilmiş mekanizması görülebilir.



Şekil 4.1: Dört bacaklı temel yapı

Şekil 4.1'de ${}^{o}C = [\ {}^{o}x_c\ \ {}^{o}y_c\ \ {}^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}}$ robotun kütle merkezinin $O = [\ {}^{o}x\ \ {}^{o}y\ \ {}^{o}z]^{T}$ referans koordinat sistemine göre pozisyon vektörüdür. L_0 bir bacağın başlangıç pozisyonundaki yanal uzunluğunu ifade etmek üzere bacakların zemine dokunan uç noktalarının referans koordinat sistemine göre pozisyon vektörleri aşağıdadır:

$${}^{o}T_1 = [\ {}^{o}x_c - L_0 - k \quad {}^{o}y_c + u \quad {}^{o}z_{T1}\ ] \tag{4.1}$$

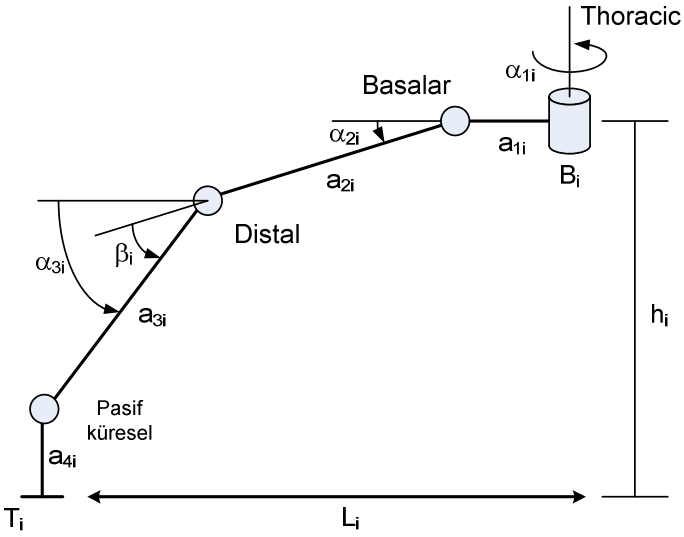
$$^{o}T_2 = [\ ^{o}x_c - L_0 + k \quad ^{o}y_c + u \quad ^{o}z_{T2}] \tag{4.2}$$

$$^{o}T_3 = [\ ^{o}x_c - L_0 - k \quad ^{o}y_c - u \quad ^{o}z_{T3}] \tag{4.3}$$

$$^{o}T_4 = [\ ^{o}x_c - L_0 + k \quad ^{o}y_c + u \quad ^{o}z_{T4}] \tag{4.4}$$

i = 1,2,3,4 olmak üzere $^{o}B_i = [\ ^{o}x_{Bi} \ ^{o}y_{Bi} \ ^{o}z_{Bi}]$ her bacağın gövdeye bağlandığı noktanın referans kox_{y^2}ordinat sisteminde pozisyon vektörünü ifade eder. Aynı şekilde bacakların zemine dokunan uç noktalarının pozisyon vektörleri de $^{o}T_i = [\ ^{o}x_{Ti} \ ^{o}y_{Ti} \ ^{o}z_{Ti}]$ şeklinde ifade edilebilir.

Şekil 4.2'de 3 serbestlik dereceli bir robot bacak yapısı görülmektedir.



Şekil 4.2: Bir bacağın kinematik yapısı

Şekil 4.2'de omuz eklemleri (thoracic) bacağın ileri ve geriye hareketini, ikinci omuz eklemi (basalar) bacağın havaya kalkıp yere inmesini sağlar. Diz eklemi ise (distal) bacağın yana açılmasını sağlar. Şekil 4.1 ve şekil 4.2'den yararlanarak aşağıdaki denklemler türetilebilir:

$$a_{1i} + a_{3i} \cos\alpha_{3i} + a_{2i} \cos\alpha_{2i} = \sqrt{(\ ^{o}x_{Ti} - \ ^{o}x_{Bi}\ )^2 + (\ ^{o}y_{Ti} - \ ^{o}y_{Bi})^2}$$

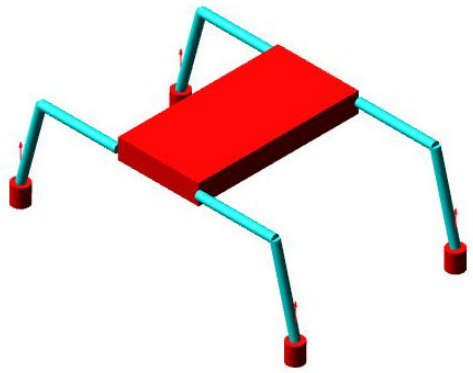
i=1,2,3,4 (4.5)

$$a_{4i} + a_{3i} \sin\alpha_{3i} + a_{2i} \sin\alpha_{2i} = h_i\ , \qquad \text{i=1,2,3,4} \tag{4.6}$$

$$\tan(\alpha_{1i}) = \kappa\ \frac{^{o}y_{Ti} - \ ^{o}y_{Bi}}{^{o}x_{Ti} - \ ^{o}x_{Bi}} \tag{4.7}$$

Denklem 4.6'da h_i bacağın gövdeye bağlandığı noktanın başlangıç pozisyonundaki yüksekliğini ifade eder, denklem 4.7'de κ bacak 2 ve 3 için -1, bacak 1 ve 4 içinse 1'dir.

Yürüme yöntemlerinin gerçeklendiği simülasyonlarda kullanılan kinematik denklemler yukarıda ifade edilmiştir. Her bacağın adım atması (havaya kalkma, adım atma ve yere inme) için gereken süreye bir yürüyüş periodu denir. Simülasyonların amacı bölüm 3'te bahsedilen statik ve dinamik yürüş metodlarını ADAMS simülasyon programında kurulan robot modeline uygulamaktır. Şekil 4.3'te ADAMS simülasyon programında kurulan robot modeli başlangıç pozisyonunda görülebilir. Bu modelde de her bacağın kinematik yapısı şekil 4.2'de anlatılan modelle aynıdır. Başlangıç pozisyonunda i = 1,2,3,4 olmak üzere $\alpha_{1i} = 0$, $\alpha_{2i} = 0$ ve $\alpha_{3i} = 75$ derecedir. Eklem uzunlukları ise $a_{1i} = 40\,mm$, $a_{2i} = 150\,mm$, $a_{3i} = 200\,mm$ ve $a_{4i} = 45\,mm$ 'dir. Robotun gövdes parametreleri ise $u = 200\,mm$ ve $k = 100\,mm$'dir. Robotun başlangıç pozisyonunda zeminden yüksekliğinin 238mm'dir.



Şekil 4.3: Başlangıç pozisyonunda dört bacaklı robot modeli

4.2. Dört Bacaklı Statik Yürüyüş Yöntemi 1

Bu bölümde [1] ve [2]'de anlatılan yürüyüş yöntemleri ayrıntılı açıklanacaktır. Bu yöntem bir dört bacaklı statik yürüme yöntemidir. Havada olan (adım atan) bacak sayısının toplam bacak sayısına oranı (destek faktörü) 0.75'tir. Bu tekniğin en önemli avantajı bir yürüyüş periodundan sonra robotun başlangıç pozisyonunu almasıdır. Bu durumda her yürüyüş periodundan sonra başlangıç pozisyonundan yerni bir yürüyüş

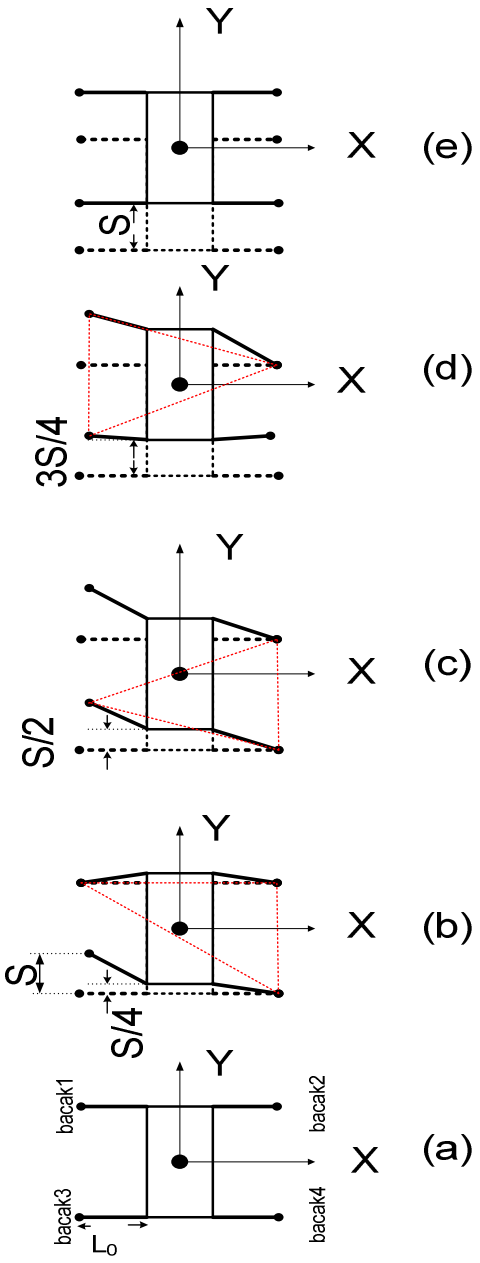
periodu başlayacak ve bir yürüyüş periodundan diğerine geçiş ya da bir yürüme yönteminden diğer bir yürüme yöntemine geçiş (gait transition) için ek hesaplamalar yapmaya gerek kalmayacaktır.

[1] ve [2]'de bu teknik engelli zeminlerde yürürkende uygulanmıştır, fakat bu tezde bu teknik simulasyonlarla gerçeklenirken zeminin düz olduğu varsayılmıştır. Bölüm 3'te anlatılan statik yürümede gövdenin destek üçgeni içinde kalması bu teknikte de aynen geçerlidir ve bu şart sağlandığı sürece yürüken robotun gövdesinin zemine paralel kalacağı açıktır.

4.2.1. Dört Bacaklı Düz Yürüyüş

Tekniğin amacı gövdenin dengeyi bozmadan ilerlemesi ve yürüyüş periodundan sonra robotun başlangıç pozisyonunu alması olduğundan adıma atan bacağın yere bastığı nokta öyle seçilmelidir ki robot yürüyüş periodu sonunda başlangıç pozsizyonunu alsın. Bu amaçla bir yürüyüş periodu 4 farklı kısımda incelenebilir. Her çeyrek yürüme periodu sonunda bir bacak adımını tamamlayacak, adım uzunluğu (S) her bacak için aynı olacak ve gövde her çeyrek adım periodundan sonra $S/4$ kadar ilerleyecek ve yürüyüş periodu bitince de gövde S kadar ilerlemiş olacak. Zemin düz(pürüzsüz) olduğundan ve yürüme periodunun herhangi bir anında kütle merkezi destek üçgenin içinde olduğudan robotun yerden yüksekliğinin değişmediği varsayılacaktır.

Bu teknikte iki önemli parametre vardır: adım uzunluğu S ve bacak adım sıralaması (hangi sıralama ile adım atılacak). Adım sıralamsı için iki alternatif vardır: 3-1-4-2 veya 4-2-3-1. Bu iki sıralama dışında $+y$ yönünde yürüyüş söz konusu olursa robotun kütle merkezi destek üçgeni dışında kalacak ve denge kaybolacaktır. Adım uzunluğunun nasıl hesaplandığı ise ileride anlatılacaktır. Şekil 4.4'te $+y$ yönünde bir yürüyüş periodu ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 4.4: +y yönünde yürüyüş

Şekil 4.4a'da robotun başlangıç pozisyonu görülmektedir. Şekil 4.4b'de görüldüğü gibi ilk adımı 3.bacak atmıştır. Bu bacak adım atarlen 1, 2, 4 numaralı bacakların uç noktaları yerde kalıp gövdeyi desteklemiştir (destek üçgenini oluşturmuştur). Yerde kalan bu bacakların omuz eklemleri gövdeyi $+y$ yönünde iterek gövdenin ilerlemesini sağlamışlardır. 3.bacak S kadar adım atmış ve bu bacak adımını tamamladığında destekleyen bacakların omuz eklemleri hareketi sonucunda gövde

$S/4$ kadar ilerlemiştir. 3.bacak adımını bitirdiğinde robotun ağırlık merkezi ve 3. bacağın uç noktasının pozisyon verktörleri aşağıdadır:

$$^{o}C = [\ ^{o}x_c \quad ^{o}y_c + \frac{S}{4} \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.8}$$

$$^{o}T_3 = [\ ^{o}x_c - L_0 - k \quad ^{o}y_c - u + S \quad ^{o}z_{T3}] \tag{4.9}$$

Şekil 4.4c'de 1.bacak adım atmış ve 2, 3, 4.bacakların uç noktaları pozisyonlarını koruyup destek üçgenini oluşturmuş ve bu bacakların omuz eklemleri gövdeyi ileri itmiştir. 1.bacak adımını tamalayınca robotun ağırlık merkezi ve 1.bacağın uç noktasının pozisyon verktörleri aşağıdadır:

$$^{o}C = [\ ^{o}x_c \quad ^{o}y_c + \frac{S}{2} \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.10}$$

$$^{o}T_1 = [\ ^{o}x_c - L_0 - k \quad ^{o}y_c + u + S \quad ^{o}z_{T1}] \tag{4.11}$$

Şekil 4.4d'de 4.bacak adım atmış ve 1, 2, 3.bacakların uç noktaları pozisyonlarını koruyup destek üçgenini oluşturmuş ve bu bacakların omuz eklemleri gövdeyi ileri itmiştir. 4.bacak adımını tamalayınca robotun ağırlık merkezi ve 1. bacağın uç noktasının pozisyon verktörleri aşağıdadır:

$$^{o}C = [\ ^{o}x_c \quad ^{o}y_c + \frac{3S}{4} \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.12}$$

$$^{o}T_4 = [\ ^{o}x_c - L_0 + k \quad ^{o}y_c + u + S \quad ^{o}z_{T4}] \tag{4.13}$$

Şekil 4.4e'de 2.bacak adım atmış ve 1, 3, 4.bacakların uç noktaları pozisyonlarını koruyup destek üçgenini oluşturmuş ve bu bacakların omuz eklemleri gövdeyi ileri itmiştir. 4.bacak adımını tamalayınca robotun ağırlık merkezi ve 2.bacağın uç noktasının pozisyon vektörleri aşağıdadır:

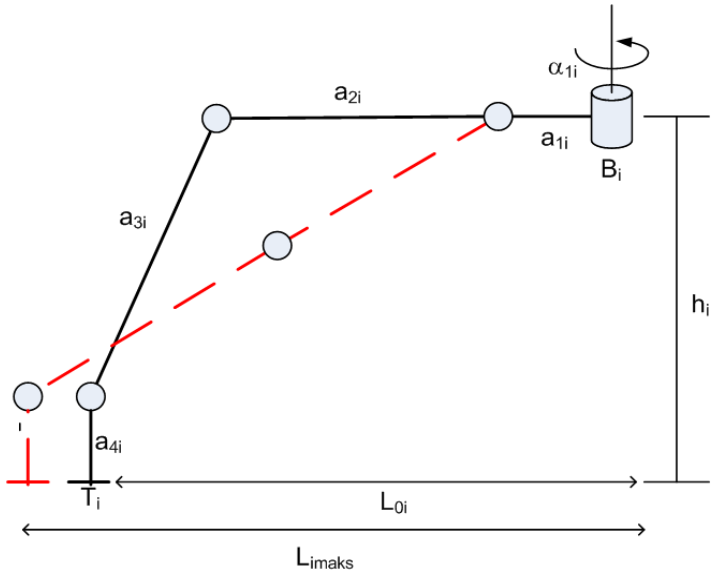
$$^{o}C = [\ ^{o}x_c \quad ^{o}y_c + S \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.14}$$

$$^{o}T_2 = [\ ^{o}x_c - L_0 + k \quad ^{o}y_c + u + S \quad ^{o}z_{T2}] \tag{4.15}$$

Burada dikkat edilmesi gereken önemli husus bir bacağın uç noktasının adım atmadan önce ve adım attıktan sonra pozisyonunun hiç değişmemesi ve bir adım

mesafesinde gövdenin 4 adım mesafesinde aldığı yolu almasıdır. Denklem 4.14'te gövdenin $+y$ yönünde adım mesafesi S kadar ilerlediği görülebilir.

Bu yöntem çeşitli adım uzunlukları ile gerçeklenebilir. Bir bacağın atabileceği en büyük adım uzunluğu nedir? Bu robotun mekanizmasına bağlıdır. Şekil 4.5'te i bacak numarasını ifade etmek üzere bir bacağın en fazla gerilme yanal uzunluğu L_{imax} ve başalngıç pozisyonundaki bacak açıklığı L_{oi} görülmektedir.



Şekil 4.5: Bir bacağın en büyük yanal gerilme uzunluğu

Buradan i = 1, 2, 3, 4 olmak üzere bir bacağın en fazla gerilme uzunluğu tanımlanır:

$$L_{imax} = a_{1i} + \sqrt{(a_{2i} + a_{3i})^2 - (h_i + a_{4i})^2} \tag{4.16}$$

Bir bacağın atabileceği en büyük adım L_{imax} değerine bağlıdır. Bir yürüyüş periodunda tüm bacaklar aynı miktarda gerilecek diye bir durum söz konusu değildir.

Bu durumda en büyük adımı en fazla gerilen bacak belirleyecektir. Şekil 4.4b'de ya da şekil 4.4d'de görüldüğü gibi 3.ve 2.bacaklar en fazla gerilmiştir. Şekil 4.4b'den şu denklem elde edilir:

$$L_i = \sqrt{{L_o}^2 + (3S/4)^2} \tag{4.17}$$

i = 1, 2, 3, 4 olmak üzere L_i bir bacağın gerilmesini ifade eder. L_i yerine L_{imax} getirilise S 'te S_{max} 'a eşit olacaktır. Bu durumda en büyük adım uzunluğu S_{max}

$$S_{max} = 4/3 \sqrt{{L_{imax}}^2 - {L_o}^2} \quad (4.18)$$

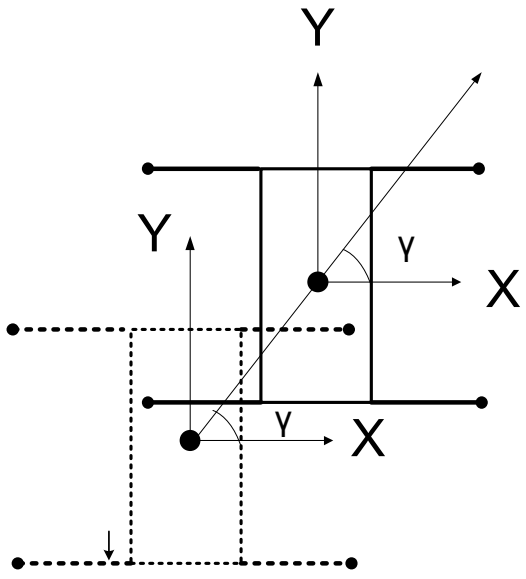
Bu teknikle $S \leq S_{max}$ olamak üzere istenilen adım mesafesi yürünebilir.

4.2.2 Dört Bacaklı Yönlü Yürüyüş

Bu bölümde 4.2.1'de anlatılan yürüme tekniği modifiye edilerek robotun düz (+y yönünde) değilde yönlü yürümesi anlatılacaktır. Bu teknik [2]'de tanıtılmış ve bu tezde de simülasyonlarla gösterilmiştir. Doğa incelendiğinde bu gövdenin oriyantasyonunu bozmadan yönlü yürüyüş yengeçlerin yürüyüşüne benzetilebilir.

Bu teknikte de bir yürüyüş periodu tamamlanınca robot yine başlangıç pozisyonunu alır ve bir yürüyüş periodundan ya da bir yürüyüş çeşidinden diğerine geçişte ek hesap gerekmez. Örneğin robot düz giderken bir yürüyüş periodunun sonunda hemen yönlü yürüyüşe geçebilir.

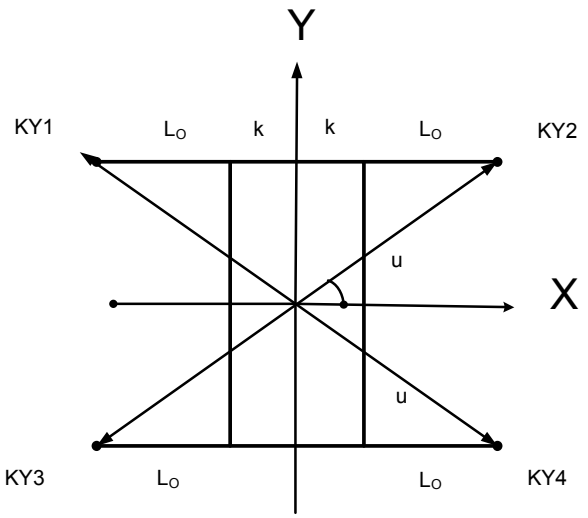
Robotun yön açısı robotun ilerlediği yön ile robotun ağırlık merkezinin ${}^{o}x_c$ bileşeni arasındaki açıdır. Bu açı şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Yön açısı

Bölüm 4.2.1 'de anlatılan tekniğe benzer şekilde bu teknikte statiktir ve destek faktörü 0.75'tir. Robotun belirnen yönde yürümesi adım sonunda bacağın yere ineceği pozisyonun ve destekleyen bacakların gövdeyi iteceği pozisyonların yön açısı

hesaba katılarak bulunmasıdır. Bu teknikte de her adımda desteke üçgeni oluşacak ve robotun kütle merkezi bu destek üçgenin içinde kalacaktır. Bu şart sağlandığı sürece de gövdenin zemine paralelliği bozulmayacaktır.



Şekil 4.7: Kritik yön doğruları

Bu teknikte önemli parametrelerden biri kritik yön açısıdır. Robotun yön açısına göre bacak adım sıralaması belirnecektir, bu sıralama yön açının kritik yön açısına göre ne olduğuna bağlıdır. Şekil 4.7'de kritik yön doğruları gösterilmiştir. Birinci kritik yön açısı x ekseninden KY1 doğrusuna, ikinci kritik yön açısı x ekseninden KY2 doğrusuna, üçüncü kritik yön açısı x ekseninden KY3 doğrusuna, dördüncü kritik yön açısı x ekseninden KY4 doğrusuna olan açıdır.

Robot yön açısının kritik yön açısına durumuna göre belirnen adım sıralamasına uymadan yön açısı yönünde yürümeye başlarsa kütle merkezi destek üçgenin dışında kalır ve denge kaybolur. Şekil 4.7 dikkatli incelenirse kritik yön açıları diagonal bacakları birleştiren düz çizginin ${}^{o}x_c$ ekseni ile yaptığı açıdır. Kritik yön açıları veren denklemler aşağıdadır:

$$\gamma_{k1} = \tan^{-1}\frac{u}{L_o + k} \tag{4.19}$$

$$\gamma_{k2} = \pi - \tan^{-1}\frac{u}{L_o + k} \tag{4.20}$$

$$\gamma_{k3} = \pi + \tan^{-1}\frac{u}{L_o + k} \tag{4.21}$$

$$\gamma_{k4} = 2\pi - \tan^{-1}\frac{u}{L_o + k} \quad (4.22)$$

Robot kritik yön açılarından biri yönünde yürütülmek istenirse robotun her adımda kütle merkezi destek üçgenin sınırında olacaktır, başka bir deyişle statik marj 0 olacaktır. Bu da dengenin en küçük bir bozucu etkide bozulabileceği anlamına gelir. Zaten bu açılarıda ”kritik” yapan budur. Robot kritik yön açısı (KYA) dışında herhangi bir yönde yürürse KYA yönüne yürümesinin aksine statik marj sürekli sıfır olmayacaktı ve dengeyi bozucu etkilere karşı hassasiyet azalacaktır.

KYA yönünde yürürken bacak adım sıralaması için iki altenatif mevcuttur, fakat KYA dışındaki değerler için tek seçenek vardır. Bu tekliği sağlamak için robotun kütle merkezi çevresindeki 360 derecelik açı 8 parçaya bölünmüştür. Her parçaya uygun adım sıralaması aşağıdaki tablodadır:

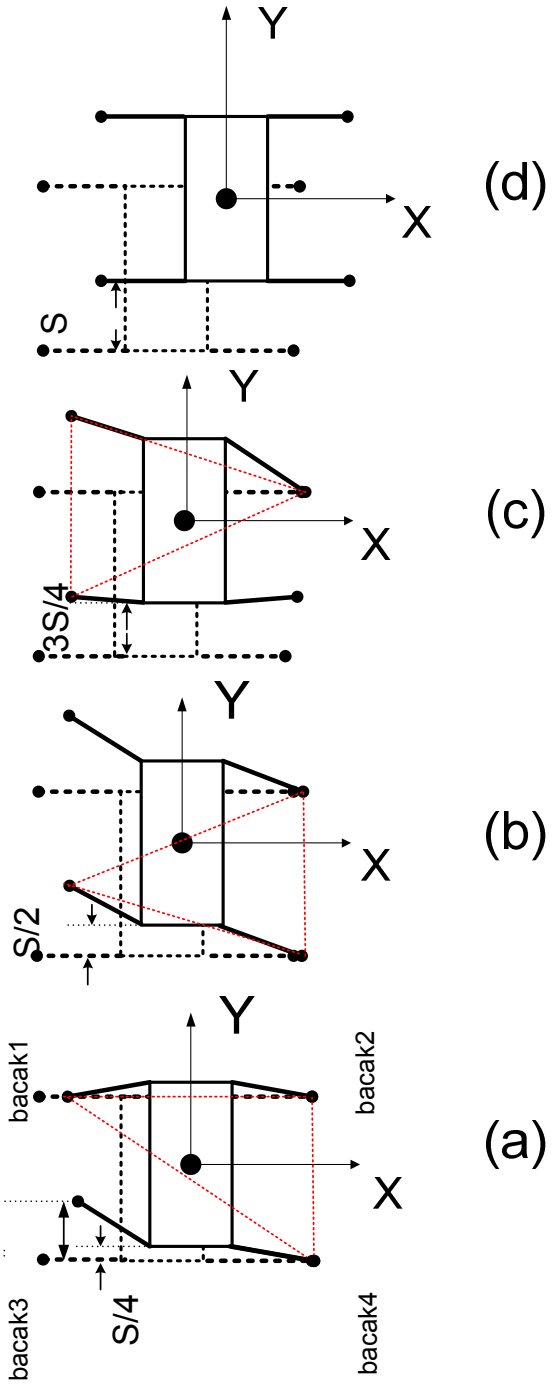
Tablo 4.1:Yön açısı ve Uygun Adım sırasını gösteren tablo

Yön açısı γ	Uygun Adım Sırası
$0 \leq \gamma \leq \gamma_{k1}$	3-4-1-2
$\gamma_{k1} \leq \gamma \leq \pi/2$	3-1-4-2
$\pi/2 \leq \gamma \leq \gamma_{k2}$	4-2-3-1
$\gamma_{k2} \leq \gamma \leq \pi$	4-3-2-1
$\pi \leq \gamma \leq \gamma_{k3}$	2-1-4-3
$\gamma_{k3} \leq \gamma \leq 3\pi/2$	2-4-1-3
$3\pi/2 \leq \gamma \leq \gamma_{k4}$	1-3-2-4
$\gamma_{k4} \leq \gamma \leq 2\pi$	1-2-3-4

Örneğin robotun KYA1 yönünde yürümesi isternirse uygun adım sıralaması 3-4-1-2, ya da 3-1-4-2 olabilir. Eğer yön açısı $\gamma, 0 \leq \gamma \leq KYA1$ olursa uygun adım sıralaması sadece 3-4-1-2, $KYA1 \leq \gamma \leq 90$ olursa uygun adım sıralaması sadece 3-1-4-2 olacaktır.

Tablo 4.1 şöyle de yorumlanabilir: 4.2.2’de anlatılan temel düz yürüyüş adım sıralaması +y yönü için 3-1-4-2 ya da 4-2-3-1, +x yönü içinse 3-4-1-2 ya da 1-2-3-4’tü, yön açısının kritik yön açısına durumuna göre yönlü yürüme $\pm y$ ya da $\pm x$ yönünde yürümeye yakınsar ve bacak adım sıralaması da bu yönlerin $\pm y$ ya da $\pm x$ yönlerinin sıralaması ile benzer olur. Bu benzerliğin belirlendiği sırnırda KYA’dır.

Robotun kütle merkezi ve bacak uç noktaları pozisyonlarının bir örnekle ayrıntılı anlatılmasında yarar vardır. Yön açısı $KYA1 \leq \gamma \leq 90$ olsun. Robotun başlangıç pozisyonunda kütle merkezi ve bacak uç nokta pozisyonları denklemler 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ile verilmişti. Bu aralıkta tablo 4.1'de gösterildiği üzere bacak sıralaması 3-1-4-2 'dir. Şekil 4.8'de bu yön açısında robotun ilerleyişi görülebilir.



Şekil 4.8: Statik yönlü yürüyüş

Şekil 4.8a'da 3.bacak adım atmıştır, 1, 2, 4 yerde kalıp destek üçgenini oluşturmuş gövdeyi desteklemiş ve yön açısı yönünde gövdeyi ötelemiştir. Adım sonunda kütle merkezi ve 3.bacağın yere dokunduğu noktanın pozisyonları:

$$^{o}C = [\ ^{o}x_c + \tfrac{1}{4}\ S\sin(\gamma) \quad ^{o}y_c + \tfrac{1}{4}\ S\sin(\gamma) \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.23}$$

$$^{o}T_3 = [\ ^{o}x_c - L_0 - k + S\ \cos(\gamma) \quad ^{o}y_c - u + S\ \sin(\gamma) \quad ^{o}z_{T3}] \tag{4.24}$$

Şekil 4.8b'de 1.bacak adım atmıştır, 2, 3, 4 yerde kalıp destek üçgenini oluşturmuş gövdeyi desteklemiş ve yön açısı yönünde gövdeyi ötelemiştir. Adım sonunda kütle merkezi ve 1.bacağın yere dokunduğu noktanın pozisyonları:

$$^{o}C = [\ ^{o}x_c + \tfrac{S}{2}\ \cos(\gamma) \quad ^{o}y_c + \tfrac{S}{2}\ \sin(\gamma) \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.25}$$

$$^{o}T_1 = [\ ^{o}x_c - L_0 - k + S\cos(\gamma) \quad ^{o}y_c + u + S\sin(\gamma) \quad ^{o}z_{T1}] \tag{4.26}$$

Şekil 4.8c'da 4.bacak adım atmıştır, 1, 2, 3 yerde kalıp destek üçgenini oluşturmuş gövdeyi desteklemiş ve yön açısı yönünde gövdeyi ötelemiştir. Adım sonunda kütle merkezi ve 4.bacağın yere dokunduğu noktanın pozisyonları:

$$^{o}C = [\ ^{o}x_c + \tfrac{3S}{4}\ \cos(\gamma) \quad ^{o}y_c + \tfrac{3S}{4}\ \sin(\gamma) \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.27}$$

$$^{o}T_4 = [\ ^{o}x_c - L_0 + k + S\cos(\gamma) \quad ^{o}y_c + u + S\sin(\gamma) \quad ^{o}z_{T4}] \tag{4.28}$$

Şekil 4.8d'da 2.bacak adım atmıştır, 1, 3, 4 yerde kalıp destek üçgenini oluşturmuş gövdeyi desteklemiş ve yön açısı yönünde gövdeyi ötelemiştir. Adım sonunda kütle merkezi ve 2.bacağın yere dokunduğu noktanın pozisyonları:

$$^{o}C = [\ ^{o}x_c + S\cos(\gamma) \quad ^{o}y_c + S\sin(\gamma) \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.29}$$

$$^{o}T_2 = [\ ^{o}x_c - L_0 + k + S\cos(\gamma) \quad ^{o}y_c + u + S\sin(\gamma) \quad ^{o}z_{T2}] \tag{4.30}$$

Görüldüğü gibi bir yürüyüş periodu sonunda kütle merkezi ve tüm bacaklar yön açısı α yönünde S kadar ilerlemiştir.

4.2.1 anlatılan tekniğe benzer şekilde buradada atılabilecek en büyük adım uzunluğu S_{max} belirlenmelidir. Bu uzunluk yine robotun mekanizmasına bağlıdır. Denklem 4.16 ile robotun bir bacağının en büyük gerilme uzunluğu tanımlanmıştı. Şekil

4.8a'da birinci ve üçüncü bacaklar, şekil 4.8c'de ikinci ve dördüncü bacaklar en fazla gerilmiştir. Aşağıdaki denklemler elde edilebilir:

$$L_1 = L_4 = \sqrt{(L_o + \frac{1}{4}S\cos\gamma)^2 + (\frac{1}{4}S\,sin\gamma)^2} \tag{4.31}$$

$$L_2 = L_3 = \sqrt{(L_o - \frac{3}{4}S\cos\gamma)^2 + (\frac{3}{4}S\,sin\gamma)^2} \tag{4.32}$$

Denklem 4.31 ve 4.32'de L_i (i = 1,2,3,4) yerine L_{max} konursa bu durumda S 'te S_{max} olacaktır ve aşağıdaki denklemler elde edilecektir.

$$(L_o + \frac{1}{4}S_{max}\cos\gamma)^2 + (\frac{1}{4}S_{max}\,sin\gamma)^2 \leq L_{imax}{}^2 \text{ , i = 1,2,3,4} \tag{4.33}$$

$$(L_o - \frac{3}{4}S_{max}\cos\gamma)^2 + (\frac{3}{4}S_{max}\,sin\gamma)^2 \leq L_{imax}{}^2 \text{ , i = 1,2,3,4} \tag{4.34}$$

Bu denklemlere ek olarak omuz eklemi [2]'de $65 \geq \alpha_{1i} \geq -65^o$ alınmıştır, buradan $\alpha_{1i} \geq -65^o$ kısıtıda aşağıdaki denklemi getirir:

$$\frac{3S_{max}\sin(\gamma)}{4L_o - 3S_{max}\cos(\gamma)} \leq tan65^o \tag{4.35}$$

Denklemler 4.33, 4.34 ve 4.35'ten

$$S_{max}^2 + 8L_oS_{max}\cos(\gamma) + 16L_o^2 - 16L_{imax}^2 \leq 0, \tag{4.36}$$

$$9S_{max}^2 - 24L_oS_{max}\cos(\gamma) + 16L_o^2 - 16L_{imax}^2 \leq 0, \tag{4.37}$$

$$S_{max} \leq \frac{4L_o tan65}{(3\,sin\gamma + 3\,tan65\,cos\gamma)} \tag{4.38}$$

Eğer $\gamma = \frac{\pi}{2}$ olsaydı:

$$S_{max} \leq \frac{4}{3}\sqrt{L_{imax}^2 - L_o^2} \text{ , i = 1,2,3,4} \tag{4.39}$$

$$S_{max} \leq \frac{4}{3}L_o tan65 \tag{4.40}$$

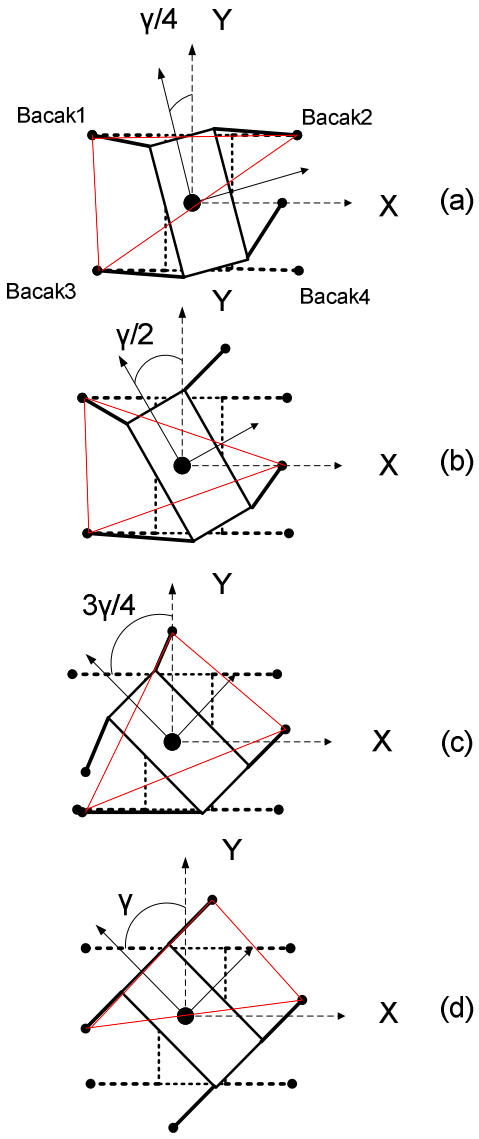
Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta yön açısı değiştikçe denklemler 4.33 ve 4.34'ün değişeceğidir. Yani yularıda S_{max} bulmak için verilen denklemler her

durum için uygulanacal standart denklemler değildir. Yön açısına göre geometrik olarak tekrar çıkarılmalıdır.

4.2.3 Kendi Ekseni ve Herhangi Bir Eksen Etrafında Dönme

Dönme mobil robotlar için önemli problemlerden biridir. Söz konusu bacaklı mobil robotlar olunca bu işlem daha da karmaşıklaşır. Bu bölümde [1]'de ayrıntılı anlatılan robotun kendi ekseni etrafında dönmesi ve bu tekniğin modifiye edilmiş şekli olan herhangi bir eksen etrafında dönme anlatılacaktır. Bu teknik temel olarak 4.2.1'de anlatılan tekniğe benzerlik gösterir.

Sağ el kuralına göre, dönme açısı θ ile gösterilmek üzere, robot kendi ekseni etrafında sola dönmek isterse $\theta > 0$, sağa dönmek isterse $\theta < 0$ olacaktır. Şekil 4.9'da robotun θ açısı kadar sola kendi ekseni etrafında dönmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Kendi ekseni etrafında sola dönüş

Bacak adım sırası tahmin edilebileceği gibi düz yürümeden farklı olacaktır. Sola dönüşte ilk adımı 4.bacak atabilir. 4.bacakla adıma başlanırsa uygun adım sırası 4-2-1-3'tür. Adım sırası için diğer seçenek 1-3-4-2'dir. Uygun adım sırasının oluşmasında temel faktör yine dengeyi sağlamaya yönelik oluşturulacak destek üçgenidir. Kendi ekseni etrafında robotun sağa dönmesi istenseydi, uygun adım sırası 3-1-2-4 ya da 2-4-3-1 olacaktı.

Bölüm 4.2.1'e benzer şekilde her adımda robot $\theta/4$ kadar döner ve bacakların uç noktalarının pozisyonları hesaplanabilir. Şekil 4.9a'da 4.bacak havaya kalkmış ve 1,

2, 3.bacaklar gövdeyi desteklemiştir. 4.bacak adımını tamamladıktan sonra, bu bacağın uç noktasının pozisyon vektörü:

$$^{o}T_4 = [\ ^{o}x_c + \ (L_0 + \ k)\ cos\theta + u\ sin\theta \quad ^{o}y_c + (L_0 + \ k) sin\theta n cos\theta \quad ^{o}z_{T4}] \quad (4.41)$$

Şekil 4.9b'da 2.bacak havaya kalkmış ve 1, 3, 4.bacaklar gövdeyi desteklemiştir. 2.bacak adımını tamamladıktan sonra, bu bacağın uç pozisyon vektörü:

$$^{o}T_2 = [\ ^{o}x_c + \ (L_0 + \ k)\ cos\theta u - usin\theta \quad ^{o}y_c + (L_0 + \ k) sin\theta n cos\theta \quad ^{o}z_{T2}] \quad (4.42)$$

Şekil 4.9c'da 1.bacak havaya kalkmış ve 2, 3, 4.bacaklar gövdeyi desteklemiştir. 1.bacak adımını tamamladıktan sonra, bu bacağın uç noktasının pozisyon vektörü:

$$^{o}T_1 = [\ ^{o}x_c - \ (L_0 + \ k)\ cos\theta u - usin\theta \quad ^{o}y_c - (L_0 + \ k) sin\theta n cos\theta \quad ^{o}z_{T1}] \quad (4.43)$$

Şekil 4.9d'de 3.bacak havaya kalkmış ve 1, 2, 4.bacaklar gövdeyi desteklemiştir. 3.bacak adımını tamamladıktan sonra, bu bacağın uç noktasının pozisyon vektörü:

$$^{o}T_3 = [\ ^{o}x_c - \ (L_0 + \ k)\ cos\theta u + usin\theta \quad ^{o}y_c - (L_0 + \ k) sin\theta n cos\theta \quad ^{o}z_{T3}] \quad (4.44)$$

Bölüm 4.2'de robotun atabileceği en büyük adım hesaplanabileceği gibi burada da robotun dönebileceği en büyük açı hesaplanabilir. Şekil 4.9a'dan görülebileceği gibi sola dönüşte yatayda en çok 4. ve 3.bacaklar gerilir. θ_{max} en büyük gerilme açısını göstermek üzere 4.bacak θ_{max} kadar dönünce uç noktasının koordinatları $^{o}x_{T4}$ ve $^{o}y_{T4}$ gösterilsin. Bu noktanın gövdeye bağlandığı nokta ise $^{o}x_{B4}$, $^{o}y_{B4}$, $^{o}z_{B4}$ ile gösterilsin. Buradan aşağıdaki denkleme ulaşılır:

$$L_4 = \sqrt{(\ ^{o}x_{T4} - \ ^{o}x_{B4})^2 - (\ ^{o}y_{T4} - \ ^{o}y_{B4})^2} \quad (4.45)$$

Gövde her adımda en çok $\theta_{max}/4$ kadar döneceğinden:

$$^{o}x_{B4} = \ ^{o}x_c + \ k\ cos\frac{\theta_{max}}{4} + u\ sin\frac{\theta_{max}}{4} \quad (4.46)$$

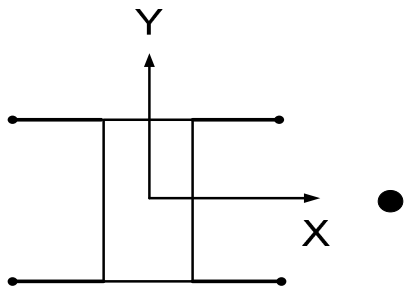
$$^{o}y_{B4} = \ ^{o}y_c + \ k\ sin\frac{\theta_{max}}{4} - u\ cos\frac{\theta_{max}}{4} \quad (4.47)$$

Sonuçta:

$$L_4 = \sqrt{P_1 sin\frac{3\theta_{max}}{4} - P_2 cos\frac{3\theta_{max}}{4} + P_3} \tag{4.48}$$

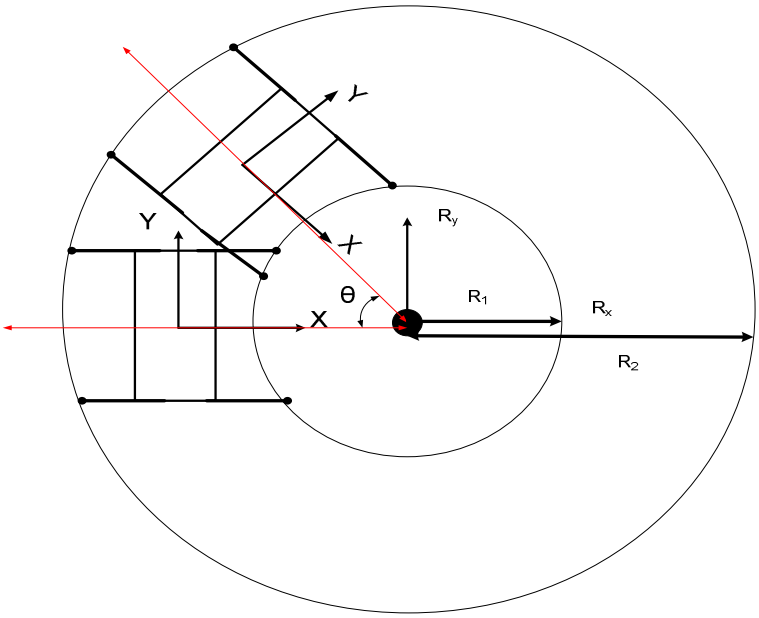
Yukarıdaki denklemde P_1, P_2, P_3 L_0, m ve n'nin birer fonksiyonudur. Denklem 4.48'de L_4 yerine L_{max} konursa en büyük dönme açısı θ_{max} bulunur.

Herhangi bir dönme merkezi etrafında dönmede de hesaplama yöntemi benzerdir. Burada herhangi bir dönme ekseninden kasıt dönme merkezinin robot kütle merkezinin x ekseni üzerinde olmasıdır. Şekil 4.10'da siyah nokta örnek bir dönme merkezi göstermektedir.



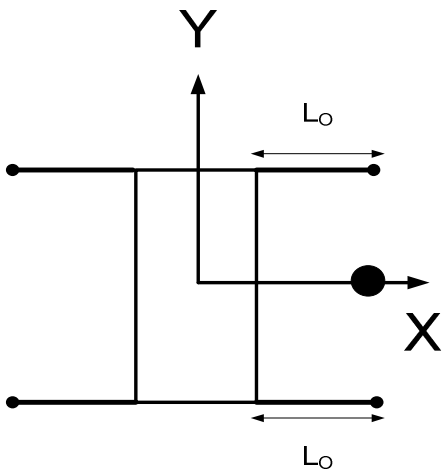
Şekil 4.10: Örnek bir dönme merkezi

Dönme merkezi robotun kütle merkezinin x ekseni ya da y ekseni doğrultusunda olmazsa robotun oriyantasyonunun dönme merkezine göre ayarlanması gerekir. Bu tezde dönme merkezinin robotun kütle merkezinin x ekseninde olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4.11: Robotun bir dönme merkezi etrafındaki hareketi

Şekil 4.11'den görülebileceği gibi robotun herhangi bir dönme merkezi etrafında dönmesi bacakların uç noktalarının merkezi dönme merkezi olan çembeler üzerinde hareket etmesidir. Dönme merkezi robotun kütle merkezinin $+x$ ekseni üzerindeyse bacak sırası 3-1-4-2 olacaktır. Dönme merkezi robotun kütle merkezinin $-x$ ekseni üzerindeyse 4-2-3-1 uygun adım sırası olacaktır. Dönme merkezi gövdeye başlangıç pozisyonu yatay bacak açıklığıından(L_0) daha yakınsa bu eksen etrafında dönüş kendi ekseni etrafında dönüşe benzer ve uygun adım sırasıda kendi ekseni etrafında dönüş gibi olur. Bu duruma örnek olacak bir dönme merkezi şekil 4.12'te siyah nokta ile gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Örnek dönme merkezi

Robot her adımda dönmesi gereken açının dörtte biri kadar döner ve yürüyüş periodu sonunda açının tamamını dönmüş olur. Simulasyonlar için gerekli hesaplarda tüm pozisyonlar dönme ekseni referans alınarak yapılmşıtır. Dönme eksenin pozisyonu ${}^{o}R = [\ {}^{o}x_R\ \ {}^{o}y_R\ \ {}^{o}z_R\ ]^{\mathrm{T}}]$ ile gösterilesin. θ dönme açısını ve μ'de her bacağın uç noktasının dönme eksenine göre başlangıç açısını göstermek üzere, şekil 4.11'de gövde sağa doğru θ kadar dönünce adımı tamamladıktan sonra dönme eksenine göre bacakların uç noktalarının ve kütle merkezinin pozisyon vektörleri:

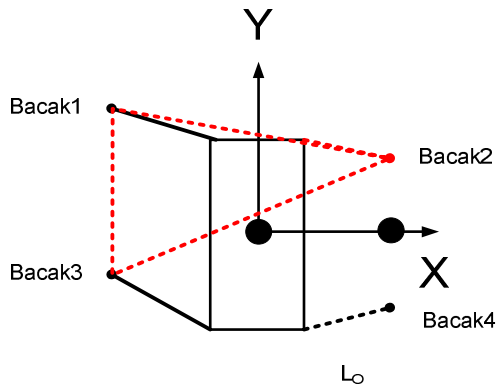
$${}^{R}T_1 = [R_1\cos(\mu_1 - \theta)\ \ R_1\sin(\mu_1 - \theta)\ \ {}^{R}z_{T1}\ ] \tag{4.49}$$

$${}^{R}T_2 = [R_2\cos(\mu_2 - \theta)\ \ R_2\sin(\mu_2 - \theta)\ \ {}^{R}z_{T2}] \tag{4.50}$$

$${}^{R}T_3 = [R_1\cos(\mu_3 - \theta)\ \ R_1\sin(\mu_3 - \theta)\ \ {}^{R}z_{T3}] \tag{4.51}$$

$${}^{R}T_4 = [R_2\cos(\mu_4 - \theta)\ \ R_2\sin(\mu_4 - \theta)\ \ {}^{R}z_{T4}] \tag{4.52}$$

Bu yöntemele de robot dönüşü tamamlayınca başlangıç pozisyonuna döner. Simülasyonlar sırasında bu yöntemin her dönme merkezi için uygulanamayacağı görülmüştür. Özellikle dönme merkezi robotun başlangıç pozisyonundaki bacak açıklığında veya buraya yakınsa robotun dengesini 3. veya 4.adımda kaybettiği yani havada olması gereken bacağın zemine dokunduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni kütle merkezinin destek üçgen dışında kalmasıdır. Bu duruma örnek olaca bilecek bir konfigürasyon şekil 4.13'te gösterilmiştir. Burada robotun 4. Bacağı havaya kalktığında kütle merkezi kesikli çizgilerle gösterilen ve 1, 2, 3.bacakaların uç noktoları tarafından oluşturulan destek üçgen dışında kalmıştır. Sonuç olarak 4. Bacak havaya kalktın sonra havada olması gereken süre kadar havada kalamamış ve gövdenin moment etkisinden dolayı yere inmiştir. Simulasyonlarda bu da pozisyon ve oriyantasyon hatasına neden olmuştur.

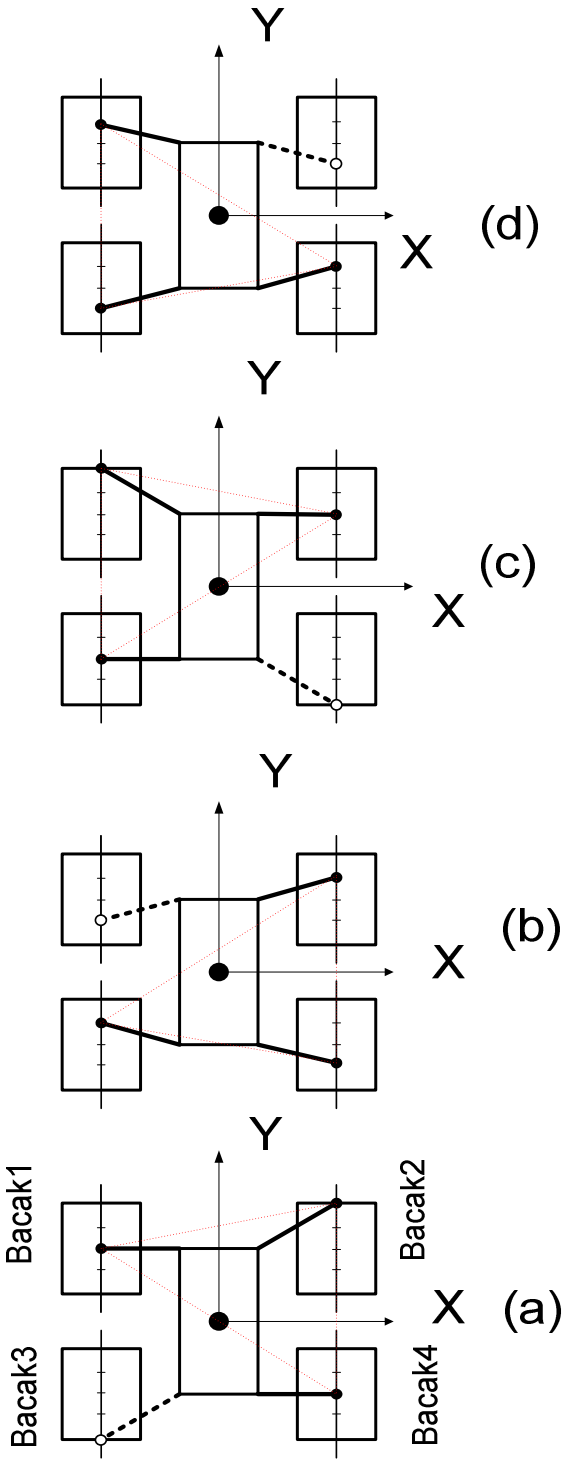


Şekil 4.13: Dengenin kaybedildiği durum örneği

4.3 Dört Bacaklı Statik Yürüyüş Yöntemi 2

Bu bölümde dört bacaklı yürüyüş için diğer bir yöntem anlatılacaktır. Bu yöntem temel olarak [3]'te anlatılmıştır. Anlatılan yönteme uygun eklem açıları bölüm 4.1'de verilen denklemlerle hesaplanmıştır. Bu teknik de bir statik yürüyüş yöntemidir ve destek faktörü 0.75'tir.

Bu yöntemde bacakların uç noktlarının erişebilecekleri alanlar tanımlanmıştır. Kolaylık açısından bu alanaların dikdörtgen olduğu varsayılmıştır. Şekil 4.14'te bu alanlar ve robotun bu alanlar içindeki hareketi gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Dört bacaklı statik yürüme

Her dikdörtgen 200mm x 300mm boyutlarındadır. Dikdörtgen boyutları robotun eklem uzunluklarına ve mekanizmasına bağlıdır. Bacak adım sıralaması 4.2'de analtılan yöntemle aynıdır. Şekil 4.14'te robotun y ekseni boyunca hareketi görülmektedir. Kesikli çizgili bacaklar adım atacak bacağı nitelemektedir. Şekil

4.14a'da 3.bacak adıma atacak ve bu bacak havaya kalktığında diğer bacaklar destek üçgenini oluşturacaktır. Şekil 4.14b'de 3.bacak adamını tamamlamış, gövde 75mm (300:4) ilerlemiş ve birinci bacak adıma atamaya hazırdır. Şekil 4.14c'de 1.bacak adımı tamamlamış, 4.bacak adım atmaya hazırdır ve gövde yine 75mm ilerlemiştir. Burada dikkat edilmesi gereken her adımda uç noktasının ulaşabileceği alanların tekrar oluşmasıdır. Yani şekil 4.14a,b,c,d de ulaşılabilir alanlar farklıdır. Robot her adımda 75mm ilerlemekte ve adım uzunluğu 225mm olmaktadır. Şekil 4.14'te de görülebileceği gibi 4.2'de anlatılan teknğin aksine robotun yürüş perioduna başlangıç ve periodu bitiriş pozisyonları robotun kendi başlangıç pozisyonundan farklıdır. Kütle merkezinin ve bacakların uç noktalarının bir yürüyüş periodu tamamlandığında pozisyon vektörleri aşağıdadır:

$$^{o}T_1 = [\ ^{o}x_c - L_0 - k \quad ^{o}y_c + u + 75 \quad ^{o}z_{T1}\ ] \tag{4.53}$$

$$^{o}T_2 = [\ ^{o}x_c - L_0 + k \quad ^{o}y_c + u + 75 \quad ^{o}z_{T2}] \tag{4.54}$$

$$^{o}T_3 = [\ ^{o}x_c - L_0 - k \quad ^{o}y_c - u + 75 \quad ^{o}z_{T3}] \tag{4.55}$$

$$^{o}T_4 = [\ ^{o}x_c - L_0 + k \quad ^{o}y_c + u + 75 \quad ^{o}z_{T4}] \tag{4.56}$$

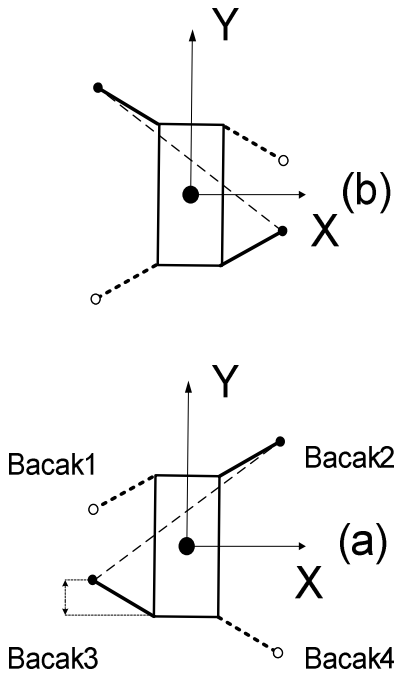
$$^{o}C = [\ ^{o}x_c \quad ^{o}y_c + 75 \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.57}$$

Bu yöntemle robotun kendi ekseni veya herhangi bir eksen etrafında dönmesi ayrıntılı olarak çalışılmamakla birlikte, temel mantık düz yürüme ile aynıdır. Robot her adımda fönme merkezine göre belli bir açı dönecek, her adımda ulaşılabilir dikdörtgen alanlarda gövdenin dönüş açısı kadar dönmüş şekilde yeniden oluşacaktır. Dönme hareketi de bu dikdörtgen ulaşılabilir alanlar arasında geçiş olacaktır.

4.4 Dört Bacaklı Dinamik Yürüyüş

Bölüm 2'de anlatıldığı üzere 4 bacaklı dinamik yürümede destek üçgeni yoktur, yani destek faktörü 0.75'ten azdır. Doğal olarak dinamik yürüyüşte dengeyi sağlamak daha zordur. Doğa incelendiğinde 4 bacaklı hayvanların dinamik yürüyüş yaptığı görülür. Doğada en sık görülen dinamik 4 bacaklı yürüyüş şekli trotting'tir.

[4]'te anlatıldığı gibi trotting diagonal bacakların yarım yürüyüş periodu faz farkı ile hareket etmesi sonucu oluşur. Şekil 4.15'te trotting'te bir yürüyüş periodu gösterilmiştir.



Şekil 4.15: Dört bacaklı dinamik yürüyüş

Şekil 4.15'da kesikli çizgiler adım atacak bacak çiftlerini, düz çigilerde yerde kalıp gövdeyi destekleyen ve ileri iten bacak çiftlerini gösterir. Destek üçgenin yerini destek doğrusu almıştır ve denge destek doğruları arasındaki hızlı geçişle sağlanmıştır. S adım uzunluğunu göstermek üzere Şekil 4.15a'da bacakların uç noktlarının ve kütle merkezinin pozisyon vektörleri

$$ {}^{o}T_2 = [\ {}^{o}x_c - L_0 + k \quad {}^{o}y_c + u + S \quad {}^{o}z_{T2}] \tag{4.58} $$

$$ {}^{o}T_3 = [\ {}^{o}x_c - L_0 - k \quad {}^{o}y_c - u + S \quad {}^{o}z_{T3}] \tag{4.59} $$

$$ {}^{o}C = [\ {}^{o}x_c \quad {}^{o}y_c + S \quad {}^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.60} $$

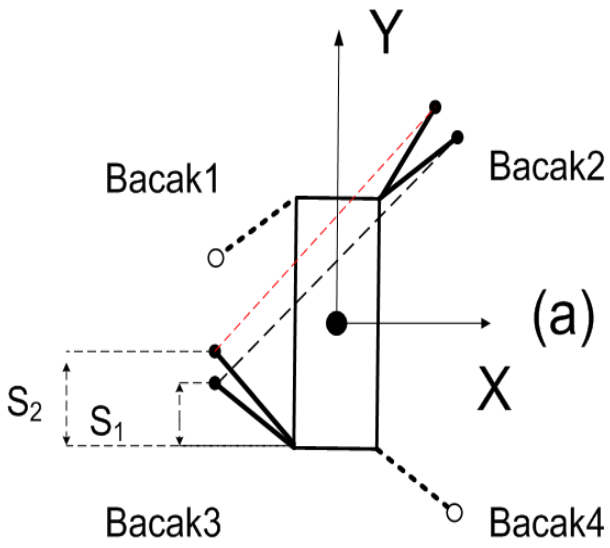
Şekil 4.15b'de bacakların uç noktalarının ve kütle merkezinin pozisyon vektörleri:

$$ {}^{o}T_1 = [\ {}^{o}x_c - L_0 - k \quad {}^{o}y_c + u + S \quad {}^{o}z_{T1}\ ] \tag{4.61} $$

$$ {}^{o}T_4 = [\ {}^{o}x_c - L_0 + k \quad {}^{o}y_c + u + S \quad {}^{o}z_{T4}] \tag{4.62} $$

$$^{o}C = [\ ^{o}x_c \quad ^{o}y_c + 2S \quad ^{o}z_c\ ]^{\mathrm{T}} \tag{4.63}$$

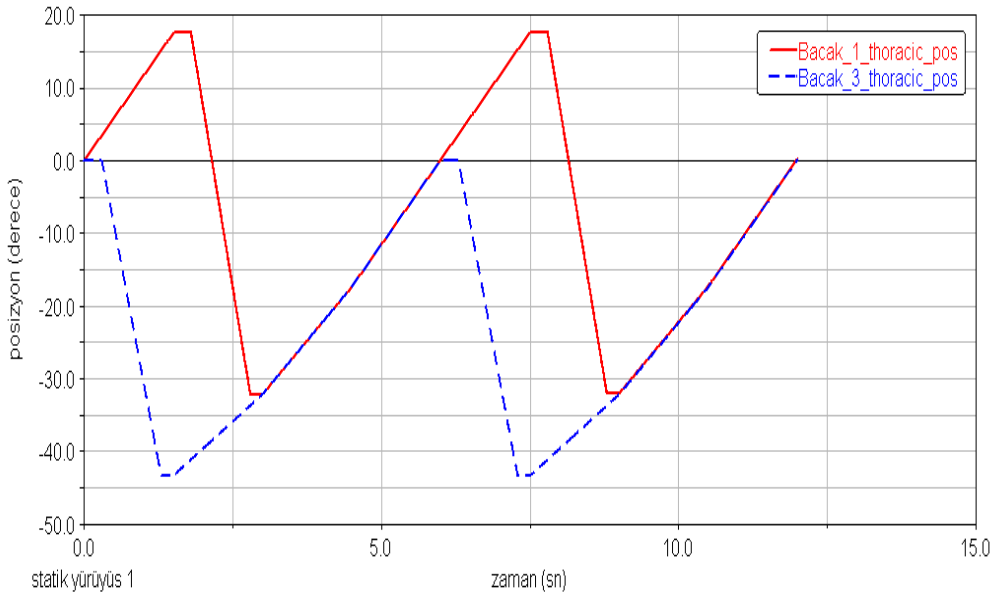
Yerde kalan diagonal bacakların oluşturduğu destek doğruları arasındaki geçişin yapılmasında S adım uzunluğu çok önemlidir. Adım uzunluğunun hesabı bölüm 4.2'ye benzer şekilde yapılabilir. Adım uzunluğu S büyük seçilirse destek doğrusu kütle merkezinden uzaklaşacak bu da gövdenin moment etkisini arttırıp dengeyisağlamayı zorlaştıracaktır. Şekil 4.16'de $S_1 < S_2$ olduğunda S_1 adım uzunluğunda yürüyüş S_2 ye göre daha dengeli olacaktır.



Şekil 4.16: Dinamik yürüyüşte iki faklı adım uzunluğu

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE YÜRÜYÜŞ YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

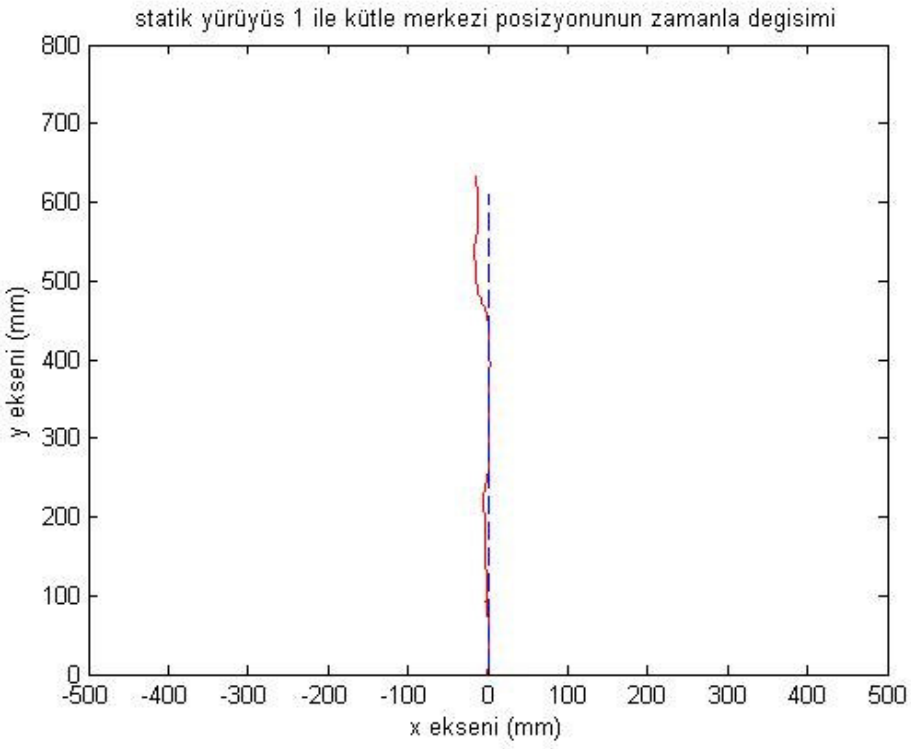
Bu bölümde 4.bölümde anlatılan yürüyüş tekniklerinin simülasyon sonuçlarına yer verilecektir[18]. Tüm simülasyonlar ADAMS dinamik simülasyon programında kurulan ve parametreleri bölüm 4.1'de verilen 4 bacaklı robot modeli ile yapılmıştır. Simülasyonlarda yürüyüş periodları teknikten tekniğe değişmektedir. Bir bacağın adımını atması 3 aşamada değerlendirilebilir: havaya kalkma, ileri gitme (adım atma), yere inme. Tüm bu zamanlamalar ve her yöntem için gerekli eklem açıları MATLAB ile hesaplanmıştır. ADAMS'ta kurulan robot modeli bir MATLAB/simulink model bloğu olarak kullanılmış ve hesaplamalar sonucu elde edilen veriler MATLAB/simulink aracılığı ile modele uygulanmıştır.



Şekil 5.1: Bir numaralı statik yürüyüş yöntemi için bacak 1 ve bacak 3 birinci omuz eklemi pozisyonunun zamanla değişimi

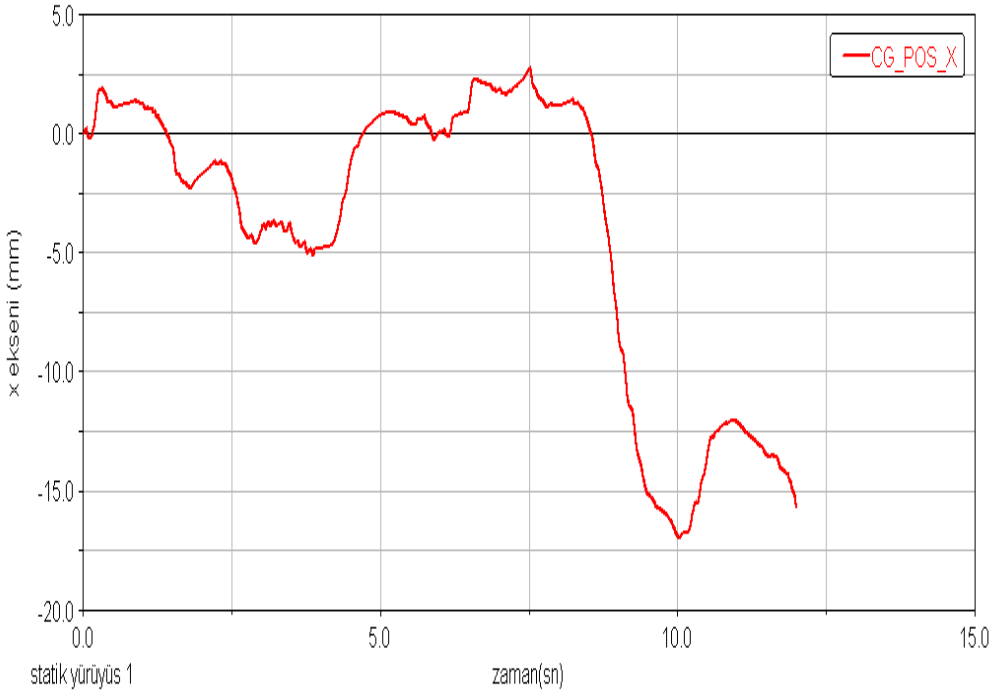
Şekil 5.1'de 4.2.1'de anlatılan birinci statik yürüyüş tekniğine için bacak 1 (düz çizgi) ve bacak 3 (kesik çizgi) birinci omuz eklemlerinin(thoracic) pozisyonlarının zamanla değişimi verilmiştir. Bu teknik için bacağın kalkış ve iniş süreli 0.3 saniye,

ileri gitme (adım atma) süresiyse 1 sn olarak ayarlanmıştır. Buradan yürüyüş periodunun 6.4 sn olduğu görülür. Bu teknikte adım uzunluğu yaklaşık $S = 332mm$ hesaplanmıştır. Şekil 5.1'de $t = 0.3$ sn'de bacak 3 'ün pozisyonunun 0 olduğu görülmektedir. Tam bu anda bacak 3'ün ikinci omuz eklemi (basalar) bacağı havaya kaldırmıştır(burada gösterilmiyor). $t = 1.3$'te bacak 3 hareketini tamamlamış ve bu anda bacak 3'ün ikinci omuz eklemi bacağı yere indirmeye başlamış, $t = 1.6$ sn'de bacak 3 yere inmiştir. Görüldüğü gibi bacak 3 ve bacak 1'in hareket yönleri terstir ve bacak 3 adım attığı için bacak 1'e göre pozisyonu daha çok değişmiştir. $t = 1.6$ sn'de bacak 1'in pozisyonu sabittir, bu bacağın havaya kalktığını göstermektedir. $t = 1.9$'da bacak 1 havaya kalkma hareketini bitirmiştir ve ileri doğru adım atmaya başlamış, $t = 2.9$ sn'de yere inmeye başlamış ve $t = 3.2$ sn'de yere inmiştir. Burada anlatılan yöntem adıma atacak her bacak için tekrarlanmıştır. Anlatıldığı gibi birinci omuz ekleminin(thoracic) sabit olduğu anlar bacağın havaya kalktığını veya yere indiğini gösterir.

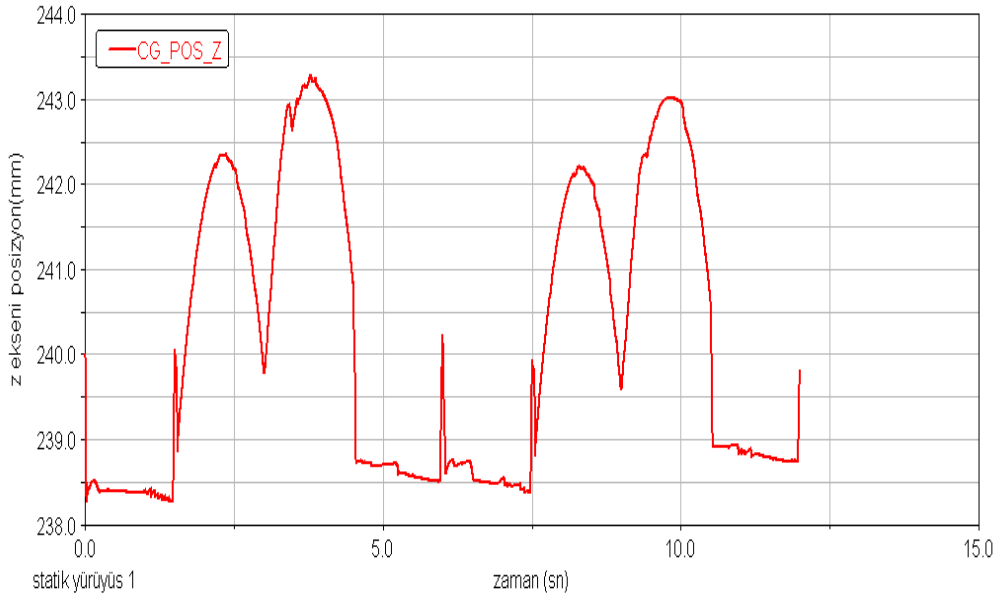


Şekil 5.2: Bir numaralı statik yürüyüş yönteminde robotun kütle merkezi pozisyonun zamanla değişimi sürekli eğri ile izlenmesi gereken yol kesikli çizgilerle gösterilmiştir

Şekil 5.2'de 12 saniyelik simülasyon sonunda birinci statik yürüyüş tekniği ile y ekseninde kütle merkezinin pozisyon değişimi (alınan yol) gösterilmiştir. Kesikli çizgiler izlenmesi gereken yolu göstermektedir. İzlenmesi gereken yolun uzunluğu 609mm'dir. Şekilden görüldüğü gibi y ekseninde tam olarak düz gidilememiş ve x eksenine sapmalar yaşanmıştır. Şekil 5.3'te 12 saniyelik simülasyon sonunda birinci statik yürüyüş tekniğinde y ekseninde yol alırken kütle merkezinin x eksenindeki pozisyon değişimi yani pozisyon hatası gösterilmiştir.



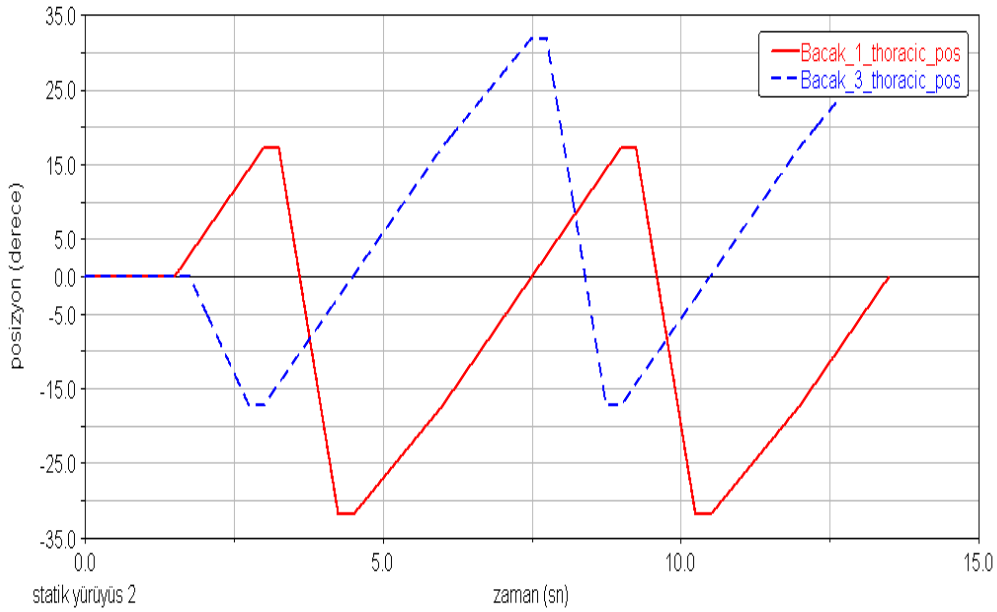
Şekil 5.3: Bir numaralı statik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin x ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi



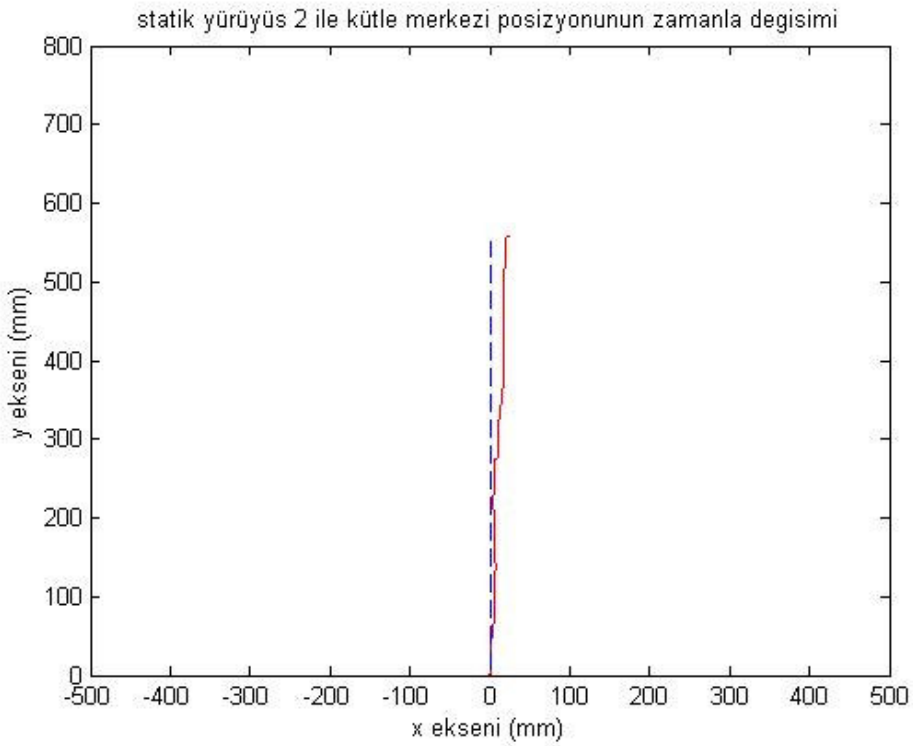
Şekil 5.4: Bir numaralı statik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin z ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi

Şekil 5.4'te ise y yönünde birinci statik yürüyüş yöntemi ile yol alırken robotun zeminden yüksekliğinin değişimi gösterilmektedir. Robotun başlangıç pozisyonunda zeminden yüksekliğinin 238mm olduğunu tekrar hatırlatmakta yarar vardır.

Bölüm 4.3'te anlatılan yürüyüş tekniği için için bacağın kalkış ve iniş süreli 0.3 saniye, ileri gitme (adım atma) süresiyse 1 sn olarak ayarlanmıştır. Buradan yürüyüş periodunun 6.4 sn olduğu görülür. Bu teknikte adım uzunluğu anlatıldığı gibi $S = 225\text{mm}$ yapılmıştır. Şekil 5.5'te bölüm 4.3'te anlatılan ikinci statik yürüyüş tekniğine ilişkin bacak 1 (düz çizgi) ve bacak 3 (kesik çizgi) birinci omuz eklemi (thoracic) pozisyonları görülmektedir. $t = 0 - 1.5$ sn aralığında bacak 3, yürüyüş tekniği için gerekli şekil 5.5a' daki başlangıç pozisyonunu almıştır. Şekil 5.1'e benzer şekilde bu şekilde de omuz eklemlerinin sabit olduğu anlar, bacakların havaya kalktığı ya da yere indiği anlardır. Bacak 3 $t = 1.5$ sn'de havaya kalkmaya başlamış (omuz eklemi sabit), $t = 1.8$ sn'de havaya kalkışı bitirip adım atmaya başlamış, $t = 2.8$ sn'de de adımı bitirmiştir(omuz eklemi sabit). $t = 3.1$'de birinci bacak havaya kalkmaya başlamıştır yani birinci omuz eklemi şekilden de görülebileceği gibi sabittir. $t = 4.7$ sn'de birinci bacak adımını tamamlayıp yere inmiştir. Dikkat edilirse bacaklar havaya kalktıktan sonra omuz ekleminin pozisyon değişimi bacak adım attığından dolayı, yerde kalıp gövdeyi destekleyip ileri ittiği haliden fazladır.

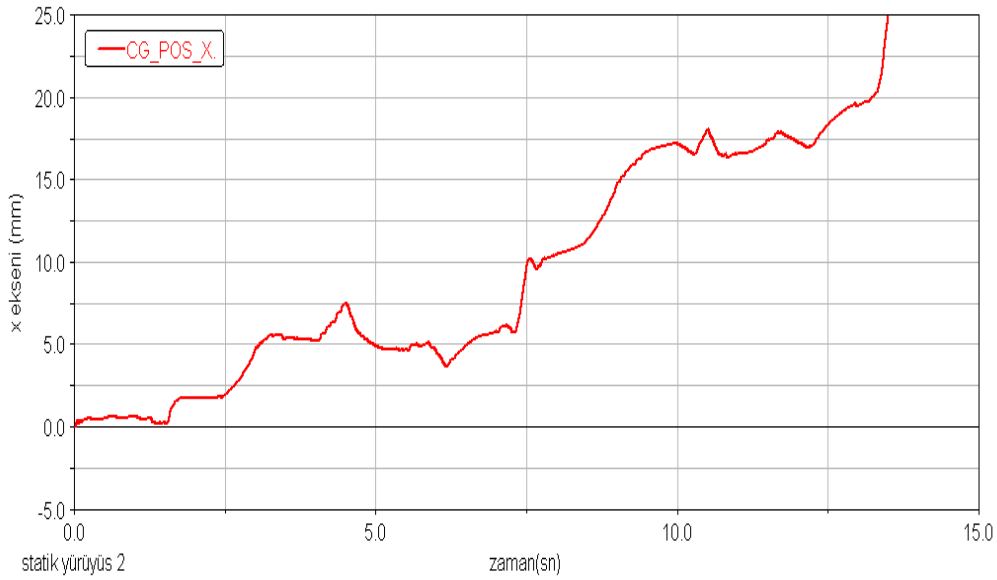


Şekil 5.5: İki numaralı statik yürüyüş yöntemi için bacak 1 ve bacak 3 birinci omuz eklemi pozisyonunun zamanla değişimi



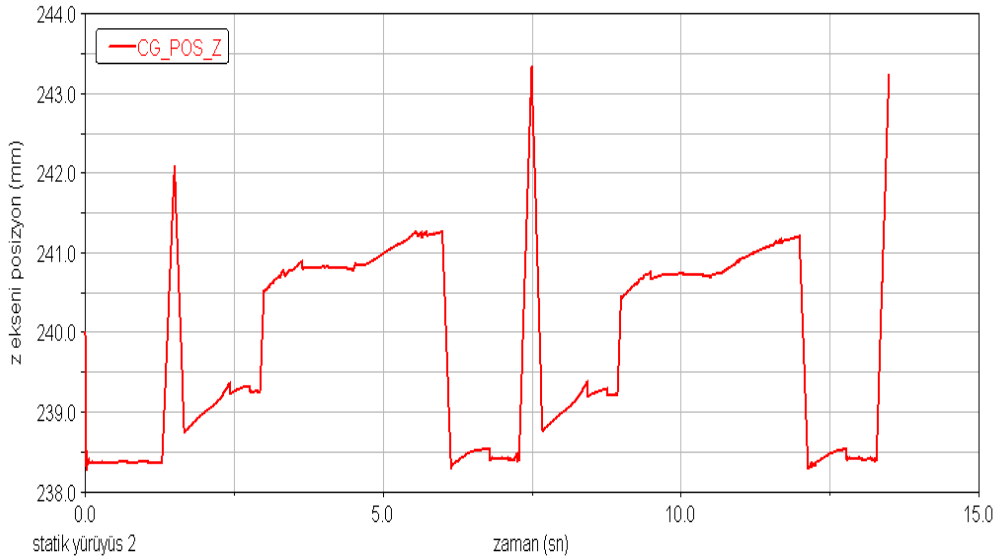
Şekil 5.6: iki numaralı statik yürüyüş yönteminde robotun kütle merkezi pozisyonun zamanla değişimi sürekli eğri ile izlenmesi gerken yol kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

Şekil 5.6'da 13.5 saniyelik simülasyon sonunda ikinci statik yürüyüş tekniği ile y ekseninde kütle merkezinin pozisyon değişimi (alınan yol) gösterilmiştir. Kesikli çizgiler izlenmesi gereken yolu göstermektedir. İzlenmesi gereken yolun uzunluğu 550mm'dir. Şekilden görüldüğü gibi y ekseninde tam olarak düz gidilememiş ve x ekseninde sapmalar yaşanmıştır. Şekil 5.7'de 13.5 saniyelik simülasyon sonunda ikinci statik yürüyüş tekniğinde y yönünde yol alırken kütle merkezinin x eksenindeki pozisyon değişimi yani pozisyon hatası gösterilmiştir.



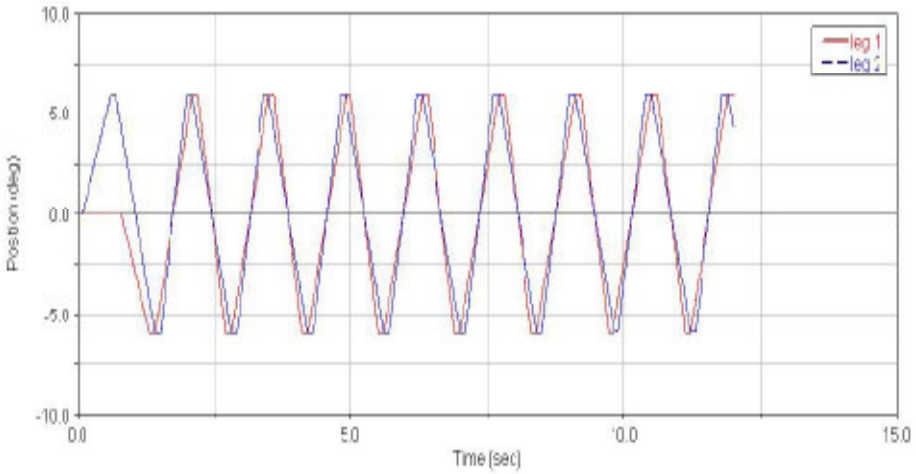
Şekil 5.7: iki numaralı statik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin x ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi

Şekil 5.8'de ise y ekseninde ikinci statik yürüyüş yöntemi ile yol alırken robotun zeminden yüksekliğinin değişimi gösterilmektedir.



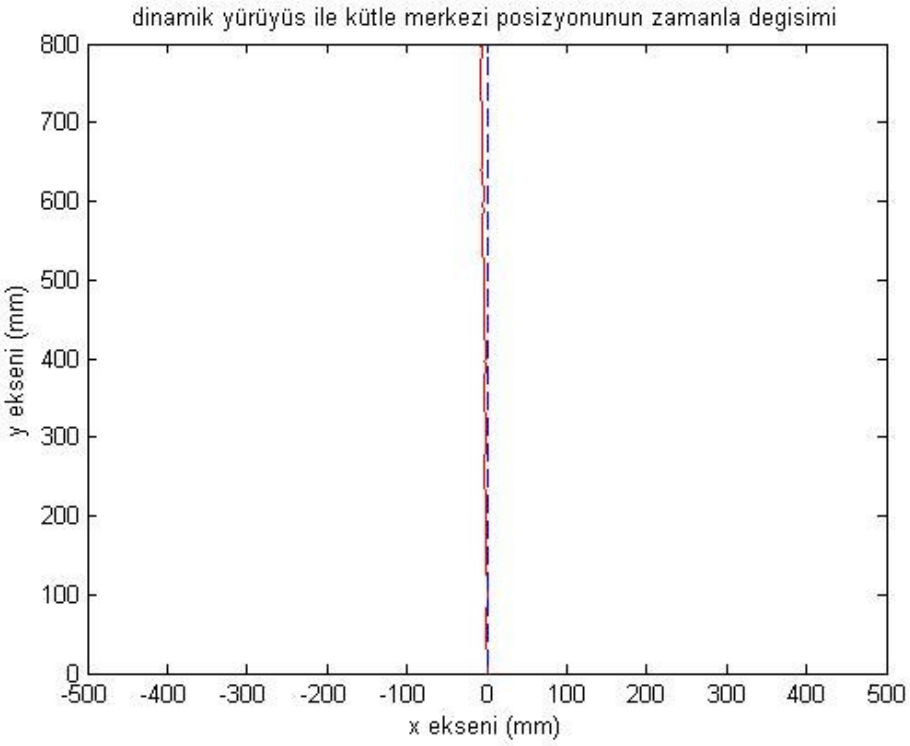
Şekil 5.8: İki numaralı statik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin z ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi

Şekil 5.9'da bölüm 4.4'te anlatılan dört bacaklı dinamik yürüyüş yöntemi için bacak 1 ve bacak 2'nin birinci omuz ekleminin(thoracic) pozisyonunun zamanla değşimi görülmektedir. Bu yöntemde bir bacağın iniş veya kalkış süresi 0.1 sn, bacağın ileri gitme(adım atma) süresi ise 0.5 sn olarak ayarlanmıştır. Buradan yürüyüş periodunun 1.4 sn olduğu görülür. Bölüm 4.3'te anlatıldığı gibi bacak 1 ve bacak 2'nin hareket yönleri aynıdır, aralarında bacağın yere inme ve yerden kalkmasından oluşan faz farkı vardır. Bu teknikte adım uzunluğu $S = 50$mm yapılmıştır.

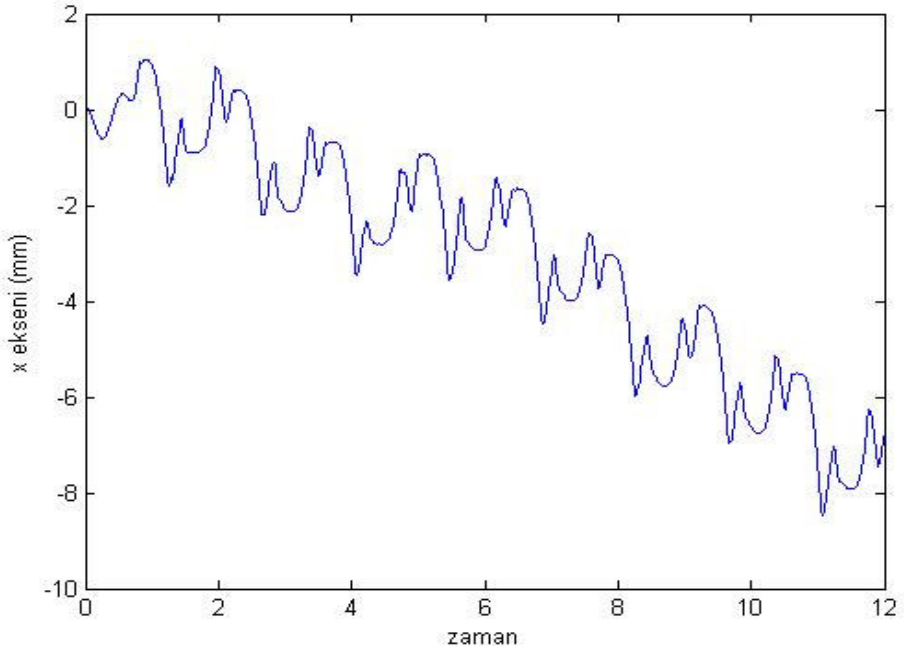


Şekil 5.9: Dinamik yürüyüş yöntemi için bacak 1 ve bacak 2 birinci omuz eklemi pozisyonunun zamanla değişimi

Şekil 5.10'da 12 saniyelik simülasyon sonunda dinamik yürüyüş tekniği ile y ekseninde kütle merkezinin pozisyon değişimi (alınan yol) gösterilmiştir. Kesikli çizgiler izlenmesi gereken yolu göstermektedir. İzlenmesi gereken yolun uzunluğu 807mm'dir. Şekilden görüldüğü gibi y ekseninde tam olarak düz gidilememiş ve x ekseninde sapmalar yaşanmıştır. Şekil 5.11'de 2 saniyelik simülasyon sonunda dinamik yürüyüş tekniğinde y ekseninde yol alırken kütle merkezinin x eksenindeki pozisyon değişimi yani pozisyon hatası gösterilmiştir.

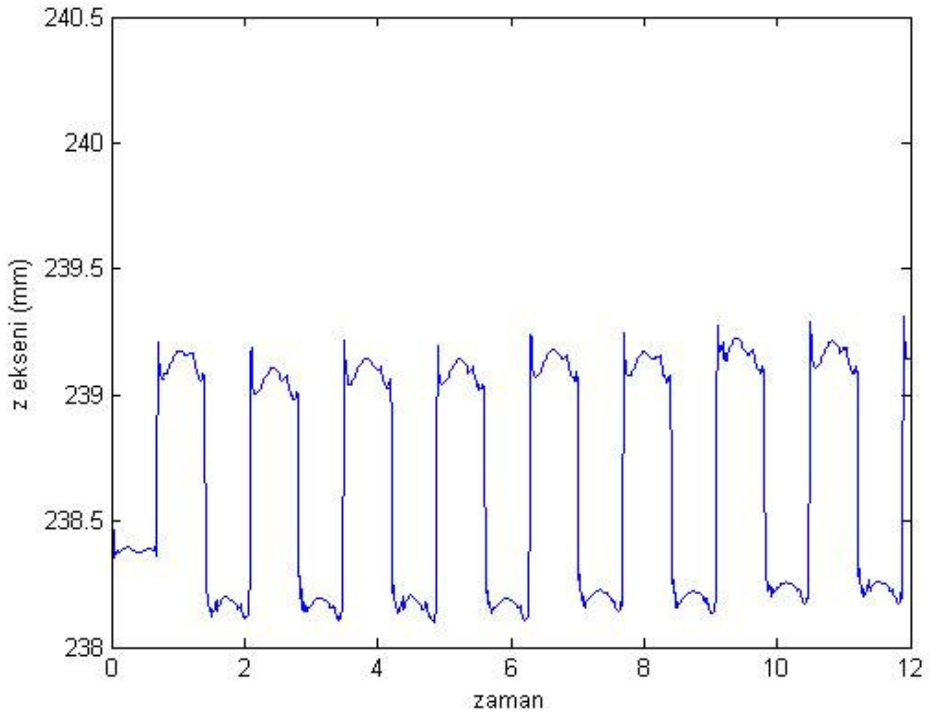


Şekil 5.10: Dinamik yürüyüş yönteminde robotun kütle merkezi pozisyonun zamanla değişimi sürekli eğri ile izlenmesi gereken yol kesikli çizgilerle gösterilmiştir



Şekil 5.11: Dinamik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin x ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi

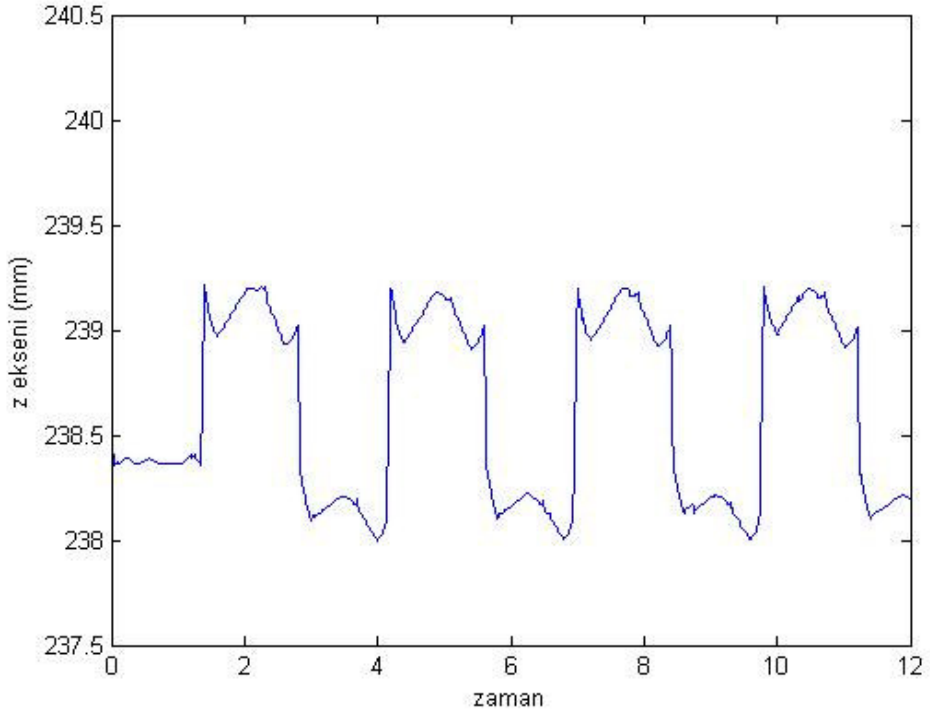
Şekil 5.12'de ise y ekseninde dinamik yürüyüş yöntemi ile yol alırken robotun zeminden yüksekliğinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.12: Dinamik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin z ekseninde pozisyonunun zamanla değişimi

Şekil 5.4, 5.8, 5.12'den robotun yürüyüş sırasında yüksekliğinin yani yere paralelliğinin en az dinamik yürümede değiştiği görülmektedir. Ayrıca şekil 5.3, 5.7, 5.11'dan x ekseninde en fazla pozisyon hatasının iki numaralı statik yürüyüş tekniğinde olduğu görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken parametrelerden biri de simülasyon zamanlarıdır. Simülasyon süreleri değişirse pozisyon hatalarının da değişebileceği unutumamalıdır. Ayrıca dinamik yürüyüşte adım uzunluğunun arttırılması bölüm 4.4'te anlatığı gibi robotun zemine paralelliğinin bozulmasına ve pozisyon hatasının artmasına da sebep olabilir. Grafiklerin genelinden çıkarılacak sonuç adım uzunluğu uygun seçilirse dinamik yürümenin statik yürüme çeşitlerinden daha hızlı ve daha dengeli olduğudur.

Dinamik yürümede adım uzunluğu S = 100mm yapılırsa kütle merkezinin yere parelliğinin değişimi de simülasyonlarla gösterilmiştir(Şekil 5.13).



Şekil 5.13: Dinamik yürüyüş yönteminde kütle merkezinin z ekseninde pozisyonunun adım uzunluğu 100mm iken zamanla değişimi

Şekil 5.13'te görüldüğü gibi kütlenin yerden yüksekliğinin değişimi adım uzumluğu 50mm olduğu zamanki durumdan çok farklı değildir, fakat kütle merkezinin sapma noktalarında kalma zamanı ilk duruma göre artmıştır.

6. SÜREKLİ FONKSİYONLARDAN OLUŞAN YOLLAR İÇİN İZLEME TEKNİĞİ GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde mobil robotların yol izlemesi için geliştirilmiş bir yörünge izleme yöntemi anlatılacak ve bu yöntemle istenen bir yörünge dört bacaklı mobil robot modeline uygulanması ile elde edilen simülasyon sonuçları gösterilecektir.

6.1 Wein-Garten Maps Yol İzleme Yöntemi

Wein-Garten Maps yöntemi ayrıntılı olarak [13]'te açıklanmıştır. Burada da yöntem özet olarak anlatılalacaktır.

Yol izleme robot kütle merkezinin anlık olarak önceden belirlenen bir yörünge üzerinde olması olarak tanımlanabilir. Eğer kütle merkezinin zamana bağlı pozisyon fonksiyonu biliniyorsa yani yol tanımlı ise, bu fonksiyon $\alpha(t)$ eğrisi olsun. Bu eğrinin izlenmesi için gerekli yarıçap ve anlık dönme merkezleri Wein-garten Maps yöntemi ile bulunabilir.

f $U\epsilon R^n$'de tanımlı $U\epsilon R^n$ $f: U\epsilon R^n \rightarrow R$ olan düz bir fonksiyon olsun. R_p^n p başlangıç noktalı ($p \epsilon U$) n boyutlu bir vektör uzayını göstermek üzere v $v\epsilon R_p^n$ olan bir vektör olsun. Bu durumda f'in v vektörüne göre türevi bir reel sayıdır:

$$\nabla_v f = (fog)'(t_o) \tag{6.1}$$

Denklem 6.1'de α $\alpha: I \rightarrow U$ olan bir parametrik eğridir ve $\alpha(\dot{t}_o) = v$ 'dir. α eğrisi yukarıdaki denklemde geçmesine rağmen türevin değeri zincir kuralı ile α'ya bağlı değildir.

$$\nabla_v f = (fog)'(t_o) \tag{6.2a}$$

$$= \nabla f\big(\alpha(t_o)\big)\, \alpha(\dot{t}_o) \tag{6.2b}$$

$$= \nabla f(p)\,.\,v \tag{6.2c}$$

Vektör alanın türevi fonksiyonlar olduğundan denklem (6.2) ile bir vektör alanının bir vektöre göre türevi alınabilir. Bir vektör alanı $X(p)$ verilen bir p noktasına bir vektör atar. Eğer eğriler söz konusu olursa bu vektör alanı $X(p) = (p, X_1(p), X_2(p))$ olur. Vektör alanının parametreleri $R^n \to R$ olmak üzere $X_1(p)$ ve $X_2(p)$ dir. X vektör alanın v vektörüne göre türevi:

$$\nabla_v X = (X\dot{o}\alpha)(t_o) \tag{6.3a}$$

$$= (\alpha(t_o), (X_1 o\alpha)'(t_o), (X_2 o\alpha)'(t_o)) \tag{6.3b}$$

$$= (p, \nabla_v X_1, \nabla_v X_2) \tag{6.3b}$$

Yukarıdaki bilgilerle birim normal vektör alanı N değişimi izlenmek istenene eğrinin şeklini bulmak için incelenebilir. Burada Wein-Garten Map tanımı aşağıda görülebilir.

$$L_p(v) = -\nabla_v N \tag{6.4}$$

Denklem 6.4'te v eğrinin teğet vektör uzayında bir vektördür. N'in teğet bir vektöre göre türevi yine eğriye teğettir ve bu aşağıda gösterilmiştir.

$$0 = \nabla_v(1) = \nabla_v(N.N) \tag{6.5a}$$

$$= \nabla_v(N)\, N(p) + N(p)\, \nabla_v(N) \tag{6.5b}$$

$$= 2\, \nabla_v(N)\, N(p) \tag{6.5c}$$

Yukarıdaki ifadelerden $\nabla_v(N)$'in $N(p)$'ye dik olduğu görülebilir. Bu bilgilerin yanında bir düzlem eğrisinin üzerindeki her noktanın teğet uzayı 1 boyutludur. Wein-Garten Maps bu uzayda bir lineer transformasyondur ve 1 boyutlu uzaydan yine bu uzaya bir lineer transformayonda kendisinşn bir skaler sayıyı ile çarpımından ibarettir. Bu skaler $k(p)$ olarak tanımlanırsa

$$L_p(v) = k(p)v \ , v \in C \tag{6.6}$$

Yukarıdaki denklemde $k(p)$ C eğrisinin p noktasındaki eğimidir. Eğimin bulunuşunu formülüze etmek için aşağıdaki teorem kullanılır.

Teorem: C birim normal N vektör alanı ile oriente edilen bir düzlem eğrisi olsun. $p \in C$ ve $v \in C_p$ olmak üzere (C_p C eğrisinin teğet uzayını ifade eder.) $\alpha: I \to C$ olan ve $\alpha(\dot{t_o}) = v$, $t_o \in I$ olan her parametrik α eğrisi için aşağıdaki ifade doğrudur:

$$\alpha(t_o).\ddot{N}(p) = L_p(v).v \tag{6.7}$$

Kanıt: $\alpha(t_o)$ C'de bir parametrik eğri olduğundan, bütün $t \in I$ için $\dot{\alpha} \in C_{\alpha(t)} = [N(\alpha(t_o))]^{\perp}$, örneğin $\dot{\alpha}.(No\alpha) = 0$. Sonuçta

$$0 = [\dot{\alpha}.(No\alpha)(t_o)]' \tag{6.8a}$$

$$= \ddot{\alpha}(t_o)\ (No\alpha)(t_o) + \alpha(\dot{t_o})\ (No\dot{\alpha})(t_o) \tag{6.8b}$$

$$= \ddot{\alpha}(t_o)\ (N(\alpha(t_o)) + v.\nabla_v N \tag{6.8c}$$

$$= \alpha(t_o)\ddot{.}N(p) - L_p(v).v \tag{6.8d}$$

Buradan sonuç:

$$\alpha(t_o).\ddot{N}(p) = L_p(v).v \tag{6.9}$$

Denklem 6.6'nın iki tarafını v ile çarparsak

$$L_p(v).v = k(p)||v||^2 \tag{6.10}$$

$$k(p) = \frac{L_p(v).v}{\|v\|^2} \tag{6.11}$$

Yukarıdaki teoremin sonucu ve 6.9 denklemi denklem 6.11'de yerine konursa

$$k\big(\alpha(t)\big) = \ddot{\alpha}(t_o)\ (N(\alpha(t_o))/\big\|\dot{\alpha}(t_o)\big\|^2 \tag{6.12}$$

$\alpha(t) = (x(t), y(t))$ olan bir düzlem eğrisi olsun. Bu durumda teğet vektör uzayı $\dot{\alpha}(t_o) = (\alpha(t_o), \dot{x}(t), \dot{y}(t))$ ve ivme vektör uzayı $\ddot{\alpha}(t_o) = (\ddot{x}(t), \ddot{y}(t))$, sonuçta birim normal vektör alanı:

$$N\big(\alpha(t_o)\big) = (\alpha(t_o), -\dot{y}(t)/\alpha(t_o),\ \dot{x}(t)/\alpha(t_o)) \tag{6.13}$$

Tüm formüller denklem 6.12'de yerine konursa:

$$k(\alpha(t)) = (\dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \dot{y}(t)\ddot{x}(t))/(\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2)^{3/2} \quad (6.14)$$

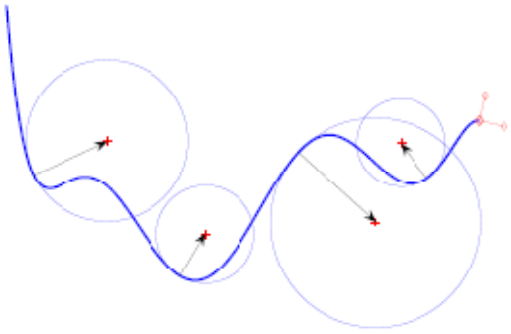
Denklem (6.14) ile izlenmek istenen $\alpha(t)$ eğrisinin eğimi bulunur. Eğimin çarpmaya göre tersi de anlık dönme merkezini verir.

6.2 Yürüme Algoritmasının Uygulanışı ve Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde 6.1'de önceden belirlenen ve zamanla değişen bir yol, $\alpha(t)$, için her t anına ait anlık dönme merkezi hesabı anlatıldı. Bu bölümde ise elde edilen parametrelerle nasıl bir algoritma oluşturulduğu ve algoritmanın ADAMS'ta kurulan dört bacaklı robot modeline uygulanması ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

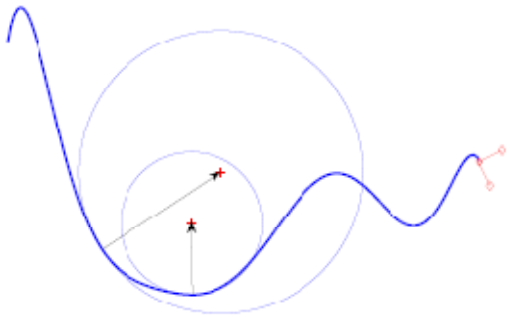
Bir yörünge (düzlem eğrisi) sonsuz sayıda noktadan oluşur ve bu noktaların bileşimi $\alpha(t)$ yol fonksiyonunu oluşturur. Bu fonksiyondan, iki tanesi yolun başından ve sonundan olmak üzere örnek noktalar alınır ve ilk noktadan ikinci noktaya robot ilerletilir aynı işlem sonraki komşu nokta çiftleri arasında tekrarlanırsa robot yolu izlemiş olur.

Yoldan alınan her nokta için Wein-Garten Maps yöntemi ile anlık dönme merkezi (ADM) hesaplanır. Şekil 6.1'de örnek bir yol, bu yoldaki örnek noktalar ve bu noktalara ait anlık dönme merkezleri gösterilmiştir. Bu durumda elimizde izlenmesi gereken bir yol, yoldan alınan örnek noktalar ve bu noktalara ait anlık dönme merkezleri vardır.



Şekil 6.1: Örnek yol ve anlık dönme merkezleri

Örnek alınan her noktanın ADM'si eğer yol üzerinde eğimi sabit olan bir nokta yoksa farklıdır. Komşu iki noktanın ADM'sinin aynı olduğu ve bu ADM'ninde komşu iki noktandan ilkinin ADM'si olduğunu var sayarsak bu iki nokta arasında bir yay oluşur. Robota bu yay izletilir, sonraki komşu nokta çiftine geçilir aynı yöntemle oluşturulan yay yine robota izletilir. Bu durum her komşu nokta çifti için tekrarlanırsa eğri izlenmiş olur. Şekil 6.2'de de iki adet örnek nokta ve bunların ADM'leri gösterilmiştir. Bunlar arasında da oluşacak yay da anlatıldığı gibi ilk noktanın ADM'si merkez alınarak oluşacaktır.



Şekil 6.2: Örnek yol ve anlık dönme merkezleri

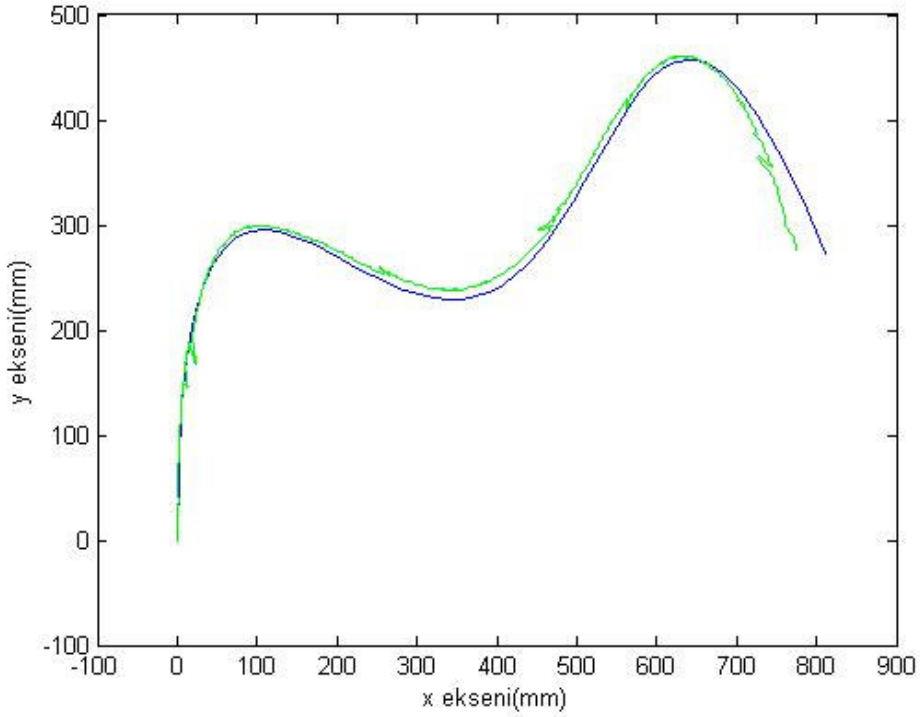
Yol izleme algoritması her örnek komşu nokta çiftinin ADM'lerinin aynı olduğu varsayımına dayanır. Gerçekteyse anlatıldığı gibi her noktanın ADM'si farklıdır. Bu da noktalar arasında bir yay oluşmasını engeller. Yani robota izletilen yaylar aslında yörünge üzeriden geçmemekte, bu da robota izletilen yol ile izlenmesi gereken yolun farklı (hata) olmasına neden olmaktadır. Bu işlem her komşu nokta çifti arasında tekrarlandığından hata giderek artar. Yoldan ne kadar fazla sayıda örnek nokta alınırsa noktalar arasındaki eğim farkı o kadar az olur, bu da yukarıda yapılan var sayıma dayanarak izlenen yayların gerçek yörüngeye yakınsamasını ve hatanın azalmasını sağlar.

Bölüm 4.2.3'te anlatılan herhangi bir eksen etrafında dönme yöntemi burada da iki komşu nokta arasında oluşan yayı izlemek için kullanılmştır. Yay izlemekte belli bir eksen etrafında yay uzunluğu kadar dönmek demektir, dönme eksenin de ilk komşu noktanın ADM'si olduğu açıktır. Bu yürüme yönteminde bir yürüyüş periodu sonunda robotun başlangıç pozisyonunu aldığı anlatılmıştı. İki nokta arasındaki izlenecek yay o dönme ekseni etrafında bir yürüyüş periodunda dönülebilecek açıya

eşit ya da daha küçükse, yani yürüyüş periodu tamamlanıyorsa sonraki izlenecek yaya (yürüyüş periodu) geçilirken hiçbir ek hesaba gerek kalmaz, çünkü robot zaten başlangıç pozisyonunu önceki yürüyüş periodunun sonunda almıştır. Eğer iki nokta arasındaki yay bir yürüyüş periodunda dönülemeyecek kadar uzunsa, bu yay iki ya da daha fazla yürüyüş periodunda dönülür. Önemli olan robotun bir ya da daha fazla yürüyüş periodunu tamamlaması yani başlangıç pozisyonuna dömesidir.

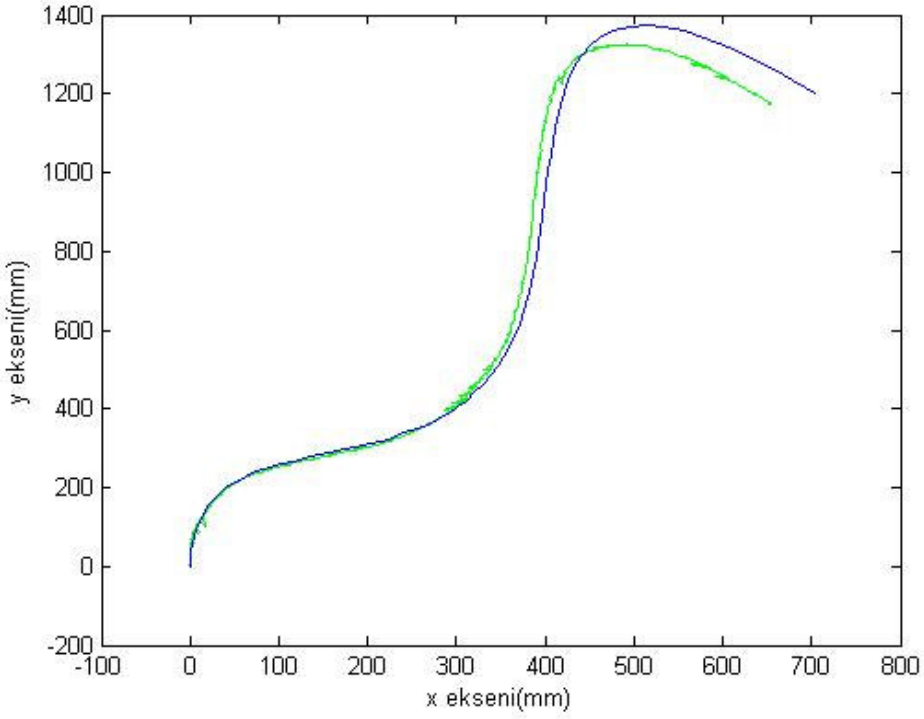
Algoritma MATLAB'da geliştirilmiş ve sonuçlar ADAMS simülasyon programında kurulan dört bacaklı robot modeline uygulanarak robotun kütle merkezinin aldığı pozisyon ile izlenmesi gereken yol simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Algoritma uygulanırken yoldan örnek noktalar alınmış, bu noktaların anlık dönme merkezleri, her komşu nokta çifti arasında oluşan yay uzunlukları ve bu yayları izlemek için robotun eklemlerinin alması gereken pozisyonlar hesaplanmıştır. Simulasyonlarda bir yürüyüş periodu o nokta çevresinde dönülebilecek en büyük açı için (izlenebilecek en büyük yay için) 6 sn. alınmış ve izlenmesi gereken yolda igili nokta etrafında alınacak yay uzunluğu ile en büyük yay uzunluğunun oranına göre yürüyüş periodu her nokta çifti için hesaplanmıştır.

İzlenmesi gereken yollar şekil 6.3, 6.4 ve 6.5'de mavi eğrilerle, izlenen yollar, yani robotun kütle merkezinin x ve y koordinatları ise yeşil eğrilerle ile gösterilmiştir.



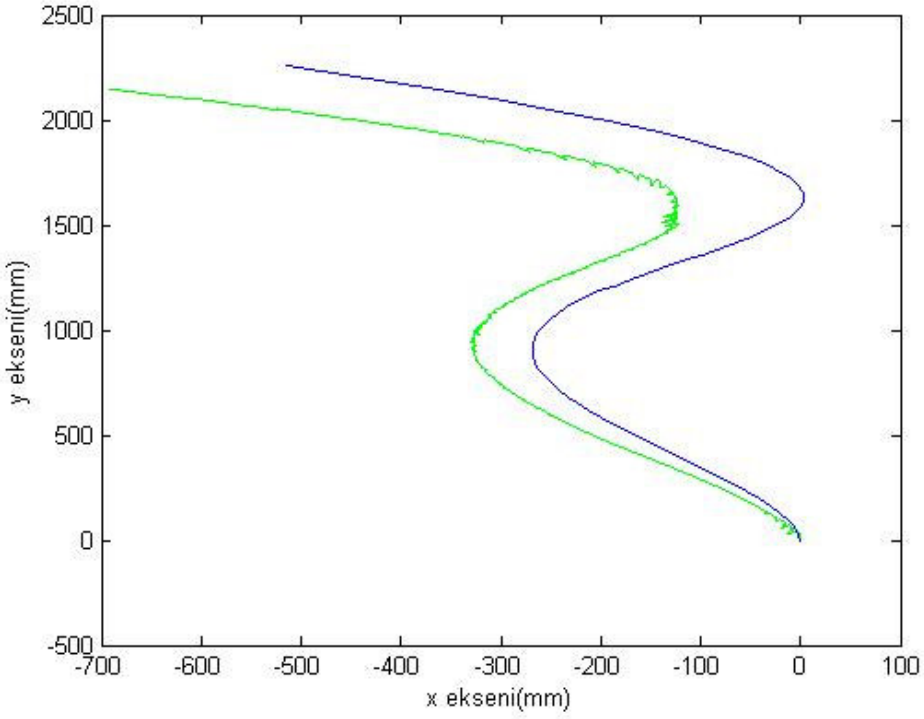
Şekil 6.3: İzlenmesi gereken yol mavi eğri, izlenen yol yeşil eğri ile gösterilmiştir

Şekil 6.3'te izlenmesi istenen yoldan 50 adet örnek nokta alınmıştır. Şekil 6.3'te algoritmanın işleyiş bölümünde anlatılan Wein-Garten Maps yönteminin doğasından gelen pozisyon hatası görülmektedir. Hata Yolun başlangıcında çok azken yol ilerdikçe artmıştır. Ayrıca robotun izlediği yolda(sürekli çizgiler) anlık sapmalar görülmektedir (x = 50mm, x = 480mm, x = 750mm yakınlarında) , bu sapmaların nedeni bölüm 4.2.3'te de anlatıldığı gibi ADM'nin robotun başlangıç pozisyonundaki yanal bacak açıklığına yakın olduğu anlarda dengesini kaybetmesi yani anlık olarak kütle merkezinin destek üçgeninin dışına çıkmasıdır. Simülasyonlarda bu anlarda havada olması gereken bacağın robot dengesini kaybettiği için olması gereken süre kadar havada kalamayıp yere indiği görülmüştür. Bu durumda şekilde görülen anlık sapmaları yani pozisyon hatalarını doğurmuştur.



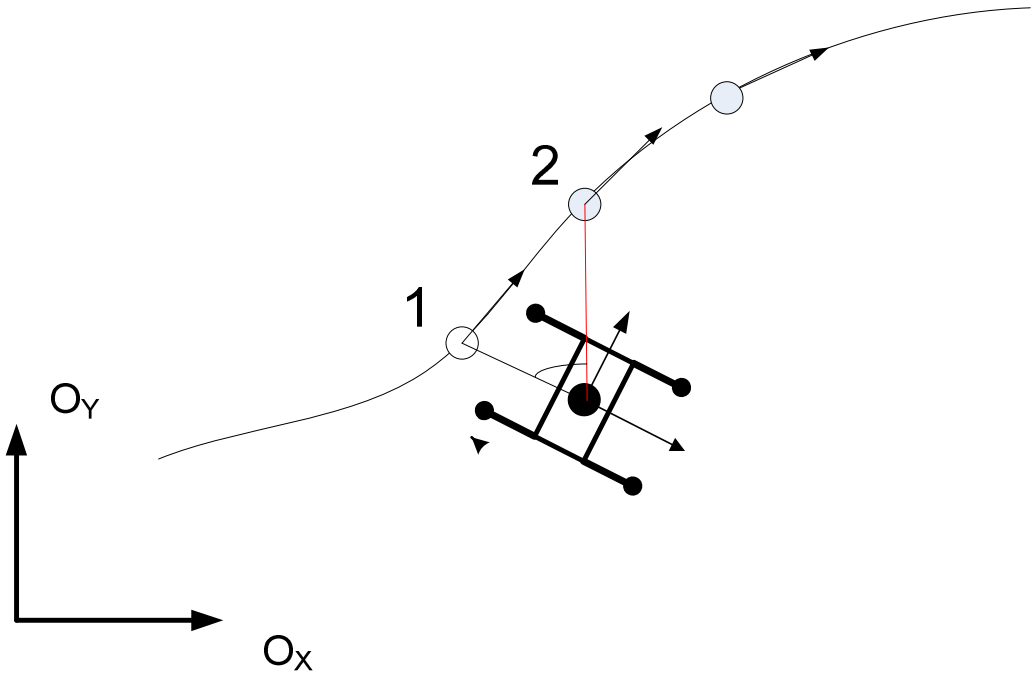
Şekil 6.4: İzlenmesi gereken yol mavi eğri, izlenen yol yeşil eğri ile gösterilmiştir

Şekil 6.4'te yoldan 70 adet örnek nokta alınmıştır. Bu şekilde de şekil 6.3'teki gibi hata yolun başlarında azken gittikçe artmıştır ve yukarıda anlatılan nedenden dolayı şekil 6.3 gibi anlık sapmalar görülmüştür. Şekil 6.5'te de şekil 6.3 ve 6.4'e benzer hatalar görülmüştür ve bu yoldan 70 adet örnek nokta alınmıştır.



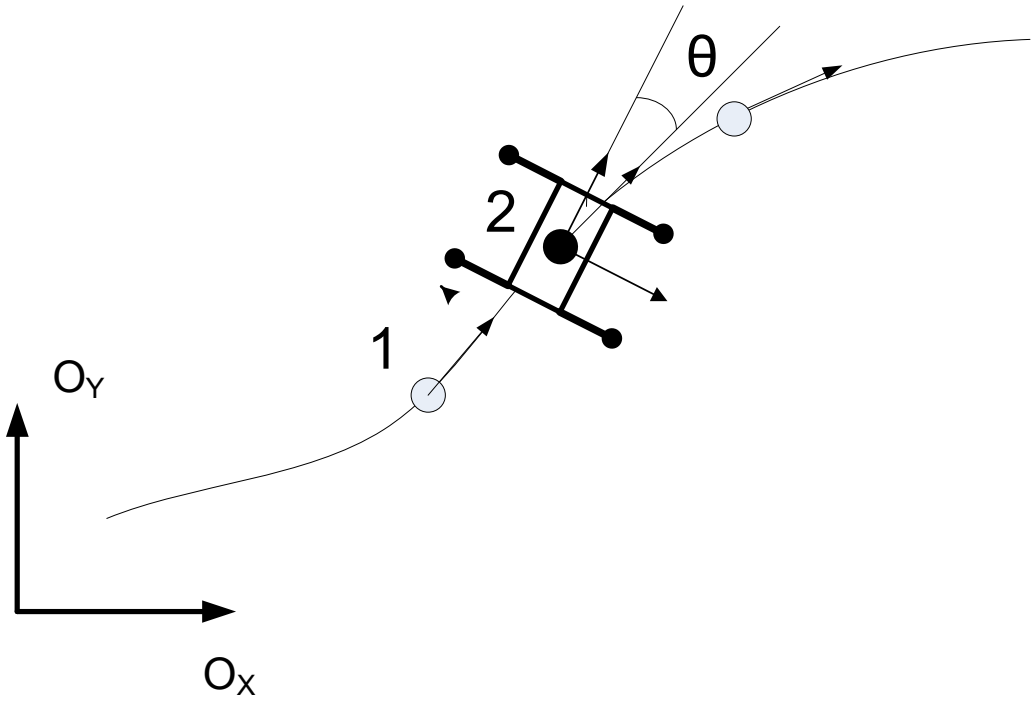
Şekil 6.5: İzlenmesi gereken yol mavi eğri, izlenen yol yeşil eğri ile gösterilmiştir

İzlenen yollarda oluşan hatalar ADAMS/view'dan geri besleme alınarak azaltılmıştır. ADAMS/view'dan geri besleme ile robotun kütle merkezi pozisyonu ve robotun z ekseni ile yaptığı açı alınmıştır. Robotun kütle merkezi her nokta geçişinde kontrol edilmiş ve kütle merkezinin anlık pozisyonu ile kütle merkezinin olması gereken nokta arasındaki mutlak uzaklık önceden berlirlenen bir değeri aştığında geri besleme algoritması devreye girmiştir. Şekil 6.6'da robotun kütle merkezinin olması gereken nokta 1, ulaşması gereken nokta 2 ile gösterilmiştir.



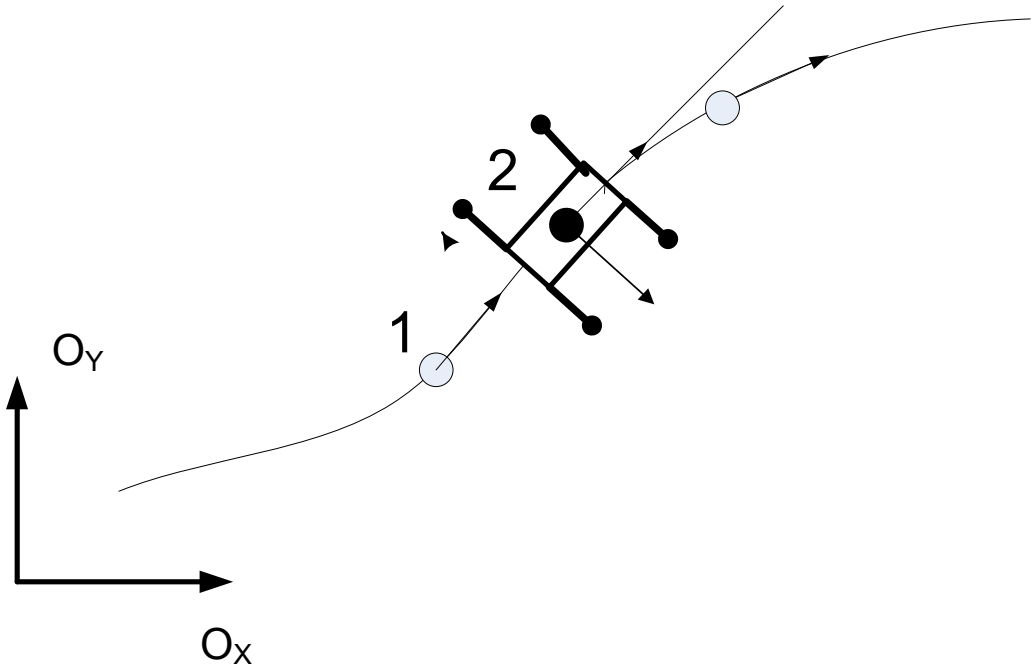
Şekil 6.6: Robotun yol izlerken anlık durumu, robotun olması gereken nokta 1, ulaşması gereken nokta 2

1 numaralı nokta ile kütle merkezi arasındaki mutlak uzaklık (pozisyon hatası) önceden berlirnen değerden fazla olduğu için Wein-Garten Maps yol izleme yöntemi durur ve geri besleme algoritması işlemeye başlar. Geri besleme algoritması ile ulaşılmak istenen noktaya (2 numaralı nokta) şekil 6.6'daki gibi bir yol çizilir, gerekli yön açısı hesaplanır. Bölüm 4.2.2'de anlatılan yürüyüş tekniği ile kullanılarak bu yol kat edilir. Bu teknikle varılmak istenen noktaya ulaşıldığında robot başlangıç pozisyonunu alır. En az 1 tam yürüyüş periodu robotun başlangıç pozisyonuna dömesi için tamamlanmalıdır. Örneğin kütle merkezi ve ulaşılmak istenen nokta arasındaki mesafe bir yürüyüş periodunda alınamayacak kadar uzunsa adım uzunluğu ayarlanarak 2 ya da daha fazla tam yürüyüş periodu tamamlanmalıdır. Şekil 6.7'de robot istenen noktaya ulaşmıştır.



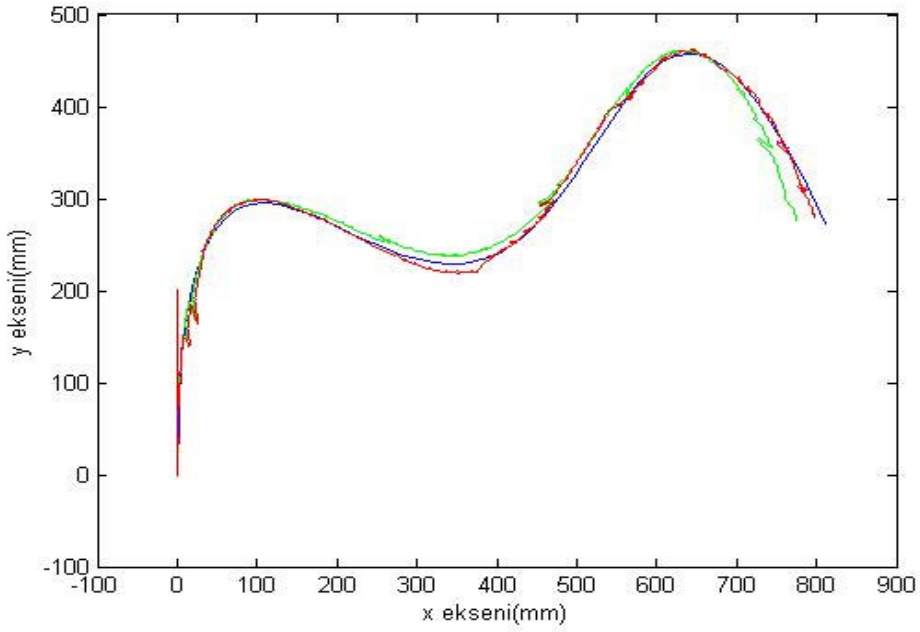
Şekil 6.7: Robot 2 numaralı noktaya ulaşmıştır

Wein Garten Maps yol izleme yöntemine göre robotun yön açısı bulunduğu noktadan eğriye çizilecek teğetin x ekseni ile yaptığı açı olmalıdır. Şekil 6.7'de robot 2 numaralı noktaya ulaşmış fakat yön açısı hala 1 numaralı noktanın yön açısıdır. Robot kendi ekseni etrafında dönerek 2 numaralı noktanın yön açısını alır. Robotun dönme açısı 2 numrarlı noktadan eğpriye çizilen teğetin x ekseni ile yaptığı açı ve ADAMS/view'den geri besleme ile alınan robotun z ekseni ile yaptığı açının farkıdır(oriyantasyon hatası). Bu açı şekil 6.7'de θ ile gösterilmiştir. Şekil 6.8'de robot kendi ekseni etrafında saat yönünde θ kadar dönmüş ve oriyantasyon hatasını yok edilmiştir. Pozisyon ve oriyantasyon hataları yok edilince 2 numaralı noktandan itibaren Wein-Garten Maps yol izleme algoritması işlemeye devam eder.



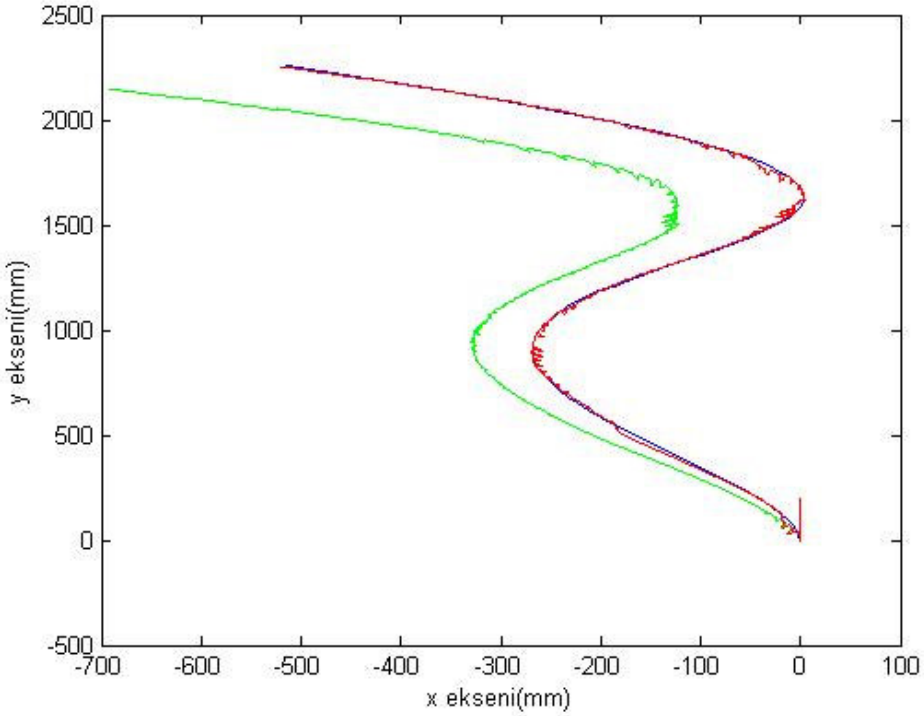
Şekil 6.8: Robot 2 numaralı noktada oriyantasyon hatası yok edildi

Aşağıda açık çevrimde izlenen eğrilerin kapalı çevrim (geri besleme algoritması ıile) izlenmesi ile elde edilen sonuçlar(robotun kütle merkezi pozisyonunun değişimi) verilmiştir.



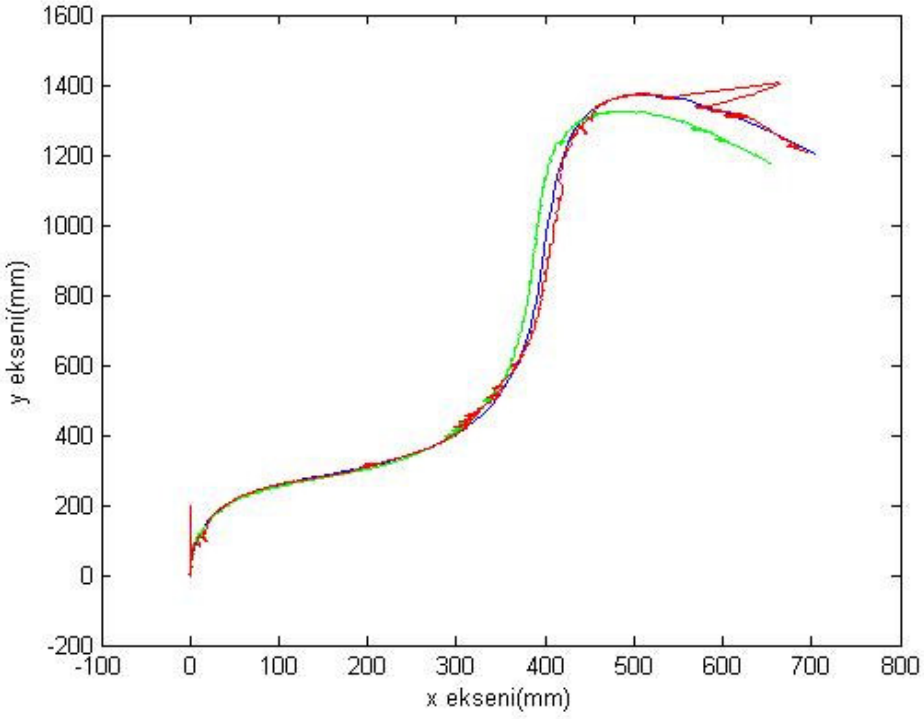
Şekil 6.8: İzlenmesi gereken yol mavi eğri, izlenen yol yeşil eğri, kapalı çevrim ile izlenen yol ise kırmızı eğri ile gösterilmiştir.

Şekil 6.8'de şekil 6.3'te izlenen yolun kapalı çevrim(geri besleme algoritması ile) ile izlenmesi ile elde edilen sonuç verilmiştir.



Şekil 6.9: İzlenmesi gereken yol mavi eğri, izlenen yol yeşil eğri, kapalı çevrim ile izlenen yol ise kırmızı eğri ile gösterilmiştir.

Şekil 6.9'da şekil 6.5'te izlenen yolun kapalı çevrim(geri besleme algoritması ile) ile izlenmesi ile elde edilen sonuç verilmiştir.



Şekil 6.10: İzlenmesi gereken yol mavi eğri, izlenen yol yeşil eğri, kapalı çevrim ile izlenen yol ise kırmızı eğri ile gösterilmiştir.

Şekil 6.10'da şekil 6.4'te izlenen yolun kapalı çevrim(geri besleme algoritması ile) ile izlenmesi ile elde edilen sonuç verilmiştir. Kırımızı yoldaki anlık sapmanın (x = 580 ve y = 1400) ADAMS/view'daki bir hesap hatasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dikkat edilirse anlık sapmadan sonra bile kontrol algoritması ile robot istenilen yola geri dönmüştür.

Şekil 6.8, 6.9 ve 6.10'dan görüldüğü kadarıyla Wein-Garten Maps yol izleme algoritmasının doğasından kaynaklanan ve bu algorimayı gerçeklerken kullanılan yürüyüş yönteminden kayhnaklanan pozisyon ve oriyantasyon hataları azaltılmştır.

7. SONUÇ

Bu tezde dört bacaklı yürüme teknikleri açıklanmış, bu teknikler ADAMS dinamik simülasyon programı ile simüle edilmiş ve önceden dört tekerli bir mobil robot için geliştirilen bir yol izleme yöntemi gerekli modifikasyonlar yapılarak dört bacaklı mobil robot modeline uygulanmış ve simülasyonlarla gerçeklenmiştir. Yol izleme yöntemi gerçeklenirken robot modelinden kütle merkezi pozisyonu ve robotun z ekseni ile yaptığı açı geri besleme ile alınmış ve kapalı çevrim kontrol ile yol izlerken oluşan pozisyon ve oriyantasyon hataları azaltımıştır.

Mobil robotlara ilgi gün geçtikçe artmaktadır ve mobil robotlar savunma, can kurtarma gibi görevlerle insan hayatında yer almaktadırlar. Mobil robotlara ihtiyacın gelecekte de artması beklenmektedir ve bu da engebeli araziye tekerli ve paletlilere göre çok daha kolay uyum sağlayan bacaklı mobil robotları daha da ön plana çıkaracaktır. İki bacaklı robotları bir kenara bırakırsak dört bacaklı yürüyüş altı ve sekiz bacaklı yürüyüşün temelini oluşturur. Bu nedenle bu çalışma gelecekteki dört ya da daha fazla bacak sayılı mobil robot araştırmaları için de bir ön çalışma niteliğindedir.

Tüm yürüyüş teknikleri ve yol izleme parametreleri önceden hesaplanmış ve robot modeline uygulanmıştır. Mobil robotlarda esas olan robotun önceden tanımlanmamış ortam koşullarında otonom hareket edip verilen görevi yerine getirmeleridir. Bu da gelişmiş bir kontrol algoritması gerektirir. Bu konuda yapılan çalışmalarda davranış temelli kontrol algoritmalarının geliştirildiği görülmüştür. Yapay sinir ağları ile robotlar için hareket paternleri üretilmiştir. Bu tezin hazırlanmasında yapılan birçok simulasyon robotun statik yürüyüş ile düz yürümesinde bile birçok sorunla karşılaşılmış, zamanlama, adım yüksekliği gibi parametrelerin iyi seçilmesi gerektiği görülmüştür. Bu nedenle üst düzeyde işleyen kontrol algoritmasına geçilmeden önde robotun dinamik modelinin ayrıntılı olarak çıkarılması ve özellikle bacakların uç

noktalarındaki sensörler olmak üzere sensör seçiminin ve modellenmesini iyi çalışılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] **Chen X., Watanabe K., Kiguchi K., Izumi K.,** 2001. Implementation of omnidirectional crawl for a quadruped robot, Advanced Robotics, **15,** 169-190.

[2] **Chen, X., Watanabe, K., Kiguchi K. ve Izumi, K.,** 2002. Translational Crawl and Path Tracking of a Quadruped Robot, *Journal of Robotic Systems,* **19,** 569-584.

[3] **Ma, S., Tomiyama, T. ve Wada, H.,** 2005. Omnidirectional Static Walking of a Quadruped Robot, *IEEE Transactions on Robotics,* **21,** 152-161.

[4] **Inagaki, K. ve Kobayashi, H.,** 1993**.** A Gait Transition for Quadruped walking Machine, *IEEE conference on Intelligent Robotics and Systems*, 26-30 Temmuz, s.525-531.

[5] **Bai, S., Low, K.H., Seet, G. and Zielinska, T.,** 1999**.** A new free Gait Generation for Quadrupeds Based on Primary/Secondary Gait, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation.*, Detroit Michigan, Mayıs, s.1371-1376.

[6] **Pal, P.K. ve Jayarajan, J.,** 1991. Generation of Free Gait – A Graph Search Approach, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **7,** 299-305.

[7] **Chen, X., Watanabe, K., Kiguchi K. ve Izumi, K.,** 2000. A real-time kinematics on translational motion of a quadruped robot, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, **29**, 111-131.

[8] **Klaasen, B., Linneman, R., Spenneberg, D. ve Kirchner, F.,** 2003. Biologically inspired robot design and modelling, *International Conference on Advanced Robotics*, Coimbra, Portekiz, 30 Haziran – 3 Temmuz, s. 576-581.

[9] http://www.oricomtech.com/robotics

[10] **Uzundere, M.**, 2006. Sekiz Bacaklı Mobil Robotun Mekanik Dizaynı, Modellenmesi ve Lokomasyonu, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[11] **Huang, Q., Yokoi K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N. ve Tanie, K.,** 2001. Planning Walking Patterns for a biped robot, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1**7,** 280-289.

[12] **Bowerman R. F.** (1975) The Control of Walking in the Scorpion I.Leg Movements during Normal Walking. J comp Physiol 100:183196

[13] **Yalçın, M.K., Yeşiloğlu, S.M., Dal, M. ve Temeltaş, H.,** 2006. Maneuvering strategies for four wheel drive, four wheel steer mobile robots using curvatures based on Wein-garten Maps, *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference*, Paris, Fransa, Kasım, s. 4148-4152.

[14] **Wilson, M.D.,** 1967. Stepping Patterns in Tarantula Spiders, *Journal of Experimental Biology*, **47,** 133-151.

[15] **Celaya, E., Porta, J.M.,** 1998. A Control Structure for the Locomotion of a legged Robot on Difficult Terrain, *IEEE Robotics and Automation*, *Magazine,* **5,** 43-51.

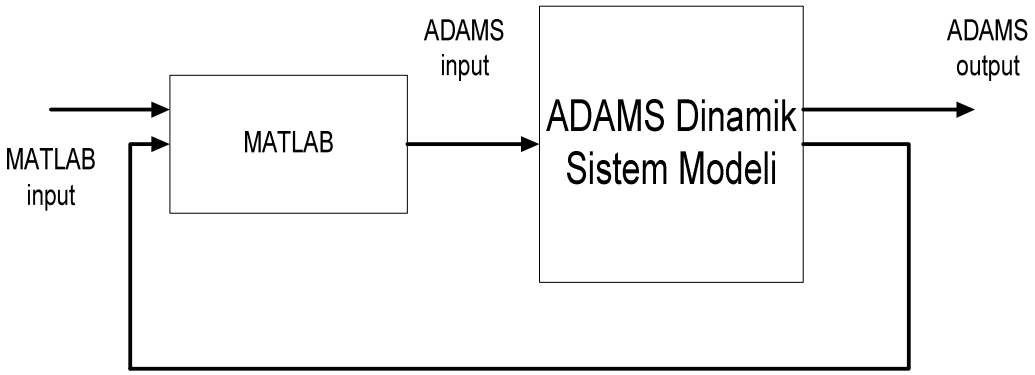
[16] **Celaya, E., Porta, J.M.,** 2000. Body and Leg Coordination for Omni-Directional Walking in Rough Terrain**,** *Proceedings of the 3rd. International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR,* Madrid, İspanya, s. 499-506.

[17] **Preumont, A. Alexandre, P. Ghuys, D,** 1991. Gait analysis and implementation of a six leg walking machine**,** *Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference,* Pisa, İtalya, s. 941-945.

[18] **Darıcı, O., Yalçın, M.K. ve Temeltaş, H.,** 2008. Comparision of gait generation methods in quadruped walking, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Xi'an, Çin, Temmuz.

EKLER

Bu bölümde ADAMS dinamik simülasyon programı hakkında genel bilgi verilecektir. ADAMS katı cisimlerin dinamik simülasyonlarında dünyada en çok kullanılan simülasyon programlardandır. ADAMS'ta istenilen sistem istenilen parametrelerle tasarlanabilir ya da mekanik çizim programlarında çizilmiş bir model ADAMS'a aktarılabilir. ADAMS hemen hemen bütün dinamik ve kinematik parametreleri(sürtünme, eylemsizlik momentleri, tork, hız , pozisyon, ivme vb..) içerir ve bunlara göre simülasyon yapar. Simulasyonlar ister sadece hesaplanan sonuçlarla (batch simulations) ister hesaplanan sonuçların yanında modelin görsel hareketi ile olabilir (interactive simulations). ADAMS'a girilen kinematik parametrelerle(pozisyon, ivme, hız) simülasyon yapıldığında sisteme gerekli dinamik parametreler (güç, tork vb.) hesaplanabilir. Sistemin dinamik modeli ADAMS'ta ne kadar ayrıntılı kurulursa hesaplanan dinamik parametrelerde gerçeğe o kadar yakın olacaktır. ADAMS'ın içinde amaca yönelik faklı program türleri vardır, bu tezde ADAMS/view ve ADAMS/controls kulllanılmıştır. ADAMS/view ile sistemin tasarımı yapılmıştır ve istenilen eklemlerde gerekli hareketler tanımlanmıştır. ADAMS/view'da kurulan model ADAMS/controls ile bir MATLAB/simulink ortamına alnarak MATLAB'da hesaplanan yürüme parametreleri ADAMS/view'da oluşturulan modele girilmiştir. ADAMS/controls, ADAMS/view gibi ayrı bir program değil, ADAMS/view'da kurulan modelin MATLAB/simulink gibi simülasyon ortamlarına alımasını sağlayan ADAMS/view içine gömülü bir araçtır. Şekil A.1'de ADAMS-MATLAB veri alışverişi gösterilmiştir.



Şekil A.1: ADAMS-MATLAB veri alışverişi

ÖZGEÇMİŞ

Osman Darıcı, 1982 yılında Kırşehir'de doğdu. Orta ve lise öğrenimini Antalya M.N. Çakallıklı Anadolu Lisesi'nde 2000 yılında tamamladıktan sonra 2001 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektronik Mühendisliği bölümüne girdi ve 2005 yılında mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Disiplinlerarası Yüksek Lisans programında öğrenimine başladı.