

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ-AYAK ROBOT MODELLEMESİ DENETLEYİCİ TASARIMI
VE
DİNAMİK BENZETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Süleyman ALTINORAK**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği
Programı: Sistem Dinamiği Ve Kontrol**

HAZİRAN 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ-AYAK ROBOT MODELLEMESİ DENETLEYİCİ TASARIMI
VE
DİNAMİK BENZETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Süleyman ALTINORAK
503031613**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 15 Temmuz 2006
Tezin Savunulduğu Tarih: 15 Haziran 2006**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet KUZUCU

Yrd. Doç. Dr. T.Berat KARYOT

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Birçok insan gibi bende izlediğim filmlerden etkilendim. Gördüğüm insansı robotların bir gün gündelik hayatımızın bir parçası olacağını düşledim. Bu konuda bir çalışma yapma imkânım doğunca da büyük bir şevkle çalıştım.

Öncelikle bana, böyle bir çalışmaya başlama imkânı tanıdığı için Sayın Prof. Dr. Ahmet KUZUCU'YA teşekkür ederim. Bu tarz projelere kol kanat girmesi benim gibi hayalleri peşinde koşan öğrenciler için büyük şans.

Yapıcı eleştirilerinden ve yol gösterici tutumundan ötürü danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU'na çok teşekkür ederim. Yaptığım birçok denemeyi bir düzene sokmamda çok büyük katkısı oldu.

Verdikleri derslerle robotik konusunda çalışmalar yapabilmeme vesile oldukları için hocam Sayın Yard. Doç. Dr. T.Berat KARYOT'A ve Doç. Dr. Hakan TEMELTAŞ'A sonsuz teşekkürlerimi iletmeyi borç bilirim.

Ve son olarak eğitimimi tamamlayabilmem için her türlü fedakârlıkta bulunan annem Dilber ALTINORAK'A en içten sevgilerimi sunarım.

HAZİRAN 2006

Süleyman ALTINORAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Terminoloji	3
1.3. Literatür Taraması	5
2. MEKANİK YAPI	7
2.1. Giriş	7
2.2. İki-Ayak Robotun Boyutları Ne Olmalıdır?	8
2.3. Eklem Sayısı Kaç Olmalıdır?	8
3. KONTROLÖR TASARIMI	11
3.1. Giriş	11
3.2. Değişken Referans Eksen Takımı Yaklaşımı	12
3.3. TDF Kontrolörü	13
3.4. Üç Kütleli Sistem Gösterimi	14
3.5. ÇDF Kontrolörü	18
3.5.1 Geçiş Yörüngesinin Oluşturulması	18
3.6. Ters Kinematik Çözüm	20
4. BENZETİM VE SONUÇLAR	24
4.1. Benzetim Ortamı	24
4.2. İki-ayak Robot Sanal Model	28
4.3. Benzetim Senaryosu	30
4.4. Sonuçlar	31
4.4.1 Analiz	32
5. ÖNERİLER VE İYİLEŞTİRMELER	37

EKLER	42
ÖZGEÇMİŞ	44

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 : Dünya Geneline Yapılan İnsansı Robot Çalışmaları	1
Tablo 4.1 : İki-ayak Robotun Mekanik Özellikleri	29
Tablo 4.2 : İlk Durum Şartları	30
Tablo 4.3 : İki-Ayak Robotun Yürüdüğü ve Düştüğü Durumlar	31

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: İki-ayak Robotun düştüğü ve yürüdüğü durumlar.....	ix
Şekil 1.1: Destek Düzlemi	4
Şekil 2.1: Alt Gövde Serbestlik Dereceleri.....	9
Şekil 2.2: İki-ayak Robot Serbestlik Dereceleri	10
Şekil 3.1: Üç Noktasal Kütle Yaklaşımı.....	14
Şekil 3.2: Serbest Cisim diyagramı	15
Şekil 3.3 : Basan Ayak Merkezli Yay Parçası.....	17
Şekil 3.4: Kinematik Gösterim	21
Şekil 3.5 : Ters Kinematik Çözücü Simulink Diyagramı	23
Şekil 4.1: Visual NASTRAN Programı Arayüzü	25
Şekil 4.2: Genel Akış Yapısı	26
Şekil 4.3 : Program Akış Çizelgesi.....	27
Şekil 4.4 : İki-ayak Robot VN Modeli	29
Şekil 4.5 : Gövde ve Salınan Ayak Referans Noktaları.....	32
Şekil 4.6 : TDF 0.6s, ÇDF 0.6s	34
Şekil 4.7 : TDF 0.6 s ÇDF 0.9 s	36

SEMBOL LİSTESİ

A_x, A_z	: Ayak x ve z koordinatları
$a, b, c, \dots$	: Polinom katsayıları
a_i	: i.inci uzvun boyu
c_i	: $\cos(q_i)$
CDF	: Çift destek fazı
CDFs	: Çift destek fazı süresi
G_x, G_z	: Gövde x ve z koordinatları
g	: Yer çekimi ivmesi
F	: İki-ayak robota etkiyen net kuvvet
K	: Katsayı matrisi
m_i	: i.inci uzvun kütlesi
q_i	: i.inci eklemin açısı
p	: Sıfır moment noktası (koordinatı)
$P(t)$	: Yörünge polinomu
s_i	: $\sin(q_i)$
SMN	: Sıfır Moment Noktası
T	: Zaman matrisi
TDF	: Tek destek fazı
t_i, t_s	: Başlangıç anı ve bitiş anı
x_i, y_i, z_i	: i.inci noktasal cismin koordinatı

İKİ-AYAK ROBOT MODELLEMESİ DENETLEYİCİ TASARIMI VE DİNAMİK BENZETİMİ

ÖZET

Gelişen teknoloji ve bu alanda yapılan çalışmalar yakın bir gelecekte insansı robotların gündelik yaşamın bir parçası olacağını göstermektedir. Bu çalışmada, iki ayaklı yürüme problemi ele alınarak insan boyutlarında iki ayaklı bir robotun düşey düzlemde denge problemine çözüm önerisi getirilmiştir. Yapılan literatür taramasında iki ayaklı robot tasarımı konusunda standart bir yöntemin bulunmadığı, çözümlenmesi gereken problemlere karşı çok farklı yaklaşımlar sergilendiği görülmüştür. Gerçeklenen robotların çoğunda denge problemi Sıfır Moment Noktası (SMN) kriteri temel alınarak çözümlenmiştir. Miomir VUKOBRATOVIC tarafından 1968 yılında öne sürülen bu yaklaşımın analitik olarak iki ayaklı robotun düşmeyeceğini garanti etmesi, en yaygın kullanılan dengeleme yöntemi olmasını sağlamıştır.

SMN ilkesini uygulamaya yönelik çok farklı yaklaşımlar vardır. Bu çalışmada tercih edilen yöntem 'üç noktasal kütle' yöntemidir. Bu yöntemde iki ayaklı robot, ikisi ayakları ve daha ağır olan bir üçüncüsü de gövdeyi göstermek üzere toplam üç kütle ile modellenmektedir. Yöntem seçimi yapılırken iki ana kriter göz önünde bulundurulmuştur. İlk olarak, dinamik benzetimlerden kısa sürede sonuç alabilmek basit mekanik modele ihtiyaç vardır. İkincisi sırada, daha önce uygulanmış bir yaklaşımın benimsenmesinin özellikle karşılaştırmalı sonuçlar elde edebilmek için avantajlı olduğu düşünülmüştür.

Bu beklentileri karşılayan dengeleme yöntem belirlendikten sonra sağladığı çok geniş esnek tasarım ve hesaplama olanaklarından ötürü denetim tasarımı için Matlab-Simulink® seçilmiştir. Yine simulink ile entegrasyonda sağladığı kolaylıklardan ötürü dinamik benzetim programı olarak Visual Nastran® seçilmiştir. Burada oluşturulan mekanik model çubuk adam formundadır, bilek, diz ve kalçada birer serbestlik derecesi olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi vardır. Visual Nastran altındaki robotun eklemleri, simulink ortamında tasarlanan denetleyiciler ve diğer bileşenler aracılığıyla sürülerek iki ayaklı robotun sert zemin üzerindeki yürüyüşü incelenmiştir.

Üç kütle yaklaşımı ile tasarlanan denetleyicinin çalışma ilkesi şu şekilde özetlenebilir: Robot, ayaklardan sadece birinin yere bastığı Tek Destek Fazında (TDF) iken diğer ayağa adım atması için gerekli olan yörünge bilgisi girilir ve

denetleyici SMN şartını sağlayacak şekilde gövdenin izlemesi gereken yörüngeyi hesaplar. Üç kütle yaklaşımı ile tasarlanan denetleyicinin ancak çok dar bir parametre aralığında ve düşük hızlarda iki ayaklı robotu yürütebildiği görülmüştür. Bu sorunu aşabilmek için ikinci bir denetleyici tasarlanmıştır. Bu denetleyici sadece iki ayağın birden yerle temas halinde olduğu Çift Destek Fazında (ÇDF) devreye girmektedir. Amacı tek ayak yerde iken oluşan salınımı sönümleyerek iki ayaklı robotun yeni bir adım atabileceği başlangıç şartlarına uygun duruma gelmesini sağlamaktır. Ardışık olarak devreye giren iki ayrı denetleyici yaklaşımı ile robot daha geniş bir parametre aralığında dengeli yürümeyi başarabilmiştir.

Tek Destek Fazı	Çift Destek Fazı							
	Saniye	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
	0.3	D, 0.6	D, 0.9	D, 1.2	Y, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	Y, 2.4
	0.6	D, 0.9	D, 1.2	Y, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	Y, 2.4	Y, 2.7
	0.9	D, 1.2	D, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	D, 2.4	Y, 2.7	Y, 3.0
	1.2	D, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	Y, 2.4	Y, 2.7	Y, 3.0	Y, 3.3
	1.5	D, 1.8	Y, 2.1	D, 2.4	D, 2.7	Y, 3.0	Y, 3.3	Y, 3.6
	1.8	D, 2.1	D, 2.4	Y, 2.7	D, 3.0	Y, 3.3	Y, 3.6	D, 3.9
	2.1	D, 2.4	D, 2.7	Y, 3.0	Y, 3.3	Y, 3.6	Y, 3.9	Y, 4.2

Şekil 1.1: İki-ayak Robotun düştüğü ve yürüdüğü durumlar

Yapılan tasarımın niteliğini değerlendirebilmek için performans kriteri olarak yürüme hızı seçilmiştir. Bu amaçla salınan ayağın 50 mm yükselerek 500 mm yol kat ettiği durumda TDF'na ve ÇDF'na 0.3 saniyeden başlayarak 2.1 saniyeye kadar çapraz değerler atanmış ve bir adıma ayrılan süre minimuma indirgenmeye çalışılmıştır. İki ayaklı robotun düşmeden yürüdüğüne kanaat getirmek için 10 adım atabilmesi yeterli görülmüştür.

Şekil 1.1'de yapılan benzetimlerin sonuçları listelenmiştir. Yatay ekseninde ÇDF'nda harcadığı zaman düşey ekseninde ise TDF'nda harcadığı zaman görülmektedir. Robotun yürüdüğü durumlar Y, düştüğü durumlar ise D ile belirtilirken toplam adım süresi de belirtilmiştir. Tablodan iki ayaklı robotun 1.5 saniye ile en hızlı yürüdüğü durumlardan birinin, TDF 0.6 saniye iken ÇDF ise 0.9 saniye iken sergilediği görülebilmektedir. Dikkat çekici bir durum ise 3.9 saniye gibi oldukça yavaş bir yürüme hızında da iki ayaklı robotun düşmesidir. Bunun nedeni ÇDF denetleyicisinin dinamik etkileri ihmal ederek hesapladığı gövde yörüngesinin bazı hızlarda dengeyi bozacak şekilde oluşmasıdır.

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında 3 noktasal kütle yaklaşımıyla iki ayaklı bir robot modeli oluşturulmuş ve sistemin yürüme kontrolü için özgün bir yöntem geliştirilmiştir. Yürüme davranışı dinamik benzetimlerle incelenmiş ve önerilen “model – kontrol yöntemi” ikilisi ile elde edilen sonuçlar gözlemlenmiştir.

MODELING CONTROL AND SIMULATION OF BIPED WALKING

SUMMARY

Recent developments and research projects in robotics industry shows that in the near future humanoid robots are highly likely to be parts of daily lives. In this work, walking with two legs was focused and a solution to the balance problem of the robot in the vertical plane is suggested. It was seen after a literature search that there is not a specific solution about bipedal robot design and construction, instead a wide variety of design solutions have been adopted. It was observed that in many designs Zero Moment Point approach was selected. This approach, which was first suggested by Miomir Vukobratovic in 1968, guarantees analytically that a bipedal robot will not fall.

There are different approaches about application of ZMP method. One of these methods, which is “three point masses” is used in the thesis. Two criteria were selected while choosing this method: Firstly a basic mechanical model is needed for a dynamic simulation. Secondly, a proven design approach is more suitable as it can provide comparative results.

Matlab-Simulink® is chosen for control design because of its flexible design features and computing advantages. Visual Nastran® was selected for dynamic simulation because of its integration advantages with Matlab-Simulink®. The model created is a humanoid formed up with rods. Wrists, knees and hips have one degree of freedom, totalling six degrees of freedom. Joints which are controlled by Visual Nastran® were driven by controllers which were modelled in Matlab-Simulink® to observe the behaviour of the robot on solid ground.

The working principle of the robot which was modelled with three point mass method can be summarized as follows: While robots step one foot in Single Support Phase, necessary calculations for the other foot are computed and controller makes appropriate calculations for the body to follow proper route according to ZMP method. It is seen that a robot which follows three point mass methods can only walk bipedal within a small margin of parameters and in low speeds. A second controller was designed to overcome this deficiency. This second controller works while both feet are on ground in Double Support Phase. Purpose of the second controller is to absorb oscillations occurred during Single Support Phase in order to provide stable

conditions. It is seen that by the help of two controllers working successively provided a wider margin of parameters for the robot to walk.

Walking speed data was chosen as a performance parameter. For this purpose, the time consumed to make one step is tried to be minimized. A successful walking action is determined as 10 steps without falling.

		Çift Destek Fazı						
Tek Destek Fazı	Saniye	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
	0.3	D, 0.6	D, 0.9	D, 1.2	Y, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	Y, 2.4
	0.6	D, 0.9	D, 1.2	Y, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	Y, 2.4	Y, 2.7
	0.9	D, 1.2	D, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	D, 2.4	Y, 2.7	Y, 3.0
	1.2	D, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	Y, 2.4	Y, 2.7	Y, 3.0	Y, 3.3
	1.5	D, 1.8	Y, 2.1	D, 2.4	D, 2.7	Y, 3.0	Y, 3.3	Y, 3.6
	1.8	D, 2.1	D, 2.4	Y, 2.7	D, 3.0	Y, 3.3	Y, 3.6	D, 3.9
	2.1	D, 2.4	D, 2.7	Y, 3.0	Y, 3.3	Y, 3.6	Y, 3.9	Y, 4.2

Figure 1. 1: Biped Robot Simulation Results

Figure 1.1 shows the results of the simulation. Horizontal axis shows time consumed in Double Support Phase, where vertical axis shows time consumed in Single Support Phase. Situations in which robot walks are denoted with “Y”, where falls are denoted with “D”. In addition total time consumed while walking is also shown. It can be seen from the table that one of the fastest walking performances is shown when Single Support Phase is 0.6 seconds and Double Support Phase is 0.9 seconds. A remarkable situation is that at even a slow walking speed in which total time consumed is 3.9 seconds, robot can fall down. The reason for this is the miscalculation of controller in Double Support Phase by neglecting dynamic effects.

In conclusion, a model for a bipedal robot by using three point mass methods is suggested in the thesis and a new method for walking control is developed. Walking behaviour is analyzed by dynamic simulations and results are examined with the suggested model – control method.

1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Gelişen teknoloji ve bu alanda yapılan çalışmalar yakın bir gelecekte insansı robotların gündelik yaşamın bir parçası olacağını göstermektedir. Dünya genelinde bu konuda yürütülen projeler şekil 1.1 de listelenmiştir [1]. Ülkemizde de ağırlıklı olarak teorik düzeyde olmak üzere bir bazı çalışmalar yapılmaktadır [2-4].

Tablo 1.1 :Dünya Genelinde Yapılan İnsansı Robot Çalışmaları

	Kapsamlı projeler	Küçük projeler	Toplam proje
Almanya	7	1	8
Amerika	10	20	30
Arjantin	X	1	1
Avustralya	1	7	8
Bulgaristan	1	X	1
Çin	3	X	3
Danimarka	X	1	1
İngiltere	4	7	11
İran	1	X	1
İsveç	2	2	4
İtalya	1	X	1
Japonya	37	18	55
Kanada	1	2	3
Kore	7	X	7
Rusya	1	1	2
Singapur	1	X	1
Tayland	1	X	1

Bu çalışmada, iki ayaklı yürüme problemi ele alınarak insan boyutlarında iki ayaklı bir robotun düşey düzlemde denge problemine çözüm önerisi getirilmiştir. İki-ayak robot çalışmalarında çözümlenmesi gereken genel problemler şu şekilde sıralanabilir [5].

Robotun serbestlik derecesi çok fazladır.

Robotun dış sabit referans eksen takımına göre mutlak kinematik modeli oluşturulamaz.

Robot kinematik ve dinamik modelleri doğrusal değildir ve oluşturulmaları oldukça zordur. Ağırlık merkezi, atalet momenti gibi parametrelerin kesin olarak belirlenmesi mümkün değildir.

Robotun dinamik modeli değişkendir. Dört farklı model söz konusudur; Tek basma fazında basan ayağa göre iki farklı model, çift basma fazı modeli ve koşma hareketinde söz konusu olan, iki ayağında yere basmadığı uçuş modeli. Bu modeller arasındaki geçişlerin sürekliliğinin sağlanması zordur.

Robot yürüme esnasında holonomik ve nonholonomik kısıtlar arasında geçiş yapar.

Çevresel faktörler baskındır; zemin yapışkan, yumuşak, kaygan, esnek olabilir.

Dengeyi eklem eyleyicileri ile sağlamak her durumda mümkün değildir.

Bu problemlerin birçoğu ortada fiziksel bir model yokken çözümlenmesi pek mümkün olmayan problemlerdir. Ülkemizde de bu tarz çalışmaların çok daha kapsamlı yapılmasına ufak bir katkı olması açısından bu çalışma kapsamında, yürüme problemi en temel düzeyde ele alınarak insan boyutlarında iki-ayak robotun düşey düzlemde denge problemine çözüm önerisi getirilmiştir. Bu amaçla öncelikle literatür çalışması yapılarak kısa sürede kavranabilecek sınırlanmış bir dengeleme yöntemi taranmıştır. Seçilen yöntem üç noktasal kütle yaklaşımıdır [6]. Bu yöntemde iki-ayak robot üç noktasal kütle ile modellenmektedir. Öyle ki iki görece hafif kütle ayakları betimlerken daha büyük noktasal bir kütle gövdeyi betimler.

Bu yöntem sanal ortamda iki-ayak robot üzerinde sınanarak sadece belirli durumlarda iki-ayak robotun yürüyebildiği görüldü. Bu sorunu aşabilmek için ek bir yaklaşım sergilenerek, iki ayak robotun bulunduğu duruma göre devreye giren ayrı bir kontrolör daha tasarlandı. Böylece çok daha geniş bir aralıkta yürüme başarısı

elde edildi. Tasarımın performansını ölçebilmek için tasarlanan iki ayrı kontrolörün çalışma sürelerine farklı değerler atanarak en hızlı yürüme senaryosu elde edilmeye çalışıldı. Sonuçlar bölümünde görüleceği üzere düştüğü durumlara ayrı bir dikkat gösterilerek yürümenin doğası kavranmaya çalışıldı.

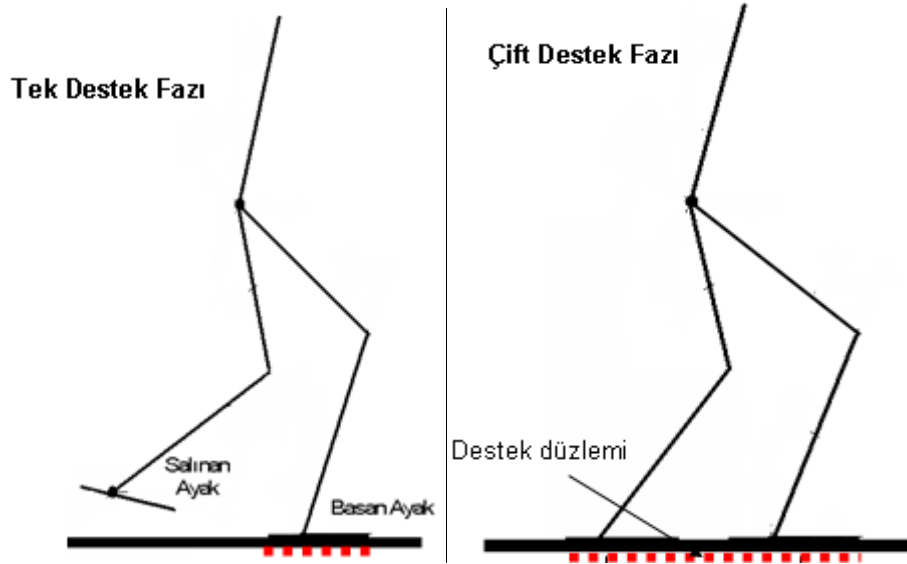
Sıradaki başlıkta iki-ayak robot çalışmalarda kullanılan kavramlar tanıtılarak tezde kullanılan terimler açıklanacaktır.

1.2. Terminoloji

İnsansı robot çalışmalarında halen standart bir terminoloji oluşmadığı için farklı kaynaklarda aynı kavramlar farklı anlamlarda kullanılabilmektedir. İki ayak üzerinde hareket edebilen canlıları nitelendiren “Biped” kelimesi Latince kökenli olup “bi” iki ve “ped” ayak kelimelerinin birleşmesinden türetilmiştir [7]. Biped robot ise bacak olarak adlandırılan iki açık kinematik zincirsel yapının gövdeye bağlanması ile oluşan mekanik yapıdır. Bacaklar genelde simetrikler ve yer ile teması sağlayan uç noktaları “ayak” olarak adlandırılır.

“Yürüme” ağırlık merkezini ötelemeye yönelik olarak bir dizi ritmik hareketler bütünüdür [8]. Bir “Yürüme periyodu” izlenmekte olan ayağın yerle temasını kestiği anda başlayarak aynı ayağın yere basıp tekrar yer ile temasını kestiği ana kadar geçen süreyi kapsar. Diğer bir deyişle ardışık iki yerle temas anı arasında geçen süre boyunca gerçekleşen eklem hareketlerinin bütünüdür. Adım, ayak tabanlarının geometrik merkezleri arasındaki yürüme doğrultusundaki mesafe olarak tanımlanırsa, bir yürüme periyodunda iki adım boyu mesafe kat edilir. Bir yürüme periyodu temel olarak iki ana bölümden oluşur. İki ayağın birden yerle temas halinde olduğu duruma “çift destek fazı”, sadece bir ayağın yerle temas halinde olduğu duruma ise “tek destek fazı” denir. Tek destek fazındayken yerle temas halinde olan ayak “basan ayak”, diğer ayak ise “salınan ayak” olarak adlandırılır. İki ayağın birden yerle temas etmediği üçüncü bir durum söz konusudur ki, koşma hareketi sırasında gözlemlenen bu duruma “uçuş fazı” denir [9].

Dengeli yürümeyi sağlayabilmek için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır [13]. Bu yöntemleri dinamik karakteristiklerine göre sınıflandırmak en etkin yaklaşım olacaktır.



Şekil 1.1: Destek Düzlemi

Yürüme esnasında robotun ağırlık merkezinin izdüşümü, daima destek düzleminin içinde kalıyorsa buna "statik dengelem" adı verilir. "Destek düzlemi" ise Şekil 1.1'de görüldüğü üzere, tek destek fazında iken basan ayağın altındaki alan, çift destek fazında ise ayak tabanları altındaki alan ve iki ayağın arasında kalan alandan oluşur. Statik dengelem'de robot yavaş hareket eder ve daima statik denge eşitliği gerçekleşir. Öyle ki, hareket herhangi bir anda durdurulabilir ve robot düşmez. Hızlı hareket etmesi, dinamik parametreleri baskın kılarak dengeyi bozacağından, mümkün değildir.

Robot'un dinamik değişkenlerin de hesaba katıldığı dengeleme yöntemine ise "dinamik dengelem" adı verilir. Sıfır moment noktası (SMN) daima destek düzlemi içerisinde kalıyorsa dinamik denge söz konusudur. İlk kez Miomir Vukobratovic tarafından 1968 yılında ileri sürülen SMN kavramı, dinamik etkenleri hesaba katmanın en etkin yoludur [10]. Robot üzerine etkiyen tüm kuvvetleri dengeleyerek

bileşenlerinin yatay düzlemde kalmamasını sağlayan kuvvetin etki ettiği noktaya "sıfır moment noktası" denir [11]. Diğer bir deyişle, robot yatay düzlemde kalan bir vektör etrafında dönmüyorsa düşmüyordur, yaklaşımından yola çıkılarak SMN kavramı oluşturulmuştur. Bu yöntemle iki-ayak robot düşmeden yumuşak ve oldukça hızlı hareket edebilmesine rağmen, robotun çok ayrıntılı bir dinamik modeline ve hassas kuvvet ölçümlerine ihtiyaç duyulmasından ötürü gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Bu problemi çözebilmek için literatürde çok farklı yaklaşımlar görmek mümkündür.

1.3. Literatür Taraması

McGeer iki ayaklı yürümenin motor kullanmadan pasif olarak da gerçekleşeceğini göstermiştir ki bu yönteme “pasif yürüyüş” denir [9, 12]. Yürüme eğimli bir yüzeyde meydana gelir ve etken sadece yer çekimidir. Buradan çıkan önemli sonuç yürümenin enerji sarfıyatı açısından çok verimli bir hareket olduğudur. Bunun yanı sıra salınan ayağın hareketinin eyleyici kullanmadan da gerçekleştirilebileceği ispatlanmıştır. A. M. Formal salınan ayağın hareketini balistik atış problemi olarak ele almış ve yürüme problemine sıra dışı bir yaklaşım getirmiştir [13].

Yürüme konusunda ilk çalışmaları yapmış olan M. Vukobratovic “sıfır moment noktası” (SMN) kavramını ortaya atmış, önceden tanımlanmış eklem yörüngeleri aracılığıyla sıfır moment noktası geri beslemesini kullanarak dengeli yürümeyi formülize etmiştir. Bu konuda yazılmış ilk kitabında insansı robotun analizi konusunda çok kapsamlı bir giriş yapmıştır [14]. Problemi doğrudan kontrol edilebilen eklemler ile kontrol edilemeyen eklemlerin denetimi olarak tanımlamıştır. Önerdiği yapıda ayak tabanı ile zemin arasında 3 serbestlik dereceli bir eklem vardır. Bu eklem robotun kinematik ve dinamik modelinde belirir. Diğer uzuv eklemleri sayesinde bu sanal eklem kontrol edilebilmesine yönelik kapsamlı ve oldukça karmaşık bir yöntem geliştirmiştir. 1970 yılların bilgisayar teknolojisine göre yaptığı benzetim çalışmaları oldukça başarılıdır. Bu çalışmanın temellerini de sağlayan 1990 basımı ikinci kitabında problemi sistematığe dökmüş iki-ayak robotun kararlılık analizine yönelik çözümler de önermiştir [10, 11, 14].

Kajita yaptığı çalışmada görme duyusunun yürüme üzerindeki etkisini iki-ayak robot tasarımı problemine dahil etmiştir. Öyle ki canlılardaki adım atmadan önce doğuracağı etkilere yönelik ön geri beslemeli bir algoritma geliştirmiştir [15].

İki-ayak robotun tüm dinamik modelini çıkarmaya çalışmaktansa sistemi yeterince ifade edebilecek görece basit modeller oluşturmakta günümüzde üzerinde ağırlıklı olarak çalışılan yöntemler arasındadır [15, 17]. Bu çalışmada da temel makale olarak kullanılan Kanniah'ın çalışmasında problem 3 noktasal cisim dengesi olarak ele alınmış ve 1200 mm boyutlarındaki robotlarında uygulayarak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [16].

2. MEKANİK YAPI

2.1. Giriş

İki-ayak robotu tasarlamak için göz önünde bulundurulması gereken pek çok faktör vardır. Literatürde sadece bu sorunları sınıflandıran araştırmalar da bulmak mümkündür[18]. İlk karar verilmesi gereken ise iki-ayak robotun boyu ne olmalıdır. Bu karar gerçekleştirilecek projede en belirleyici etken olacaktır.

Daha sonra sırasıyla; iki-ayak robotun boyutlarını belirleme, eklem sayısını ve tipini belirleme, eyleyici seçimi, güç kaynağı seçimi, algılayıcı seçimi, kontrol donanımı seçimi... gibi konularda kararlar verilmelidir.

Yukarıda sıralanan seçimlerin her biri diğerleri ile sıkı bir ilişki içindedir dolayısıyla diğerleri üzerinde belirleyicidir de. Örneğin besleme kaynağı olarak gövdeye yerleştirilecek akülerin kullanılması düşünülüyorsa, bu iki-ayak robotun ağırlığını baskın bir biçimde arttıracaktır. Bu da eyleyici seçimini doğrudan etkileyecektir. Mekanik yapı da eyleyici tipine göre değişecektir.

Bu çalışma kapsamında amaç üretimden daha çok üretime yönelik bir çalışmaya başlanıldığında doğru kararları verebilecek bir birikim sağlamaktır. Bu nedenle, deneysel bir platform olarak kısa sürede ve az iş gücüyle yapılabilecek basit fakat oldukça farklı denemeler yapılmasına imkân tanıyacak bir iki-ayak robot hedeflenmiştir. Çalışma benzetim aşamasında kaldığı için verilen kararlar ve gerekçeleri şöyle sıralanabilir.

2.2. İki-Ayak Robotun Boyutları Ne Olmalıdır?

İki-Ayak denge problemini incelerken çok farklı problemlere çözümler geliştirmek gerekmektedir. Mekanik tasarım göz önünde bulundurulduğunda ise denge probleminde en baskın etkenler ayak taban alanı ve robotun boyudur [19]. İki-ayak robotun ayak taban alanının artması dengelemeyi kolaylaştırırken manevra kabiliyetini düşürür. İki-ayak robotun boyunun artması ise dengeleme problemini zorlaştırmasının yanı sıra yine manevra kabiliyetine düşürmektedir. Denemelerde, ortalama boyutlardaki bir insanın ölçülerini referans alınarak model oluşturuldu ve bu parametreler değiştirilmeyip sabit kabul edilerek iki-ayak robotun ne kadar hızlı yürüyebileceği araştırıldı.

İki-ayak robotun boyutları kontrol mimarisi başta olmak üzere tasarımda en belirleyici etkindir. Amaç insanların hüküm sürdüğü bir ortamda çalışacak bir robot imal etmekse boyutları da buna uygun olmalıdır. Küçük bir robot hedeflenirse merdiven çıkmak gibi eylemleri yapamayacaktır ve üzerine eyleyicileri ve diğer donanımları yerleştirmek te daha zor olacaktır. Gereğinden büyük iki-ayak robot hedeflenirse daha fazla güç ve enerji gerektirecek buda tasarımı zorlaştıracak hatta imkânsız hale getirebilecektir.

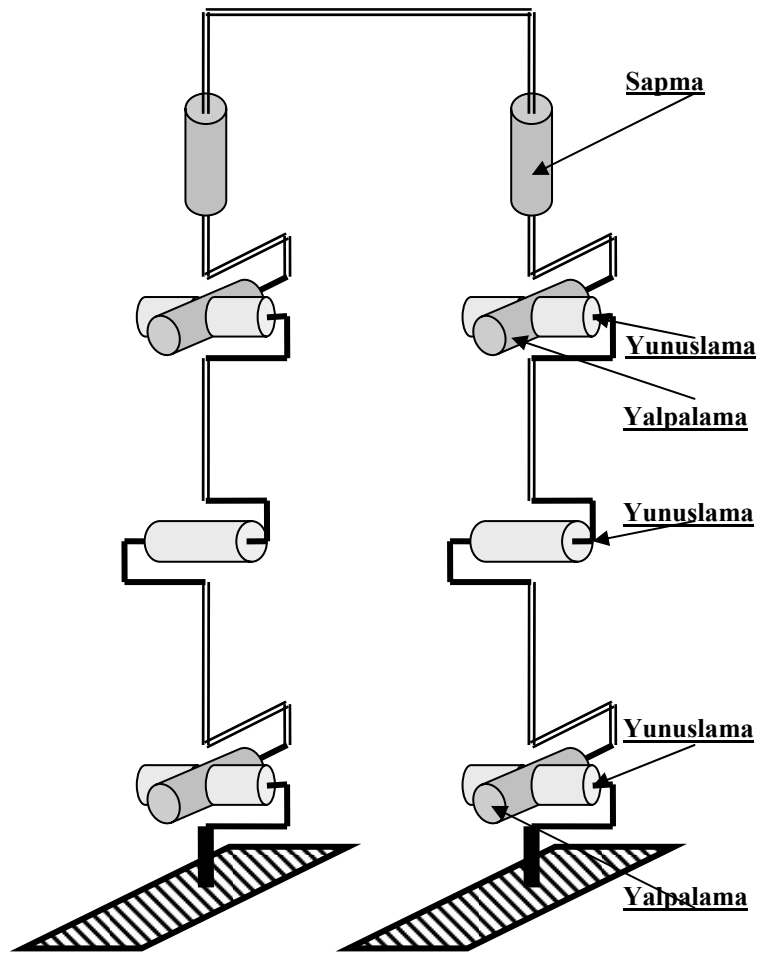
İki-ayak robotun yüksekliğinin ortalama 1500 mm civarında olması ön görülmüştür. Bu amaçla kaval baldır ve gövdenin 500 mm uzunluğunda olması, ayağın ise 50 mm yüksekliğinde olmasına karar verilmiştir. Ayak taban alanının dengelemede baskın rol oynayacağı göz önünde bulundurularak 100 mm genişliğinde 200 mm uzunluğunda dikdörtgen prizma formunda olmasına karar verilmiştir. Bu boyutlar ortalama boyutlardaki genç bir insanın ölçüleri ile örtüşür [20].

2.3. Eklem Sayısı Kaç Olmalıdır?

3 boyutlu uzayda hareket edebilecek bir insanı modellemek için en az 23 serbestlik derecesine ihtiyaç vardır [19, 20]. Sadece yürümesini sağlayacak gövdenin altındaki uzuvları göz önünde bulundurulursa bu sayı 12 ye iner. Bir insanın yaptığı

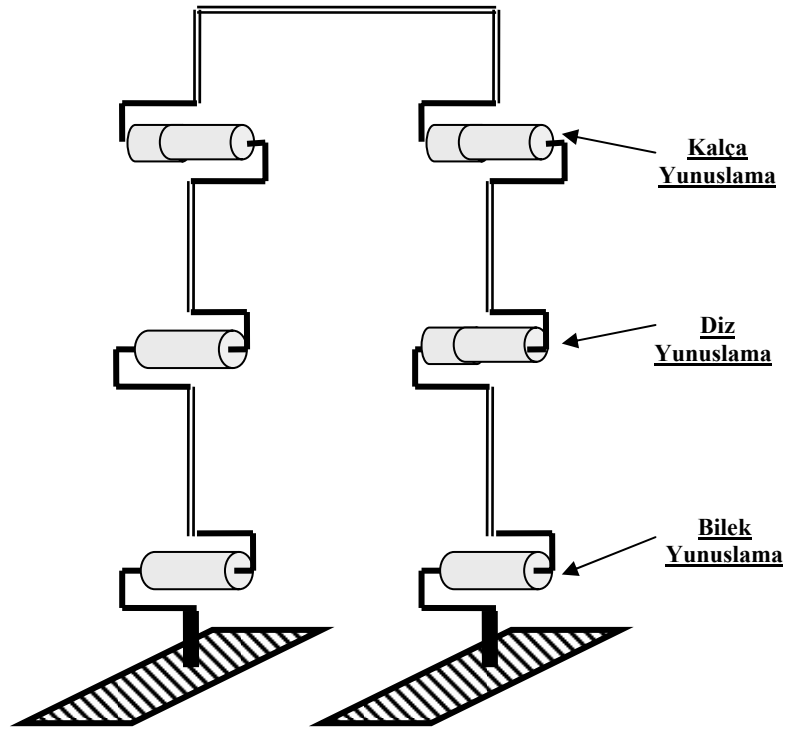
hareketleri gerçekleştirebilmesi için iki-ayak robotun en az 12 serbestlik derecesine sahip olması gerekmektedir [30].

Şekil 2.1'de bu eklemler gösterilmiştir. Kalça küresel mafsal tipinde bir eklem ile modellenenebilir. Sapma olarak isimlendirilen serbestlik derecesi yürüme esnasında yön değiştirmeye yaramaktadır. Kalça da ve bilekte birer tane olan yalpalama ise yana yürüme hareketinde ve daha da önemlisi ağırlık merkezinin iz düşümünü bir ayaktan diğerine aktarmaya yaramaktadır. Bu sayede robot tek ayaküstünde durabilir. Yunuslama eklemleri ise çömelme, yürüme, koşma gibi hareketlerde aktif rol üstlenirler.



Şekil 2.1: Alt Gövde Serbestlik Dereceleri

3 boyutlu uzayda hareketi hedeflemiş olmamıza rağmen bu eklemlerin bir kısmından vaz geçilebilir. Örneğin sadece bir ayağını kullanarak yön değiştirebilir böylece kalçalardan sadece birinde sapma serbestlik derecesi olması yeterli olur. Aynı şekilde yalpalama eklemleri de iki ye indirgenerek ayaklar arasında ağırlık aktarımı mümkün olabilir. Hatta insansı bir yürüyüş hedeflenmez ise yunuslamaların da bir kısmından vaz geçilebilir.



Şekil 2.2: İki-ayak Robot Serbestlik Dereceleri

Bu çalışma kapsamında iki-ayak robotun eğimsiz bir zeminde öne arkaya yürüyeceği ve merdiven çıkabileceği ön görülmüştür. Bu nedenle Şekil 2.2'de görüldüğü üzere model sadece yunuslama serbestlik derecelerini barındırmaktadır. Sapma serbestlik derecelerinin dahil edilmemesi iki-ayak robotun yanal dengelemeyi sağlayamayacağını düşündürtebilir ama uygun bir ayak tasarımıyla bu sorun aşılabilir. Yukarıda ayrıntıları verilen iki-ayak robot sanal ortamda modellenerek kontrolör tasarımına geçilmiştir .

3. KONTROLÖR TASARIMI

3.1. Giriş

Herhangi bir sisteme kapalı çevrim kontrolör tasarlayabilmek için öncelikle kontrol edilecek değişkenle sistem arasında ki bağıntıları gösterecek bir modele ihtiyaç vardır. Daha da önemlisi kontrol edilecek değişkenin sistemden doğrudan ölçülebilmesi ya da ölçülebilen başka değişkenler yardımıyla hesaplanabiliyor olması gerekir. Bu açıdan bakıldığında iki-ayak robotlar oldukça zor tasarım problemleri içerirler. Öncelikle sistemin ağırlık merkezinin o anki konum, hız gibi kinematik büyüklüklerinin belirlenebilmesi gerekir. Kinematik büyüklükler Newton mekaniğindeki diğer bütün büyüklükler gibi tanımlanabilecekleri bir referans sistemine ihtiyaç duyarlar. Oysaki manipülatör tipi robotların aksine iki-ayak robotların sabit bir uzvu olmadığı için iki-ayak üzerinde kalıcı olarak sabit bir referans sistemi tanımlamak mümkün değildir.

Bu soruna çözüm yöntemlerinden biri, robotun üzerine değil de robotun bulunduğu ortamdaki herhangi bir sabit noktaya referans eksen takımını atayarak, pivot olarak seçilen uzvun kinematik ölçümlerini yapmaktır. Böylece, örneğin robotun gövdesini tanımlayan kinematik büyüklükler bu eksen takımı üzerinden ölçülebilir ve diğer uzuvlar için referans teşkil eder. Fakat iki-ayak ile çevresi arasında daimi fiziksel bir bağlantı olmadığı için, mühendisliğin temel sorunlarından biri olan; doğru ölçme problemi ile karşı karşıya kalınır. Günümüz teknolojisinin getirdiği imkânlardan yararlanıp çeşitli jiroskoplar kullanılarak bu sorun kısmen çözümlenebilir. Robotun başlangıç durumu tanımlandıktan sonra hız ve ivmesi ölçülerek konumu hesaplanabilir. Ama bu sayısal integrasyonun doğasından kaynaklanan hatalardan ötürü ancak sınırlı bir aralıkta ve sürede doğru sonuçlar verir. Doğru donanım ve

tasarımla bu sorunlar aşılabilecek olmasına rağmen, üretimdeki ilk denemeler için bu kadar yoğun veri akışına ve hesaplamaya ihtiyaç duyan bir tasarım uygun olmayacaktır.

Uygun referans sistemi atandıktan sonra da bu referans sistemine göre ayağa etkiyen dış kuvvetlerin tayini sorunu ile karşılaşılır. Basan ayağa zemin tarafından yayılı bir yük etkimektedir ki bu yük tek bir bileşke kuvvet olarak ta ifade edilebilir. Bu bileşke kuvvet iki-ayağın dengesini belirleyen kuvvettir. SMN yaklaşımına göre bu kuvvetin oluşturduğu moment iki-ayak robot üzerine etkiyen net momenti sıfırlamıyorsa iki-ayak dengede değildir ve net moment etkisiyle dönmektedir ki biz bunu düşme olarak adlandırıyoruz. SMN yaklaşımının en genel formunda bu kuvvet bilgisine ayak tabanlarına yerleştirilen kuvvet algılayıcıları ile erişildiği görülür. Ama bu yaklaşımda iki-ayak robotu gerçekleştirmeye yönelik ilk denemeler için uygun değildir. Çünkü her bir ayağa yerleştirilecek en az üçer adet kuvvet algılayıcısından gelecek verilerin işlenmesi ciddi bir sinyal işleme problemi doğurur. Bu iki temel sorunda referans eksen takımının uygun bir yere atanması ile çözümlenebilir. Öyle ki iki-ayak dengeyi sağlayacak bir biçimde hareket ediyor olmasına rağmen kuvvet algılayıcılarına ve jiroskopa ihtiyaç duymayacak açık çevrim kontrol ile dengeli yürüme sağlanabilecektir [22-26].

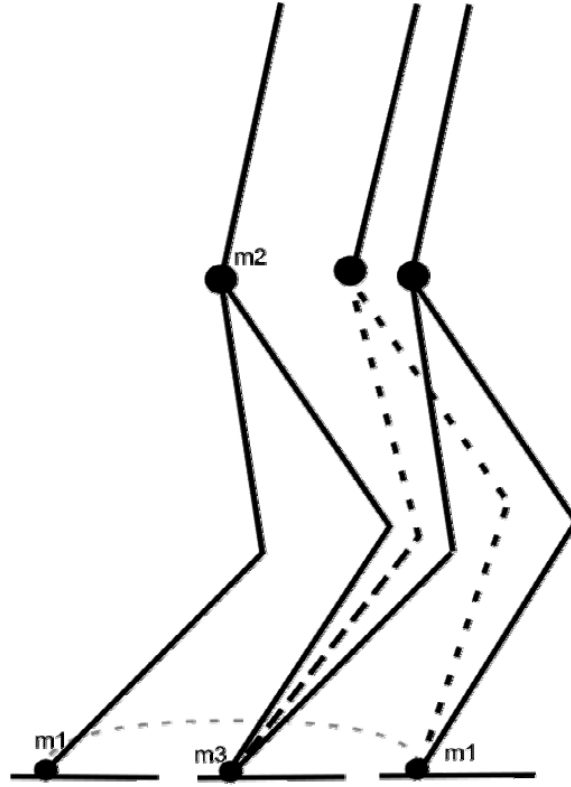
3.2. Değişken Referans Eksen Takımı Yaklaşımı

Sistemi tanımlamanın vaz geçilmez bir gereklilik olduğu aşikârdır. Bu tez kapsamında iki-ayak robotun o anki durumun gereklerine göre belirlenen ve ardışık olarak devreye giren iki ayrı referans eksen takımı atanmıştır. Bu referans eksen takımları iki ayağın merkezlerindedir ve x ekseninin pozitif yönü ileri yürüme doğrultusunda ve z eksenini de yatay düzleme dik doğrultuda pozitif yön olarak atanmıştır. ÇDF'nda iken sıradaki adımda basan ayak olarak kalacak ayağa atanan eksen takımı referans eksen takımı olarak kabul edilir ve bu ayak salınan ayak olana kadar referans eksen takımını barındırır. Burada yapılan kabul basan ayağın sabit olduğu zemin ile ayak tabanı arasında kayma söz konusu olmadığıdır. Bu oldukça

büyük bir kabul olarak görünmesine rağmen iki-ayak robot, basan ayakta sürtünmeyi aşacak bir yanal kuvvet oluşmasını engelleyecek şekilde hareket ettiği sürece kendiliğinden gerçekleşir. SMN şartı sağlandığında da tam olarak bu gerçekleşir çünkü SMN sisteme etkiyen tüm kuvvetlerin herhangi bir noktaya göre tanımlı momentlerin toplamalarının sıfır olmasını sağlar [11]. Sıradaki bölümde tanıtılacak olan TDF kontrolörü SMN şartını sağlayarak robotun dengeli adım atmasını sağlamaktadır.

3.3. TDF Kontrolörü

Son 20 yıldır insansı robot çalışmaları oldukça hız kazanmıştır [16]. Bu çalışmaların en başında istenilen hareketin dengeli bir biçimde gerçekleşmesi için eklem açılarının yörünge kontrolü gelmektedir [26]. SMN şartı sağlandığı taktirde robotun ağırlık merkezi, destek düzleminin dışına çıksa dahi robotun düşmeyeceği bilinmektedir. Lakin SMN'nın hesaplanmasında tüm dinamik sistem modelinin kullanılması, gerçek zamanlı gerçekleştirilemeyecek hesapların yapılmasını gerektirmektedir. Bu sorunun aşılabilmesi için sistemi basitleştirmek adına literatürde birçok farklı yaklaşım bulmak mümkündür [27, 28]. Bu çalışma kapsamında robot TDF'da iken üç kütleli oluşan bir sistem olarak modellenmiştir. Kütlelerden ikisi ayakları betimlerken görece daha büyük diğer kütle ise gövdeyi betimlemektedir. Salınım fazındaki ayak adım atmak için önceden tanımlanmış hareketi gerçekleştirirken, TDF kontrolörü ise SMN şartını sağlayacak şekilde gövdenin izlemesi gereken yörüngeyi hesaplar [16].



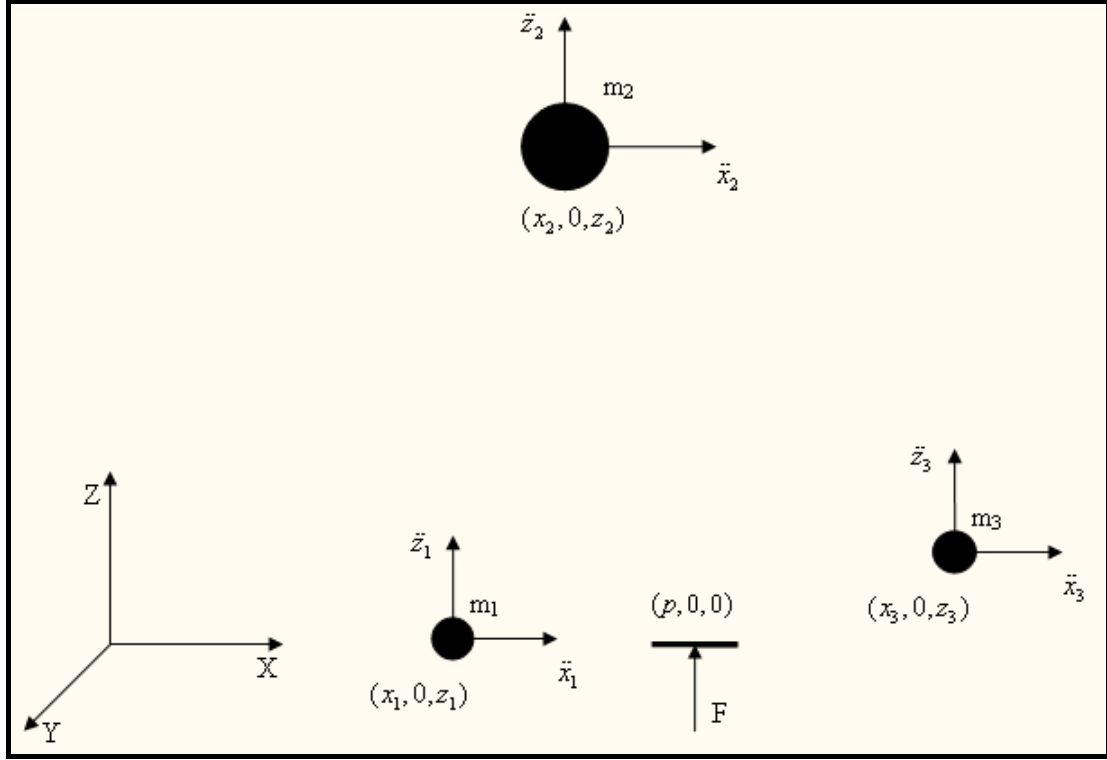
Şekil 3.1: Üç Noktasal Kütle Yaklaşımı

Şekil 3.1'de robot'un üç cisim yaklaşımına göre yürüyüşü betimlenmiştir. t_0 anında sistem ÇDF' dadır. Ayaklar arasında bir adım boyu mesafe vardır. TDF kontrolörü, $t = t_0$ anında arkadaki m1 kütleli ayağın harekete geçmesi ile devreye girer ve m3 kütleli basan ayağın önüne geçerek $t = T_s + t_0$ anında tekrar yere konana kadar gövdeyi kontrol ederek SMN şartını sağlar. Böylece sistemin dengede kalarak düşmesini engeller. Bu hareket sırasında salınan ayak iki adım boyu mesafe kat eder.

3.4. Üç Kütleli Sistem Gösterimi

Uygulamayı kolaylaştıracak basitlikte bir model oluştururken aynı zamanda yapılan modelin sistemi betimleyecek düzeyde olmasını sağlamak iki-ayak robotlar üzerine yapılan çalışmaların bel kemiğini oluşturmaktadır. Yedi uzuvdan oluşan sistemin üç noktasal cisim yaklaşımı ile temsil edilmesi çok büyük kabuller yapıldığını

düşündürmesine rağmen literatürde başarılı uygulamalarını görmek mümkündür. [16,17] Bu yöntemde ayaklar iki noktasal kütle ile betimlenirken görece ikisinden daha ağır bir kütle de gövdeyi betimlemektedir. Bacakları hareket ettiren eyleyiciler ile diğer sistem bileşenlerinin gövdede bulunduğu göz önüne alınırsa bu yaklaşımın gerçekçi olduğu aşikârdır.



Şekil 3.2: Serbest Cisim diyagramı

Şekil 3.2'de noktasal cisimden oluşan sistem gösterilmektedir. Gövdeyi betimleyen m_2 kütlelerinin daha ağır olduğunu göstermek için daha büyük çizilmiştir. $X = p$ noktası sıfır moment noktasını göstermektedir. Referans eksen takımının merkezi olan $(0, 0, 0)$ noktasına göre moment denkleminde oluşturduğumuzda (3.1) denklemini elde ederiz.

$$F \cdot p = x_1(\ddot{z}_1 + g)m_1 + x_2(\ddot{z}_2 + g)m_2 + x_3(\ddot{z}_3 + g)m_3 - \ddot{x}_1 z_1 m_1 - \ddot{x}_2 z_2 m_2 - \ddot{x}_3 z_3 m_3 \quad (3.1)$$

Önceki bölümde anlatılan eksen takımını atamanın getirdiği kolaylıktan yararlanmak için referans eksen takımını basan ayağı betimleyen m1 kütesine atarız. Böylece $x_1 = z_1 = 0$ olur. Dengenin sağlanması için F kuvvetinin oluşan momenti sıfırlayacak şekilde ters yönlü bir moment oluşturmaları gerekir. Bu kuvvetin ayağa etkiyen tepki kuvveti olduğu göz önünde bulundurulursa $p = 0$ olur.

$$x_2(\ddot{z}_2 + g)m_2 + x_3(\ddot{z}_3 + g)m_3 - \ddot{x}_2 z_2 m_2 - \ddot{x}_3 z_3 m_3 = 0 \quad (3.2)$$

Denklimin daha okunaklı olması için m2 kütesinin gövdeyi, m3 kütesinin de salınan ayağı betimlediği göz önünde bulundurarak denklem (3.3) deki gösterimi kullanmak uygun olacaktır.

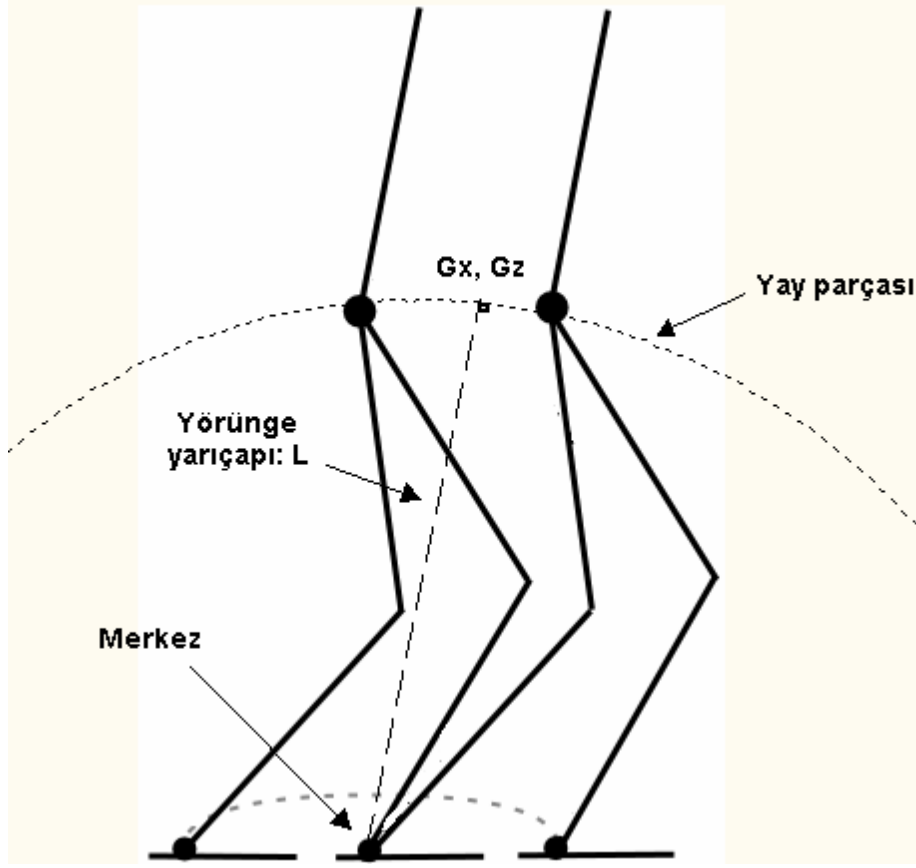
$$G_x(\ddot{G}_z + g)m_G + A_x(\ddot{A}_z + g)m_A - \ddot{G}_x m_G G_z - \ddot{A}_x m_A A_z = 0 \quad (3.3)$$

Bu denklem salınan ayağın hareketi ile gövdenin hareketi arasında bir bağıntı kurmaktadır. Öyle ki salınan ayak adım atmaya yönelik hareketini yaparken gövde de (3.3) diferansiyel denklemini sağlayacak şekilde hareket ederse denge şartı sağlanmış olur.

A_x ve A_z fonksiyonları istenilen adım boyu, adım yüksekliği ve ya adım hızı gibi değişkenlerin fonksiyonu olduğundan, denklemin analitik çözümü mümkün değildir. Lakin denklemde G_x ve G_z olarak iki bilinmeyen fonksiyon olduğundan sayısal yöntemler ile de diferansiyel denklemi çözmek mümkün olmayacaktır.

Bu noktada (3.3) diferansiyel denklemini çözebilmek için yardımcı ikinci bir denkleme ihtiyaç vardır. Yardımcı denklemi oluşturabilmek için, Şekil 3.3'de görüldüğü gibi, gövdenin daima merkezi basan ayak üzerinde olmak üzere, bir yay parçası üzerinde hareket ettiği kabulü yapılmıştır. Bu kabulün analitik gösterimi (3.4) denklemdir.

$$G_x^2 + G_z^2 = L^2 \quad (3.4)$$



Şekil 3.3 : Basan Ayak Merkezli Yay Parçası

Denklemin zamana göre ikinci türevi (3.5) denklemini verir.

$$\ddot{G}_x^2 + G_x \ddot{G}_x + \ddot{G}_z^2 + G_z \ddot{G}_z = 0 \quad (3.5)$$

İki bilinmeyenli iki diferansiyel denklemi sayısal çözüm yöntemleri çözmek mümkündür.

ÇDF'nin anlık bir durum olduğu kabulü ile yapılan benzetimlerde, ilgili bölümde ayrıntılı olarak değinileceği üzere, iki-ayak ancak sınırlı sayıda adım atabilmiştir. Bu duruma bir çözüm getirebilmek amacıyla ÇDF için ayrı bir kontrolör tasarlanmıştır.

3.5. ÇDF Kontrolörü

ÇDF'nın anlık olarak kabul edilmesi tasarımda kolaylıklar getirmesine rağmen, benzetimlerde sınırlıklı bir aralıkta başarılı sonuçlar doğurduğu görülmüştür. Daha önce de belirtildiği gibi, iki ayağın birden yere basarak sabit durduğu duruma çift destek fazı denir. Bu durum kapalı zincirsel yapı formundadır. Ayaklar sabit olmasına rağmen gövde hareket edebilmektedir. Bu nedenle üç kütle yaklaşımının bu faza uygulanması mümkün değildir. ÇDF kontrolünün temel olarak iki işlevi vardır.

Birincisi TDF da oluşmuş olan istenmeyen salınımı sönümlmek. Böylece bu salınımın birikerek robotun düşmesine sebebiyet vermesini engellemek. Bu salınım her bir adımdan sonra bekleme süresi konularak önlenabilir. Ancak bu yürüme süresini uzatacağından etkin bir çözüm yaklaşımı olmaz.

ÇDF kontrolörünün ikinci ve daha önemli görevi ise TDF kontrolörünün çalışabilmesi için gerekli olan başlangıç şartlarını oluşturmaktır. Öyle ki ÇDF'nın sonunda robot TDF'nın başlangıç şartlarını sağlar duruma gelsin ve böylece sıradaki adıma başlayabilsin. Çünkü adım boyu ve adım yüksekliği gibi parametrelere bağımlı olarak TDF'nın sonunda gövdenin kinematik değişkenleri farklı değerler alır.

ÇDF'nda destek düzlemi iki ayak ve arasında kalan bölgeden oluştuğu için sistemi dengelemek görece daha kolaydır. Gövde belli bir bölge içinde hareket ettiği sürece düşmeyeceği göz önünde bulundurularak problem yörünge planlama sorunu olarak ele alınmıştır. Öyle ki TDF sonunda gövdenin kinematik değişkenleri alınarak, istenilen değerlere gelmesi için gerekli olan geçiş yörüngesi hesaplanacaktır.

3.5.1 Geçiş Yörüngesinin Oluşturulması

Yörünge planlama problemi robotik biliminin temel araştırma konularından biridir. Görevin gereklerine göre geliştirilmiş değişik yörünge planlama yöntemlerini literatürde bulmak mümkündür[31]. Burada basitliğinden ve hesaplama kolaylığından ötürü polinomlar tercih edilmiştir. Herhangi bir t_i anındaki konum hız

ve ivme değerlerini ts anındaki istenen değerlere götürmek için 5. mertebeden bir polinom yeterli olmaktadır. Polinomun genel ifadesi denklem (3.6) da görülmektedir.

$$P(t) = at^5 + bt^4 + ct^3 + dt^2 + et + f \quad (3.6)$$

Hız ve ivme polinomları ise denklem (3.6) ardışık türetilerek (3.7) ve (3.8) de ki gibi elde edilir.

$$\dot{P}(t) = 5at^4 + 4bt^3 + 3ct^2 + 2dt + e \quad (3.7)$$

$$\ddot{P}(t) = 20at^3 + 12bt^2 + 6ct + 2d \quad (3.8)$$

Bu polinomun sağlaması gerekenler şartlar şöyle sıralanabilir;

$$P(t_i) = P_i \quad (3.9)$$

$$\dot{P}(t_i) = \dot{P}_i \quad (3.10)$$

$$\ddot{P}(t_i) = \ddot{P}_i \quad (3.11)$$

$$P(t_s) = P_s \quad (3.12)$$

$$\dot{P}(t_s) = \dot{P}_s \quad (3.13)$$

$$\ddot{P}(t_s) = \ddot{P}_s \quad (3.14)$$

6 bilinmeyen ve 6 denklem olduğundan matris formatında ifade etmek, denklemleri daha anlaşılır kılacaktır.

T zaman matrisi, K katsayı vektörü olmak üzere kapalı formda (3.15) denklemi şeklinde ifade edilebilir.

$$P = TK \quad (3.15)$$

(3.15) denkleminin açık formu (3.16) da gösterilmiştir.

$$\begin{pmatrix} P_i \\ \dot{P}_i \\ \ddot{P}_i \\ P_s \\ \dot{P}_s \\ \ddot{P}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_i^5 & t_i^4 & t_i^3 & t_i^2 & t_i & 1 \\ 5t_i^4 & 4t_i^3 & 3t_i^2 & 2t_i & 1 & 0 \\ 20t_i^3 & 12t_i^2 & 6t_i & 2 & 0 & 0 \\ t_s^5 & t_s^4 & t_s^3 & t_s^2 & t_s & 1 \\ 5t_s^4 & 4t_s^3 & 3t_s^2 & 2t_s & 1 & 0 \\ 20t_s^3 & 12t_s^2 & 6t_s & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

$t_i \neq t_s$ olduğu sürece $\text{rank}(T) = 6$ dır. Bu da her zaman (3.17) formatında bir çözümün var olduğunu kanıtlar.

$$K = T^{-1}P \quad (3.17)$$

(3.6) polinomu X ve Z yörüngeleri için TDF bittiği anda oluşturularak gövdeyi istenilen konuma getirmektedir. Lakin polinom başlangıç ve bitiş anlarında istenilen şartları sağlamasına rağmen ara bölgede nasıl davranacağı bilinmemektedir. Bu durum benzetim bölümünde irdelenecektir.

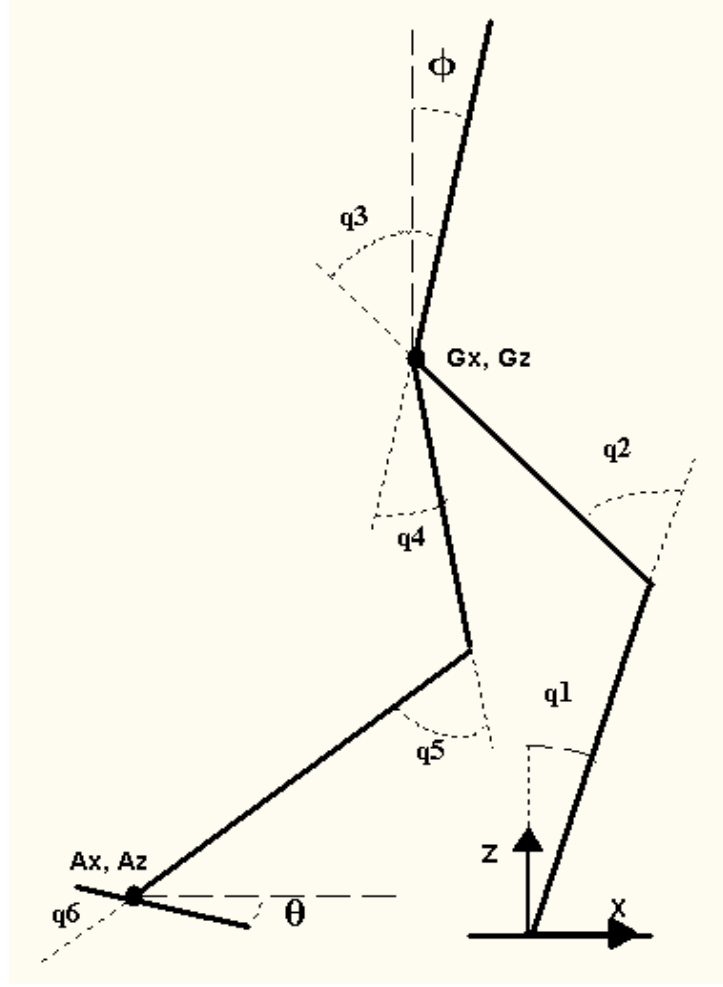
3.6. Ters Kinematik Çözüm

Basan ayağın bir yürüme periyodu boyunca hareketsiz olduğu göz önünde bulundurularak sabit referans eksen takımı merkezi basan ayağa atanmıştır. Robotun o anki durumunu betimleyen büyüklükler üç bileşenle ifade edilirler ve bu eksen takımı üzerinden tanımlanırlar.

$$A = A(Ax(t), Ay(t), \theta(t)) \quad (3.18)$$

$$G = G(Gx(t), Gz(t), \phi(t)) \quad (3.19)$$

Kontrolörler tarafından hesaplanan gövde ve ayak yörüngelerinin gerçekleştirilmesi için robota eklem değişkenleri cinsinden girilmesi gerekir. Her bir kontrol anında robota girilen eklem açıları geometrik ve trigonometrik bağıntılardan yararlanılarak aşağıdaki algoritma ile hesaplanmıştır. Bağıntılarda ki a_i sembolü uzuv boylarını göstermektedir.



Şekil 3.4: Kinematik Gösterim

$$c_2 = \frac{(G_x^2 + G_z^2 - a_1^2 - a_2^2)}{2a_1a_2} \quad (3.20)$$

$$s_2 = \sqrt{1 - c_2^2} \quad (3.21)$$

$$q_2 = \text{Atan } 2(s_2, c_2) \quad (3.22)$$

$$s_1 = \frac{((a_1 + a_2c_2)G_z - a_2s_2G_x)}{G_x^2 + G_z^2} \quad (3.23)$$

$$c_1 = \frac{((a_1 + a_2c_2)G_x - a_2s_2G_z)}{G_x^2 + G_z^2} \quad (3.24)$$

$$q_1 = A \tan 2(s_1, c_1) \quad (3.25)$$

$$q_3 = \phi - q_1 - q_2 \quad (3.26)$$

$$c_5 = \frac{(G_x - A_x)^2 + (G_z - A_z)^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \quad (3.27)$$

$$s_5 = \sqrt{1 - c_5^2} \quad (3.28)$$

$$q_5 = A \tan 2(s_5, c_5) \quad (3.29)$$

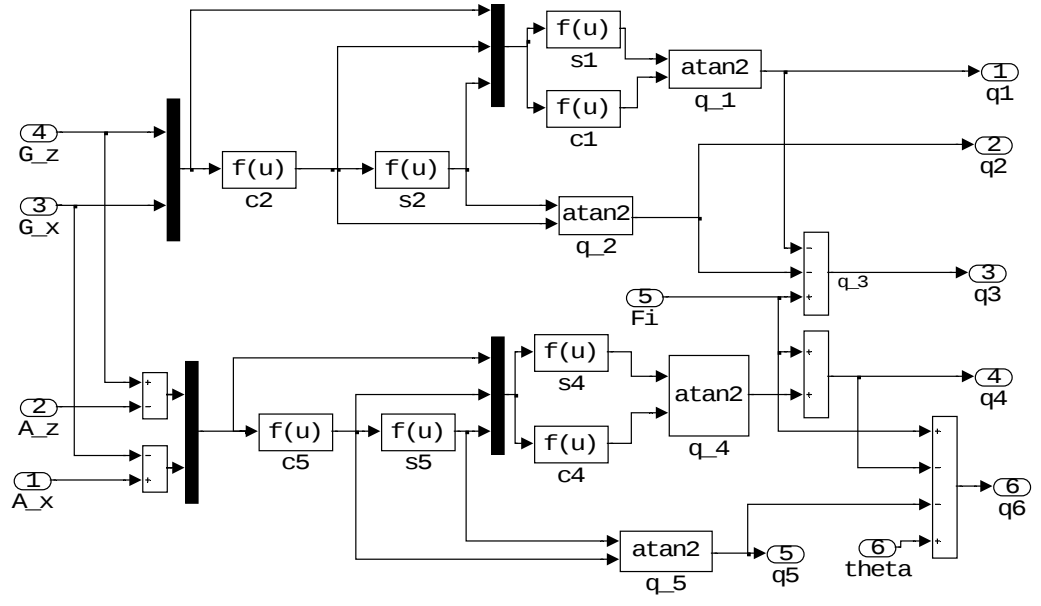
$$s_4 = \frac{((a_1 + a_2c_5)(G_z - A_z) - a_2s_5(G_x - A_x))}{(G_x - A_x)^2 + (G_z - A_z)^2} \quad (3.30)$$

$$c_4 = \frac{((a_1 + a_2c_5)(G_x - A_x) - a_2s_5(G_z - A_z))}{(G_x - A_x)^2 + (G_z - A_z)^2} \quad (3.31)$$

$$q_4 = A \tan 2(s_4, c_4) \quad (3.32)$$

$$q_6 = \theta - (Fi + q_4 + q_5) \quad (3.33)$$

Bu bağıntıların her birinde bilinen değişkenler ile önceki adımlarda hesaplanmış değişkenler kullanıldığı için Şekil 3.5'te görüldüğü gibi basit bir simulink yapısı ile hesaplanmaları mümkündür.



Şekil 3.5 : Ters Kinematik Çözücü Simulink Diyagramı

4. BENZETİM VE SONUÇLAR

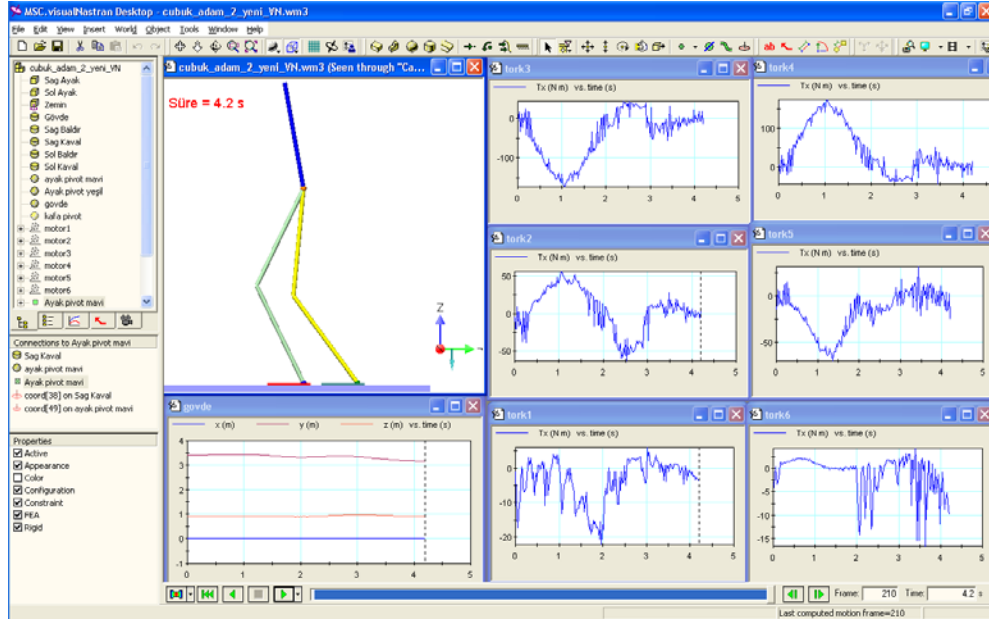
4.1. Benzetim Ortamı

Başta işlemci gücü olmak üzere gelişen günümüz bilgisayar teknolojisi ve beraberinde gelen yazılım imkânlarının sağladığı sayısız olanaklarla, ürün geliştirme sürecinde hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Üretime başlamadan önce sanal ortamda, ürünün yaratacağı gürültü dâhil her açıdan test etmek mümkündür. İki-ayak robotların benzetimini de amaçlayan birçok çalışma bulmak mümkündür[32, 33]. Bu çalışmada modüler yapılarından ötürü paket programlar tercih edilmiştir.

MATLAB-Simulink® ikilisi günümüzde çok yaygın olarak kullanılan bir ürün geliştirme platformudur. Sağladığı sayısız olanaklarla tasarımcının kullanması gereken araçlardan daha çok, ürünün kendisine zaman ayırabilmesine imkân tanımaktadır. Sağladığı en olumlu avantajlardan biride kendi alanında çok başarılı olan diğer programlarla (Visual NASTRAN®, MAPLE®, SolidWORKS®, vb) oldukça kolay bir şekilde veri alış-verişine izin veren bir yapıda olmasıdır. Bunun gibi birçok avantajından ötürü, Visual NASTRAN® (VN) dinamik benzetim programı altındaki sanal iki-ayak robotu denetlemek için kontrolör tasarımı ve hesaplama platformu olarak seçilmiştir.

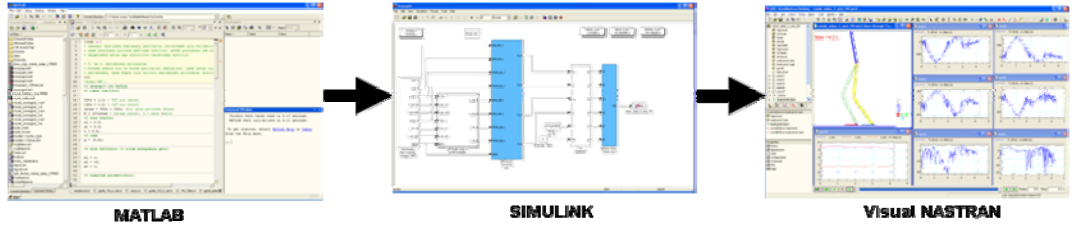
Dinamik benzetim yazılımlarının en kullanışlılarından biri de MSC SOFTWARE firmasının geliştirdiği Visual NASTRAN® (VN) dinamik benzetim programıdır. Programın dinamik analiz algoritması Newton'un kütle çekim yasası dışında ki bütün mekanik yasaları barındırmaktadır. Başlangıç koşulları verilmiş bir sistemin davranışını incelemek için kullanılabileceği gibi, tanımlanan kontrol değişkenlerine

müdahale ederek sistemin davranışı da incelenebilir. Mekanik tasarımı sağladığı basit modelleme araçları ile yapmak mümkün olduğu gibi SolidWORKS® tarzı modelleme programları ile yapılmış katı modelleri de kabul etmektedir. Programın arayüzü Şekil 4.1'de görüldüğü gibidir. Benzetimi yapılan sistemin davranışını görsel olarak sergilemesinin yanı sıra, tork, kuvvet, hız gibi her türlü dinamik ve kinematik büyüklüğün ölçülebilmesine de olanak sağlamaktadır.



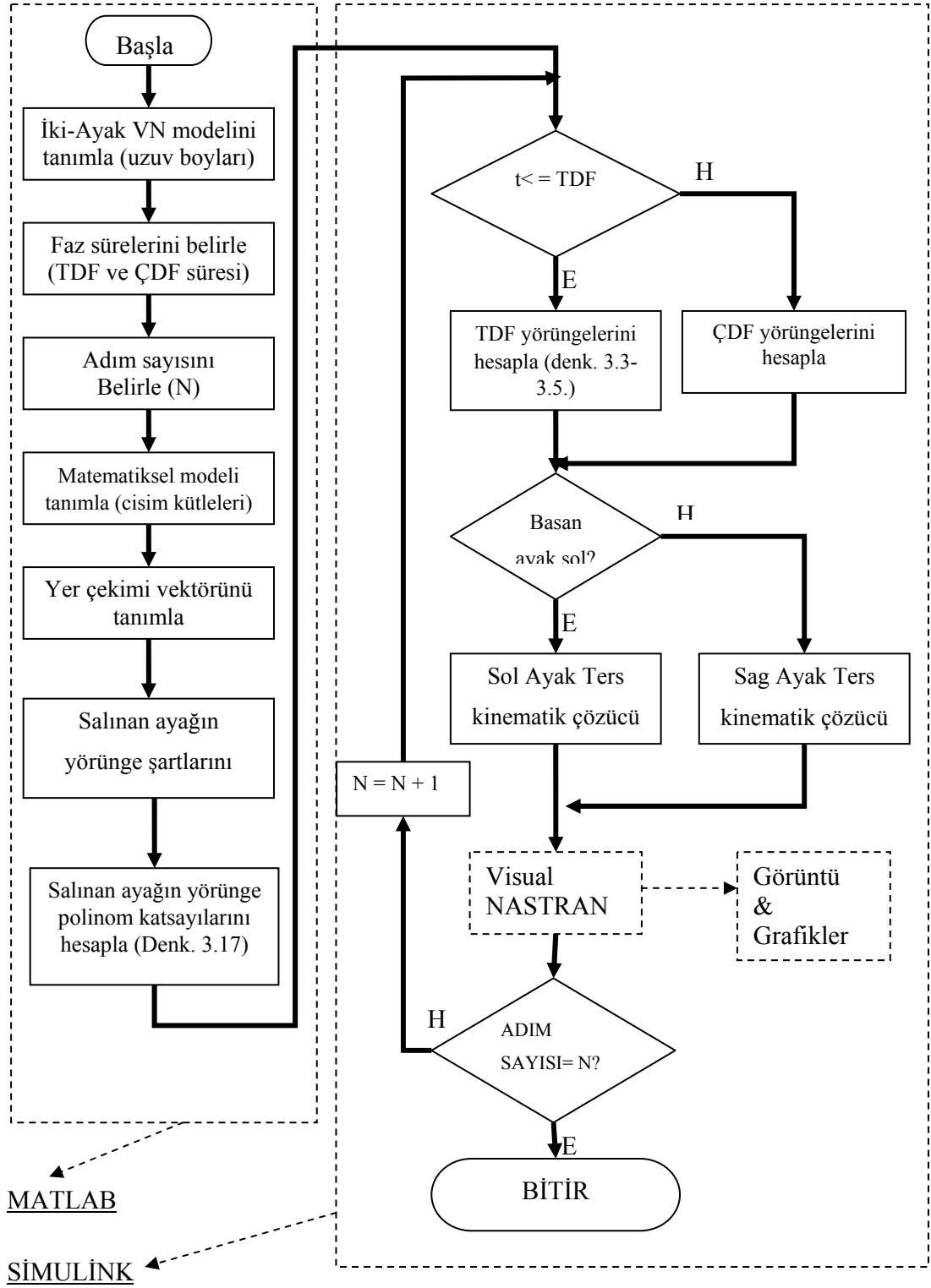
Şekil 4.1: Visual NASTRAN Programı Arayüzü

Benzetim esnasında kullanılan programlar arasındaki genel yapı Şekil 4.2'de genel akış yapısı ile gösterilmiştir. Matlab ortamında genel olarak tanımlamalar yapılmaktadır.



Şekil 4.2: Genel Akış Yapısı

Salınan ayak yörüngesinin dikey ve yatay bileşenlerini oluşturan polinomların katsayıları hesaplanmakta diğer sabitlerle birlikte simulink formatına dönüştürülerek ilgili yerlere gönderilmektedir.



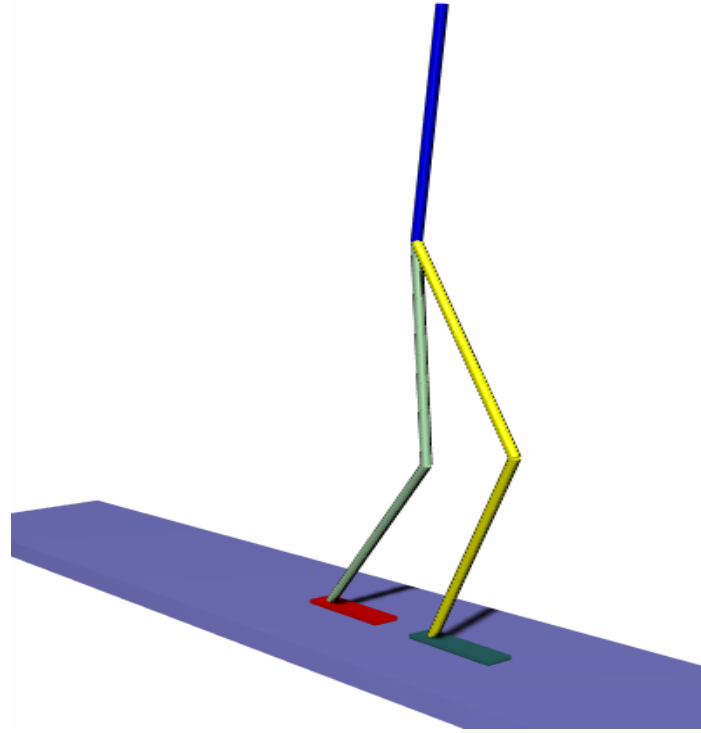
Şekil 4.3 : Program Akış Çizelgesi

Şekil 4.3'te program akış çizelgesi ayrıntılandırılmıştır. Şemadan da görüldüğü üzere, MATLAB ortamında girilen ve hesaplanan sabitler simulink' e gönderilmekte bundan sonraki, ÇDF geçiş yörünge polinom yörüngeleri dâhil, bütün yörünge hesaplamaları simulinkte yapılmaktadır. ÇDF'nda kullanan yörünge polinomlarının katsayıları anlık olarak TDF'ı sonunda hesaplanmakta ve bu katsayılar ÇDF boyunca polinom katsayısı olarak kullanılmaktadır. Kartezyen koordinatlarda hesaplanan gövde ve ayak yörüngeleri, o anki aktif referans takımına göre ters kinematik çözümleri yapılarak, Visual NASTRAN ortamında ki sanal iki ayak modele eklem açıları cinsinden gönderilmektedir.

Benzetimin başlangıç anında İki-ayak robot Visual NASTRAN ortamında TDF başlangıç şartlarını sağlar şekilde durmaktadır. Simulink ortamında hesaplanan eklem yörüngeleri uygun forma dönüştürülerek sanal modelin eklemelerini kumanda eder. Visual NASTRAN ayakların yerle temasından kaynaklanan etkileri, iki-ayak robotun ağırlığından ve ataletinden kaynaklanan dinamik olayları hesaplayarak sistemin davranışını görselleştirir.

4.2. İki-ayak Robot Sanal Model

İki-ayak robot sağladığı kolaylıklardan ötürü basit çubuk adam şeklinde modellenmiştir. Prototip ortamına uygun olacağı düşünülerek zemin ahşap malzeme uzuvlara ise alüminyum malzeme özellikleri atanmıştır. Özellikle ayak ve zemin arasındaki temas kuvvetleri Visual NASTRAN programında momentum denklemlerinde yer aldığından malzeme tipi benzetim sonuçlarını etkilemektedir.



Şekil 4.4 : İki-ayak Robot VN Modeli

Şekil 4.4'de benzetimlerde kullanılan iki-ayak robot modeli görülmektedir. Model Visual NASTRAN programının sağladığı basit modelleme araçları ile tasarlandı. Ayaklar dikdörtgen prizma diğer uzuvlar ise silindirik prizma olarak modellendi. Uzuvlar arasında ki bağlantılar ise dönel eklemlerle sağlandı. Modelin ayrıntıları şöyledir;

Tablo 4.1 : İki-ayak Robotun Mekanik Özellikleri

Gövde	Silindir, çap:10 mm, boy = 500 mm	0.435 Kg
Baldır	Silindir, çap:10 mm, boy = 500 mm	0.435 Kg
Kaval	Silindir, çap:10 mm, boy = 500 mm	0.435 Kg
Ayak	Dikdörtgen prizma: 200 mm 50 mm 10 mm	0.227 Kg

Benzetim sonuçlarını işlevsel kılmak için uzuvların yanı sıra ayaklarda birer Kg lık, gövde de ise 10 Kg lık noktasal kütleler kullanıldı. Bu eklemelerle birlikte iki-ayak robotun toplam ağırlığı 15 Kg civarındadır.

4.3. Benzetim Senaryosu

Oluşturulan model ile çömelme, ayak sallama, sıçrama gibi hareketler incelenebilir. Bu çalışmada iki-ayak robotun sıfır eğimli bir zeminde öne doğru yürüme hareketi incelenmiştir. Yürümeyi tanımlayan çok sayıda değişken olduğu için yürüme senaryoları da çok çeşitli olabilir. Burada sabit adım boyu ve yüksekliği için en kısa adım süresini belirlemeye yönelik bir senaryo geliştirilmiştir.

Başlama anında ayaklar arasında yürüme doğrultusunda adım boyu kadar açıklık vardır. Yürüme esnasında öndeki ayak basan ayak olacaktır ve referans eksen takımını barındırmaktadır. Gövde, öndeki ayağın üzerinde durmaktadır. Şekil xxx te ilk durum şartları listelenmiştir.

Tablo 4.2: İlk Durum Şartları

	İlk Durum Konumları (x, y, z)(mm)
Ön Ayak	0, 0, 0
Arka Ayak	-250, 0, 0
Gövde	0, 0, 900

Yürümenin başlaması ile birlikte arkadaki ayak önceden tanımlanmış yörünge doğrultusunda harekete geçer, öyle ki 250 mm geriden başlayıp 250 mm öne geçecektir ve bu esnada adım yüksekliği en fazla 50 mm olacaktır. Basan ayağın kaymasını ve iki-ayak robotun dengesinin bozulmasını önlemek için yere temas anında hızı ve ivmesi sıfır olacaktır. Gövde de, ilk etapta TDF'nda iken dengeyi sağlayacak şekilde hareket edecek, salınan ayağın yere bastığı andan itibaren devreye

giren ÇDF kontrolörü sayesinde, adım sonunda öndeki ayağın 900 mm üzerinde yer alacaktır.

4.4. Sonuçlar

Tasarlanan sistemin performansını değerlendirmek için çok farklı kriterler seçilebilir. Değişken olarak bu senaryoda ÇDF'na ve TDF'na ayrılan süreler seçilmiştir. Böylece dengeli olarak ne kadar hızlı yürüyebildiği belirlenmiştir. Bu amaçla Tablo 4.3'te listelendiği gibi faz sürelerine çapraz değerler atanmıştır. Tabloda Yatay ekseninde ÇDF'nda harcadığı zaman düşey ekseninde ise TDF'nda harcadığı zaman görülmektedir. Robotun yürüdüğü durumlar Y, düştüğü durumlar ise D ile belirtilirken toplam adım süresi de belirtilmiştir. Başarılı yürüme için 10 adım atması şart koşulmuştur.

Tablo 4.3: İki-Ayak Robotun Yürüdüğü ve Düştüğü Durumlar

		Çift Destek Fazı						
Tek Destek Fazı	Saniye	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
	0.3	D, 0.6	D, 0.9	D, 1.2	Y, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	Y, 2.4
	0.6	D, 0.9	D, 1.2	Y, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	Y, 2.4	Y, 2.7
	0.9	D, 1.2	D, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	D, 2.4	Y, 2.7	Y, 3.0
	1.2	D, 1.5	Y, 1.8	Y, 2.1	Y, 2.4	Y, 2.7	Y, 3.0	Y, 3.3
	1.5	D, 1.8	Y, 2.1	D, 2.4	D, 2.7	Y, 3.0	Y, 3.3	Y, 3.6
	1.8	D, 2.1	D, 2.4	Y, 2.7	D, 3.0	Y, 3.3	Y, 3.6	D, 3.9
	2.1	D, 2.4	D, 2.7	Y, 3.0	Y, 3.3	Y, 3.6	Y, 3.9	Y, 4.2

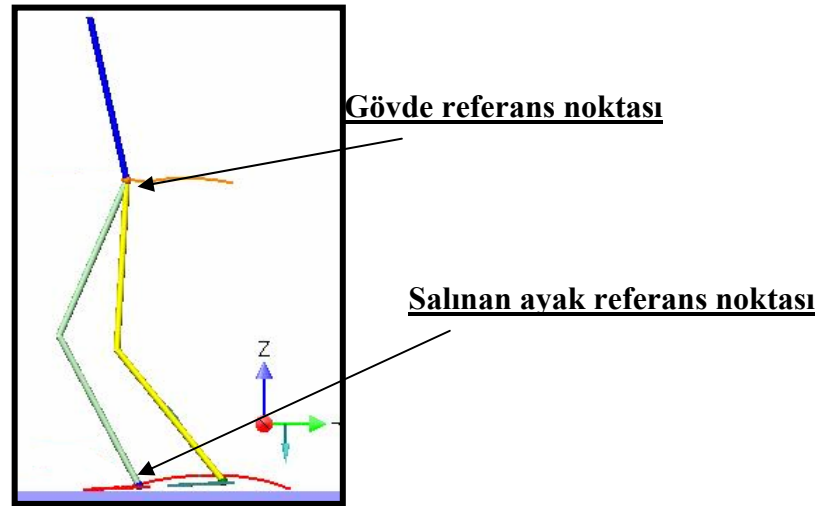
Tablo 4.3'den görüldüğü üzere iki-ayak robot 49 denemenin 18'inde düşmüş, 31'inde ise yürümüştür. Düştüğü durumların hepsi aynı sebepten değildir ve iki ayrı grup altında toplanabilir.

Birinci gruptaki düşmeler ÇDF'nın yeterince uzun olmadığı durumlarda kaynaklanmaktadır. ÇDF'na ayrılan sürede iki-ayak robot kendini toparlayamamakta ve düşmektedir.

Lakin adım süresini oldukça uzun olduğu durumlarda da düşme görülebilmektedir. Örneğin 3.9 saniye gibi oldukça yavaş bir yürüme hızında da iki-ayak robotun düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni ÇDF denetleyicisinin dinamik etkileri ihmal ederek hesapladığı gövde yörüngesinin bazı hızlarda dengeyi bozacak şekilde oluşmasıdır. Oluşturulan yörünge sadece var olan durumları, olması gereken son durumlara taşıdığı için yörüngenin ara noktalarında gerçekleşemeyecek durumlar oluşabilmektedir. Örneğin gövdenin erişim uzayı dışına çıkıldığı durumlar da ters kinematik çözüm gerçekleştirilemediğinden iki-ayak robot kontrolden çıkıp düşmektedir. Sıradaki başlıkta iki-ayak robotun düştüğü ve yürüdüğü durumlar ayrıntılandırılmıştır.

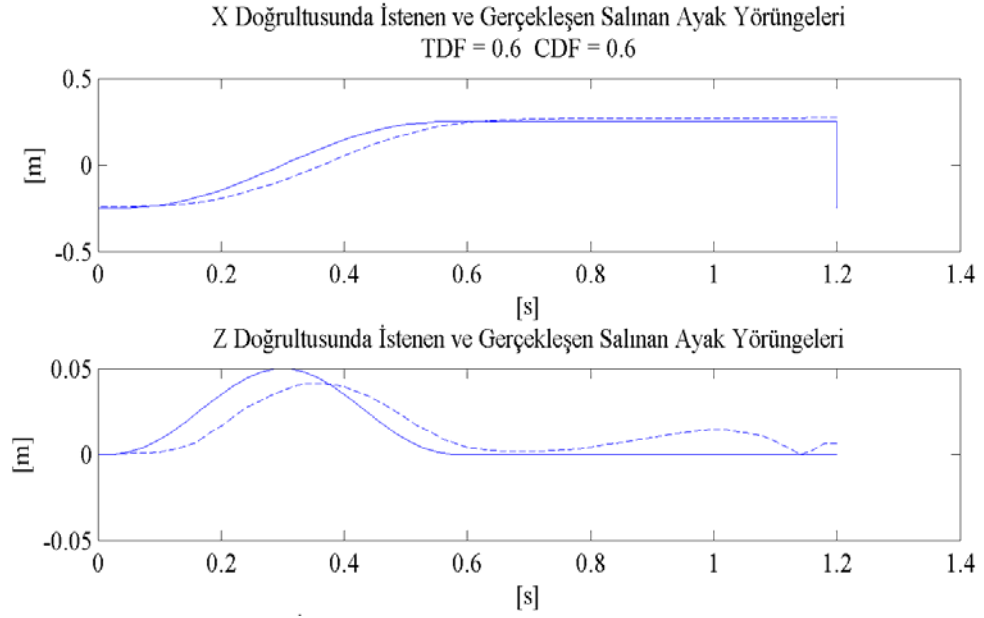
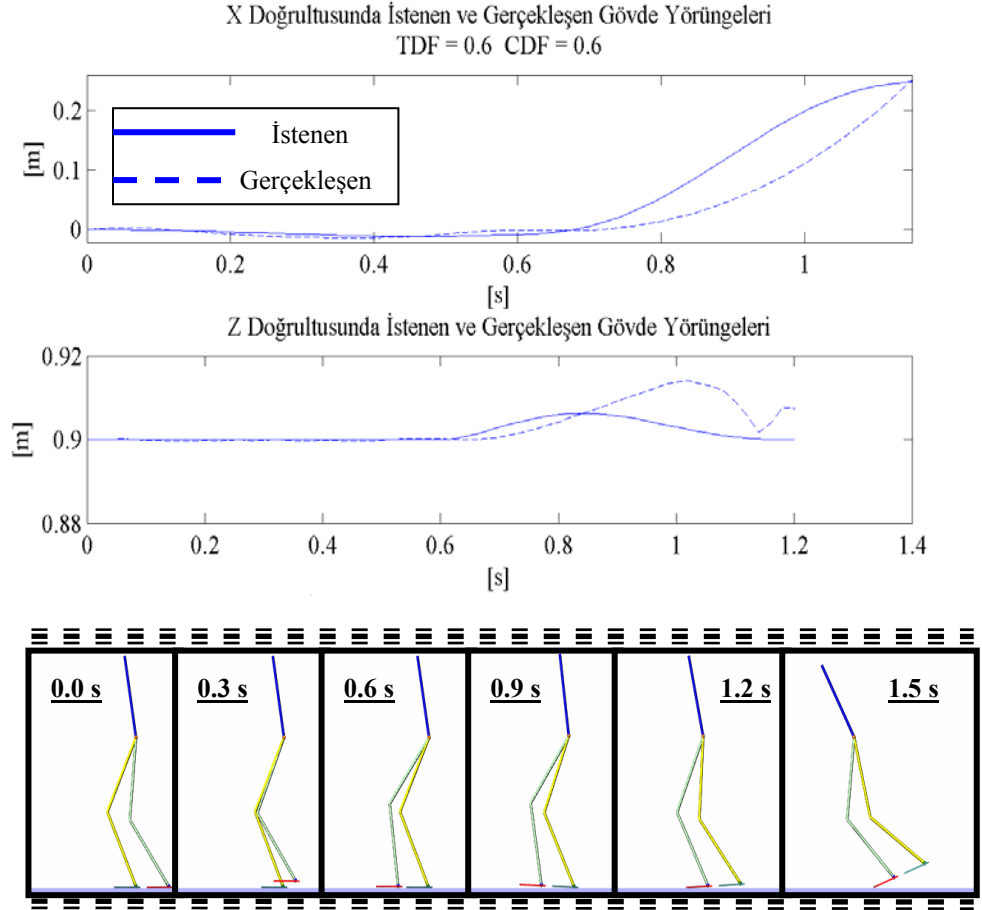
4.4.1 Analiz

İki-ayak robot tasarımında en temel problemin dengeleme olduğu aşikârdır. İki-ayak robotu düşürmeden dengeli yürütebilmek için neden düştüğünü iyi anlayabilmek gerekir. Bu amaçla yapılan denemelerde düştüğü durumlar daha ayrıntılı bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır. Şekil 4.5'da Gövde ve salınan ayak referans noktaları gösterilmiştir. Düştüğü durumlara örnek olarak TDF'nin 0.6s ve ÇDF'nin 0.6s olduğu senaryo seçilebilir.



Şekil 4.5 : Gövde ve Salınan Ayak Referans Noktaları

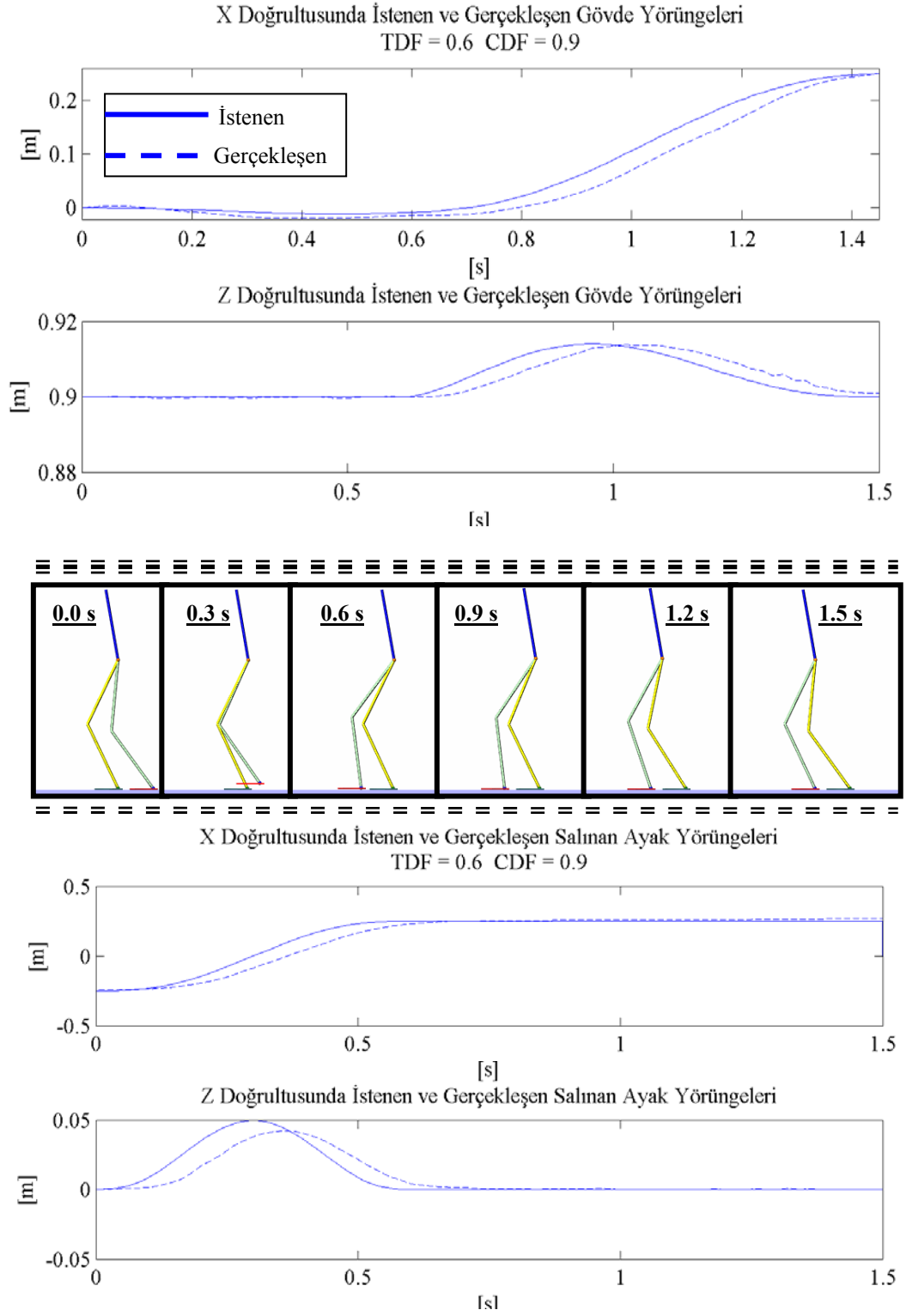
4.3 numaralı bölümde ayrıntılandırıldığı gibi, salınım boyu 500 mm adım yüksekliği 50 mm olacak şekilde, salınan ayak için yürüme doğrultusu X'te ve düşey düzlem Z'de referans yörüngeler oluşturuldu. TDF kontrolörü salınan ayak yukarıda betimlenen hareketi yaparken iki-ayak robotun düşmesini engelleyecek bir şekilde gövde referans noktası için yörünge oluşturdu. Salınan ayağın zeminle temasıyla birlikte başlayan ÇDF'nda ise iki-ayak robotun gövdesi için uygun yatay ve düşey yörüngeler oluşturularak yeni bir adım atabilmesi için gerekli başlangıç şartları sağlandı. Şekil 4.6'da TDF'nın 0.6s ÇDF'nın 0.6s olduğu durum gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : TDF 0.6s, ÇDF 0.6s

Şekil 4.6'da Üstteki iki grafikte gövde için istenen ve gerçekleşen yörüngeler, alttaki iki grafikte ise salınan ayak için istenen ve gerçekleşen yörüngeler çizildi. Düz çizgiler ile belirtilen yörüngeler MATLAB ve Simulink ortamında oluşturulup Visual NASTRAN altındaki iki ayak robota gönderilen istenen yörüngelerdir. Kesikli çizgiler ise Visual NASTRAN altında gerçekleşen dinamik benzetim sonucunda ölçülmüş gövde ve ayak yörüngeleridir. Başlangıç anında istenen ve gerçekleşen durumları gösteren çizgiler çakışmaktadır. Özellikle TDF süresince oluşturulan referans yörüngeler sistemin dinamiğini de hesaba katarak oluşturulduğu için gerçekleşen yörüngeler ile örtüşmektedir. 0.6 s boyunca süren TDF'nda hata; istenen ve gerçekleşen arasındaki fark oldukça azdır. Hata 0.6'cı saniyeden sonra başlamakta ve gövde yörüngesi referans yörüngeyi takip etmemektedir. Ayak düşey yörüngesinden de görüldüğü üzere 1. saniye civarında salınan ayak tekrar yerden yükselmekte ve iki-ayak robot düşmektedir. Bu andan sonra hareketsiz olduğu kabulüyle referans eksen takımını barındıran basan ayak ta kayarak ve ön kenarı çevresinde dönerek harekete geçtiğinden ölçümler niteliğini yitirmektedir. Ancak basan ayağın hareketi dışarıdaki sabit bir referans eksen takımından ölçülüp gerekli dönüşümler yapıldıktan sonra bu ölçümler kullanılabilir. Bu durum İki-ayak robot için kapalı çevrim kontrolör tasarlamadaki güçlüğü de açıklamaktadır. Öyle ki, daha önce de belirtildiği gibi, sabit referans eksen takımına göre duyarlı ölçüm yapmak başlı başına bir tasarım problemidir. Bu sorunu bertaraf edebilmek için başvuru alan değişken referans eksen takımı yaklaşımı basan ayak hareketsiz olduğu sürece sistemi doğru betimlemektedir. Bu şartın sağlanabilmesi için ÇDF'nın yeterince uzun sürmesi dolayısıyla iki-ayak robotun yavaş hareket etmesi gerekmektedir.

Şekil 4.7'de ÇDF'nın 0.3 s. daha uzun olduğu durum gösterilmektedir. TDF yine 0.6 s. sürmektedir. ÇDF ise 0.9 s. sürdüğünden oluşturulan geçiş yörüngesinde değişimler çok daha yumuşaktır. Gövde referans noktası daha yavaş hareket etmekte dolayısıyla ivmesi daha düşük olmaktadır. Şekil 4.7'de ki grafiklerden de görüldüğü üzere 1.5 s. sonra adım tamamlandığında istenen ve gerçekleşen durumlar çakışmakta ve iki-ayak robot sıradaki adımı atabilir duruma gelmektedir.



Şekil 4.7 : TDF 0.6 s ÇCDF 0.9 s

5. ÖNERİLER VE İYİLEŞTİRMELER

Bu tez kapsamında iki-ayak robotun düşey düzlemde denge problemi ele alınarak çözüm önerisi getirildi. Öncelikle tasarlanan kontrolörün üzerinde sınanabileceği sanal ortamda mekanik bir model oluşturuldu. Daha sonra bu modeli kontrolör içerisinde betimleyecek matematiksel model olarak "üç cisim yaklaşımı" seçildi. Üç kütle yaklaşımı sadece tek destek fazında iken uygulanabildiğinden, çift destek fazı için ayrı bir kontrolör tasarımı yapılarak bu iki kontrolörün ardışık devreye girdiği hibrit bir mimari oluşturuldu. Yapılan denemeler sonucunda oldukça önemli deneyimler elde edildi. En başta gelenlerini şöyle sıralamak mümkündür.

İki-ayak robotlarda en temel problem sistemi doğru betimleyecek bir matematiksel modeldir. Öyle ki, ilk denemelerde, herhangi bir basitleştirmeye gitmeden iki ayak robotun, Lagrange enerji metodu kullanılarak, dinamik denklemleri elde edilmişti. Bu denklemler ortalama 50000 terimden oluşmaktadır ve gerçek zamanlı bir uygulamada çözülebilmelerinin mümkün değildir. Çok kütleli sistemlerin sembolik formda matematiksel modellerini elde etmeyi amaçlayan yazılımlarda benzer sonuçlar rapor edildiği görülmüştür [36]. Modeli basitleştirmek adına literatür taraması yapıldığında, üç cisim yaklaşımı tercih edildi. Bu seçimdeki en büyük etken yöntemin gerçek bir robot üzerinde sınanmış olmasıydı. Lakin yapılan benzetimlerde sınırlı bir aralıkta başarılı yürüme gerçekleştirilebildiği görüldü ve çözüm olarak ÇDF kontrolörü yöntemine başvuruldu. Sonuç olarak iki-ayak robot tasarımında temel problem, "Gerçek zamanlı hesaplamaya olanak sağlayacak kadar basit sistemi doğru tanımlayacak kadar da kapsamlı" bir matematiksel model kurmaktır.

Her türlü işlemi sanal ortamda yapmak birçok sorunu beraberinde getirmektedir. Örneğin sanal ortamda salınan ayağın yerle temasıyla birlikte iki-ayak robot'ta bir salınım oluşmakta ve basan ayağın kaymasına sebep olmaktadır. Bu problemi

özebilmek için salınan ayak yörüngesini 5. ve 6. mertebeden polinomlarla ifade ederek ayağın yere çok yavaş temas etmesi sağlanmıştır. Lakin ayağın yere çok yavaş temas ettirilmeye çalışılması eklemlerde çok daha fazla tork ihtiyacı doğurmuş benzetim sonuçlarının işlevselliğini daraltmıştır. Oysaki deneme platformu olarak kullanılacak gerçek bir iki-ayak robot üzerinde, ayaklara esnek kauçuk malzeme giydirmek çözüm olarak denenebilir. İkinci bir çözüm önerisi de benzetimlerin gerçek zamanlı esnek malzemelerin temasını da hesaplayabilecek donanımı barındıran bir bilgisayar üzerinde yapılmasıdır.

Sonuç olarak, bu çalışma yapılırken yukarıda birkaç örneği verildiği gibi birçok sorunla karşılaşmış ve bu sorunlar mümkün olduğunca işlevsel, gerçekleştirilebilir bir şekilde çözülmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçların daha kapsamlı çalışmalara katkı sağlayabilmesi bu çalışmayı amacına kavuşturacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.androidworld.com/> ,Mart 2006
- [2] **Ozan A.**, 2004, Biped Locomotion Control via Hybrid Position Control and Gravity Compensation Modes, Istanbul.
- [3] **Bebek Ö.**, 2003, A Study on Automatic Gait Parameter Tuning for Biped Walking Robots, Istanbul.
- [4] **Bebek Ö., Erbatur K., Kurt O.**, 2005, İki Bacaklı Yürüyen Robotlarda Bulanık Mantıklı Yürüyüş Biçimi, İstanbul.
- [5] **Sugihara T.**, 2004, Mobility Enhancement Control of Humanoid Robot based on Reaction Force Manipulation via Whole Body Motion, Netherlands.
- [6] **Kanniah J., Lwin N., Kumar D., Fatt N.**, 2004, A 'ZMP' Management scheme for trajectory control of biped robots using a three mass model, Singapore
- [7] **Kaptı, A. O.**, 2001, İnsan Alt Ekstremitesinin İncelenmesi ve Aktif Diz Üstü Protezi Tasarımı, İstanbul
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Biped>, Mart 2006.
- [9] **Zonfrilli F.**, 2004, Theoretical and Experimental Issues in Biped Walking Control Based on Passive Dynamics, Italia.
- [10] **Vukobratovic M.**, 1975, Legged Locomotion Robots and Anthropomorphic Mechanism, Belgrade
- [11] **Vukobratovic M., Borovac B.**, 2004, Zero Moment Point, Thirty Five Years of Its Life, Belgrade.
- [12] **McGeer T.**,1990, Passive dynamic walking, The International Journal of Robotics Research, Australia.
- [13] **Formel, A.M.**, 1999, Ballistic Locomotion of a Biped, Design and control of two biped machines, Moscow.
- [14] **Vermeulen J.**, 2004, Trajectory Generation for Planar Hopping and Walking Robots: An Objective Parameter and Angular Momentum Approach, Brussels
- [15] **Vukobratovic M., Borovac B., Surla D.**, 1990, Biped locomotion : dynamics, stability, control, Berlin

- [16] **Kajita S., Kanehiro F., Kaneko K., Fujiwara K., Harada K, Yokoi K., Hirukawa I.**,2003, Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point. Japan
- [17] **Kanniah J., Lwin N., Kumar D., Fatt N.**, 2004, A‘ZMP’ Management scheme for trajectory control of biped robots using a three mass model, Singapore
- [18] **Wahde M., Pettersson J.**, 2002, A Brief Review Of Bipedal Robotics Research, Sweden
- [19] **Kulvanit P., Laowattana D.**, 2000, Critical Issues for Biped Mechanism in achieving Dynamically Stable Legged Locomotion, Thailand.
- [20] **Pickel A.**, 2003, Control for a Biped Robot with Minimal Number of Actuators, Australia.
- [21] **Choong E., Chew M., Poo A., Hong G.**, 2003, Mechanical Design of an anthropomorphic Bipedal Robot, Singapore
- [22] **Hardt M., Strky O., Design**, 2000, Design of an Autonomous Fast-Walking Humanoid Robot, Germany.
- [23] **Wyeth G, Kee D., Wagstaff M., Brewer N., Stirzaker J.**, 2003, Design of an Autonomous Humanoid Robot, Australia.
- [24] **Hyeon P.**, 2002., Fuzzy-logic zero-moment-point trajectory generation for reduced trunk motions of biped robots, South Korea.
- [25] **Quinghua L.**, 1998, A Biped Walking Robot Having A ZMP Measurement System Using Universal Force-Moment Sensors, Japan.
- [26] **Nakaura S.**, 2002, Balance Control Analysis of Humanoid Robot based on ZMP Feedback Control, Switzerland.
- [27] **Tomomichi S., Nakamura Y.**, 2003, Real-time Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control, Tokyo.
- [28] **Tomomichi S., Nakamura, Y.**, 2005, Whole-body Cooperative COG Control through ZMP Manipulation for Humanoid Robots, Japan
- [29] **C.C.Kang C. C.**, 2000, Trajectory Planning for 7-link Biped Robot, Malaysia.
- [30] **Seok J., Won S.**, 2005, Real-time Trajectory Adaptation for a Biped Robot with Varying Load, Korea
- [31] **Sugihara T.**,2004 Mobility Enhancement Control of Humanoid Robot based on Reaction Force Manipulation via Whole Body Motion, Japan
- [32] **Wollherr D., Michael H.**, 2002, Actuator Selection and Hardware Realization of a Small and Fast-Moving Autonomous Humanoid Robot, Switzerland.

- [33] **Tang Z., Zhou C.**,2003, Trajectory Planning for Smooth Transition of a Biped Robot China.
- [34] **Mojon S.**, 2003, Realization of a Physic Simulation for a Biped Robot, Australia.
- [35] **Haavisto O., Hyötyniemi H.**, 2004, Simulation Tool of a Biped Walking Robot Model, Germany.
- [36] **Samin J., Fiset P.**, 2003, Symbolic modeling of Multibody systems

EKLER

EK-A

Üçüncü bölümde ayrıntılı bir biçimde açıklandığı üzere iki-ayak robot tek destek fazındayken üç cisim yaklaşımına göre matematiksel olarak modellenmiştir. Sistemin davranışını betimleyen matematiksel denklemler simulink ortamında çözülmektedir.

$$G_x(\ddot{G}_z + g)m_G + A_x(\ddot{A}_z + g)m_A - \ddot{G}_x m_G G_z - \ddot{A}_x m_A A_z = 0 \quad \text{A.1}$$

$$\dot{G}_x^2 + G_x \ddot{G}_x + \dot{G}_z^2 + G_z \ddot{G}_z = 0 \quad \text{A.2}$$

A.1 ve A.2 diferansiyel denklemlerinden gövdenin x ve z doğrultusundaki kinematik değişkenleri çözülmektedir. A.1 denklemindeki katsayılar aşağıdaki gibidir.

$$m_G = 10Kg \quad \text{A.3}$$

$$m_A = 1Kg \quad \text{A.4}$$

$$A_x(t) = a_x t^5 + b_x t^4 + c_x t^3 + d_x t^2 + e_x t + f_x \quad \text{A.5}$$

$$\ddot{A}_x(t) = \frac{d^2 A_x(t)}{dt^2} \quad \text{A.6}$$

$$A_z(t) = a_z t^6 + b_z t^5 + c_z t^4 + d_z t^3 + e_z^2 t + f_z t + g_z \quad \text{A.7}$$

$$\ddot{A}_z(t) = \frac{d^2 A_z(t)}{dt^2}$$

A.8

Ayak yörünge polinomlarının katsayıları 3.5.1 numaralı bölümde ayrıntılı bir biçimde açıklandığı üzere Matlab ortamında hesaplanarak Simulink'e aktarılmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İstanbul'da doğdu. 1997 yılında İTÜ Meteoroloji mühendisliği bölümüne girdi. 2000 yılında aynı üniversitede Uzay mühendisliği programına yatay geçiş yaptı. 2003 yılında Bitirme çalışması olarak, "3 Boyutlu Modelleme Cihazı" tasarlayarak başarı ile mezun oldu. Aynı yıl İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sistem Dinamiği ve Kontrol programına başladı. 2005 yılında değişim öğrencisi olarak 6 ay Eindhoven Teknik Üniversitesi, Hollanda'da eğitim gördü. 2006 yılında Sistem Dinamiği ve Kontrol programını başarı ile tamamladı.