İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSI ROBOTLARIN TÜM VÜCUT KİNEMATİK VE DİNAMİK MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ

Emre SARIYILDIZ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

OCAK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSI ROBOTLARIN TÜM VÜCUT KİNEMATİK VE DİNAMİK MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ

Emre SARIYILDIZ
(504092101)

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ

OCAK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504092101 numaralı Doktora Öğrencisi Emre SARIYILDIZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "İNSANSI ROBOTLARIN TÜM VÜCUT KİNEMATİK VE DİNAMİK MODELLENMESİ VE KONTROLÜ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Sıddık Murat YEŞİLOĞLU**.....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erhan AKDOĞAN .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Gülay ÖKE GÜNEL .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Dilek BİLGİN TÜKEL .....
Doğuş Üniversitesi

Teslim Tarihi : **18 Aralık 2015**
Savunma Tarihi : **20 Ocak 2016**

Aileme ve Dostlarıma,

ÖNSÖZ

Bu tez Şubat 2010 ve Aralık 2015 tarihleri arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon mühendisliği bölümünde bulunan robot araştırmaları labaratuarında Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ'ın danışmanlığında gerçekleştirdiğim çalışmalarımın sonuçlarını sunmaktadır. Umarım bu tez ülkemizde robot alanında çalışmakta olan araştırmacılara yardımcı olup yeni fikirler üretmelerine ufakta olsa bir katkı sağlar.

İlk olarak bu tezde bana danışmanlık yapan Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ'a tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Hem yüksek lisans hem de doktora çalışmalarım boyunca inandığım yolda ilerlemem konusunda beni koşulsuz olarak desteklemesi akademik özgüvenimin gelişmesini sağladı. Ayrıca çalışmalarım boyunca gerek mühendislik tecrübelerinden yararlanma gerekse de insani ve ahlaki değerlerini örnek alma şansına sahip oldum. Danışmanlığı altında yaptığım çalışmalarda edindiğim tecrübelerin akademik hayatım boyunca karşılacağım problemlerin çözümünde bana her zaman yol göstereceğine inanıyorum.

Tez ilerleme jürimde bulunan İstanbul Teknik Üniversitesinden Yrd. Doç. Dr. Sıddık Murat YEŞİLOĞLU ve Yıldız Teknik Üniversitesinden Doç. Dr. Erhan AKDOĞAN'a tez çalışmalarıma yaptıkları katkılardan dolayı teşekkürlerimi sunuyorum. Tez ilerleme sunumlarımdaki değerli yorumları ve tavsiyeleri sayesinde karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmem çok daha kolay oldu.

İstanbul Teknik Üniversitesinden Ar. Gör. Dr. Mustafa Seçkin DURMUŞ ve Ar. Gör. Kemal UÇAK'a tez çalışmalarım boyunca bana gösterdikleri koşulsuz hoşgörü ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

Bosch Siemens'de bilgi teknolojileri mühendisliği yapan Murat Ufuk HÜRUFUK ve Vodafone'da bilgi teknolojileri mühendisliği yapan Fatih SEYMEN'e bu zorlu süreçte her zaman yanımda oldukları ve dostluklarını gösterdikleri için teşekkürlerimi sunuyorum.

Hem yüksek lisans hem de doktora çalışmalarım boyunca beni maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunuyorum. TÜBİTAK'ın maddi desteklerinin ülkemizin bilim kültürünü ve bilimsel başarılarını önemli bir şekilde geliştirerek ilerlettiğine inanıyor ve bu desteklerin artarak daha çok araştırmacıya ulaşabilmesini tüm kalbimle diliyorum.

Son olarak tüm hayatım boyunca beni yalnız bırakmayan ve bugünlere gelmemde çok emeği bulunan aileme: rahmetli babam Ayhan SARIYILDIZ, sevgili annem Saniye SARIYILDIZ, sevgili ağbim Hakan SARIYILDIZ ve sevgili ablam Şerefnur Tülay SARIYILDIZ'a içtenlikle teşekkürlerimi sunuyorum.

Ocak 2016 Emre SARIYILDIZ
(Yüksek Mekatronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 3
1.2 Temel Kavramlar 4
1.3 Literatür Araştırması 5
1.4 İnsansı Robot Çalışmalarındaki Temel Motivasyon Kaynakları 8
1.5 İnsansı Robotların Modellenmesindeki Temel Zorluklar 8
1.6 İnsansı Robotların Kontrolündeki Temel Zorluklar 9
1.7 Problemin Tanımı ve Bilimsel Katkılar 11
1.8 Gelecek Çalışmaları 13
1.9 Tezin İçeriği 14
2. GÖZETLEYİCİ TABANLI HAREKET KONTROLÜ **15**
2.1 Bozucu Gözetleyici 15
2.2 Tepki Kuvvet Gözetleyicisi 16
2.3 Dayanıklı Pozisyon ve Kuvvet Kontrolü 17
2.4 Dayanıklı Hibrit ve Komplayns Hareket Kontrolörleri 18
3. İNSANSI ROBOTLARIN TÜM VÜCUT DİNAMİK MODELİ **21**
3.1 İnsansı Robotların Kapalı Form Genel Dinamik Modeli 21
3.1.1 Genelleştirilmiş Newton-Euler algoritması kullanılarak dinamik modelin elde edilmesi 23
3.1.2 Analitik yaklaşım tabanlı dinamik modelin elde edilmesi 28
3.2 Zemin Kontak Modeli 31
3.3 Simülasyon Sonuçları 32
4. İNSANSI ROBOTLARIN ALT VÜCUT KONTROLÜ **37**
4.1 Statik Yürüme 37
4.2 Dinamik Yürüme 38
4.2.1 Sıfır moment noktası (SMN) 39
4.2.2 Engebeli yüzeylerde SMN kullanılarak dinamik yürüme probleminin çözülmesi 45
4.3 İki Bacaklı Yürüyen Bir Mekanizmanın Kontrolü 47
4.3.1 İki bacaklı yürüyen mekanizmanın kinematik analizi 48
4.3.2 Simülasyon sonuçları 51
5. İNSANSI ROBOTLARIN TÜM VÜCUT KONTROLÜ **57**
5.1 İnsansı Robotun Yapısı 59

5.2 Serbest Hareket Kontrolü 60
5.3 Kısıtlı Hareket Kontrolü 64
5.4 Çift Taraflı Kontrol 69
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 79
KAYNAKLAR 83
ÖZGEÇMİŞ 91

KISALTMALAR

BG : Bozucu Gözetleyici
ÇTHK : Çift Taraflı Hareket Kontorolü
EU : Eklem Uzayı
İK : İleri Kinematik
KKK : Kayan Kipli Kontrol
MU : Model Uzayı
MUBG : Model Uzayı Bozucu Gözetliyicisi
MUD : Model Uzayı Dönüşümü
SG : Sanal Gerçeklik
SMN : Sıfır Moment Noktası
SSMN : Sanal Sıfır Moment Noktası
TKG : Tepki Kuvvet Gözetleyicisi
UU : Uygulama Uzayı
YSA : Yapay Sinir Ağları
2-SDK : İki Serbestlik Dereceli Kontrol
4K_ÇTHK : Dört Kanallı Çift Taraflı Hareket Kontrolörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Ülkelere göre insansı robot çalışmaları 7
Çizelge 4.1 : Robot parametreleri 48
Çizelge 4.2 : Tek bir bacak için tasarlanan D-H tablosu 48

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tek ve çift destek faz evreleri 4
Şekil 1.2 : Tez bölümlerini gösteren blok şema 14
Şekil 2.1 : Bozucu gözetleyici blok şeması. 15
Şekil 2.2 : Tepki kuvvet gözetleyicisinin blok şeması. 16
Şekil 2.3 : Dayanıklı pozisyon kontrolörünün blok şeması. 17
Şekil 2.4 : Dayanıklı kuvvet kontrolörünün blok şeması. 18
Şekil 2.5 : Dayanıklı hibrit hareket kontorlörünün blok şeması. 19
Şekil 2.6 : Dayanıklı komplayns hareket kontrolörünün blok şeması şeması. 19
Şekil 3.1 : İnsansı robotlar için genel bir gösterim. 22
Şekil 3.2 : Zemin kontak modeli. 32
Şekil 3.3 : İki bacaklı robotun kütle merkez kontrolü simülasyonu (ön düzlem)..... 33
Şekil 3.4 : İki bacaklı robotun kütle merkez kontrolü simülasyonu (yan düzlem).... 34
Şekil 3.5 : Serbest ayak yörüngesi ve kütle merkezinin kontrol sonuçları. 35
Şekil 4.1 : Çift ve tek destek faz evrelerinde destek düzlemleri 38
Şekil 4.2 : Zeminden ayağa uygulanan tepki kuvvetleri 39
Şekil 4.3 : Tek destek faz evresini gösteren genel bir insansı robot şekli 41
Şekil 4.4 : Ters sarkaç benzetiminin iki boyutta gösterimi 43
Şekil 4.5 : İki ayaklı yürümede tek ve çift destek faz evreleri 44
Şekil 4.6 : İnsansı robotun engebeli yüzeyde denge kararlılığını koruyarak yürümesi 46
Şekil 4.7 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın mekanik yapısı 47
Şekil 4.8 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın eklemlerinin koordinat sistemleri 49
Şekil 4.9 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın statik yürüme sonuçları 52
Şekil 4.10 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın dinamik yürüme sonuçları 53
Şekil 4.11 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın SMN simulasyon sonuçları 54
Şekil 4.12 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın engebeli yüzeyde yürüme sonuçları 55
Şekil 4.13 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın engebeli yüzeyde yürürken kütle merkez kontrolünün sonuçları 56
Şekil 5.1 : Simülasyonlarda kullanılan robotun yapısı 60
Şekil 5.2 : İnsansı robotun bir düzlem üzerinde yürümesini ve yürürken sağ elini sallamasını gerçekleştirdiği simülasyon sonuçları 61
Şekil 5.3 : İnsansı robotun sağ elini sallaması uygulamasında kullanılan el yörüngesi kontrol sonuçları 62
Şekil 5.4 : Dikey eksen doğrultusundaki moment kontrolü 64
Şekil 5.5 : İnsansı robotun bilinmenyen bir nesneye dokunma simülasyonu 65
Şekil 5.6 : Güvenli ve güvenli olmayan kontak kontrolü simülasyon sonuçları 66
Şekil 5.7 : İnsansı robotun el ve ayak noktalarına göre belirlenen destek düzlemi ... 67
Şekil 5.8 : İnsansı robotun hareket ettirilemeyen bir nesne ile kontak hareketi 69
Şekil 5.9 : İnsansı robotun hareket ettirilebilir bir nesne ile kontak hareketi 70
Şekil 5.10 : Geleneksel dört kanallı çift taraflı kontrolörün blok şeması 72

Şekil 5.11 : Önerilen dört kanallı çift taraflı kontrolörün blok şeması 74
Şekil 5.12 : Geleneksel çift taraflı kontrol yapısı kullanılarak insansı robotun kontrol edilmesi 76
Şekil 5.13 : Önerilen çift taraflı kontrol yapısı kullanılarak insansı robotun kontrol edilmesi 77
Şekil 5.14 : Önerilen çift taraflı kontrol yapısı kullanıldığında elde edilen pozisyon ve kuvvet kontrol sonuçları 78

İNSANSI ROBOTLARIN TÜM VÜCUT KİNEMATİK VE DİNAMİK MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

ÖZET

Yetmişli yılların başlarından itibaren insansı robotların mühendislik alanındaki araştırmaları artan bir ilgiyle devam etmektedir. Temel olarak insansı robotların insanların günlük yaşamlarına dahil olup yaşam kalitelerini arttırmaları beklenmektedir. İnsansı robotların talep edilmesindeki en önemli unsur mekanik yapılarından kaynaklı olan yüksek hareket kabiliyeti kapasiteleridir. İnsansı robotlar insanların günlük yaşam uygulamalarını gerçekleştirmede kullanılabilecek en uygun mekanizmalardan bir tanesi olarak kabul edilmektedir.

İnsansı robotlar mekanik yapılarından dolayı oldukça yüksek hareket kabiliyetine sahip olsalarda mevcut insansı robotlar bu kabiliyetin çok az bir kısmını kullanabilmektedirler. İnsan hareketlerinin iyi bir şekilde anlaşılamamış olması ve basitleştirilmiş model ve kontrolörlerin kullanılması insansı robotların hareket yeteneklerini kısıtlayan başlıca etmenlerdir. Bu tezde insansı robotların hareket yeteneklerinin geliştirilmesi hedeflenmişitir. Bunun için insansı robotların tüm vücut dinamik modeli elde edilmiş ve insanların günlük yaşamlarında yaptıkları davranışları gerçekleştirebilmelerini sağlayacak gelişmiş kontrolörler tasarlanmıştır.

Bu tez 6 bölümden oluşmaktadır. Her bir bölümün içeriği aşağıda açıklanmaktadır.

İlk bölümde tez ile ilgili temel kavramlar açıklanmış, tezin amacı ve motivasyon kaynakları belirtilmiş, literatür özeti verilmiş, problemin tanımı yapılarak önerilen çözümler açıklanmıştır.

İkinci bölümde insansı robotların kontrolünde kullanılan kontrolörler açıklanmıştır. Bu tezde bozucu gözetleyici tabanlı kontrolörler dayanıklı kontrolün ve sensörsüz kuvvet kontrolünün elde edilmeleri için kullanılmıştır.

Üçüncü bölümde insansı robotların tüm vücut dinamik modeli elde edilmiştir. Tüm vücut dinamik model elde edilirken kayan nokta dinamiği kullanılmıştır. Geleneksel dinamik modellere kıyasla kayan nokta dinamiği tabanlı yaklaşımın temel avantajı insansı robotlar için sürekli yapıya sahip bir dinamik modelin elde edilebilmesine olanak sağlamasıdır. Bu bölümde dinamik model nümerik ve analitik tabanlı iki farklı yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Elde edlen dinamik model ve MATLAB'ın sanal gerçeklik araç kutusu (Virtual Reality Toolbox) kullanılılarak yeni bir simülatör tasarlanmıştır.

Dördüncü bölümde insansı robotların alt vücut kontrolü üzerinde durulmuştur. Alt vücut kontrol uygulamalarında iki bacaklı yürüyen bir mekanizma kullanılmıştır. İki bacaklı robot statik ve dinamik yürüme algoritmaları kullanılarak kontrol edilmiş ve tasarlanan simülatör kullanılarak benzetim sonuçları sunulmuştur. Ayrıca iki bacaklı robotun engebeli bir yüzeyde dinamik yürüme kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Beşinci bölümde insansı robotların tüm vücut kontrolü üzerinde durulmuştur. Üst vücut kontrolü serbest ve kısıtlı hareket kontrolleri olmak üzere iki temel bölümde incelenmiştir. Serbest hareket kontrolünde robot kolları çevre ile etkileşime girmezken kısıtlı hareket kontrolünde robot kolları bir nesne ile temas halindedir. Serbest hareket kontrolünde robot kolları için bağımsız yörüngeler tasarlanmıştır. Robot kollarının yörüngeleri kullanılarak dinamik yürümenin kararlılığı iyileştirilmiştir. Kısıtlı hareket kontrolünde robotun bilinmeyen bir nesne ile etkileşime girmesi incelenmiştir. Güvenli kontak kontrolü ve bilinmeyen bir nesnenin ittirilmesi ile ilgili simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İnsansı robotların hareket kabiliyetlerini insanların hareket yeteneklerini kullanarak arttırmak için çift taraflı kontrol yapısı önerilmiştir. Bir çok farklı uygulamada kullanılabilecek iki farklı çift taraflı kontrol yapısı sunulmuştur.

Altıncı bölümde sonuçlar ve öneriler verilmektedir.

WHOLE BODY KINEMATIC AND DYNAMIC MODEL AND CONTROL OF HUMANOID ROBOTS

SUMMARY

Humanoid robots are one of the most popular research topics in the robotic society since their mechanisms have high capabilities to perform dexterous and versatile tasks in human environments. With the improving computer technology in the early of 70s, humanoid robots have been extensively studied due to their several superiorities such as adaptation abilities to human environments and performing tasks that people can do and even tasks that people are unable to do. Humanoid robots have high potentials to improve the quailty of humans' lives, e.g., they can be used to take care of kids and/or old people and perform tasks in a hazardous environment, in which humans are not willing to work, such as Fukushima Nuclear Plant and Soma mine pit. The main motivations behind the humanoid researches can be stated as follows: against wheel and caterpillar, humanoid robots can locomote in a discontinous terrain efficiently; the mechanisms of humanoid robots are very suitable to perform general tasks in human environments; it can be implemented into several different fields such as military and entertainment; psychological factors in human-robot interaction and so on. Besides, humanoid researches provide deep insight into the nature of humans' motions which can be used to design new mechanisms that can help humans, e.g., human support systems are used to improve the motion skills of old and/or disabled people.

Although humanoid robots have high capabilities to perform complex tasks in human environments and there are several motivation sources, which are explained above, behind the humanoid researches, the existing ones are still far away from being a part of our daily life due to some challenging issues such as safety. Humanoid robots should be able to adapt to unknown environments to perform dexterous and versatile tasks in human environments. For instance, humanoid robots are generally walked on even terrains; however, human environments include uneven terrains as well.

Bipedal locomotion has been widely studied in humanoid researches; however, upper body control of humanoid robots is as important as lower body control to perform humans' daily life activities. For instance, holding a glass of water, showing a direction, and pushing an object require upper body motion control. Therefore, not only the lower body control but also the upper body control should be studied to improve the versatility of humanoid robots.

In this dissertation, whole body dynamic model and control of humanoid robots are studied to perform dexterous tasks in human environments. The exact dyanmic model of a humanoid robot is derived by using floating point base dynamics. A new simulator is designed by using the derived whole body dynamic model and Virtual Reality Toolbox of MATLAB. Several different control tasks, in which a humaonid robot works in an unknown open environment, are conducted by using the proposed simulator.

This dissertation includes six chapters. The organization of the dissertation is as follows:

In the first chapter, the introdcution of the dissertation is given. A literature review is provided for bipedal locomotion and humanoid researches. The main motivation of humanoid researches and the demerits of existing humanoid robots are explained in detail. The problem definition and the contribution of the dissertation – improving the dexterity and versatility of humanoid robots by analyzing the dynamic characteristics of humans' motions and designing advanced controllers- are explained clearly. The fundamental concepts of bipedal locomotion and humanoid robots are explained.

In the second chapter, advanced motion control methods, which are used in the whole body control of humanoid robots, are briefly explained. Disturbance observer is used to achieve high performance robust motion control systems. Disturbance observer estimates external disturbances as well as system uncertainties, and the robustness of a motion control system is simply achieved by feeding back the estimated disturbances. If system uncertainties are substracted from the input of a disturbance observer, then external disturbances can be estimated, i.e., disturbance observer works as a force sensor. Force sensorless force control is significantly important in humanoid applications since there may be several contact points on a humanoid robot in contact motion. However, although joint space forces/torques can be easily estimated by using a disturbance observer, contact points should be known *a priori* to control operational space forces. A compliance motion control system is used to treat impact force when swing foot contact to floor. The compliance control is very important for the balance of humanoid robots. If it is not used, then robot may directly tip over due to the impact forces at sole. A hybrid motion control system is also proposed to achieve contact motion control in the upper body of humanoid robot.

In chapter three, the dynamic model of a humanoid robot, which has floating point base dynamics, is derived by using two different methods. The floating point base dynamics is used so that the continous dynamic model of a humanoid robot is derived. In the first method, the dynamic model is numerically derived by using generalized Newton-Euler algorithm. Although the dynamic model is systematically derived, it does not give deep insight into the dynamic characteristics of humanoid robots. In the second method, the fundmentals of floating point base dynamics are considered and the dynamic model is analytically derived. It provides better insight, yet Coriolis and centrifugal forces cannot be derived.

In chapter four, lower body control of humanoid robots is considered by analyzing a two legged bipedal mechanism. For the sake of simplicity rotational motion about yaw axis is ignored. Static and dynamic walking simulations of the two legged bipedal mechanism are given by using the proposed simulator. It is shown that the speed of bipedal locomotion can be increased by using dynamic walking. Zero moment point (ZMP) is used to achieve the balance in dynamic locomotion. ZMP is widely used to generate stable dynamic walking pattern on even terrain. However, humanoid robots should be able to walk on uneven terrains to adapt human environment. Virtual ZMP and virtual support polygon are used so that the two legged bipedal mechanism can dynamically walk on an uneven terrain. The main disadvantage of the virtual ZMP is that the uneven terrain should be known to

determine virtual support polygon. Therefore the applications of virtual ZMP is limited.

In chapter five, whole body motion control of humanoid robots is studied. The whole body motion control of a humanoid robot consists of lower and upper body control systems. The lower body control is studied in chapter 4. In this chapter, two different states of the upper body control, namely free and contact motion control, are considered. In the free motion control, robot arms do not contact any object and position controllers are designed so that they follow predetermined trajectories. By keeping arm accelerations low, upper and lower body controllers of a humanoid robot can be idependantly designed. It is shown that a humanoid robot can perform free motion tasks and keep its balance by using the propopsed controllers. In the contact motion control, the robot arms contact to unknown environment. To achieve contact motion, hybrid controllers are conducted in the upper body control. The stability of humanoid robot is significantly influenced by the stability of contact motion. If the impact force is high and/or the stability of contact motion is low, then the humanoid robot may direclty tip over. In order to improve the stability of humanoid robots, safe contact motion control should be achieved by improving the adaptibility of humanoid robots. However, designing a high performance humanoid robot that can adapt unknown open environment is not an easy task. A bilateral control system, in which humans' skills can be transferred to humanoid robots, is implemented in the control of humanoid robots so that the adaptibility is improved. Two different bilateral control systems are implemented in the control of humanoid robots. Several different dexterous and versatile applications can be performed by using the proposed control methods.

The dissertation ends with conclusion and discussion given in the sixth chapter.

1. GİRİŞ

Günümüzde insansı robotlar gerek üniversiteler gerekse de özel firmaların araştırma geliştirme bölümlerinde, büyük ölçekli projelerle başlıca Japonya olmak üzere birçok ülkede yaygın bir şekilde araştırılmaktadır. İnsansı robotların temel avantajları: tekerlek, palet vb. hareket sistemlerine sahip robotlara göre hareket yeteneklerinin sürekli olmayan ortamlarda daha yüksek olması; insanlar için tasarlanan dış ortamlarda hareket etmeye daha uygun olmaları; insan robot etkileşiminde ki psikolojik faktörler; tıp, askeriye, eğlence gibi farklı birçok alanda uygulama imkânı bulunması olarak sıralanabilir. Ayrıca insansı robotların, tasarlanan diğer robot sistemlerine göre, insanlar tarafından daha cazip bulundukları da yadsınamaz bir gerçektir. İnsansı robotlar mühendislik, tıp, psikoloji gibi farklı alanlarda çalışmalarını sürdüren araştırmacıları bir araya getiren ortak bir araştırma konusudur.

İnsansı robotlar insanların yapabildiği ve hatta insanların yeteneklerinin yetersiz kaldığı hareketleri gerçekleştirme kapasitesine sahiptirler. Fakat günümüz insansı robotları, bazı temel basit hareketler dışında, insanların günlük davranışlarını gerçekleştirmenin çok gerisindedirler. Örneğin engebeli bir zeminde yürüme/koşma veya insan ve bilinmeyen çevreyle etkileşime geçerek temel insan davranışlarını gerçekleştirmek günümüzde hala araştırılmaya devam eden temel problemlerdir.

İnsansı robotların hareketlerini alt ve üst vücut hareketleri olmak üzere temel olarak iki bölümde inceleyebiliriz. Alt vücut hareket çalışmalarında insansı robotların dengeli bir şekilde yürüme ve koşma problemleri ele alınır. Üst vücudu olmayan birçok iki bacaklı robot mekanizması kullanılarak bu problem üzerine çalışılmalar gerçekleştirilmiştir. Üst vücut hareket çalışmalarında ise insansı robotların kol ve vücudunu kullanarak daha dengeli yürümesi ve çevre ile etkileşime geçerek bazı görevleri gerçekleştirmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Yürüme problemi, insansı robotların gerçekleştirilmesinde mühendislik alanında karşılaşılan en önemli problemlerden bir tanesidir. İnsansı robotlarda yürüme problemi, literatürde iki bacaklı yürüme (bipedal locomotion) olarak adlandırılır. İki

bacaklı yürüme probleminde, mühendislik alanında karşılaşılan temel başlıca problemler: robot mekanizmasının yüksek serbestlik derecesine sahip olması ve bu nedenle analiz ve kontrolör tasarımının zor olması; iki bacaklı yürümede sabit bir noktanın olmaması ve robotta direk kontrol edilemeyen, dolaylı olarak kontrol edilebilen, bir hareket noktasının bulunması (underactuation); robotun kinematik analizinin tek bir kapalı formda elde edilememesi olarak sıralanabilir. Gerek mühendislik alanındaki problemlerin zor ve ilginç olması gerekse de insansı robotların yukarıda bahsedilen avantajları mühendislik alanında birçok araştırmacıyı iki bacaklı yürüme problemini çözmeye sevk etmiştir. Bu güne kadar literatürde iki bacaklı yürüme problemini çözmek için çok çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları geleneksel robot analizi ve kontrolü yaklaşımlarını kullanırken bazıları da yapay sinir ağları (YSA) ya da pasif-dinamik yürüme gibi yöntemler kullanarak yürüme problemine farklı çözümler sunmuşlardır. Bu yöntemlerle ilgili temel bilgiler sonraki bölümlerde verilmektedir. İki bacaklı yürümede en sık kullanılan yöntemlerden bir tanesi robotun denge kararlılık kriteri olarak kullanılan sıfır moment noktasıdır (SMN). SMN literatürde robotun kararlılık kriteri olarak da adlandırılmasına rağmen, kontrol teorisinde ki kararlılık kavramından tamamen farklıdır. Bu nedenle, herhangi bir anlam karmaşasına neden olmamak için, bu tezde SMN kararlılık kriteri kavramı yerine iki bacaklı robotun düşmeden yürümesi için gerekli olan denge kararlılık kriteri kavramı kullanılarak ifade edilecektir.

Literatürde üst vücut hareketleri üzerine yapılan çalışmalar alt vücut hareketleri üzerine yapılanlardan daha az olmasına karşın, insansı robotların hareket yeteneklerini arttırmada üst vücut hareketleri de en az alt vücut hareketleri kadar önemlidir. İnsanlar günlük davranışlarını gerçekleştirirken aktif olarak dört uzvunu kullanarak çevre ile etkileşime geçerler. Örneğin su içmek için bir bardak suyu tutarken ya da bir nesnenin yerini değiştirmek için nesneyi ittirirken üst vücut hareketlerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra ilerleyen bölümlerde gösterileceği üzere, üst vücut hareketleri insansı robotların denge kararlılıklarının arttırılmasında da önemli bir etkiye sahiptirler. Bu nedenlerden dolayı, daha yüksek hareket kabiliyetine sahip insansı robotların elde edilmesi için tüm vücut hareket kontrolü üzerine yapılan çalışmaların arttırılması gerekmektedir.

Bu doktora tezinde insansı robotların tüm vücut dinamik modellemesi ve kontrolü üzerine araştırmalar yapılmıştır. İnsansı robotların dinamik modeli oldukça karmaşık

bir yapıya sahiptir ve bu nedenle kontrolör tasarımında kullanılmaları oldukça zordur. Fakat dinamik model tüm vücut hareketlerinin doğasının anlaşılmasını sağladığı için mühendislik açısından çok önemlidir. Ayrıca tüm vücut dinamik model incelenerek daha yüksek performanslı basitleştirilimiş kontrolörler tasarlamak ve kuvvet sensörsüz kuvvet kontrolü uygulamalarını gözetleyiciler kullanarak gerçekleştirmek mümkündür. Elde edilen dinamik model ve MATLAB'ın Sanal Gerçeklik Araç Kutusu (Virtual Reality Toolbox) kullanılarak yeni bir simülatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Simülatörler insansı robotlar gibi maliyeti çok yüksek olan araştırma alanlarında ucuz ve güvenli bir şekilde analiz ve tasarım yapmamıza olanak sağladıklarından dolayı mühendislikte çok önemli bir yere sahiptirler. Tasarlanan yeni simülatör üzerinde insansı robotların tüm vücut kontrolü için çeşitli algoritmalar gerçeklenmiştir.

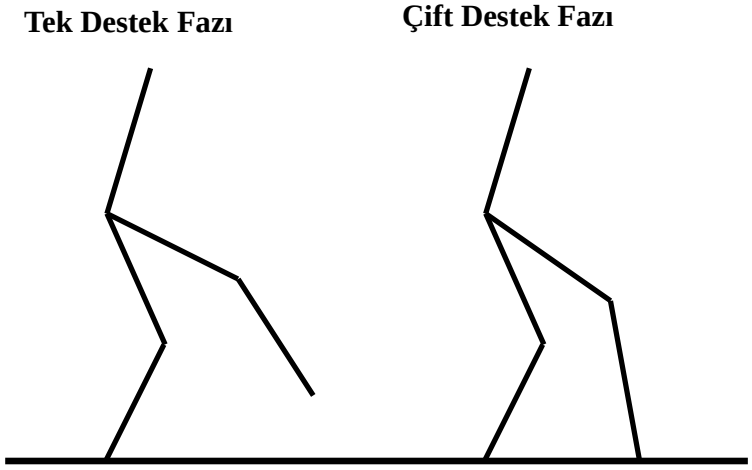
1.1 Tezin Amacı

Bu doktora tezinin temel amacı insansı robotların hareket yeteneklerini geliştirerek insanların günlük yaşamlarında yaptıkları daha karmaşık davranışları gerçekleştirmelerini sağlamaktır. Bu nedenle yalnız yürüme problemi değil, insansı robotların tüm vücut hareket kontrolü problemi ele alınmıştır. İnsansı robotlar çok karmaşık davranışları gerçekleştirebilecek kapasitelere sahip olmalarına karşın, literatürdeki mevcut örneklerin hareket kabiliyetleri oldukça düşüktür. Bu nedenle insansı robotların hareket yeteneklerinin geliştirilmesi üzerine çalışmaların yapılması gerekmektedir. İnsansı robot mekanizmalarının hareket denklemlerini anlamak onların hareket yeteneklerinin geliştirilmesinde çok önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle tez çalışmalarında insansı robotların dinamik modeli üzerine araştırmalar yapılmıştır. Dinamik modelin analitik yaklaşımla oluşturulması ve insansı robotların hareket denklemlerinin daha anaşılır bir şekilde ifade edilmesi hedeflenmiştir. Bu tezde insansı robotların, insanların günlük yaşamda yaptıkları engebeli ortamlarda yürüme ve bilinmeyen çevre ile etkileşime girme gibi, karmaşık hareketleri gerçekleştirmelerini sağlayacak gelişmiş kontrolörlerin tasarlanması hedeflenmiştir. Hareket kontrolörlerinin tasarımlarında dayanıklılıkk ve gerçeklenmelerindeki pratiklik dikkate alınmıştır. Dayanıklı hareket kontrolörleri bozucu gözetleyiciler kullanarak tasarlanmıştır. Uygulamalardaki avantajlarından dolayı robtoun çevre ile etkileşime girebilmesi için kuvvet sensörsüz kuvvet kontrol sistemleri önerilmiştir.

1.2 Temel Kavramlar

İnsansı robot araştırmalarında robotların geleneksel analiz ve tasarım yöntemleri - örneğin endüstriyel robotların dinamik ya da kinematik analizi ve kontrolü- yetersiz kalmaktadır. Bunun en temel nedeni insansı robotlarda sabit bir noktanın olmaması ve robotun hareket kontrolünün doğrudan yapılamamasıdır. Bu nedenle yürüyen robotlarla ilgili bazı temel kavramlar bu bölümde açıklanacaktır.

- **Kayan nokta dinamiği**: Endüstriyel robotların aksine, insansı robotlarda sabit bir nokta bulunmamaktadır. Bu nedenle insansı robotlar, mobil ve uzay robotları gibi, kayan nokta dinamiği kullanılarak analiz edilebilirler. Literatürde insansı robotlar için sabit nokta dinamiği kullanılarak sürekli olmayan dinmaik çözümler bulunsada, kayan nokta dinamiği insansı robotların haraketini daha doğal ve sürekli bir çözüm kullanarak ifade eder.
- **Tek ve çift destek faz evreleri**: İki bacaklı yürümede robotun yer ile teması analizlerde değişikliklere neden olur. Örneğin, robotun bir ayağı yerde diğer ayağı havada iken (tek destek faz evresi) robot açık kinematik analiz ile incelenebilirken, her iki ayağın yerde olduğu evrede (çift faz evresi) robot kapalı kinematik analizi ile incelenebilir [1]. Bu iki destek faz evresi şekil 1.1 de gösterilmektedir. Her iki fazda robota etkiyen dış kuvvetler (zemin tepki kuvvetleri) farklı olduğundan dinamik modellemede bunlar göz önünde bulundurulmalıdırlar [2 ve 3].
- **Statik ve dinamik yürüme:** Eğer robotun ağırlık merkezinin yere olan izdüşümü her zaman robotun destek düzleminde kalarak yürüme gerçek-



Şekil 1.1 : Tek ve çift destek faz evreleri.

leştiriliyorsa buna statik yürüme; eğer robotun ağırlık merkezinin yere olan izdüşümü destek düzleminin dışına çıkartılarak yürüme gerçekleştiriliyorsa buna dinamik yürüme denir [4 ve 5]. Çift destek faz evresinde destek düzlemi iki ayak tabanı ve bu iki ayak tabanı arasında kalan alanı belirtirken, tek destek faz evresinde destek düzlemi yerle temas eden ayağın tabanını belirtir. Statik yürümede, robotun hareketini herhangi bir anda durdursak bile robot devrilmez. Bu nedenle statik yürümede denge çok iyi bir şekilde sağlanır. Fakat bu denge düşük hızlarda ve büyük enerjiler harcanarak elde edilebilir. Bu nedenle araştırmalar dinamik yürüme üzerine yoğunlaşmıştır.

- **Sıfır moment noktası (SMN):** Sıfır moment noktası M. Vukobratovic tarafından bulunmuş iki bacaklı robotların dinamik yürüme probleminin çözümünde çok sık kullanılan bir denge kararlılık kriteridir. Zeminden ayağa aynı yönde etkiyen tüm kuvvetleri ele alıp bu kuvvetlerin bileşkesini tek bir noktada elde edelim. Bu toplam tepki kuvvetinin uygulandığı notaya baskı kuvvetlerinin merkezi ya da literatürde bilindiği üzere sıfır moment noktası (SMN), "Zero moment Point" (ZMP), adı verilir [6-8].
- **Doğrusal ters sarkaç model yakalşımı:** SMN'nin elde edilmesinde çok sık kullanılan, karmaşık insansı robot dinamiğinin basitleştirilmesini sağlayan bir yakaşımdır. Bu yaklaşımda karmaşık insansı robot dinamiğinin yerine doğrusal ters sarkaç modeli kullanılır. Böylece SMN için analitik çözümler elde edilebilir. Basitleştirilmiş çözümlerin literatürde çok sık kullanılmalarına karşın bu çözümler genel olarak insansı robotların performaslarını düşürürler.
- **Üst ve alt vücut kontrolleri:** Bu tezde üst vücut kontrolü insansı robotların gövde ve kollarının kontrolü, alt vücut kontrolü ise dengeli yürüme algoritmalarının geliştirilmelerini belirtmek için kullanılmıştır.
- **Çift taraflı kontrol (Bilateral Control):** İnsan yeteneklerinin insansı robotlara aktarılmasını sağlamak amacıyla yönetenin (master) insan yönetilenin (slave) ise insansı robot olduğu, yönetenin pozisyon ve kuvvet referanslarının yönetilende gerçeklendiği kontrol yapısıdır [9 ve 10].

1.3 Literatür Araştırması

İnsansı robotlar üzerine literatürde çok çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, mühendislik, psikoloji, tıp gibi alanları bir araya getiren çok kapsamlı ve

çok amaçlı projeleri içermektedir. İnsanı robotların gerçekleştirilmesinde iki bacaklı yürüme problemi mühendislik alanında karşılaşılan en zorlu problemlerden bir tanesidir. Bu bölümde, insansı robotlar ve iki bacaklı yürüme problemi üzerine yapılan literatür çalışmalarının geniş bir özeti verilmektedir.

Geçtiğimiz 30-40 yıllık sürede – gelişen teknoloji ile birlikte – insansı robotlar üzerine mühendislik alanında çok önemli çalışmalar yapılmıştır [11, 12, 13, 14 ve 15]. İnsansı robotların son 20-30 yıl içinde oldukça popüler olmalarına karşın, onlar üzerine yapılan çalışmalar çok daha eski tarihlere dayanmaktadır. İlk insansı mekanizmalar 12. ve 15. yüzyıllarda El Ceziri ve Leonardo da Vinci tarafından tasarlanmıştır [16 ve 17]. Bu mekanizmalar oturma, kollarını hareket ettirme gibi insanların yaptığı temel bazı hareketleri gerçekleştirebilmekteydi [16 ve 17]. Daha sonrasında Jacques de Vaucanson 1738 yılında flüt ve tambur çalabilen bir mekanizmayı gerçekleştirdi [18]. Bu mekanizmaların temel özellikleri insanı taklit ederek tasarlanmalarıdır. 1921 yılında çek yazar Karel Capek yazdığı oyunda ilk olarak bu genel amaçlı mekanizmalar için robot ismini kullanmıştır [19].

Robotlarda yürüme probleminin en önemli isimlerinden bir tanesi Sırp mühendis Mimor Vukobratovictir. Vukobratovic, 70'li yıllarda, günümüzde de çok popüler olan ve çok sık kullanılan sıfır moment noktası (SMN) - yürüme problemi için dinamik denge kararlılık kriteri - fikrini bulan kişidir [20 ve 21]. Aynı dönemde, 1973 yılında, ilk iki ayaklı yürüyen robot (Wabot-1) Kato tarafından Waseda üniversitesinde gerçekleştirilmiştir [22, 23 ve 24]. Bu robot insansı robotlarda yürüme problemi için bir dönüm noktası olarak kabul edilebilir. Statik yürüme prensibine göre hareket ettiği için düşük yürüme hızına sahip olması ve çok fazla enerjiye ihtiyaç duymasına rağmen, 70'li yıllarda robot alanında gerçekleştirilen en önemli çalışmalardan bir tanesidir. Yine aynı dönemde Raighbert MIT bacak çalışamları labaratuvarında yürüme ve koşma problemlerine zıplama yaklaşımı ile çözüm üretmek için ilk zıplayan mekanizmayı gerçekleştirmiştir [25]. İlk SMN tabanlı dinamik yürüme uygulaması 1985 yılında Takanishi ve Kato tarafından yine Waseda üniversitesinde gerçekleştirilmiştir (WL-10RD) [26 ve 27]. SMN tabanlı dinamik yürümedeki bir diğer önemli gelişme ise Kajita tarafından 1991 yılında SMN denklemlerinin ters sarkaç dinamik model denklemeleri kullanılarak basitleştirilmesi ile elde edilmiştir [28]. Doksanlı yıllarda yürüme problemi ile ilgili bir diğer önemli gelişme ise McGeer tarafından önerilen pasif - dinamik yürüme ile

gerçekleştirilmiştir [29]. McGeer iki bacaklı yürüyen bir mekanizmayı aktif elemanlar kullanmadan tasarlamayı başarmıştır. Daha sonrasında pasif - dinamik yürüme ve aktif - pasif - dinamik yürüme üzerine çok çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Geçtiğimiz 10-20 yıl içinde insansı robotlar üzerine çok sayıda gelişmiş, büyük ölçekli projeler geçekleştirilmiştir. Bu projelerin içinde, en ünlü ve en gelişmiş olanlarından bir tanesi 2001 yılında Honda tarafından gerçekleştirilen ASIMO isimli insansı robottur [30]. ASIMO yürüme, koşma ve üst gövdede insanlara özgü temel hareketleri gerçekleştirebilen en gelişmiş robotlardan bir tanesidir. Bu robot ile ilgili elde edilebilen kısıtlı bilgiler bize SMN yaklaşımın bu robotta kullanıldığını ve SMN'nin gelecekte iki bacaklı yürüme için önemli bir araştırma konusu olmaya devam edeceğini göstermektedir [30]. Bunun yanı sıra son dönemde Boston Dynamics tarafından üretilen, kendi kendini dengeleyebilen PETMAN ve engebeli ortamlarda hareket kabiliyeti oldukça yüksek olan ATLAS robotları insansı robotlarda son gelinen ileri teknolojiyi göstermektedirler [13 ve 31]. Geçmişte yapılan ve günümüzde devam ettirilen çalışmalar insansı robotların literatürdeki önemini açık bir şekilde göstermektedir.

İnsansı robotlar - Japonya ağırlıklı olmak üzere - dünya üzerinde birçok ülkede araştırılmaktadır. Ülkemizde Sabancı üniversitesi mekatronik mühendisliği bölümünde SURALP isimli ilk insansı robot Kemalettin Erbatur tarafından tasarlanmıştır [32]. Çizelge 1.1 dünya üzerinde devam ettirilen insansı robot çalışmaları ile ilgili genel bir bilgi vemektedir [12 ve 13].

Çizelge 1.1 : Ülkelere göre insansı robot çalışmaları.

Ülke	Proje Sayısı
Japonya	49
Amerika	11
Kore	11
Almanya	9
Çin	7
İngiltere	4
İsveç	2
İran	2
Türkiye	1

Çizelge 1.1'den de görülebileceği üzere insansı robot çalışmalarında Japonya belirgin bir şekilde diğer ülkelere göre daha ileridedir. Bunun başlıca nedenleri,

Japon halkının kültürü ve Japonyanın genç nüfus azalışının en tehlikeli olduğu ülkelerden bir tanesi olmasıdır.

1.4 İnsansı Robot Çalışmalarındaki Temel Motivasyon Kaynakları

İnsansı robot çalışmaları çeşitli araştırma alanlarında farklı motivasyon kaynaklarıyla gerçekleştirilmektedir. Mühendislik alanındaki temel motivasyon kaynakları şu şekilde sıralanabilir:

- Mühendislik açısından oldukça zor bir problem olması.
- İnsan hareketlerinin dinamik karakterini anlamada insansı robotların çok önemli bir yer teşkil etmesi.
- İnsansı robotların sürekli olmayan ortamlardaki hareket yeteneklerinin yüksek olması.
- Dış ortamların, genel olarak, insanların fiziksel özelliklerine göre tasarlanmasından dolayı insansı robotların uyum sağlama yeteneklerinin yüksek olması.
- Rehabilitasyon robot uygulamaları için önemli bir altyapı oluşturması.
- Askeri ve eğlence gibi birçok uygulama alanına sahip olması.
- İnsan robot etkileşiminde ki psikolojik faktörler göz önüne alındığında insansı robotların en uygun mekanik tasarım olması.

Yukarıda verilen temel nedenlerden dolayı insansı robotlar ve iki bacaklı yürüme problemi mühendislik açısından çok önemlidir. Mühendisliğin yanı sıra, insan doğasını anlama, insan ve robot etkileşimindeki psikolojik faktörleri inceleme gibi konular tıbbın çeşitli alanlarında araştırmacılar tarafından incelenmektedir [33 ve 34].

1.5 İnsansı Robotların Modellenmesindeki Temel Zorluklar

- **Yüksek Serbestlik Derecesi:** İnsansı robotlar genel olarak yüksek serbestlik derecelerine sahip robot sistemleridir. Her bir bacak ve kolda tüm hareketleri gerçekleştirebilmek için en az altı serbestlik derecesi olması gerekir. Bu nedenle, insansı robotlar genel olarak en az 24 serbestlik derecesine sahiptirler. Bunun yanı sıra gövde ve boyunda da hareket elde etmek için ek serbestlik dereceleri bulunmaktadır. Bazı tasarımlarda, her bir uzuvda 7

serbestlik derecesi olmak üzere toplamda 28 serbestlik derecesi kullanılmaktadır. Yüksek serbestlik derecesi robotun analiz ve kontrolünde büyük zorluklar oluşturmaktadır [35 ve 36].

- **Değişen Kinematik Yapı:** İnsansı robotlarda harekete bağlı olarak değişen bir kinematik yapı mevcuttur. Bu kinematik yapı insansı robotun uzuvlarının dış ortamla etkileşimine göre değişmektedir. Bu nedenle her bir model arasındaki geçişin (farklı fazlar: tek destek fazı, çift destek fazı) sürekliliği problem oluşturmaktadır. İki bacaklı bir robot için, genel, tüm fazları kapsayacak bir kinematik model elde etmek mümkün değildir [37, 38 ve 39].
- **Zemin Tepki Kuvveti:** İki bacaklı yürümede zeminle ayak arasında robotun hareketlerine bağlı olarak değişen bir kontak model mevcuttur. Bu model doğrudan kontrol edilemediğinden iki bacaklı yürüme problemi için ayrı bir zorluk teşkil eder [40].

1.6 İnsansı Robotların Kontrolündeki Temel Zorluklar

İnsansı robotların hareket kontrolü temel olarak alt ve üst vücut hareket kontrolleri olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Alt vücut kontrolünde kullanılan kontrol yöntemleri temel olarak üç başlıkta incelenebilir. Bunlar, pasif-dinamik yürüme, yapay sinir ağları tabanlı yürüme ve yörünge planlama tabanlı yürüme kontrolleridir. Pasif dinamik yürüme 90'lı yıllarda McGeerin'in çalışmaları ile başlamış ve ardından birçok araştırmacı tarafından da devam ettirilmiştir [41, 42, 43, 44 ve 45]. Bu yaklaşımda aktif elemanların kullanılmaması robot hareketlerinin sınırlanmasına neden olmaktadır. Yapay sinir ağları (YSA), dinamik modeli oldukça karmaşık olan iki bacaklı robot sistemlerin kontrolünde kullanılan farklı bir yaklaşımdır. Bu yöntemde insan harektlerinin doğasından esinlenerek tasarlanan akıllı kontrolörler kullanılarak robota yürüme hareketinin öğretilmesi hedeflenmektedir. Literatürde YSA tabanlı dinamik yürüme üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [46, 47, 48, 49 ve 50]. Bu tezde yörünge planlama yaklaşımı kullanılacağından, ilerleyen bölümlerde bu yöntem üzerinde durulacaktır. Yörünge planlama yöntemi ismi ilk kez Kajita tarafından 2003 yılında kullanılmıştır [51]. Kajita, bir yörünge takip kontrolörü ve bir de sistem kararlılığını sağlayacak kontrolör tasarımı gerçekleştirerek yürüme problemi için bir çözüm önermiştir. Bu yöntemde robotun dengede yürümesini sağlayacak yörüngeler

önceden tasarlanır ve robotun bu yörüngeleri takip etmesi için gerekli eklem referansları robota uygulanır. Yörünge planlama tabanlı çalışmalardan, [52 ve 53]'de yörüngeleri önceden planlayıp açık çevrim kontrol kullanarak yürüme probleminin çözümü gerçekleştirilmiştir. Fakat bu çözümlerde geri besleme kullanılmadığı için robot modelindeki hatalar yörünge takibini önemli ölçüde etkilemektedir. Kajita ters sarkaç yaklaşımını kullanarak iki bacaklı robotun dinamik denklemini doğrusallaştırmış ve denge problemini çözmek için basit kontrolörler tasarlamayı başarmıştır [28]. Ters sarkaç modeli kullanılarak robotun SMN'i ve kütle merkezi arasında basit diferansiyel denklemler elde edilebilir. Bu diferansiyel denklemler nümerik olarak kolayca çözülebilir. Eğer robotun kütle merkezinin yüksekliği sabit kabul edilirse, diferansiyel denklemlerin analitik çözümleri de elde edilebilir. Böylece eğer robotun kütle merkezinin yörüngesi SMN denge kararlılık kriteri sağlanarak kontrol edilirse, karmaşık dinamik yürüme probleminin çözümü basit bir şekilde elde edilmiş olur. Ters sarkaç modeli üzerinde çok çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş ve robotun denge kontrolörü bu yöntem kullanılarak tasarlanıp birçok uygulamada başarılı sonuçlar elde edilmiştir [54, 55, 56]. Basitleştirilmiş ters sarkaç model yöntemi - dış ortam bilgileri kullanılmadığından - yalnızca düzlem üzerinde ki yürüme uygulamaları için denge kriteri olarak kullanılabilir. Bu nedenle önerilen bu çözüm dış ortamda ki bozuculara karşı çok hassastır. Literatürde dış ortamdaki bozucuları da göz önüne alarak yürüme problemini çözmek için çeşitli uygulamalar sunulmuş olmasına karşın bu problem hala çözülememiştir [57, 58, 59 ve 60].

Literatürde, üst vücut kontrol çalışmaları alt vücut kontrol çalışmalarına göre daha azdır [61 ve 62]. Bunun temel nedeni günümüzde hala yüksek performaslı kararlı dinamik yürüme probleminin çözülememiş olmasıdır. Fakat insansı robotların insanların yaşadığı ortamlarda çalışabilmeleri için üst vücut kontrolü en az alt vücut kontrolü kadar önemlidir [63-65]. İnsansı robotların hareket yeteneklerinin arttırılması için üst vücut uzuv yörüngelerinin robotun dengesini bozmayacak şekilde tasarlanması en temel üst vücut kontrol problemidir. Örneğin ileriki bölümlerde gösterileceği üzere üst vücut kontrolü robotun dinamik yürüme denge kararlığının arttırılmasında kullanılabilir ya da üst vücut kullanılarak insansı robotlar insanların günlük hayatta dış çevre ile etkileşime girerek yaptıkları işleri gerçekleştirebilirler. Fakat yüksek serbestlik derecelerine sahip insansı robotların yörüngelerinin bilinmeyen bir çevre için tasarlanması oldukça zor bir problemdir. İnsansı robotların

yeteneklerini arttırmak için robotun çevre ile güvenli bir şekilde etkileşime girmesi, hem çevreye zarar vermemesi hem de robotun kendisini koruması gerekmektedir. Bunun için insansı robotların bilinmeyen dış çevrede uyumlu bir şekilde çalışmalarını sağlayacak uyumlu kontrolörlerin ve dış çevreden gelen bozucu kuvvetler altında robotun dengede kalmasını sağlayacak dayanıklı kontrolörlerin tasarlanması gerekmektedir.

1.7 Problemin Tanımı ve Bilimsel Katkılar

İnsansı robotlar üzerine literatürde birçok çalışma yapılmasına karşın günümüzde varolan insansı robotlar yalnız labaratouar ortamlarında çalıştırılabilmektedir. Mevcut olan insansı robotlarla gerçekleştirilebilen hareketler kendi hareket yeteneklerinin çok altındadır. Bunun temel nedenleri arasında insansı robotların kontrolünde kullanılan basitleştirilmiş yaklaşımlar ve tüm vücut kontrolü üzerine yapılan çalışmaların eksikliği önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle insansı robotların hareketlerinin daha iyi anlaşılması ve tüm vücut hareket kontrolü üzerine daha detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada insansı robotların kayan nokta dinamik model tabanlı hareket denklemleri iki farklı yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Kayan nokta dinamik model kullanımının temel avantajları

- İnsansı robotların dinamik davranışlarının daha iyi bir şekilde anlaşılmasına olanak sağlaması
- Sürekli bir model kullanılarak insansı robotların dinamik davranışlarının ifade edilebilmesi

olarak sıralanabilir. Dinamik modelin elde edilmesinde genelleştirilmiş Newton-Euler nümerik yaklaşımı ve kayan nokta dinamiği tabanlı analitik çözümleme yöntemi kullanılmıştır. Genelleştirilmiş Newton-Euler nümerik yaklaşımında dinamik model sistematik olarak basit bir şekilde elde edilebilir. Fakat bu yöntemde insansı robotların dinamik davranışları hakkında bilgi edinmek oldukça güçtür. Kayan nokta dinamiği tabanlı analitik çözümde ise insansı robotların dinamik davranışları üzerine daha detaylı bilgi edinmek mümkündür.

Önerilen dinamik model ve MATLAB'ın Sanal Gerçeklik (SG) Araç kutusu kullanılarak yeni bir simülatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Simülatör insansı

robotlar gibi maliyeti yüksek olan projelerde güvenli ve ucuz bir şekilde analiz yapma ve kontrolör tasarlama imkânlarını sunmaktadır.

İnsansı robotların labaratuar ortamı dışında insanların günlük hayatta gerçekleştirdikleri karmaşık hareketleri yerine getirebilmeleri için yeni kontrolörler önerilen simülatör kullanılarak tasarlanmıştır. Engebeli yüzeylerde dinamik yürüme problemini çözmek için sanal sıfır moment noktası (SSMN) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem klasik SMN yönteminin engebeli yüzeylere uygulanması sonucunda basit bir şekilde elde edilebilir.

Alt vücut kontrolünün yanı sıra üst vücut kontrolü üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Dinamik yürümenin denge kararlılığını arttırmak için robot kollarının yörüngeleri dikey eksen doğrultusundaki momentlerin bastırılması ile elde edilmiştir. Robot kollarının doğal hareket etmesi için dikey eksenlerdeki momentler robot kollarının yanal düzlemdeki hareketleri ile bastırılmıştır. Serbest hareketin yanı sıra insansı robotların çevre ile etkileşimi - bir başka deyişle robot kollarının çevreye dokunma kontrol problemi - üst vücut kontrolünde ele alınmıştır. Dış kuvvetler gözetleyici kullanılarak kuvvet sensörü olmadan elde edilmiştir. Gözetleyici tabanlı kuvvet kestirminin insansı robot uygulamalarında maliyet açısından çok büyük avantajları vardır. Örneğin eğer insansı robotların çevre ile etkileşimi kontrol edilmek istenirse, vücutta dokunma noktalarına çok sayıda sensörün yerleştirilmesi gerekmektedir. Fakat bu problem gözetleyici kullanılarak basit bir şekilde çözülebilir. Gözetleyici kullanılarak eklem uzayında kuvvet kontrolünün yapılmabilmesine karşın, uygulama uzayında yapılacak kuvvet kontrolleri için robotun çevre ile etkileşime girdiği noktanın bilinmesi gerekmektedir.

Son olarak insansı robotların kontrolü için çift taraflı hareket kontrolü (ÇTHK) yapısı önerilmiştir. ÇTHK literatürde bilateral control olarak bilinmektedir. Bu tezde klasik kontrol yöntemleri kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmesine karşın gerçek uygulamalarda aynı sonuçları elde etmek her zaman için kolay olmayabilir. Bunun temel nedeni bilinmeyen bir çevreye uyum sağlayabilecek bir insansı robotun tasarımının oldukça zor bir problem olmasıdır. ÇTHK'nın temel avantajı insanların adaptasyon yeteneklerinin robotlara aktarılmasına olanak sağlamasıdır. Böylece insanların yeteneklerine sahip insansı robotları insanların çalışamayacağı ya da çalışmak istemeyeceği ortamlarda kullanmak mümkün olabilir. Bu tezde çift taraflı hareket kontrolörleri model uzayında tasarlanmışlardır. Model uzayında ki

kontrolörlerde hem eklem uzayı hem de uygulama uzayı değişkenleri kullanılarak iki farklı ÇTHK yöntemi önerilmiştir. İlk yöntem - geleneksel yöntem olarak da adlandırılabilir - oldukça basit bir şekilde tasarlanabilir ancak pratikte bazı uygulama sorunlarına neden olabilir. İkinci önerilen yöntemde çift taraflı hareket kontrol yapısı için çok büyük esneklik sağlanmaktadır. Bu nedenle bu tezde insansı robotların çift taraflı hareket kontrolü için model uzayında kontrolörlerin uygulama uzayı değişkenleri kullanılarak tasarlanması önerilmektedir.

Son dönemde DARPA tarafından gerçekleştirilen insansı robot yarışmalarında mevcut insansı robotların hareket yeteneklerinin oldukça sınırlı oldukları gözlemlenmiştir. Bu robotlar bilinmeyen bir çevrede insanların gündelik yaşamda gerçekleştirdikleri kapı açma, araba kullanma gibi birçok görevi tamamlamada başarısız olmuşlardır. Bu nedenle insansı robotların günlük hayatta kullanımları oldukça sınırlıdır. Örneğin Fukushima nükleer santralinde gerçekleşen kaza sonrasında santrale müdahale robotlar tarafından gerçekleştirilememiş ve birçok mühendisin hayatı bu nedenle tehlikeye atılmıştır. Eğer insanların adaptasyon yetenekleri insansı robotlara aktarılabilirse insansı robotlar bilinmiyen çevrelerde karmaşık görevleri basit bir şekilde gerçekleştirebilirler. Böylece Fukushima nükleer santrali gibi insanların çalışmaları için uygun olmayan ortamlarda belirli görevler insanların yetenekleri kullanılarak insansı robotlar tarafından basit bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu tezde önerilen çift taralı kontrol yapısı insansı robotların hareket yeteneklerini önemli bir şekilde geliştirmektedir. Birçok farklı uygulama önerilen kontrol yapısı kullanılarak pratikte gerçekleştirilebilir.

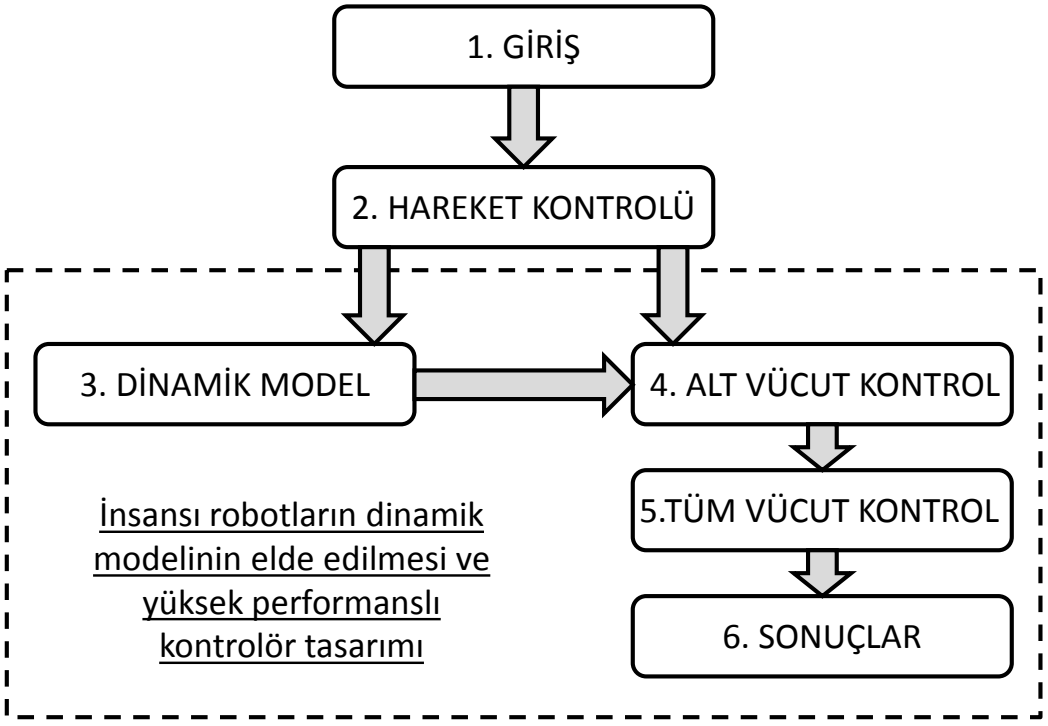
1.8 Gelecek Çalışmaları

Bu tezde insansı robotların bilinmeyen bir çevrede karmaşık görevleri yerine getirebilmelerini sağlayacak gelişmiş kontrolör yapıları önerilmiştir. Çift taraflı hareket kontrolünün insansı robotlar üzerinde çok çeşitli uygulama alanları vardır. Bu nedenle ileriki çalışmalarda önerilen kontrol yapılarının farklı uygulamalarda gerçeklenmesi hedeflenmiştir. İnsansı robotların yanı sıra önerilen kontrol yöntemi farklı robot uygulamalarında da kullanılabilir. Örneğin yönetenin tedavi uzmanı ve yönetilenin de hasta olduğu bir iyileştirme uygulması önerilen çift taraflı hareket kontrolü ile gerçekleştirilebilir. Pozisyon ve kuvvet kontrolleri sağlanarak hastanın eklemlerinde bulunan hastalıktan veya sakatlıktan kaynaklı empedans doğrudan aynı

eklemde tedavi uzmanına aktarılabilir. Tedavi uzmanının gerçekleştirdiği hareketler tedavi için hastaya doğrudan iletilerek konforlu bir tedavi uygulaması gerçekleştirilebilir.

1.9 Tezin İçeriği

Tezin bölümlerini gösteren akış diyagramı şekil 1.2'de verilmektedir. Bölüm 2'de gözetleyici tabanlı hareket kontrolörleri kısaca açıklanmıştır. Gözetleyici tabanlı hareket kontrolörü dayanıklı kontrolörlerin tasarlanmasında ve sensörsüz kuvvet kontrolünün elde edilmesinde kullanılmıştır. Bölüm 3'de insansı robotların dinamik denklemleri nümerik ve analitik yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Bölüm 4'de elde edilen dinamik model göz önünde bulundurularak insansı robotlar için yürüme problemi ele alınmış, engebeli ortamda yürüme algoritmaları geliştirilmiştir. Bölüm 5'de yürüme probleminin yanı sıra insansı robotların üst vücut kontrolü de ele alınmıştır. Hem serbest hem de kısıtlı hareket problemleri için yeni kontrolörler tasarlanmış ve önerilen çözümler yeni tasarlanan simülatör üzerinde gösterilmiştir. Bölüm 6' da tezin sonuçları sunulmaktadır.



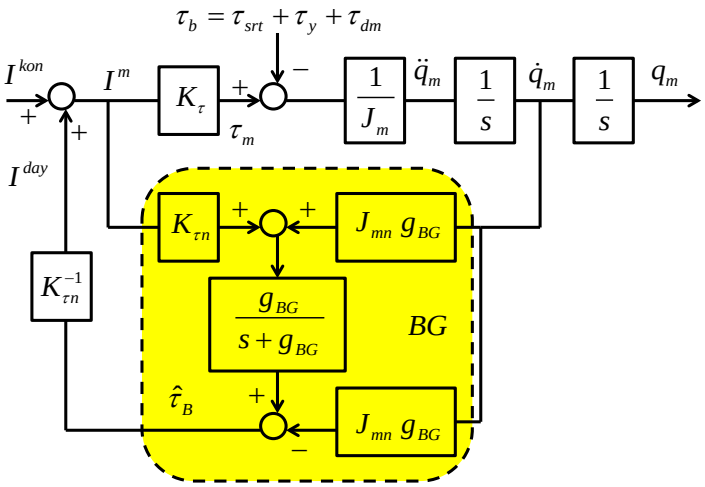
Şekil 1.2 : Tez bölümlerini gösteren blok şema.

2. GÖZETLEYİCİ TABANLI HARAKET KONTROLÜ

Bu bölümde gözetleyici tabanlı dayanıklı hareket kontrolörleri ve sensörsüz kuvvet kontrolü açıklanmaktadır. Bozucu gözetleyici (BG) yaklaşık 30 yıldır dayanıklı hareket kontrolörlerinin tasarımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [66]. Bozucu gözetleyiciler kullanılarak karmaşık matematiksel işlemlere ihtiyaç duyulmadan yüksek performanslı dayanıklı hareket kontrolörleri tasarlanabilir. Ayrıca bozucu gözetliyicler tepki kuvvetlerinin kestirminde de kullanılmaktadır. Böylece kuvvet sensörü kullanılmaksızın kuvvet kontrolü bozucu gözetliyiceler ile gerçekleştirilebilmektedir. Sensörsüz kuvvet kontrolünün insansı robotların uygulamalarında maliyetin düşürülmesi gibi birçok pratik avantajı vardır.

2.1 Bozucu Gözetleyici

Şekil 2.1' de bozucu gözetleyicinin blok şeması gösterilmektedir. Bu şekilde J_m ve J_{mn} gerçek ve nominal ataleti veya kütleyi; K_τ ve $K_{\tau n}$ gerçek ve nominal akım sabitini; τ_b ve $\hat{\tau}_B$ dış ve gözlemlenen bozucuları; τ_{srt}, τ_y ve τ_{dm} sırasıyla sürtünme, dış yük ve dinamik model bozucularını; g_{BG} bozucu gözetleyicinin bant genişliğini; $q_m, \dot{q}_m$ ve $\ddot{q}_m$ sırasıyla servo sistemin posizyon/açı, hız ve ivmesini; ve I^{kon} ve I^{day}

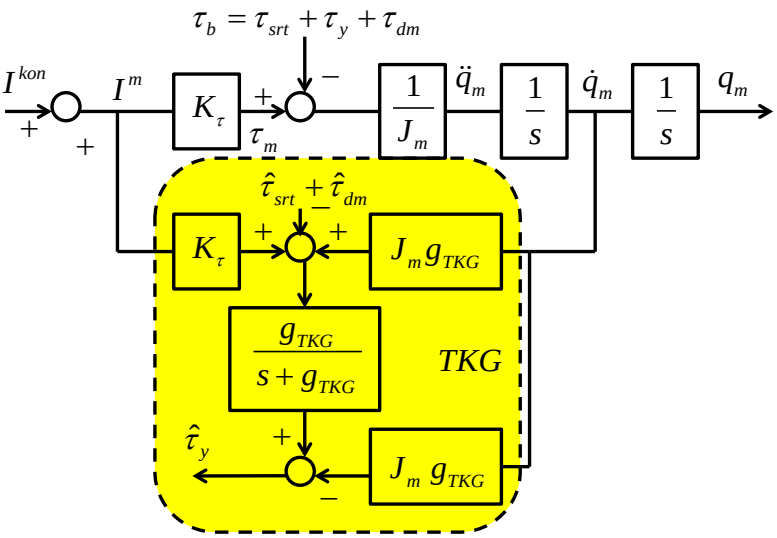


Şekil 2.1 : Bozucu gözetleyicinin blok şeması.

performans ve dayanıklı kontrol akımlarını belirtmektedir. Şekil 2.1'den görülebileceği üzere bozucu gözetleyici dış bozucuları ve sistem belirsizliklerini gözlemler. Dayanıklı kontrol gözlemlenen bozucuların sisteme geri beslenmesi ile basit bir şekilde elde edilir. Bozucu gözetleyicinin bant genişliği doğrudan sistemin dayanıklılığını ve performansını belirler. Gözetleyicinin bant genişliği arttıkça servo sistemin de dayanıklılığı artar. Fakat bant genişliği pratikte gürültü ve örnekleme zamanı gibi nedenlerden dolayı sınırlıdır [67].

2.2 Tepki Kuvvet Gözetleyicisi

Tepki kuvvey gözetleyecisinin blok şeması şekil 2.2'de gösterilmektedir. Bu şekilde $\hat{\tau}_{srt}$ ve $\hat{\tau}_{dm}$ modellenen sürtünme ve dinamik model bozucularını; $\hat{\tau}_y$ gözlemlenen dış tepki kuvvetini; ve g_{TKG} tepki kuvvet gözetleyicisinin bant genişliğini belirtmektedir. Diğer parametreler bozucu gözetleyicide açıklanan parametreler ile aynıdır. Tepki kuvvet gözetleyicsi ile bozucu gözetleycinin blok şemaları birbirlerine çok benzemektedir. Tek fark tepki kuvvet gözetleyicisinde sürtünme ve dinamik model bozucuları modellenerek bozucu gözetleyeciden çıkartılır. Böylece yalnız dış tepki kuvvetinin gözetlenmesi sağlanır. Bozucu ve teki kuvvet gözetleyicilerinin blok şemaları birbirne çok benzese de dinamik cevapları arasında farklılıklar bulunmaktadır [68 ve 69]. Tasarımda bu farklılıklara dikkat etmek servo sistemin kararlılığı ve performansı açısından önemlidir.



Şekil 2.2 : Tepki kuvvet gözetleyicisinin blok şeması.

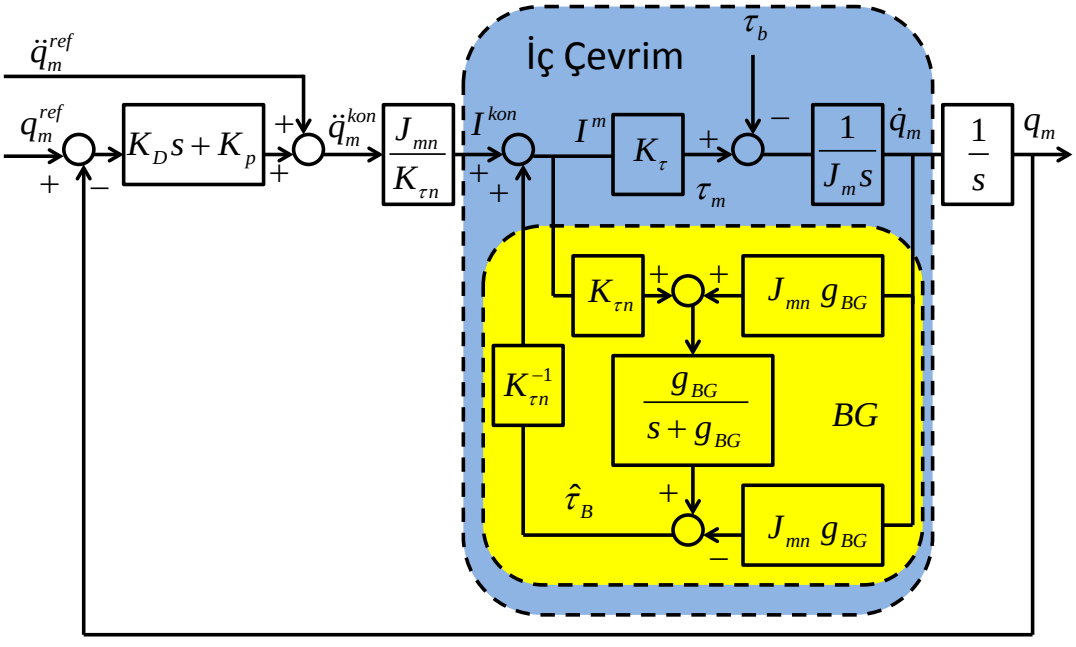
2.3 Dayanıklı Pozisyon ve Kuvvet Kontrolü

Dayanıklı pozisyon ve kuvvet kontrolörlerinin blok şemaları sırasıyla şekil 2.3 ve şekil 2.4'de gösterilmektedir.

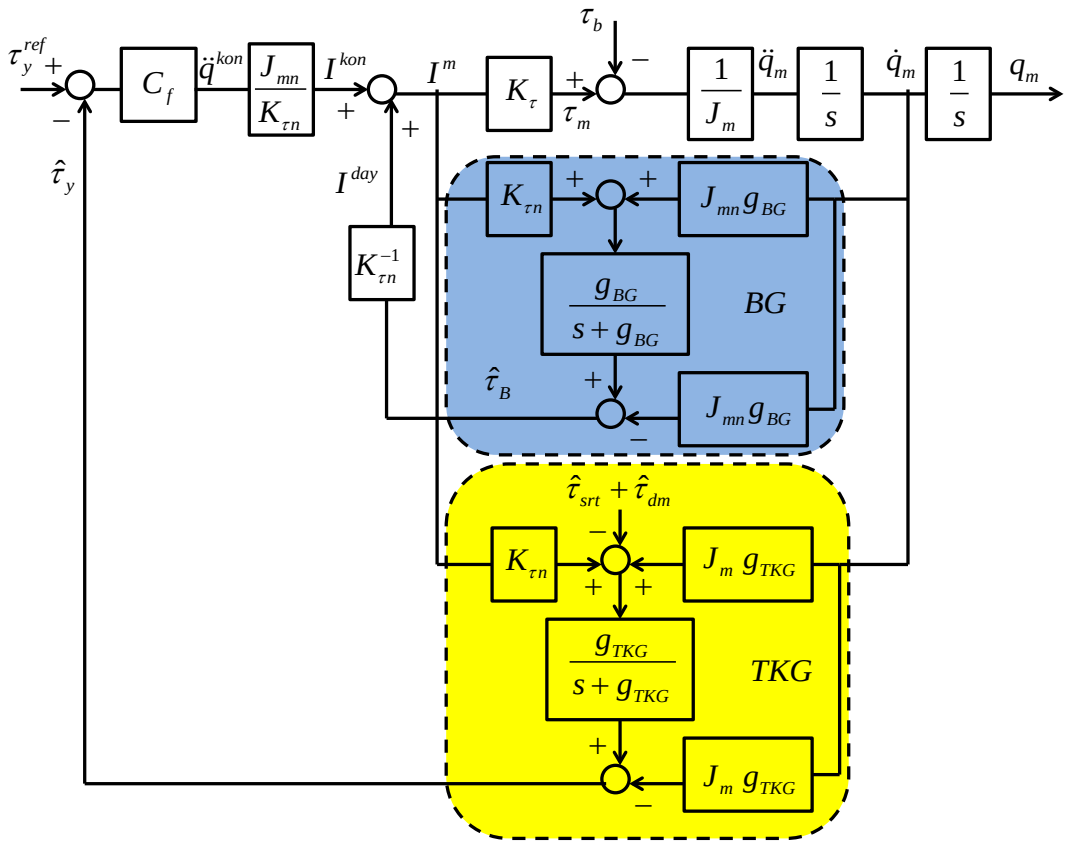
Şekil 2.3'de K_D ve K_P sırasıyla hız ve konum kontrol kazançlarını ve $q_m^{ref}, \dot{q}_m^{ref}$ ve $\ddot{q}_m^{ref}$ pozisyon/açı, hız ve ivme referanslarını belirtmektedir. Diğer parametreler yukarıda açıklanmıştır. Şekil 2.3'de gösterilen pozisyon kontrolörü literatürde ivme tabanlı kontrolör olarak bilinmekte ve kayan kipli kontrol "sliding mode control" (KKK) tasarımı yönteminin hareket kontrolündeki başarılı bir uygulamasıdır.

Şekil 2.4'de τ_y^{ref} kuvvet kontrol referansını ve C_f kuvvet kontrol kazancını göstermektedir. Diğer parametreler yukarıda açıklanmıştır.

Gözetleyici tabanlı dayanıklı hareket kontrolörleri literatürde iki serbeslik dereceli kontrolörler olarak bilinirler (2-SDK). Şekil 2.3 ve şekil 2.4'den görülebileceği üzere servo sistemin dayanıklılığı bozucu gözetliyici tarafından iç geri besleme çeviriminde sağlanır. Bozucu gözetleyici dış bozucuların yanı sıra atalet değişimleri gibi servo sistemdeki belirsizlikleri de gözetler. Böylece iç çevrimde servo sistemin nominal sistem gibi davranması sağlanır. Bozucu gözetliyici sayesinde dış çevrim kontrolörü yalnız nominal servo sistem parametrelerini dikkate alarak tasarlanabilir. İç çevrimde dayanıklılığın dış çevrimde ise performasın birbirinden bağımsız olarak



Şekil 2.3 : Dayanıklı pozisyon kontrolörünün blok şeması.



Şekil 2.4 : Dayanıklı kuvvet kontrolörünün blok şeması.

ayarlandığı bu yapı yüksek performanslı dayanıklı hareket kontrolörlerinin tasarlanmasında büyük kolaylıklar sağlar.

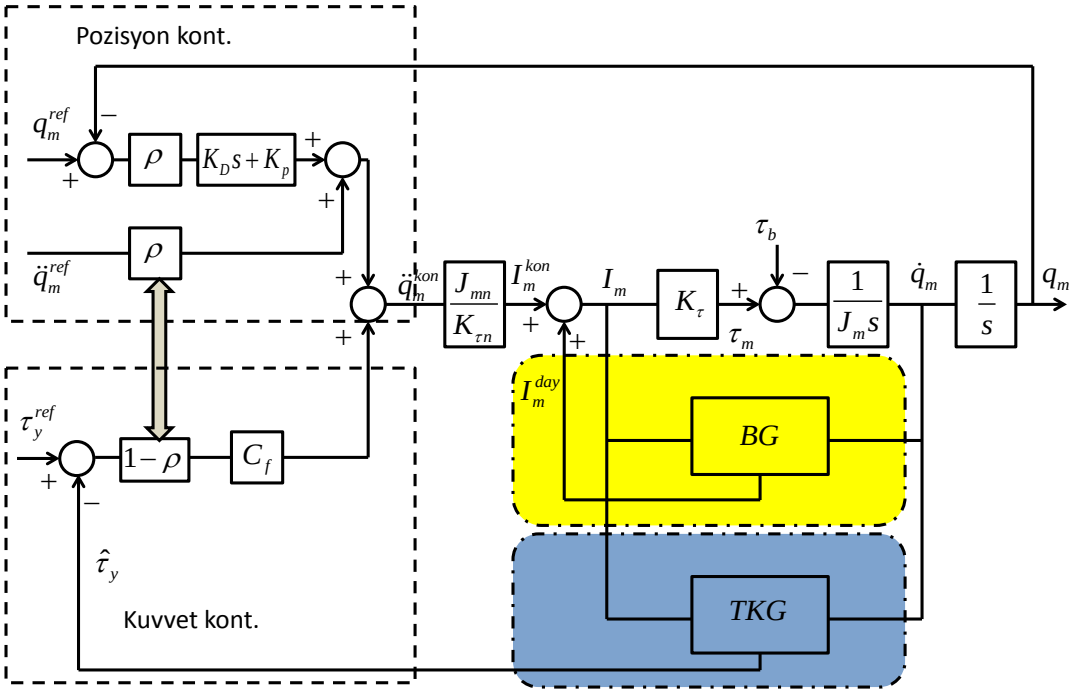
Dayanıklı kontrol yalnız pozisyon kontrolünün değil kuvvet kontrolünün de kararlılık ve performansını önemli ölçüde arttırmaktadır [67 ve 68].

2.4 Dayanıklı Hibrit ve Komplayns Hareket Kontrolörleri

Dayanıklı hibrit ve komplayns kontrol tabanlı hareket kontrolörlerinin blok şemaları şekil 2.5 ve 2.6' da gösterilmetedir.

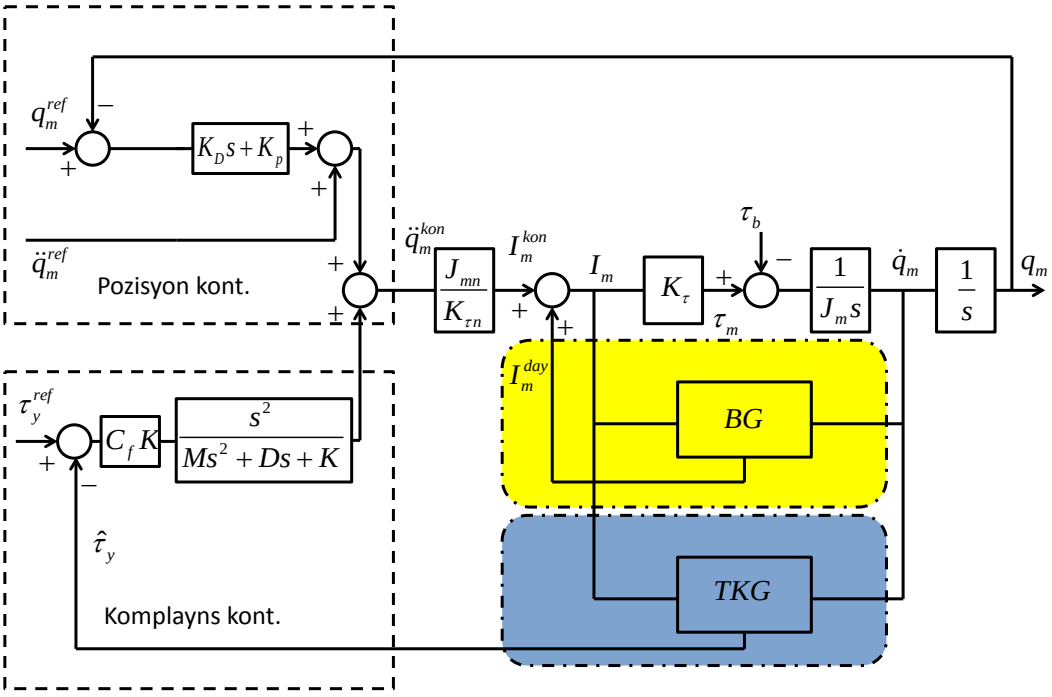
Şekil 2.5'de ρ pozisyon ve kuvvet kontrolörlerini seçmede kullandığımız hibrit kontrol değişkeninini ifade etmektedir. Diğer parametreler pozisyon ve kuvvet kontrolörlerinde kullanılan parametrelerle aynıdır. Hibrit kontrol yapısı çift taraflı bilateral kontrol ve robotun üst vücudunu kullanarak çevre ile etkileşime girdiği nesne ittirme uygulamalarında kullanılacaktır.

Şekil 2.6'da verilen komplayns kontrol yapısı şekil 2.5'de verilen hibrit kontrole çok benzemekle birlikte temel fark komplayns kontrolde aynı eksen üzerinde pozisyon ve



Şekil 2.5 : Dayanıklı hibrit hareket kontorlörünün blok şeması.

kuvvet kontrolünün eş zamanlı olarak yapılabilmesidir. Bu kontrol yapısı sert pozisyon kontrolünün yumuşatılması olarak da düşünülebilir. Komplayns kontrol robotun havada olan ayağının yer ile teması öncesi aktif edilerek robotun adımlarının daha yumuşak olmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Böylece robotun dinamik yürüme kararlığı iyileştirilir [70].



Şekil 2.6 : Dayanıklı komplayns hareket kontrolörünün blok şeması.

3. İNSANSI ROBOTLARIN TÜM VÜCUT DİNAMİK MODELİ

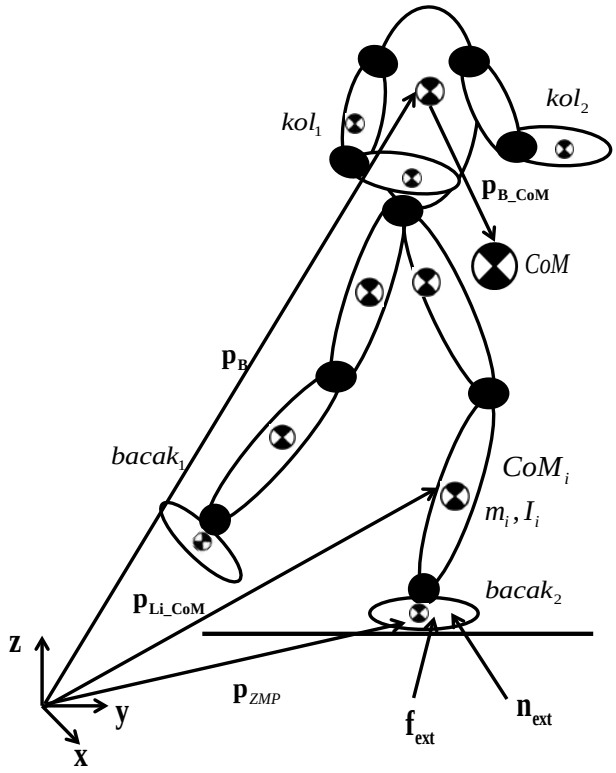
İnsansı robotların performanslarını arttırmak ve daha karmaşık hareketleri gerçekleştirmelerini sağlamak için onların dinamik davranışlarını daha iyi anlamamız gerekmektedir. Dinamik modeller aracılığıyla robotların davranışlarını daha iyi anlayabilir ve daha gelişmiş kontrolörler tasarlayabiliriz [71, 72, 73 ve 74].

İnsansı robotlar genel olarak yüksek serbestlik derecelerine sahiptirler. Ayrıca geleneksel endüstriyel robotlarının aksine insansı robotlarda sabit bir nokta bulunmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı insansı robotların dinamik modelleri oldukça karmaşık bir yapıya sahiptirler. Karmaşık dinamik modeller aracılığıyla kontrolör tasarlamak oldukça zor çoğu zaman da mümkün değildir. Buna rağmen insansı robotların dinamik modelleri bize onların hareketlerini daha iyi anlama ve daha gelişmiş yüksek performanslı basitleştirilmiş kontrolörler tasarlama imkânı sunar. Bu nedenle tüm vücut dinamik modeli insansı robot çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır.

Bu bölümde insansı robotların tüm vücut dinamik modeli iki farklı yöntem kullanılarak elde edilecektir. Her iki yöntem kullanılarak aynı dinamik modelin elde edilmesine karşın bu yöntemler bize farklı bakış açıları sunmaktadır.

3.1 İnsansı Robotların Kapalı Form Genel Dinamik Modeli

Şekil 3.1 insansı robotların genel yapısını göstermektedir. Literatürde insansı robotların dinamik modelinin elde edilmesi üzerine birçok çalışma bulunmaktadır [2, 3, 75, 76, 77 ve 78]. Örneğin tek faz evresinde yerle temas eden ayak sabit nokta kabul edilip insansı robotun dinamik denklemleri klasik robot denklemleri kullanılarak elde edilir [77]. Fakat bu yöntemde sürekli bir dinamik model elde etmek mümkün değildir. Her adım değişiminde dinamik modelin de değiştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle model tabanlı kontrolörlerin tasarımında anahtarlama problemi de gözönünde bulundurulmalıdır. Ayrıca bu yaklaşım insansı robotların hareketlerinin doğasını da net bir şekilde açıklamamaktadır.



Şekil 3.1 : İnsansı robotlar için genel bir gösterim.

Literatürde kullanılan bir diğer yöntem ise kayan nokta tabanlı dinamik model yaklaşımıdır [3 ve 78]. Bu yaklaşımda insansı robot sabit olmayan bir gövde ve bu gövdeye bağlı dört uzuvdan oluşan bir mekanizma olarak modellenir. Kayan nokta tabanlı dinamik modelin temel avantajları şu şekilde sıralanabilir.

- Geleneksel yöntemlerde ortaya çıkan süreklilik probleminin ortadan kaldırılması
- İnsansı robotların hareketlerinin daha doğal bir şekilde ifade edilebilmesi

Kayan nokta tabanlı dinamik modelin kapalı formu denklem 3.1'de ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} {}^{B}\mathbf{M}_{B} & {}^{B}\mathbf{M}_{L} \\ {}^{L}\mathbf{M}_{B} & {}^{L}\mathbf{M}_{L} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{B} \\ \ddot{\mathbf{x}}_{L} \end{bmatrix}}_{\ddot{\mathbf{x}}} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{B}(\mathbf{x},\dot{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{c}_{L}(\mathbf{x},\dot{\mathbf{x}}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{B}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{g}_{L}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\tau}_{L} \end{bmatrix} + \mathbf{J}^{T}\mathbf{F} \tag{3.1}$$

Burada $\ddot{\mathbf{x}}_{B} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}^{T} & \dot{\boldsymbol{\omega}}^{T} \end{bmatrix}^{T}$ gövde linkinin sırasıyla doğrusal ve açısal ivmelerini; ${}^{B}\mathbf{M}_{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{\dot{v}\dot{v}} & \mathbf{m}_{\dot{v}\dot{w}} \\ \mathbf{m}_{\dot{w}\dot{v}} & \mathbf{m}_{\dot{w}\dot{w}} \end{bmatrix}$ gövde linkinin atalet matrisini; $\mathbf{m}_{\dot{v}\dot{v}}, \mathbf{m}_{\dot{w}\dot{w}}$ ve $\mathbf{m}_{\dot{v}\dot{w}}$ gövde linki atalet matrisinin doğrusal ve açısal hareketlerle ilgili olan atalet alt matrislerini; $\ddot{\mathbf{x}}_{L}$

uzuv eklemlerinin ivmelerini; ${}^{\mathrm{L}}\mathbf{M}_{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{11} & \cdots & \mathbf{m}_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{m}_{n1} & \cdots & \mathbf{m}_{nn} \end{bmatrix}$ uzuvların atalet matrisini; $\mathbf{m}_{ij}$ j. uzvun ivmesi ile i. uzvun hareketi arasındaki ilişkiyi gösteren uzuv atalet alt matrisini; ${}^{\mathrm{B}}\mathbf{M}_{\mathrm{L}} = {}^{\mathrm{L}}\mathbf{M}_{\mathrm{B}}{}^{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}1} & \cdots & \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}n} \\ \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}2} & \cdots & \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}n} \end{bmatrix}$ atalet matrisinin köşegen olmayan elemanlarını; $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}i}$ ve $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}i}$ sırasıyla i. uzvun ivmesi ile gövdenin doğrusal ve açısal hareketi arasındaki ilişkiyi belirten atalet alt matrislerini; $\mathbf{c}_{\mathbf{B}}\left(\mathbf{x},\dot{\mathbf{x}}\right)$ ve $\mathbf{c}_{\mathbf{L}}\left(\mathbf{x},\dot{\mathbf{x}}\right)$ sırasıyla gövde ve uzuvların Coriolis ve merkez çekim kuvvetlerini; $\mathbf{g}_{\mathbf{B}}\left(\mathbf{x}\right)$ ve $\mathbf{g}_{\mathbf{L}}\left(\mathbf{x}\right)$ sırasıyla gövde ve uzuvların yerçekimi kuvvetlerini; $\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{L}}$ uzuvlara ait genelleştirilmiş koordinatlarda tanımlı tork girişlerini; $\mathbf{J}$ dış kuvvetlerin uygulandığı noktalara göre tanımlanmış Jakobiyen matrisini; ve $\mathbf{F}$ robota etkiyen dış kuvvet ve momentleri ifade etmektedir.

Denklem 3.1 bize insansı robotların kayan nokta tabanlı dinamik modelinin kapalı formunu vermektedir. Denklemden de kolayca anlaşılacağı üzere insansı robotların yalnızca uzuvları doğrudan kontrol edilebilir, gövde linki ise uzuvlar aracılığıyla dolaylı olarak kontrol edilmelidir. Denklem 3.1'in elemanları genelleştirilmiş Newton-Euler algoritması kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir [79, 80, 81 ve 82].

3.1.1 Genelleştirilmiş Newton-Euler algoritması kullanılarak dinamik modelin elde edilmesi.

Newton-Euler algoritması robotların dinamik modellerinin elde edilmesinde çok sık kullanılan nümerik bir yöntemdir. Yüksek serbestlik derecesine sahip robotların dinamik modeli sistematik olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

Newton-Euler Algoritması:

İleri iterasyon:

$$
\begin{aligned}
{}^{\mathbf{i+1}}\mathbf{w}_{\mathbf{i+1}} &= {}^{\mathbf{i+1}}_{\mathbf{i}}\mathbf{R}\,{}^{\mathbf{i}}\mathbf{w}_{\mathbf{i}} + \dot{\theta}_{i+1}\,{}^{\mathbf{i+1}}\mathbf{z}_{\mathbf{i+1}} \\
{}^{\mathbf{i+1}}\dot{\mathbf{w}}_{\mathbf{i+1}} &= {}^{\mathbf{i+1}}_{\mathbf{i}}\mathbf{R}\,{}^{\mathbf{i}}\dot{\mathbf{w}}_{\mathbf{i}} + {}^{\mathbf{i+1}}_{\mathbf{i}}\mathbf{R}\,{}^{\mathbf{i}}\mathbf{w}_{\mathbf{i}} \times \dot{\theta}_{i+1}\,{}^{\mathbf{i+1}}\mathbf{z}_{\mathbf{i+1}} + \ddot{\theta}_{i+1}\,{}^{\mathbf{i+1}}\mathbf{z}_{\mathbf{i+1}} \\
{}^{\mathbf{i+1}}\dot{\mathbf{v}}_{\mathbf{i+1}} &= {}^{\mathbf{i+1}}_{\mathbf{i}}\mathbf{R}\left({}^{\mathbf{i}}\dot{\mathbf{w}}_{\mathbf{i}} \times {}^{\mathbf{i}}\mathbf{p}_{\mathbf{i+1}} + {}^{\mathbf{i}}\mathbf{w}_{\mathbf{i}} \times \left({}^{\mathbf{i}}\mathbf{w}_{\mathbf{i}} \times {}^{\mathbf{i}}\mathbf{p}_{\mathbf{i+1}}\right) + {}^{\mathbf{i}}\dot{\mathbf{v}}_{\mathbf{i}}\right) \\
{}^{\mathbf{i+1}}\dot{\mathbf{v}}_{\mathbf{c}_{i+1}} &= {}^{\mathbf{i+1}}\dot{\mathbf{w}}_{\mathbf{i+1}} \times {}^{\mathbf{i+1}}\mathbf{p}_{\mathbf{c}_{i+1}} + {}^{\mathbf{i+1}}\mathbf{w}_{\mathbf{i+1}} \times \left({}^{\mathbf{i+1}}\mathbf{w}_{\mathbf{i+1}} \times {}^{\mathbf{i+1}}\mathbf{p}_{\mathbf{c}_{i+1}}\right) + {}^{\mathbf{i+1}}\dot{\mathbf{v}}_{\mathbf{i+1}}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
{}^{i+1}\mathbf{F}_{i+1} &= \mathbf{m}_{i+1}\,{}^{i+1}\dot{\mathbf{v}}_{c_{i+1}} \\
{}^{i+1}\mathbf{N}_{i+1} &= {}^{i+1}\mathbf{I}_{c_{i+1}}\,{}^{i+1}\dot{\mathbf{w}}_{i+1} + {}^{i+1}\mathbf{w}_{i+1} \times {}^{i+1}\mathbf{I}_{c_{i+1}}\,{}^{i+1}\mathbf{w}_{i+1}
\end{aligned}
\tag{3.2}
$$

Ters İterasyon:

$$
\begin{aligned}
{}^{i}\mathbf{f}_{i} &= {}^{i}_{i+1}\mathbf{R}\,{}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1} + {}^{i+1}\mathbf{F}_{i+1} \\
{}^{i}\mathbf{n}_{i} &= {}^{i}\mathbf{N}_{i} + {}^{i}_{i+1}\mathbf{R}\,{}^{i+1}\mathbf{n}_{i+1} + {}^{i}\mathbf{p}_{c_i} \times {}^{i}\mathbf{F}_{i} + {}^{i}\mathbf{p}_{i+1} \times {}^{i}_{i+1}\mathbf{R}\,{}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1} \\
\tau_i &= {}^{i}\mathbf{n}_{i}^{T} \cdot {}^{i}\mathbf{z}_{i}
\end{aligned}
\tag{3.3}
$$

$$
NE = \left[\mathbf{f}_{\mathbf{B}}, \mathbf{n}_{\mathbf{B}}, \boldsymbol{\tau}\right] \tag{3.4}
$$

Burada

${}^{i}_{i+1}\mathbf{R}$ i. ve i+1. eksen takımı arasındaki dönme matrisi;

${}^{i}\mathbf{w}_{i}$ i. eksen takımında tanımlı i. eksen takımının açısal hızı;

${}^{i}\dot{\mathbf{w}}_{i}$ i. eksen takımında tanımlı i. eksen takımının açısal ivmesi;

${}^{i}\mathbf{v}_{i}$ i. eksen takımında tanımlı i. eksen takımının doğrusal hızı;

${}^{i}\dot{\mathbf{v}}_{i}$ i. eksen takımında tanımlı i. eksen takımının doğrusal ivmesi;

$\dot{\theta}_i$ i. eklemin açısal hızı;

$\ddot{\theta}_i$ i. eklemin açısal ivmesi;

${}^{i}\mathbf{z}_{i}$ i. eksen takımında tanımlı i. eklemin dönme ekseni;

${}^{i}\mathbf{p}_{i+1}$ i. ve i+1. eksen takımları arasındaki mesafe;

${}^{i}\mathbf{p}_{c_i}$ i. eksen takımı ile i. bağlmın kütle merkezi arasındaki mesafe;

m_i i. bağlamın kütlesi;

${}^{i}\mathbf{I}_{c_i}$ i. eksen takımında takımında tanımlı i. bağlamın kütle merkezindeki atalet matrisi;

${}^{i}\mathbf{F}_{i}$ i. eksen takımında tanımlı i. bağlamın kütle merkezine etki eden kuvvet vektörü;

${}^{i}\mathbf{N}_{i}$ i. eksen takımında tanımlı i. bağlamın kütle merkezine etki eden moment vektörü;

${}^{i}\mathbf{f}_{i}$ i. eksen takımında tanımlı i. ekleme etki kuvvet vektörü;

${}^{i}\mathbf{n}_{i}$ i. eksen takımında tanımlı i. ekleme etki eden moment vektörü;

τ_i i. ekleme etki eden tork;

$\mathbf{f_B}$ Gövdeye etki eden kuvvet vektörü;

$\mathbf{n_B}$ Gövdeye etki eden moment vektörü;

${}^i\boldsymbol{\tau}$ i. uzvun eklem torklarını belirten vektör.

Newton-Euler algoritması kullanılarak ters dinamik model sistematik bir şekilde elde edilebilir [72]. Ters dinamik modelde verilen eklem pozisyonları, hızları ve ivmeleri ile etkiyen dış kuvvetler için her bir eklemde gerekli olan torklar hesaplanır. Fakat simülatör tasarımı için ileri dinamik modelin de elde edilmesi gerekmektedir. İleri dinamik modelde ters dinamik modelin aksine robot ivmeleri verilen eklem torkları ve etkiyen dış kuvvetler için hesaplanır. Denklem 3.1 ileri ve ters dinamik modellerin kolay bir şekilde elde edilebileceği, robotun dinamik davranışı hakkında bize bilgi veren genel kapalı form dinamik model yapısıdır. Kapalı form dinamik modelin doğrudan Newton-Euler algoritması kullanılarak elde edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle aşağıdaki algoritma kapalı form dinamik modelin sistematik olarak elde edilebilmesi için sunulmuştur.

Atalet Matrisi:

$\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}\dot{\mathbf{v}}}$, $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}\dot{\mathbf{v}}}$ ve $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}i}$ atalet alt matrislerinin elde edilmesi:

for j = 1 : 3

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0}, \mathbf{F} = \mathbf{0} \tag{3.5}$$

$$\dot{\mathbf{v}}(j) = 1 \tag{3.6}$$

for i = 1 : n

$$\left[{}^i\mathbf{f_B}, {}^i\mathbf{n_B}, {}^i\boldsymbol{\tau} \right] = NE(i) \tag{3.7}$$

$$\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}i}{}^T(j) = {}^i\boldsymbol{\tau} \tag{3.8}$$

end

$$\hat{\mathbf{m}}_{\dot{\mathbf{v}}\dot{\mathbf{v}}}(j) = \sum_i {}^i\mathbf{f_B}, \ \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}\dot{\mathbf{v}}}(j) = \sum_i {}^i\mathbf{n_B} \tag{3.9}$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0}, \mathbf{F} = \mathbf{0} \tag{3.10}$$

$$\dot{\mathbf{w}}(j) = 1 \tag{3.11}$$

for i = 1 : n

$$\left[{}^{i}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}, {}^{i}\mathbf{n}_{\mathbf{B}}, {}^{i}\boldsymbol{\tau} \right] = NE(i) \tag{3.12}$$

$$\mathbf{m}_{\dot{w}i}{}^{T}(j) = {}^{i}\boldsymbol{\tau} \tag{3.13}$$

end

$$\mathbf{m}_{\dot{v}\dot{w}}(j) = \sum_{i} {}^{i}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}, \ \hat{\mathbf{m}}_{\dot{w}\dot{w}}(j) = \sum_{i} {}^{i}\mathbf{n}_{\mathbf{B}} \tag{3.14}$$

end

$$\mathbf{m}_{\dot{v}\dot{v}} = \hat{\mathbf{m}}_{\dot{v}\dot{v}} + m_B\mathbf{E}_3, \ \mathbf{m}_{\dot{w}\dot{w}} = \hat{\mathbf{m}}_{\dot{w}\dot{w}} + \mathbf{I}_{\mathbf{B}} \tag{3.15}$$

Burada n uzuvların sayısını; $\mathbf{E}_3$ 3x3-boyutlu birim matrisi; ve $\mathbf{I}_{\mathbf{B}}$ gövdenin ataletini belirtmektedir.

$\mathbf{m}_{\dot{w}i}, \mathbf{m}_{\dot{v}i}$ ve $\mathbf{m}_{ij}$ atalet alt matrislerinin elde edilmesi:

for i = 1: n

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0}, \mathbf{F} = \mathbf{0} \tag{3.16}$$

for j = 1 : i_k

$$\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{limb}} = \mathbf{0} \tag{3.17}$$

$$^{\mathbf{i}}\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{limb}}(j) = 1 \tag{3.18}$$

for k = 1 : n

$$\left[{}^{k}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}, {}^{k}\mathbf{n}_{\mathbf{B}}, {}^{k}\boldsymbol{\tau} \right] = NE(k) \tag{3.19}$$

$$\mathbf{m}_{ki}(j) = {}^{k}\boldsymbol{\tau} \tag{3.20}$$

end

$$\mathbf{m}_{\dot{v}i}(j) = \sum_{k} {}^{k}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}, \ \mathbf{m}_{\dot{w}i}(j) = \sum_{k} {}^{k}\mathbf{n}_{\mathbf{B}} \tag{3.21}$$

end

end

Burada i_k i. uzvun serbestlik derecesini belirtmektedir. Örneğin bu tezin simülasyon çalışmalarında bacaklarda 5 ve 6 serbestlik derecesine sahip robotlar kullanılmıştır.

Böylece atalet matrisinin her bir elemanı önerilen algoritma aracılığıyla elde edilir. İşlem yükünü azaltmak için atalet matrisinin simetrik olma özelliği kullanılabilir. Örneğin atalet matrisinde $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}\dot{\mathbf{w}}}$ ve $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}\dot{\mathbf{v}}}^{T}$ alt matrisleri birbirlerine eşittirler. Bu nedenle $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}\dot{\mathbf{w}}}$ veya $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}\dot{\mathbf{v}}}$ alt atalet matrislerinden yalnız bir tanesi hesaplanarak da atalet matrisi elde edilebilir. Kapalı form dinamik modelin diğer elemanları da benzer bir şekilde aşağıdaki gibi elde edilirler.

Coriolis ve merkezçekim kuvvet vektörü:

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0}, \mathbf{F} = \mathbf{0} \tag{3.22}$$

for i = 1 : n

$$\left[{}^{i}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}, {}^{i}\mathbf{n}_{\mathbf{B}}, {}^{i}\boldsymbol{\tau} \right] = NE(i) \tag{3.23}$$

end

$$\mathbf{c}_{\mathbf{B}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \left[\sum_{i} {}^{i}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}{}^{T}, \sum_{i} {}^{i}\mathbf{n}_{\mathbf{B}}{}^{T} \right]^{T}, \mathbf{c}_{\mathbf{L}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \left[{}^{1}\boldsymbol{\tau}^{T}, \quad \cdots, \quad {}^{n}\boldsymbol{\tau}^{T} \right]^{T} \tag{3.24}$$

Yerçekim vektörü:

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -9.8 \end{bmatrix}^{T}, \mathbf{F} = \mathbf{0} \tag{3.25}$$

for i = 1 : n

$$\left[{}^{i}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}, {}^{i}\mathbf{n}_{\mathbf{B}}, {}^{i}\boldsymbol{\tau} \right] = NE(i) \tag{3.26}$$

end

$$\mathbf{g}_{\mathbf{B}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \left[\sum_{i} {}^{i}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}{}^{T}, \sum_{i} {}^{i}\mathbf{n}_{\mathbf{B}}{}^{T} \right]^{T}, \mathbf{g}_{\mathbf{L}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \left[{}^{1}\boldsymbol{\tau}^{T}, \quad \cdots, \quad {}^{n}\boldsymbol{\tau}^{T} \right]^{T} \tag{3.27}$$

Jakobiyen:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0} \tag{3.28}$$

for j = 1 : 6 x p

$$\mathbf{F} = \mathbf{0}, \ \mathbf{F}(j) = 1 \tag{3.29}$$

for i = 1 : n

$$\left[{}^{i}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}, {}^{i}\mathbf{n}_{\mathbf{B}}, {}^{i}\boldsymbol{\tau} \right] = NE(i) \tag{3.30}$$

end

$$\mathbf{J}^{T}(j) = \left[\sum_{i} {}^{i}\mathbf{f}_{\mathbf{B}}{}^{T}, \sum_{i} {}^{i}\mathbf{n}_{\mathbf{B}}{}^{T}, {}^{1}\boldsymbol{\tau}^{T} \quad \cdots \quad {}^{n}\boldsymbol{\tau}^{T} \right]^{T} \tag{3.31}$$

end

Burada p robota etkiyen dış kuvvetlerin ($\mathbf{F}$) sayısını belirtmektedir.

Denklem 3.5-3.31 kullanılarak insansı robotların dinamik modeli sistematik olarak elde edilebilir. Fakat genelleştirilmiş Newton-Euler algoritması kullanılarak robotun dinamik davranışı hakkında detaylı bir bilgi edinmek çok kolay değildir. Bu nedenle kayan nokta dinamiği tabanlı sistemlerin doğası göz önünde bulundurularak insansı robotların dinamik denklemleri analitik bir yaklaşım kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

3.1.2 Analitik yaklaşım tabanlı dinamik modelin elde edilmesi.

Atalet Matrisinin Köşegen Elemanları:

İlk olarak insansı robotun yerçekimsiz bir ortamda sabit durduğunu varsayalım. Bu durumda robotun durum vektörleri aşağıda ki gibi ifade edilir.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0} \tag{3.32}$$

Eğer yalnız doğrusal ivmelerin robotun gövdesine etki ettiğini düşünürsek, bir başka deyişle $\dot{\mathbf{v}} \neq \mathbf{0}$ ve $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0}$,bu durumda robota etki eden doğrusal ivmelerden kaynaklı toplam atalet kuvveti aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{F}_{\mathbf{toplam}} = \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}\dot{\mathbf{v}}} \dot{\mathbf{v}} \tag{3.33}$$

Burada

$$\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}\dot{\mathbf{v}}} = \left(m_B + \sum_{i} m_i \right) \mathbf{E}_{\mathbf{3}} \tag{3.34}$$

Burada m_B gövdenin kütlesini ve m_i ise i. bağlamın kütlesini ifade etmektedir. Bir başka deyişle $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}\dot{\mathbf{v}}}$ robotun toplam kütlesine eşittir. Atalet matrisinin diğer alt matrislerinin elde edilmesinde benzer analitik yaklaşımlar kullanılmıştır. Alt matrisler aşağıda sunulan yöntem kullanılarak elde edilebilir.

Eğer doğrusal ivmelerin yerine yalnız açısal ivmelerin robotun gövdesine etki ettiğini düşünürsek, bir başka deyişle $\dot{\mathbf{w}} \neq \mathbf{0}$ ve $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0}$,bu durumda robota etki eden açısal ivmelerden kaynaklı toplam atalet momenti aşağıda ki gibi ifade edilir.

$$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{toplam}} = \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}\dot{\mathbf{w}}} \dot{\mathbf{w}} \tag{3.35}$$

Burada $\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}\dot{\mathbf{w}}}$ alt atalet matrisi robotun toplam ataletine eşittir. Robotun toplam ataleti paralel eksen teoremi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}\dot{\mathbf{w}}} = \mathbf{I}_{\mathbf{B}} + \sum_i \left({}_i\mathbf{R}^{\mathbf{i}} \mathbf{I}_{\mathbf{c_i}\, i} \mathbf{R}^{\mathbf{T}} + \left(\mathbf{p}_{\mathbf{B_CoM_i}}{}^{\mathbf{T}} \mathbf{p}_{\mathbf{B_CoM_i}} \right) \mathbf{E}_3 - \mathbf{p}_{\mathbf{B_CoM_i}} \mathbf{p}_{\mathbf{B_CoM_i}}{}^{\mathbf{T}} \right) \tag{3.36}$$

Burada $\mathbf{p}_{\mathbf{B_CoM_i}}$ gövde eksen takımı ile i. bağlam arasında ki mesafeyi belirtmektedir. Diğer parametreler yukarıda açıklanmıştır.

Son olarak yalnız eklem ivmelerinin robot üzerinde etkili olduğunu varsayalım. Bir başka deyişle $\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{L}} \neq \mathbf{0}$ ve $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0}$. Bu durumda robotun uzuvlarına ait atalet alt matrisi Euler-Lagrange denklemleri kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mathbf{m}_{ii} = \sum_i \left(m_i \mathbf{J}_{\mathbf{V_{CoM}}i}{}^{\mathbf{T}} \mathbf{J}_{\mathbf{V_{CoM}}i} + \mathbf{J}_{\mathbf{W_{CoM}}i}{}^{\mathbf{T}}\, {}_i\mathbf{R}^{i} \mathbf{I}_{i\, i} \mathbf{R}^{\mathbf{T}} \mathbf{J}_{\mathbf{W_{CoM}}i} \right) \tag{3.37}$$

Burada $\mathbf{J}_{\mathbf{V_{CoM}}i}$ ve $\mathbf{J}_{\mathbf{W_{CoM}}i}$ i. bağlamın kütle merkezine göre elde edilmiş doğrusal ve açısal Jakobiyen matrislerini belirtmektedir.

Atalet Matrisinin Köşegen Olmayan Elemanları:

Tekrar insansı robotun yerçekimsiz bir ortamda sabit durduğunu varsayalım. Eğer yalnız açısal ivmelerin robotun gövdesine etki ettiğini düşünürsek, bir başka deyişle $\dot{\mathbf{w}} \neq \mathbf{0}$ ve $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0}$, bu durumda robota etki eden dönel ivmelerden kaynaklı toplam atalet kuvveti aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{F}_{\mathbf{toplam}} = \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}\dot{\mathbf{w}}} \dot{\mathbf{w}} \tag{3.38}$$

$$\mathbf{F}_{\mathbf{total}} = \left(m_B + \sum_i m_i \right) \dot{\mathbf{v}}_{\mathbf{CoM}} = \left(m_{body} + \sum_i m_i \right) \left(\mathbf{p}_{\mathbf{B_CoM}} \right)_{\times} \dot{\mathbf{w}} \tag{3.39}$$

Burada $\mathbf{p}_{\mathbf{B_CoM}}$ robotun gövde eksen takımı ile kütle merkezi arasında ki mesafeyi ve $(\bullet)_{\times}$ ise $\bullet$ vektörünün çarpık-simetrik (skew-symmetric) formda ifadesini belirmektedir.

Eğer yalnız eklem ivmelerinin robot üzerinde etkili olduğunu varsayarsak, bir başka deyişle $\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{L}} \neq \mathbf{0}$ ve $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \mathbf{g} = \mathbf{0}$, robotun toplam atalet kuvveti ve momenti aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{F}_{\mathbf{total}} = \sum_j \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}j}{}^{j}\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{L}} \tag{3.40}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{total}} = \sum_j \mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}j}{}^{j}\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{L}} \tag{3.41}$$

Burada köşegen olmayan alt atalet matris elemanları doğrusal ve açısal Jakobiyen matrisleri kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilirler.

$$\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{v}}j} = \sum_j m_j \mathbf{J}_{\mathbf{V_{CoM}}j} \tag{3.42}$$

$$\mathbf{m}_{\dot{\mathbf{w}}j} = \sum_j \left({}^{\mathbf{0}}_{\mathbf{j}}\mathbf{R}\,{}^{\mathbf{i}}\mathbf{I}_{\mathbf{i}}\,{}^{\mathbf{0}}_{\mathbf{j}}\mathbf{R}^{\mathbf{T}}\mathbf{J}_{\mathbf{W_{CoM}}i} + m_j \left(\mathbf{p}_{\mathbf{B_CoM_j}}\right)_{\times} \mathbf{J}_{\mathbf{V_{CoM}}j} \right) \tag{3.43}$$

Robot uzuvlarının hareketlerinin birbiri ile doğrudan bir etkileşimi yoktur. Robotun bir uzvundaki ivmelenme doğrudan gövdenin doğrusal ve açısal hareketlerini etkiler ve gövde hareketleri de diğer uzuvlara aktarılır. Bu nedenle köşegen olmayan uzuv atalet matrisinin alt elemanları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mathbf{m}_{ij} = \mathbf{0} \text{ eğer } i \neq j. \tag{3.44}$$

Yerçekim vektörü:

Yer çekim vektörü bağlamların kütle merkezlerine ait Jakobiyen matrisi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mathbf{g}_{\mathbf{B}} = 9.8\left[\left(m_B + \sum_i m_i\right)\boldsymbol{\upsilon}_{\mathbf{g}}{}^{T}, \sum_i m_i \left(\left(\mathbf{p}_{\mathbf{Li_CoM}} - \mathbf{p}_{\mathbf{B}}\right) \times \boldsymbol{\upsilon}_{\mathbf{g}}\right)^{T}\right]^{T} \tag{3.45}$$

$$\mathbf{g}_{\mathbf{L_j}} = 9.8 \sum_i {}^{j}m_i\,{}^{j}\mathbf{J}_{\mathbf{VCoM_i}}{}^{T}\boldsymbol{\upsilon}_{\mathbf{g}} \tag{3.46}$$

$$\mathbf{g} = [\mathbf{g}_{\mathbf{B}}{}^{T}, \quad \mathbf{g}_{\mathbf{L_1}}{}^{T}, \quad \cdots, \quad \mathbf{g}_{\mathbf{L_n}}{}^{T}]^{T} \tag{3.47}$$

Jakobiyen:

Uzuvların uç noktalarına göre doğrusal ve dönel geometrik Jakobiyen matrisleri aşağıda ki gibi elde edilir.

$$
\begin{aligned}
{}^{r}\mathbf{J}_{V_1} &= \mathbf{E}_3 \\
{}^{r}\mathbf{J}_{V_2} &= \left[\left[1,0,0\right]^T \times \mathbf{p}_{B_{}^{r}L_{tip}}, \left[0,1,0\right]^T \times \mathbf{p}_{B_{}^{r}L_{tip}}, \left[0,0,1\right]^T \times \mathbf{p}_{B_{}^{r}L_{tip}} \right]
\end{aligned} \tag{3.48}
$$

$$
{}^{r}\mathbf{J}_{V_k} = \begin{cases} \left[\mathbf{w}_1 \times \mathbf{p}_{j1_{}^{r}L_{tip}}, \mathbf{w}_2 \times \mathbf{p}_{j2_{}^{r}L_{tip}}, \cdots, \mathbf{w}_{r_k} \times \mathbf{p}_{jr_k_{}^{r}L_{tip}} \right] & eger\, r = k \\ \mathbf{0} & degilse \end{cases} \tag{3.49}
$$

$$
\begin{aligned}
{}^{r}\mathbf{J}_{W_1} &= \mathbf{0}_3 \\
{}^{r}\mathbf{J}_{W_2} &= \mathbf{E}_3
\end{aligned} \tag{3.50}
$$

$$
{}^{r}\mathbf{J}_{W_k} = \begin{cases} \left[\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \cdots \mathbf{w}_{r_k} \right] & eger\, r = k \\ \mathbf{0} & degilse \end{cases} \tag{3.51}
$$

$$
{}^{r}\mathbf{J} = \begin{bmatrix} {}^{r}\mathbf{J}_{V_1} & \cdots & {}^{r}\mathbf{J}_{V_{r_k}} \\ {}^{r}\mathbf{J}_{W_1} & \cdots & {}^{r}\mathbf{J}_{W_{r_k}} \end{bmatrix} \tag{3.52}
$$

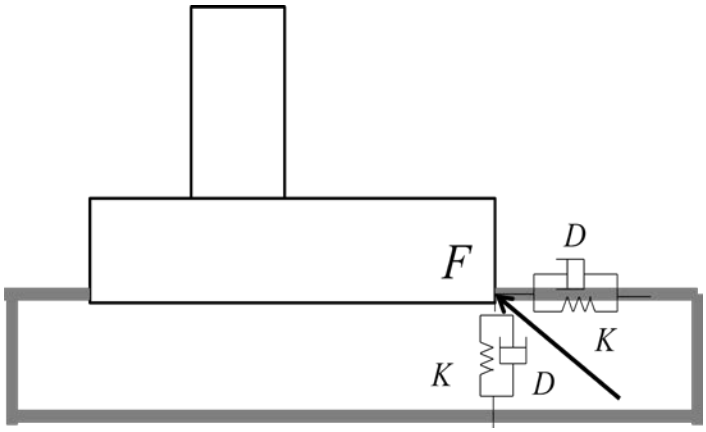
Burada $\mathbf{p}_{B_{}^{r}L_{tip}}$ gövde eksen takımı ile r uzvunun uç noktası arasındaki mesafeyi; ${}^{r}\mathbf{p}_{ji_{}^{r}L_{tip}}$ r uzvundaki i. eklem ile r uzvunun uç noktası arasındaki mesafeyi ve r_k r. uzuvda bulunan serbestlik derecesini belirtir.

Denklem 3.32-3.52 bize insansı robotların dinamik modelinin analitik olarak ifadesini göstermektedir. İnsansı robotların dinamik modelinin analitik olarak elde edilmesi, insansı robotların hareket dinamiklerini daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Fakat Coriolis ve merkezçekim kuvvetlerinin analitik olarak elde edilmesi oldukça zordur. Denklem 3.22-3.24 kullanılarak Coriolis ve merkezçekim kuvvetleri Newton-Euler denklemlerinden elde edilebilir.

3.2 Zemin Kontak Modeli

Yürüme simülasyonlarının en önemli problemlerinden bir tanesi de robotun zemin ile yaptığı etkileşim sonucunda robota etki eden dış kuvvetlerin modellenmesidir. Bu tez çalışmasında zemin ve ayak arasındaki etkileşim modeli birinci dereceden bir denklem olan yay damper modeli kullanılarak elde edilmiştir. Kontak modeli şekil 3.2 kullanılarak daha net bir şekilde açıklanabilir.

Yay damper modeli kullanılarak robotun ayağının zeminle temas yaptığı noktadaki kuvvetler denklem 3.53'de ifade edilmektedir [70].



Şekil 3.2 : Zemin kontak modeli.

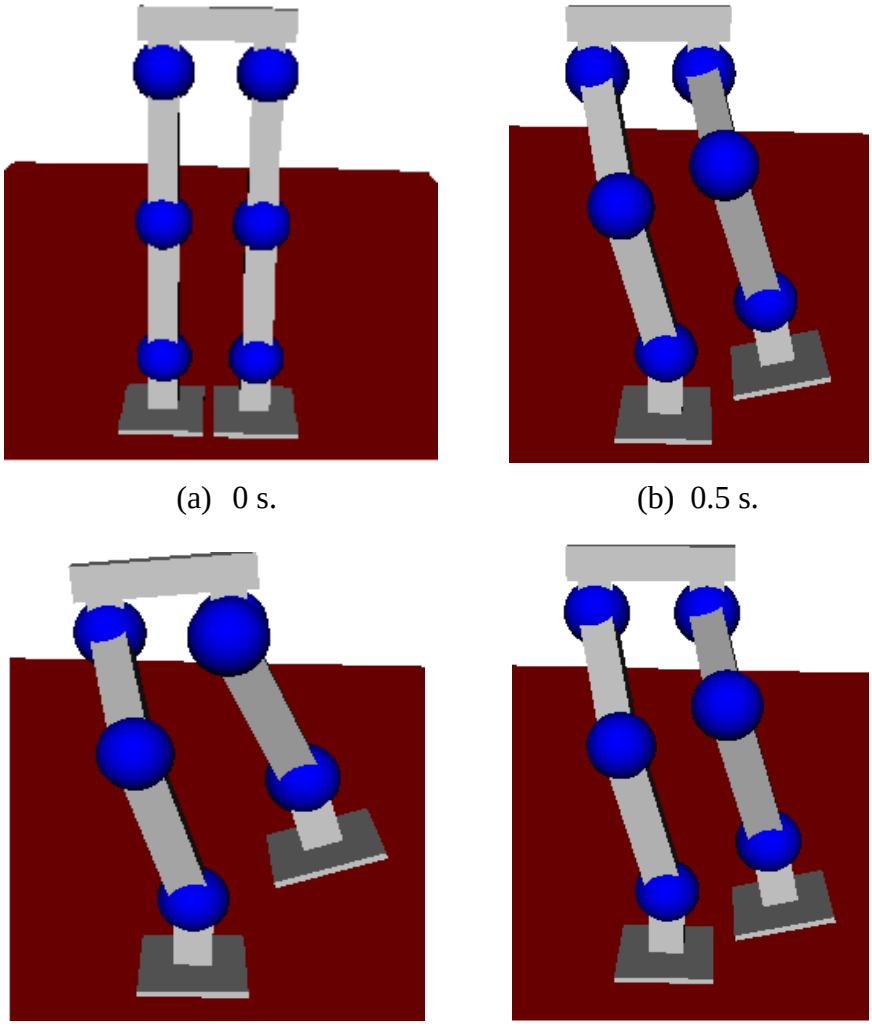
$$\begin{aligned} f_{ix} &= K\Delta x_i + D\Delta \dot{x}_i \\ f_{iy} &= K\Delta y_i + D\Delta \dot{y}_i \\ f_{iz} &= K\Delta z_i + D\Delta \dot{z}_i \end{aligned} \tag{3.53}$$

Burada K ve D zeminin sertlik ve bastırma katsayılarını Δx_i, Δy_i ve Δz_i i noktasında ve x, y ve z eksenleri doğrultusunda pozisyon değişimlerini ve $\Delta \dot{x}_i$, $\Delta \dot{y}_i$ ve $\Delta \dot{z}_i$ i noktasında ve x, y ve z eksenleri doğrultusunda hız değişimlerini belirtmektedir.
Kontak modeli için ayağın her bir köşesinde bir adet yay damper modeli kullanmak üzere toplamda her bir ayak için dört adet zemin kuvvet denklemi kullanılmıştır.
Zemin kontak modeli için kullanılan basit yay damper modeli robotun üst vücut kontrolünde robot kollarının çevre ile etkileşimini modellemek için de kullanılmıştır.

3.3 Simülasyon Sonuçları

Elde edilen dinamik modeller ve MATLAB'ın Sanal Gerçeklik Araç kutusu kullanılarak yeni bir simülatör tasarımı yapılmıştır. Bu simülatörde şekil 3.3 ve 3.4'de gösterilen iki bacaklı bir robotun dinamik benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda robot tek destek faz evresindeyken kendi kütle merkezini dikey ve yatay eksenler boyunca sabit tutmaya çalışmaktadır. Şekillerden de görülebileceği üzere robot dengesini koruyarak serbest ayağını yukarı ve aşağı doğru hareket ettirebilmektedir.

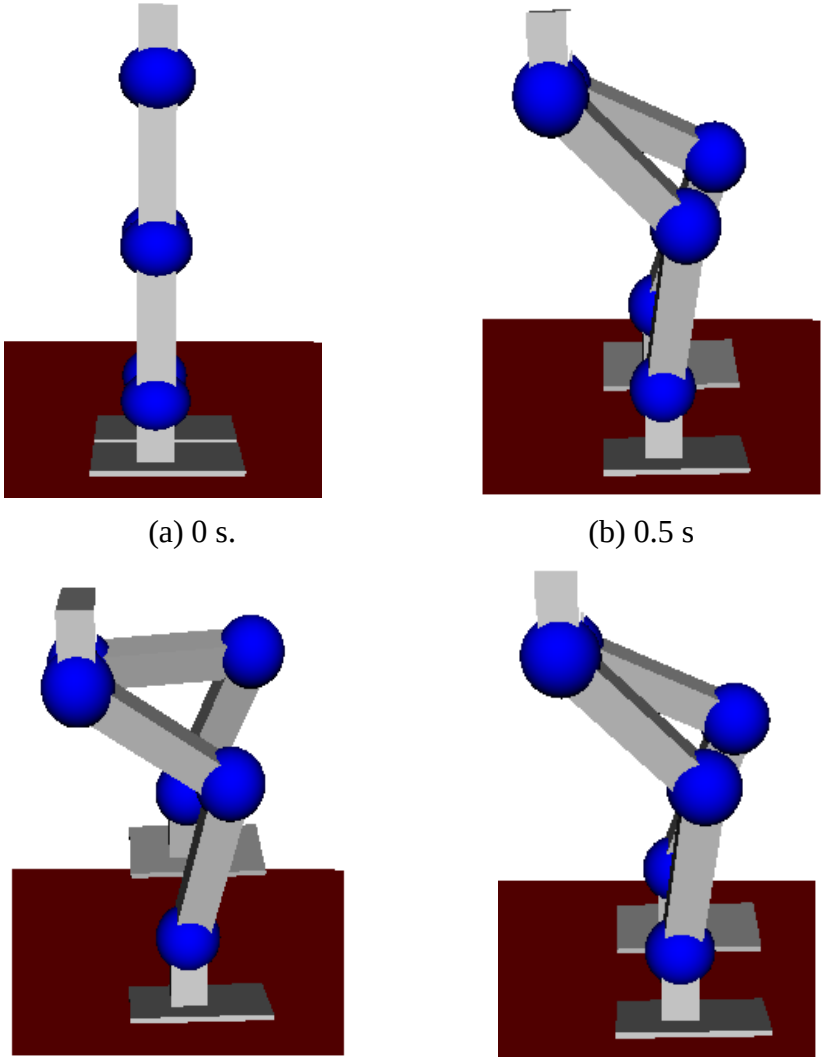
Serbest ayağın yörüngesi ve kütle merkezinin kontrol sonuçları şekil 3.5'de gösterilmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere robot kütle merkezini sabit tutarak serbest ayağını hareket ettirebilmektedir. Ayrıca önerilen her iki dinamik modelleme yönteminde de aynı sonuçlar elde edilmiştir.



(a) 0 s. (b) 0.5 s.

(c) 1 s. (d) 1.5 s.

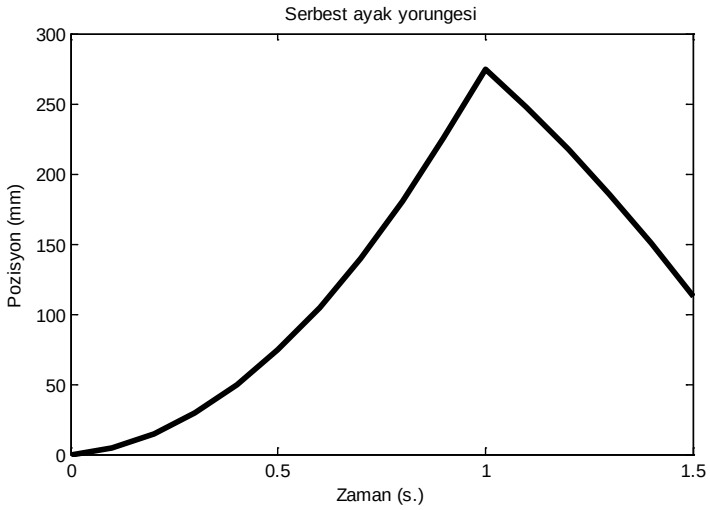
Şekil 3.3 : İki bacaklı robotun kütle merkez kontrolü simülasyonu (ön düzlem).



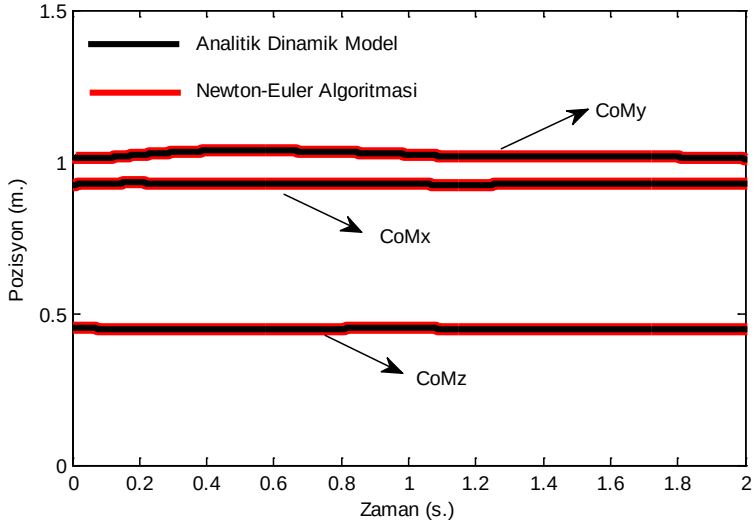
(a) 0 s. (b) 0.5 s

(c) 1 s. (d) 1.5 s.

Şekil 3.4 : İki bacaklı robotun kütle merkez kontrolü simülasyonu (yan düzlem).



(a) Serbest ayak yörüngesi.



(b) Kütle merkezinin kontrol sonuçları.

Şekil 3.5 : Serbest ayak yörügesi ve kütle merkezinin kontrol sonuçları.

4. İNSANSI ROBOTLARIN ALT VÜCUT KONTROLÜ

Bu bölümde insansı robot çalışmalarındaki en temel problemlerden bir tanesi olan yürüme problemi incelenecektir. Literatürde gerek insansı robotların gerekse de yalnız iki bacaklı mekanizmaların yürüme problemi üzerine çok çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [28, 83-90]. Bu çalışmalarda pasif-dinamik yürümeden akıllı kontrol sistemlerine kadar birçok farklı yöntem hala araştırılmaya devam etmektedir [91-94].

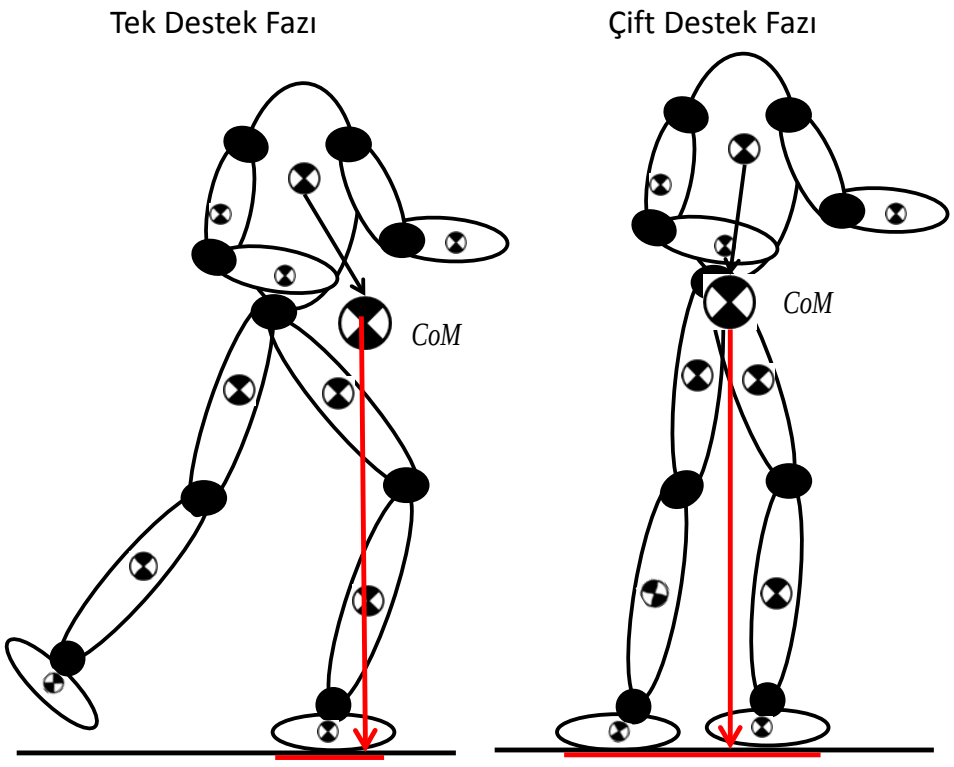
Bu tez çalışmasında insansı robotların dinamik yürüme problemi yörünge tasarlamada çok sık kullanılan sıfır moment noktası (SMN) denge kararlılık kriteri kullanılarak çözülmüştür [8 ve 28]. Bu tezde SMN tabanlı dinamik yürüme üzerine çalışılmasının temel nedenleri

- Literatürde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olması,
- Gerek simülasyonlar gerekse de uygulamalarda başarılı sonuçların elde edilebilmesi,
- SMN'nin oldukça karmaşık olan iki bacaklı yürüme hareketi için gayet basit bir denge kararlılık kriteri olması,
- Uzun bir zamandır araştırılmasına karşın mevcut robotlarda yürüme algoritmalarının hala istenen performansa sahip olmamaları
- ASIMO gibi insansı robotlarda öncü projelerde yaygın bir şekilde kullanılıyor olması ve gelecekte de bu yaygın kullanımın devam edeceğine dair genel kanı

olarak sıralanabilir.

4.1 Statik Yürüme

İnsansı robotlarda kullanılan en basit denge kararlılık kriteridir. Statik denge kararlılık kriterinde robotun kütle merkezinin zemine olan izdüşümü ele alınır ve eğer bu izdüşüm destek düzlemi içinde kalıyorsa robotun statik denge kararlılığı elde edilir. Tek ve çift destek faz evreleri için robotun statik denge kriterleri şekil 4.1'de gösterilmektedir. Tek destek faz evresinde destek düzlemi yerde sabit olan ayağın



Şekil 4.1 : Çift ve tek destek faz evrelerinde destek düzlemleri.

tabanı iken çift destek faz evresinde destek düzlemi yerde sabit olan ayakların tabanları ve bu ayakların arasında kalan alandır. Robotu yürüme esnasında herhangi bir anda durdursak bile kütle merkezinin izdüşümü sürekli destek düzlemi içinde olduğundan robotun dengesi korunacaktır. Şekil 4.1'den görülebileceği üzere insansı robotlar beklenildiği gibi çift destek faz evresinde daha kararlıdırlar.

Statik yürümede insansı robotlar için çok basit bir kararlılık kriteri sunulmasına rağmen yürüme performansının düşük ve enerji tüketiminin de oldukça yüksek olmasından dolayı tercih edilen bir yöntem değildir. Bu nedenle literatürdeki çalışmalar dinamik yürüme üzerine yoğunlaşmıştır.

4.2 Dinamik Yürüme

Dinamik yürümede statik yürümenin aksine robotun kütle merkezinin izdüşümü destek düzlemin dışına çıkabilir. Bu nedenle robotu yürüme esnasında herhangi bir anda durdurursak robot devrilebilir. Tanımdan da anlaşılabileceği üzere dinamik yürümenin denge kararlılığı statik yürümenin denge kararlılığından daha kötüdür. Fakat dinamik yürüme insansı robotların daha az enerji kullanarak daha yüksek hızlarda hareket etmelerini sağlar.

4.2.1 Sıfır moment noktası

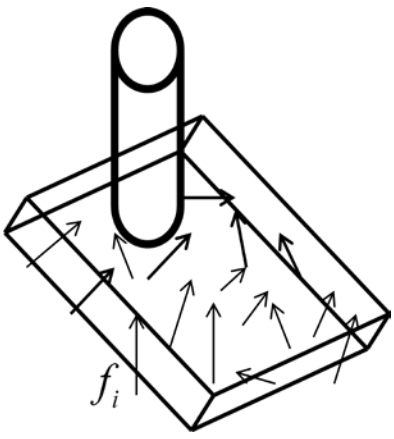
Giriş bölümündeki SMN açıklamasında Vukobratovic tarafından yapılan orijinal tanım kullanılmıştır. Bu bölümde SMN üzerine daha detaylı bir çalışma yapılacaktır. Orijinal tanımda SMN zeminden ayağa uygulanan tepki kuvvetlerin bileşkesi olarak ifade edilmektedeir. Şekil 4.2'de zeminden ayağa farklı yönlerde uygulanan tepki kuvvetleri gösterilmektedir. Eğer zeminden ayağa etki eden her bir kuvveti $\mathbf{f_i} = \begin{bmatrix} f_{xi} & f_{yi} & f_{zi} \end{bmatrix}^T$ vektörü ile ifade edersek, SMN noktası denklem 4.1 kullanılarak hesaplanabilir [7 ve 8].

$$\mathbf{p_{zmp}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \mathbf{p_i} f_{iz}}{\sum_{i=1}^{N} f_{iz}} = \sum_{i=1}^{N} \mathbf{p_i} \frac{f_{iz}}{f_z} \tag{4.1}$$

Burada $f_z = \sum_{i=1}^{N} f_{iz}$ ve $f_{iz} \geq 0 \ \forall i = 1, 2, \ldots N$. Denklem 4.1 bize SMN noktasının her zaman ayak içinde olacağını gösterir. Her bir kuvvetin SMN'de oluşturduğu moment etkisi denklem 4.2 ve 4.3 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_{i=1}^{N} (\mathbf{p_i} - \mathbf{p_{ZMP}}) \times \mathbf{f_i} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned} \tau_x &= \sum_{i=1}^{N} (p_{iy} - p_y) f_{iz} - \sum_{i=1}^{N} (p_{iz} - p_z) f_{iy} \\ \tau_y &= \sum_{i=1}^{N} (p_{iz} - p_z) f_{ix} - \sum_{i=1}^{N} (p_{ix} - p_x) f_{iz} \\ \tau_z &= \sum_{i=1}^{N} (p_{ix} - p_x) f_{iy} - \sum_{i=1}^{N} (p_{iy} - p_y) f_{ix} \end{aligned} \tag{4.3}$$



Şekil 4.2 : Zeminden ayağa uygulanan tepki kuvvetleri.

Eğer yürüme bir düzlem üzerinde gerçekleştiriliyorsa, $p_{iz} = p_z$ olacağından τ_x denkleminin ikinci toplamı ve τ_y denkleminin ilk toplamı sıfır olacaktır. Ayrıca, doğrudan 4.1 denkleminden - $\sum_{i=1}^{N} f_{iz}\, p = \sum_{i=1}^{N} p_i\, f_{iz}$ olduğundan – görüleceği üzere τ_x ve τ_y denklemlerindeki diğer toplamlar da sıfır olur. Böylece $\tau_x = \tau_y = 0$ elde edilir. Ayak üzerindeki bu noktaya sıfır moment noktası denmesinin nedeni bu noktadaki momentlerin x ve y doğrultularında sıfıra eşit olmalarıdır. Sürtünme kuvvetlerinden dolayı genel olarak z eksenindeki moment sıfırdan farklıdır, $\tau_z \neq 0$.

Yukarıda verilen SMN tanımı kavramı açıklamada yardımcı olsa da robotların denge kararlılığı hakkında detaylı bir bilgi vermemektedir. SMN robot dinamiği de gözönünde bulundurularak aşağıdaki gibi elde edilir.

Şekil 4.3'de verilen genel insansı robot yapısını ele alalım. Ayakta bulunan bir noktaya göre robotun atalet kuvvetlerinden kaynaklı toplam momenti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{ZMP}} = \dot{\mathbf{L}}_{\mathbf{w}} + \sum_i m_i \left(\mathbf{p}_{\mathbf{CoM}_i} - \mathbf{p}_{\mathbf{ZMP}}\right) \times \left(\ddot{\mathbf{p}}_{\mathbf{CoM}_i} - \boldsymbol{\upsilon}_{\mathbf{g}}\right) \tag{4.4}$$

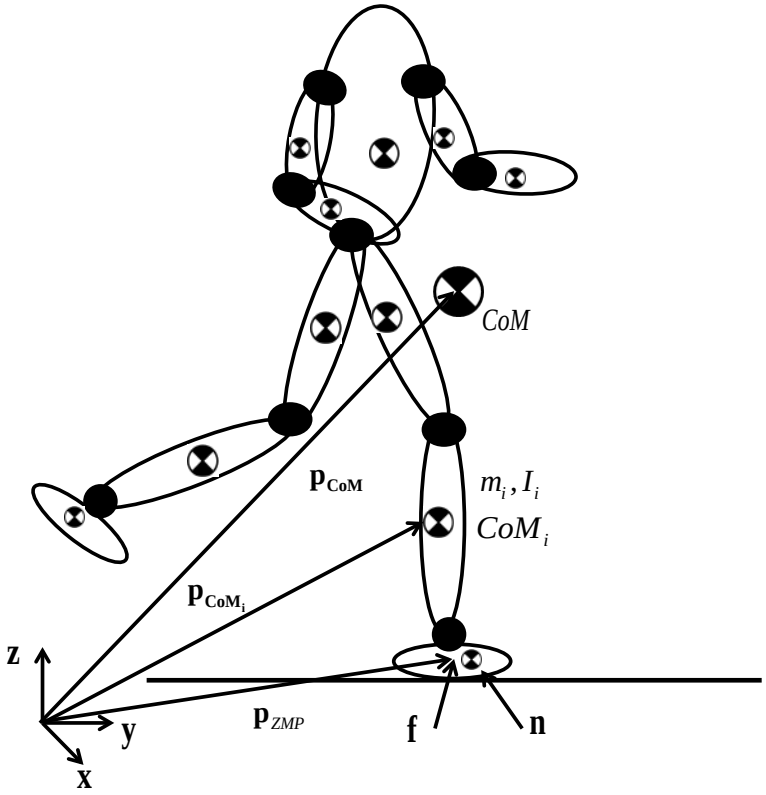
Burada $\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{ZMP}}$ ayakta bulunan $\mathbf{p}_{\mathbf{ZMP}}$ noktasındaki toplam momenti; $\mathbf{L}_{\mathbf{w}}$ robotun kütle merkezi etrafındaki toplam momentumu göstermektedir. Kütle merkezi etrafındaki toplam momentum aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{L}_{\mathbf{w}} = \sum_i m_i \left(\mathbf{p}_{\mathbf{CoM}_i} - \mathbf{p}_{\mathbf{CoM}}\right) \times \dot{\mathbf{p}}_{\mathbf{CoM}_i} + {}_i\mathbf{R}\, {}^i\mathbf{I}_i\, {}_i\mathbf{R}^T \mathbf{w}_i \tag{4.5}$$

Tanımda belirtildiği gibi, SMN $\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{ZMP}}$ momentlerinin yatay düzlemdeki izdüşümlerinin sıfıra eşitlenmesi ile elde edilir. Eğer yatay düzlemdeki momentler - bir başka deyişle moment vektörünün x ve y düzlemindeki elemanları - sıfıra eşitlenirse SMN noktası aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$${}^x p_{ZMP} = \frac{M\, {}^x p_{CoM} \left({}^z \ddot{p}_{CoM} + g\right) - M \left({}^z p_{CoM} - {}^z p_{ZMP}\right) {}^x \ddot{p}_{CoM} - {}^y \dot{L}_w}{M \left({}^z \ddot{p}_{CoM} + g\right)} \tag{4.6}$$

$${}^y p_{ZMP} = \frac{M\, {}^y p_{CoM} \left({}^z \ddot{p}_{CoM} + g\right) - M \left({}^z p_{CoM} - {}^z p_{ZMP}\right) {}^y \ddot{p}_{CoM} + {}^x \dot{L}_w}{M \left({}^z \ddot{p}_{CoM} + g\right)} \tag{4.7}$$



Şekil 4.3 : Tek destek faz evresini gösteren genel bir insansı robot şekli.

İnsansı robotların kontrolü için kütle merkez yörüngelerinin SMN denge kararlılık kriterine göre belirlenmeleri gerekmektedir. Denklem 4.6 ve 4.7 analitik olarak çözülemez, ancak nümerik çözümleri elde edilebilir. Nümerik çözümleme yöntemi literatüde kullanılmasına karşın yörünge planlamada zorluklara neden olur. Bu nedenle genel olarak 4.6 ve 4.7 denklemleri basitleştirilerek analitik çözümler elde edilir. Eğer 4.6 ve 4.7 denklemlerinde açışal momentumlar ihmal edilir ve robotun yürürken dikey eksendeki kütle merkezinin yüksekliğini sabit tuttuğu kabul edilirse basitleştirilmiş denklemler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$ {}^{x}p_{ZMP} = {}^{x}p_{CoM} - \frac{\left({}^{z}p_{CoM} - {}^{z}p_{ZMP}\right)}{g} {}^{x}\ddot{p}_{CoM} \tag{4.8} $$

$$ {}^{y}p_{ZMP} = {}^{y}p_{CoM} - \frac{\left({}^{z}p_{CoM} - {}^{z}p_{ZMP}\right)}{g} {}^{y}\ddot{p}_{CoM} \tag{4.9} $$

Basit cebirsel işlemler sonrasında 4.8 ve 4.9 denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$ {}^{x}\ddot{p}_{CoM} = g \frac{{}^{x}p_{CoM} - {}^{x}p_{ZMP}}{{}^{z}p_{CoM} - {}^{z}p_{ZMP}} \tag{4.10} $$

$$ {}^{y}\ddot{p}_{CoM} = g\frac{{}^{y}p_{CoM} - {}^{y}p_{ZMP}}{{}_{z}p_{CoM} - {}^{z}p_{ZMP}} \tag{4.11} $$

Eğer sabit eksen takımını zeminde kabul edersek SMN noktası dikey düzlemde sıfıra eşit olacaktır. Bu kabul altında 4.10 ve 4.11 denklemlerinin çözümleri - bir başka deyişle kütle merkezinin yörüngeleri - aşağıdaki gibi elde edilir.

$$ \begin{aligned} {}^{x}p_{CoM}(t) &= \left({}^{x}p_{CoM}(t_0) - {}^{x}p_{ZMP}\right)\cosh\left(\omega(t-t_0)\right) + \frac{{}^{x}\dot{p}_{CoM}(t_0)}{\omega}\sinh\left(\omega(t-t_0)\right) + {}^{x}p_{ZMP} \\ {}^{x}\dot{p}_{CoM}(t) &= \omega\left({}^{x}p_{CoM}(t_0) - {}^{x}p_{ZMP}\right)\sinh\left(\omega(t-t_0)\right) + {}^{x}\dot{p}_{CoM}(t_0)\cosh\left(\omega(t-t_0)\right) \\ {}^{x}\ddot{p}_{CoM}(t) &= \omega^2\left({}^{x}p_{CoM}(t_0) - {}^{x}p_{ZMP}\right)\cosh\left(\omega(t-t_0)\right) + \omega\,{}^{x}\dot{p}_{CoM}(t_0)\sinh\left(\omega(t-t_0)\right) \end{aligned} \tag{4.12} $$

$$ \begin{aligned} {}^{y}p_{CoM}(t) &= \left({}^{y}p_{CoM}(t_0) - {}^{y}p_{ZMP}\right)\cosh\left(\omega(t-t_0)\right) + \frac{{}^{y}\dot{p}_{CoM}(t_0)}{\omega}\sinh\left(\omega(t-t_0)\right) + {}^{y}p_{ZMP} \\ {}^{y}\dot{p}_{CoM}(t) &= \omega\left({}^{y}p_{CoM}(t_0) - {}^{y}p_{ZMP}\right)\sinh\left(\omega(t-t_0)\right) + {}^{y}\dot{p}_{CoM}(t_0)\cosh\left(\omega(t-t_0)\right) \\ {}^{y}\ddot{p}_{CoM}(t) &= \omega^2\left({}^{y}p_{CoM}(t_0) - {}^{y}p_{ZMP}\right)\cosh\left(\omega(t-t_0)\right) + \omega\,{}^{y}\dot{p}_{CoM}(t_0)\sinh\left(\omega(t-t_0)\right) \end{aligned} \tag{4.13} $$

Burada $\omega = \sqrt{\frac{g}{{}_{z}p_{CoM}}}$. Böylece robotun dengesini koruyarak dinamik yürümesini gerçekleştirecek kütle merkez yörüngeleri elde edilmiş olur.

SMN yörügelerinin elde edilmesinde çok sık kullanılan bir diğer yöntem de doğrusal ters sarkaç modelidir. Doğrusal ters sarkaç model yaklaşımı şekil 4.4 incelenerek daha kolay anlaşılabilir. Şekil 4.4'de bulunan p noktası etrafındaki moment 4.14 ve 4.15 denklemleri kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$ {}^{x}\tau = -mg\left(x - {}^{x}p\right) + m\ddot{x}z_c \tag{4.14} $$

$$ {}^{y}\tau = -mg\left(y - {}^{y}p\right) + m\ddot{y}z_c \tag{4.15} $$

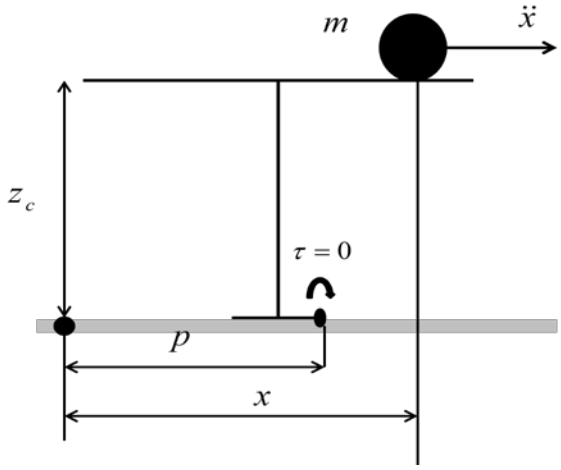
Eğer (4.14) ve (4.15) denklemlerinde momentler sıfıra eşitlenirse SMN noktası

$$ {}^{x}p = x - \frac{z_c}{g}\ddot{x} \tag{4.16} $$

$$ {}^{y}p = y - \frac{z_c}{g}\ddot{y} \tag{4.17} $$

olarak elde edilir.

Denklem 4.16 ve 4.17'den direk görülebileceği üzere eğer kütle ivmelenmeden hareket ediyorsa SMN direk olarak kütle merkezinin izdüşümüne



Şekil 4.4 : Ters sarkaç benzetiminin iki boyutta gösterimi.

eşittir. Ayrıca eğer kütlenin ivmesi çok büyükse SMN noktası ayak destek düzleminin dışına çıkacaktır. Bu durum fiziksel olarak gerçekçi değildir, çünkü SMN noktası ayağa etki eden kuvvetlerin bileşkesidir. Bu durum 4.16 ve 4.17 denklemlerinin ayağa uygulanan tepki kuvvetleri göz ardı edilerek elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle, 4.16 ve 4.17 denklemlerinde ayak yere sabit bir şekilde yapıştırılmış olarak kabul edildiği düşünülebilir. Eğer, zemin tepki kuvvetleri de hesaba katılarak SMN noktası hesaplanırsa 4.18 ve 4.19 denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$ {}^{x}\tau = -m\left(g+\ddot{z}\right)\left(x-{}^{x}p\right)+m\ddot{x}z \Rightarrow {}^{x}p = x-\frac{z}{g+\ddot{z}}\ddot{x} \tag{4.18}$$

$$ {}^{y}\tau = -m\left(g+\ddot{z}\right)\left(y-{}^{y}p\right)+m\ddot{x}z \Rightarrow {}^{y}p = y-\frac{z}{g+\ddot{z}}\ddot{y} \tag{4.19}$$

Yürüme yörüngeleri belirlenirken kütle merkezinin başlangıç konum ve ivmeleri yürüme denge kararlılığı üzerinde oldukça etkilidir. Bunun nedeni ters sarkaç modelden de anlaşılacağı üzere dinamik yürümenin doğası gereği kararlı olmayan bir yapıya sahip olmasıdır. Bu nedenle kütle merkezinin başlangıç konum ve hızları aşağıda verilen yöntem ile belirlenmiştir.

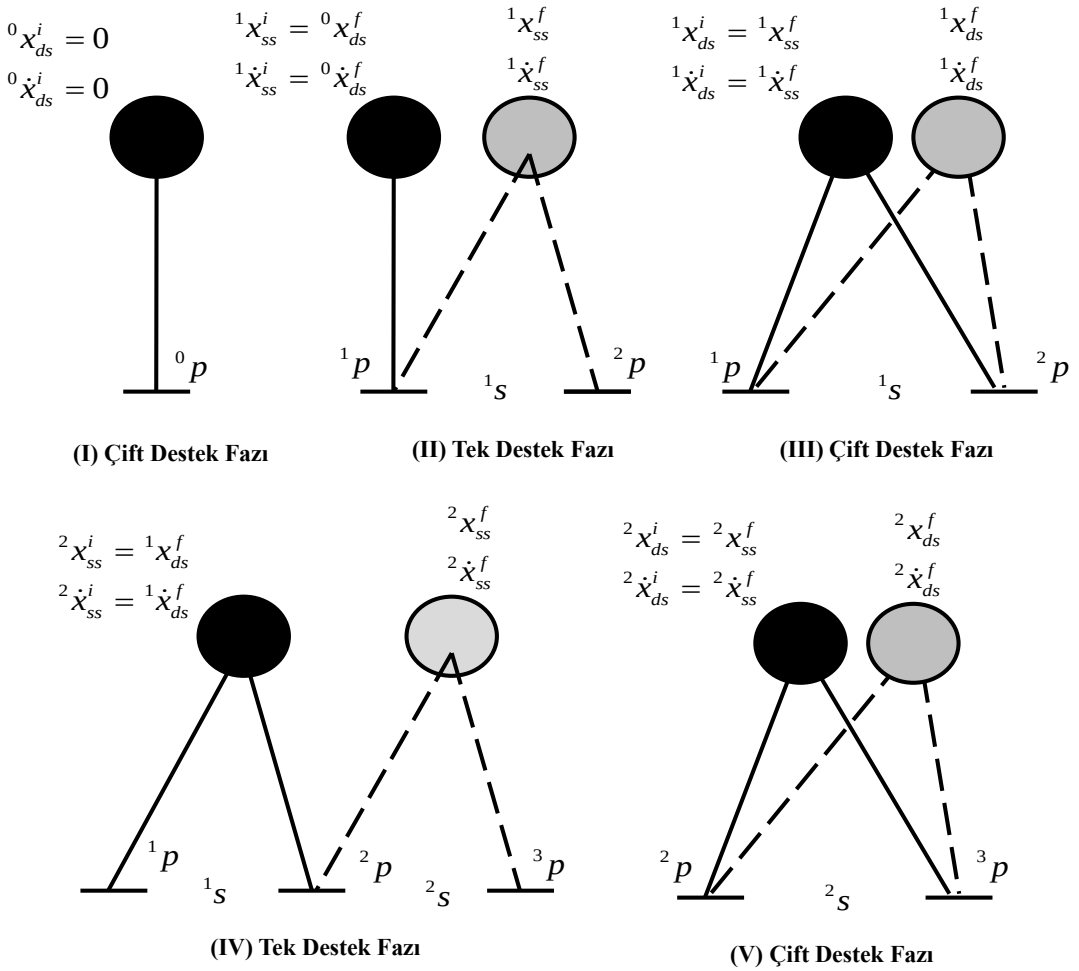
Şekil 4.5'de iki bacaklı yürüme için genel tek ve çift faz evreleri gösterilmektedir. Bu şekilde

${}^{k}p$ robotun ayak pozisyonunu,

${}^{k}x_{ss}^{i}$ tek destek faz evresinde robotun kütle merkezinin başlangıç pozisyonunu,

${}^{k}\dot{x}_{ss}^{i}$ tek destek faz evresinde robotun kütle merkezinin başlangıç hızını,

${}^{k}x_{ss}^{f}$ tek destek faz evresinde robotun kütle merkezinin son pozisyonunu,



Şekil 4.5 : İki ayaklı yürümede tek ve çift destek faz evreleri.

${}^k\dot{x}_{ss}^f$ tek destek faz evresinde robotun kütle merkezinin son hızını,

${}^k x_{ds}^i$ çift destek faz evresinde robotun kütle merkezinin başlangıç pozisyonunu,

${}^k\dot{x}_{ds}^i$ çift destek faz evresinde robotun kütle merkezinin başlangıç hızını,

${}^k x_{ds}^f$ çift destek faz evresinde robotun kütle merkezinin son pozisyonunu,

${}^k\dot{x}_{ds}^f$ çift destek faz evresinde robotun kütle merkezinin son hızını,

${}^k s$ bir adım uzunluğunu,

belirtmektedir. Robotun kütle merkezinin konumu ayağın sabit bulunduğu nokta ve adım uzunluğu cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$ {}^k x_{ss}^i = {}^k p - \beta\, {}^k s \tag{4.20}$$

$$ {}^k x_{ss}^f = {}^k p + \alpha\, {}^k s \tag{4.21}$$

Eğer 4.20 ve 4.21 denklemleri 4.12 denkleminde robotun kütle merkezinin yörüngesini belirlemede kullanılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$
{}^{k}p + {}^{k}\alpha\,{}^{k}s = ({}^{k}p - {}^{k}\beta\,{}^{k}s - {}^{k}p)\cosh\left(\omega\left({}^{k}t_{ss}^{f} - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right) + \frac{{}^{k}\dot{x}_{ss}^{i}}{\omega}\sinh\left(\omega\left({}^{k}t_{ss}^{f} - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right) + {}^{k}p \tag{4.22}
$$

Denklem 4.22 kullanılarak robotun kütle merkezinin ilk hızı aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$
{}^{k}\dot{x}_{ss}^{i} = \omega\frac{{}^{k}\alpha + {}^{k}\beta\cosh\left(\omega\left({}^{k}t_{ss}^{f} - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right)}{\sinh\left(\omega\left({}^{k}t_{ss}^{f} - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right)}\,{}^{k}s \tag{4.23}
$$

Denkem 4.23'de verilen robotun kütle merkezinin yörüngeleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$
{}^{k}x_{ss}(t) = \left({}^{k}x_{ss}^{i} - {}^{k}p\right)\cosh\left(\omega\left(t - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right) + \frac{{}^{k}\dot{x}_{ss}^{i}}{\omega}\sinh\left(\omega\left(t - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right) + {}^{k}p \tag{4.24}
$$

$$
{}^{k}\dot{x}_{ss}(t) = \omega\left({}^{k}x_{ss}^{i} - {}^{k}p\right)\sinh\left(\omega\left(t - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right) + {}^{k}\dot{x}_{ss}^{i}\cosh\left(\omega\left(t - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right) \tag{4.25}
$$

$$
{}^{k}\ddot{x}_{ss}(t) = \omega^{2}\left({}^{k}x_{ss}^{i} - {}^{k}p\right)\cosh\left(\omega\left(t - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right) + \omega\,{}^{k}\dot{x}_{ss}^{i}\sinh\left(\omega\left(t - {}^{k}t_{ss}^{i}\right)\right) \tag{4.26}
$$

Tek destek faz evresinin son hızı ve çift destek faz evresinin ilk ve son hızları 4.24, 4.25 ve 4.26 denklemleri kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$
{}^{k}\dot{x}_{ss}^{f} = {}^{k}x_{ss}\left({}^{k}t_{ss}^{f}\right) \tag{4.27}
$$

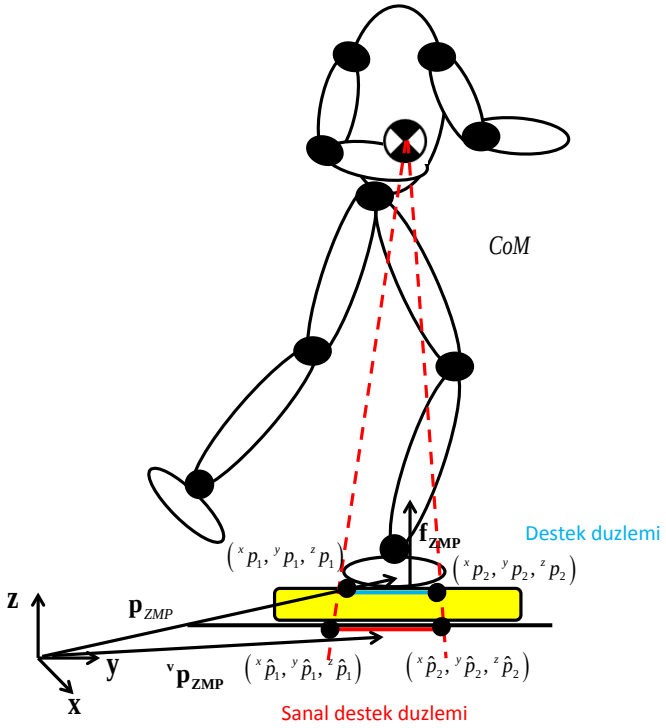
$$
{}^{k}\dot{x}_{ds}^{i} = {}^{k}\dot{x}_{ss}^{f} = {}^{k}x_{ss}\left({}^{k}t_{ss}^{f}\right) \tag{4.28}
$$

$$
{}^{k-1}\dot{x}_{ds}^{f} = {}^{k}\dot{x}_{ss}^{i} \tag{4.29}
$$

4.2.2 Engebeli zeminlerde SMN kullanılarak dinamik yürüme probleminin çözülmesi.

Engebeli zeminlerde insansı robotların dinamik yürüme problemi uzun zamandır araştırılmaktadır [95-97]. Bu problem için çeşitli çözümler üretilmesine karşın düzlem üzerinde SMN kullanılarak elde edilen dinamik yürüme gibi başarılı bir sonuç henüz elde edilmemiştir. Bunun temel nedenleri önerilen çözümlerin oldukça karmaşık olması ve uygulamada karşılaşılan problemlerdir. Ayrıca robotların dış çevreye adaptasyon problemi çözülmeden bilinmeyen engebeli yüzeylerde robotların dinamik yürüme probleminin çözülmesi oldukça güçtür.

Bu bölümde insansı robotların dinamik yürüme problemi bilinen engebeli yüzeylerde SMN kullanılarak çözülecektir. Şekil 4.6'da insansı robotun engebeli bir yüzeyde



Şekil 4.6 : İnsansı robotun engebeli yüzeyde denge kararlılığını koruyarak yürümesi.

yürümesi gösterilmektedir. SMN denge kararlılık kriterini engebeli yüzeylerde uygulamak için sanal bir düzlem oluşturulması gerekir [70]. Bu sanal düzlemi aşağıda verilen denklem ile ifade edelim.

$$ {}^{z}\hat{p}_i = k_x\, {}^{x}\hat{p}_i + k_y\, {}^{y}\hat{p}_i + {}^{z}\hat{p}_i^{0} \tag{4.30} $$

Burada $\left({}^{x}\hat{p}_i, {}^{y}\hat{p}_i, {}^{z}\hat{p}_i\right)$ sanal düzlem üzerindeki bir noktayı; ${}^{z}\hat{p}_i^{0}$ sanal düzlemin ilk yüksekliğini ve k_x ve k_y sanal düzlemin tanımlanmasında kullanılan serbest parametreleri belirtmektedir. Sanal düzlem ile insansı robotun ayağının engebeli yüzeye dokunma noktaları arasındaki ilişki şekil 4.6 ve basit geometrik denklemler kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$ \begin{aligned} {}^{x}\hat{p}_i(t) &= \frac{{}^{x}p_i - {}^{x}p_{CoM}}{{}^{x}p_i - {}^{x}p_{CoM}}\left({}^{z}p_i - {}^{z}p_{CoM}\right) + x \\ {}^{y}\hat{p}_i(t) &= \frac{{}^{y}p_i - {}^{y}p_{CoM}}{{}^{y}p_i - {}^{y}p_{CoM}}\left({}^{z}p_i - {}^{z}p_{CoM}\right) + y \end{aligned} \tag{4.31} $$

Ayağa $\mathbf{p}_i$, i=1,2,3…. noktalarında etkiyen kuvvetlerin $\mathbf{f}_i$, i=1,2,3…. olduğunu varsayalım. Bu durumda sanal SMN noktasındaki moment sanal destek düzleminde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sum_i ({}^v\mathbf{p}_{zmp} - \mathbf{p}_i) \times \mathbf{f}_i = \mathbf{0} \tag{4.32}$$

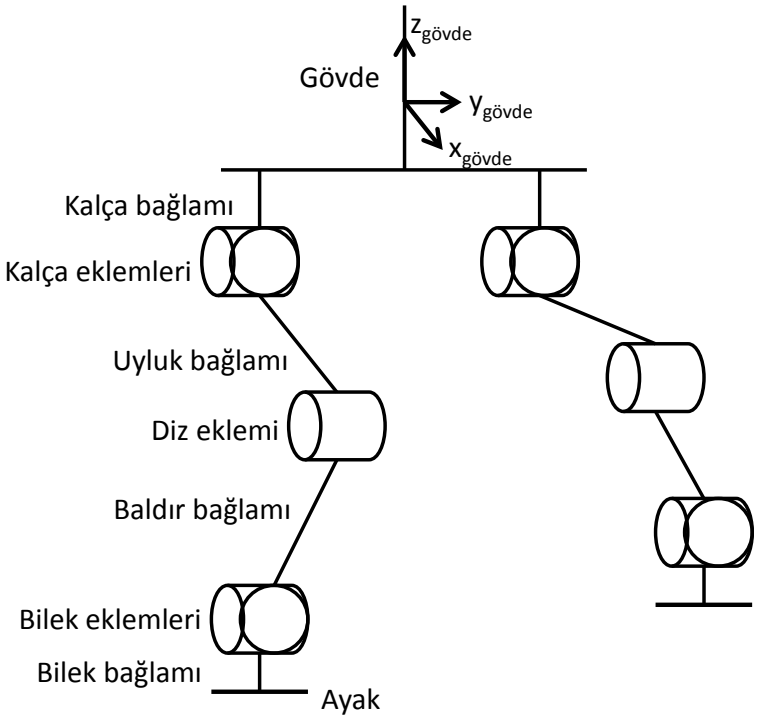
$${}^v\mathbf{p}_{zmp} \times \sum_i \mathbf{f}_i = \sum_i \mathbf{p}_i \times \mathbf{f}_i \tag{4.33}$$

Eğer yürüme boyunca insansı robotun sanal SMN'i sanal destek düzlemi içinde kalıyorsa dinamik yürümenin denge kararlılığı sağlanır. Böylece engebeli yüzeyler için SMN çözümü doğrudan dinamik yürüme problemine uygulanabilir.

4.3 İki Bacaklı Yürüyen Bir Mekanizmanın Kontrolü

Bu bölümde iki bacaklı yürüyen bir mekanizma için yeni bir simülatör tasarlanıp mekanizmanın yürüme problemi ile ilgili benzetim sonuçları tasarlanan simülatör aracılığıyla sunulmuştur. Simülasyon çalışmalarında şekil 4.7'de gösterilen yalnız alt vücudu olan bir robot kullanılmıştır. Robotun her bir bacağında 5 serbestlik derecesi olmak üzere toplamda 10 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bu serbestlik derecelerinden 6 tanesi yan düzleme 4 tanesi de ön düzleme dik olarak dönme hareketini geçekleştirmektedirler. Robotun tasarım parametreleri çizelge 4.1'de verilmiştir.

Literatürde çok çeşitli insansı robot mekanizmaları bulunmaktadır. Bu mekanizmalar



Şekil 4.7 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın mekanik yapısı.

genel olarak her bir bacak için 6 serbestlik derecesi olmak üzere alt gövdede toplamda 12 serbestlik derecesi kullanırlar. Alt gövdede tüm hareketleri gerçekleştirebilmek için her bir bacakta en az 6 serbestlik derecesine ihtiyaç vardır. Fakat dikey eksen doğrultusundaki dönme yürümede göreceli olarak daha az etkiye sahip olduğu için bu serbestlik derecesini kullanmadan da yürüme problemi çözülebilir. Bu nedenle hem mekanizma tasarımını hem de kontrol problemini kolaylaştırmak için bu bölümde her bir bacakta 5 serbestlik derecesine sahip iki bacaklı yürüyen bir mekanizma kullanılmıştır.

Çizelge 4.1: Robot parametreleri.

Bağlam	Kütle (kg)	Uzunluk (m)	Kütle merkez konumu
Gövde	13.9	0.40	[-0.2,0.1,0.0]
Kalça	2.6	0.0	[0.02,0.0,0.0]
Uyluk	3.5	0.30	[0.17,0.0,0.0]
Baldır	3.4	0.30	[0.17,0.0,0.0]
Bilek	2.6	0.0	[-0.02,0.0,0.0]
Ayak	2.0	0.12	[0.023,0.0,0.0]

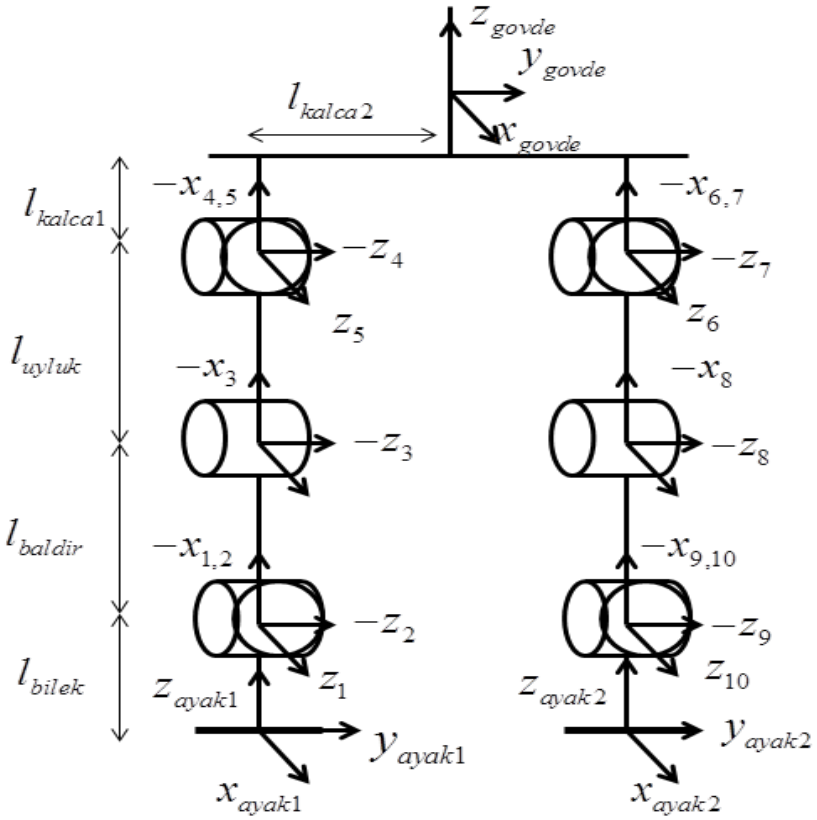
4.3.1 İki bacaklı yürüyen mekanizmanın kinematik analizi

Bu bölümde şekil 4.7'de gösterilen iki bacaklı yürüyen mekanizmanın ileri ve ters kinematik çözümlemeleri elde edilmiştir. İleri kinematik çözümleme için robot literatüründe çok sık kullanılan Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemi ve ters kinematik çözümleme için ise diferansiyel kinematik yöntemi kullanılmıştır [71 ve 98]. Çizelge 4.2'de robotun tek bir bacağı için tasarlanmış D-H tablosu gösterilmektedir. D-H tablosu şekil 4.8'de gösterilen her bir eklem ve gövdeye yerleştirlen koordinat sistemleri kullanılarak elde edilmiştir.

Geliştirilmiş D-H tablosu kullanılarak robotun koordinat sistemleri arasında ki dönüşüm 4.34 denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.2: Tek bir bacak için tasarlanan D-H tablosu.

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	$-\pi/2$	0	0	θ_2
3	0	l_{baldir}	0	θ_3
4	0	l_{uyluk}	0	θ_4
5	$\pi/2$	0	0	θ_5



Şekil 4.8 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın eklemlerinin koordinat sistemleri.

$$ {}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1})d_i \\ \sin(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1})d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.34} $$

Eklemler arasındaki dönüşüm matrisleri kullanılarak ileri kinematik çözümleme bir bacak için 4.35 denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$ {}^{0}_{5}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T\,{}^{3}_{4}T\,{}^{4}_{5}T \tag{4.35} $$

Robotun ayağı ile bileği ve kalçası ile gövdesi arasında ki dönüşümler 4.36 ve 4.37 denklemleri kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$ {}^{ayak}_{0}T = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & l_{bilek} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.36} $$

$$ {}^{5}_{govde}T = \begin{bmatrix} \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 & \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) & -l_{kalca1} \\ 0 & 1 & 0 & l_{kalca2} \\ -\sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.37} $$

Robot ters kinematiği için diferansiyel kinematik yöntemi kullanılmıştır. Diferansiyel kinematik yüksek serbestlik dereceli mekanizmaların kinematik çözümlemelerinde kapalı formda çözüm sunması, çözümün kolay elde edilmesi, on serbestlik dereceli yürüyen mekanizmanın ters kinematik probleminin analitik olarak çözümünün çok zor olması gibi nedenlerden dolayı tercih edilmiştir. Literatürde diferansiyel kinematik ile ilgili birçok kaynak bulunamaktadır [71, 72 ve 98]. Diferansiyel kinematik tabanlı doğru ve ters kinematik çözümler 4.38 ve 4.39 denklemlerinde verilmektedir.

$$ V_{uc} = J(\theta)\dot{\theta} \tag{4.38} $$

$$ \dot{\theta} = J^{-1}(\theta)V_{uc} \tag{4.39} $$

Diferansiyel kinematik - en genel şekilde - hız uzayında Jakobiyen operatörü kullanılarak elde edilen, robotun eklem hızları ile uç noktasının hızı arasındaki doğrusal bağıntı olarak tanımlanabilir. Böylece, yüksek serbestlik dereceli sistemler için çözümü çok zor olan ters kinematik problemi Jakobiyen operatörünün tersi alınarak kolayca elde edilir.

İvmeler 4.38 ve 4.39 denklemlerinin türevi alınarak denklem 4.40 ve 4.41'de verildiği üzere kolayca elde edilebilir.

$$ A_{uc} = \dot{V}_{uc} = J(\theta)\ddot{\theta} + \dot{J}(\theta)\dot{\theta} \tag{4.40} $$

$$ \ddot{\theta} = J^{-1}(\theta)\dot{V}_{uc} + \frac{d}{dt}\left(J^{-1}(\theta)\right)V_{uc} \tag{4.41} $$

İki bacaklı robotta yürüme hızı düşük olduğundan Jakobiyen operatörünün değişimleri gözardı edilebilir. Böylece 4.40 ve 4.41 denklemleri aşağıdaki gibi basitleştirilebilirler.

$$ A_{uc} = \dot{V}_{uc} = J(\theta)\ddot{\theta} \tag{4.42} $$

$$\ddot{\theta} = J^{-1}(\theta)\dot{V}_{uc} \tag{4.43}$$

Jakobiyen operatörü hız uzayının yanı sıra robot eklemlerindeki torklar ve uç noktadaki statik kuvvetler arasındaki ilişkinin tanımlanmasında da kullanılabilir. Bu tanımlama aşağıdaki gibi ifade edilir [71].

$$\boldsymbol{\tau} = J^{T}(\theta)\mathbf{F} \tag{4.44}$$

Burada $\boldsymbol{\tau}$ eklem torklarını ve $\mathbf{F}$ uç noktadaki statik kuvvetleri ifade etmektedir.

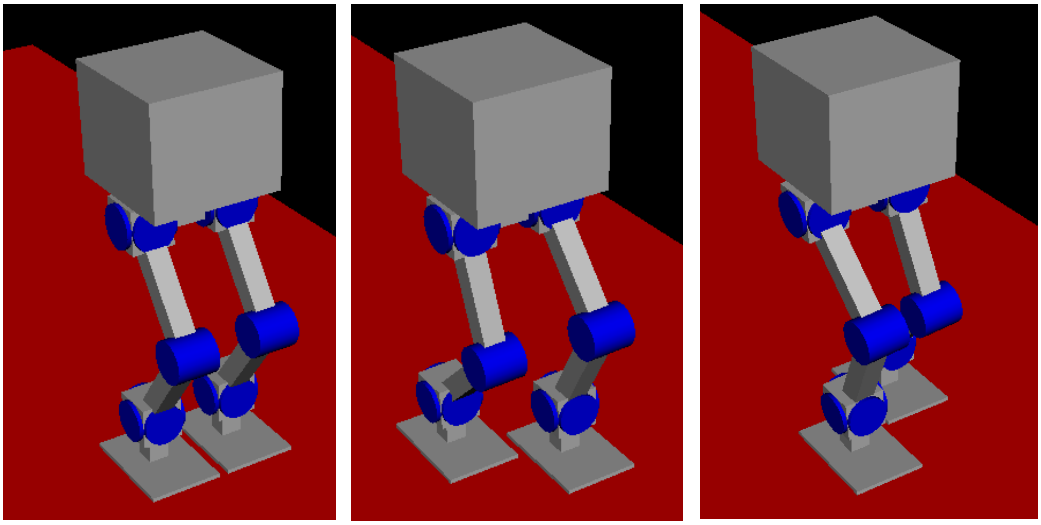
4.3.2 Simülasyon sonuçları

Bu bölümde iki bacaklı robotun yürüme simülasyonlarının sonuçları verilmektedir. Yürüme algoritmaları düzlem ve engebeli yüzeyler için statik ve dinamik denge kararlılık kriterleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

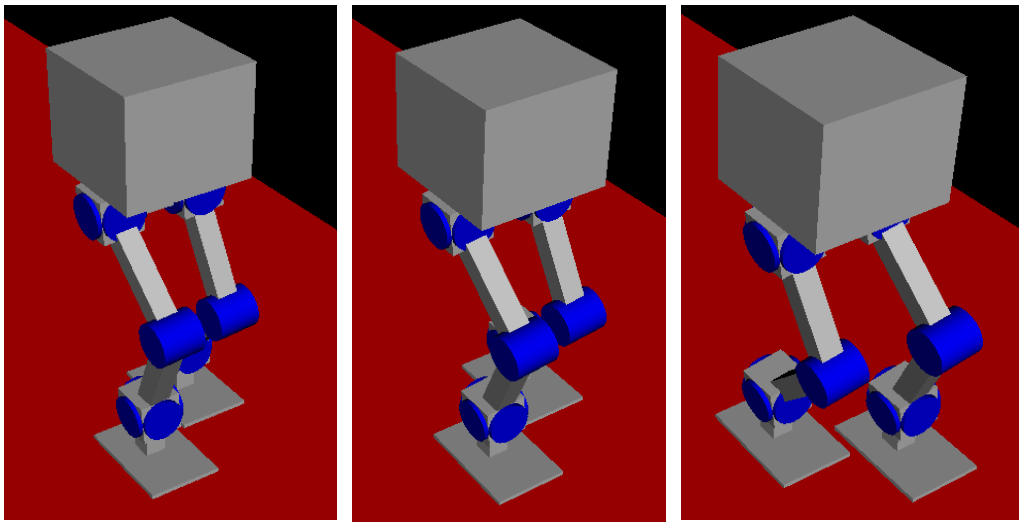
Hem statik hem de dinamik yürüme algoritmalarının simülasyonlarında iki bacaklı robotun hareket kontrolü doğrudan kütle merkezinin kontrol edilmesiyle elde edilmiştir. Robotun kütle merkezi kontrolünde bölüm 2'de verilen bozucu gözetleyici tabanlı dayanıklı pozisyon kontrolörleri kullanılmıştır. Bozucu gözetleyici sayesinde iki bacaklı robotun bölüm 3'de verilen karmaşık dinamik modeli kullanılmaksızın yüksek performanslı dayanıklı pozisyon kontrolü elde edilmiştir. Pozisyon kontrolünde dinamik model gerekmese de kuvvet kontrolünün performansını iyileştirmek için dinamik modelin elde edilmesi çok önemlidir.

İki bacaklı robotun bir düzlem üzerindeki yürüşü şekil 4.9 ve şekil 4.10'da gösterilmektedir. Şekil 4.9'da iki bacaklı robot statik denge kararlılık kriteri kullanılarak yürütülürken şekil 4.10'da sonuçlar SMN tabanlı dinamik denge kararlılık kriteri kullanılarak elde edilmiştir. Her iki şekilde de robotun adım uzunlukları aynıdır ve simülasyonlar aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Direk olarak şekillerden anlaşılacağı üzere iki bacaklı robot SMN tabanlı dinamik denge kararlılık kriteri kullanılarak daha hızlı yürütülmüştür.

Yukarıda verilen dinamik yürüme simülasyonu için x ve y düzlemlerindeki SMN referansları ve robotun SMN ölçümleri şekil 4.11'de gösterilmektedir. Bu şekilden direk görülebileceği üzere iki bacaklı robotun SMN ölçümleri SMN referanslarını takip etmektedir. Dinamik yürüme kararlılığı önerilen bozucu gözetleyici tabanlı dayanıklı pozisyon kontrolörü kullanılarak elde edilmiştir.



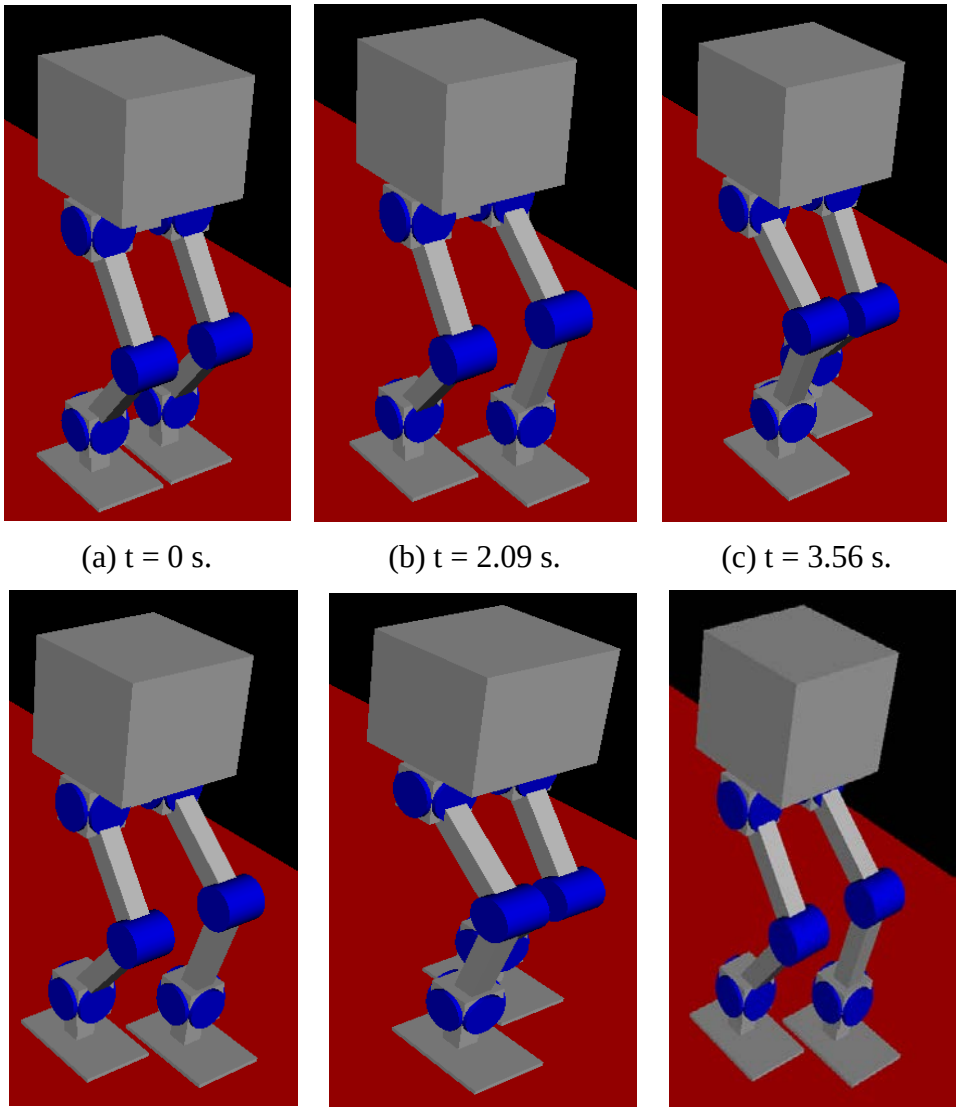
(a) t = 0 s. (b) t =3.2 s. (c) t =6.32 s.



(d) t =9.38 s. (e) t = 12.35 s. (f) t = 15.6 s.

Şekil 4.9 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın statik yürüme sonuçları.

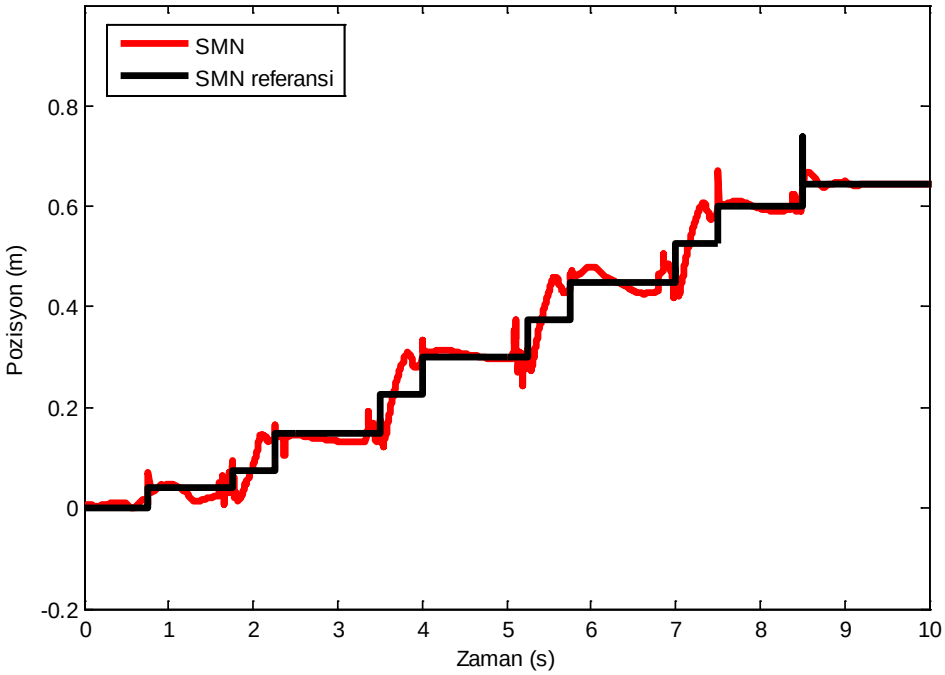
İki bacaklı robotun engebeli bir yüzeydeki yürüyüşü şekil 4.12'de gösterilmektedir. Engebeli yüzeydeki yürüme sanal SMN tabanlı dinamik denge kararlılık kriteri kullanılarak elde edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında sonuçların verilmemesine karşın düzlem için kullanılan statik yürüme algoritması herhangi bir değişiklik yapılmadan engebeli yüzeyede uygulanmış ve statik yürümede başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.13'de dayanıklı pozisyon kontrolörü kullanılarak elde edilen kütle merkezi kontrol sonuçları gösterilmektedir. Doğrudan bu şekilde görülebileceği üzere dayanıklı kontrolörler kullanılarak kütle merkezi için yüksek performanslı pozisyon kontrolü elde edilmiştir. Şekil 4.12 ve şekil 4.13 bize iki bacaklı robotun engebeli yüzeylerde dinamik yürüme algoritmaları kullanılarak kontrol edilebildiğini göstermektedir.



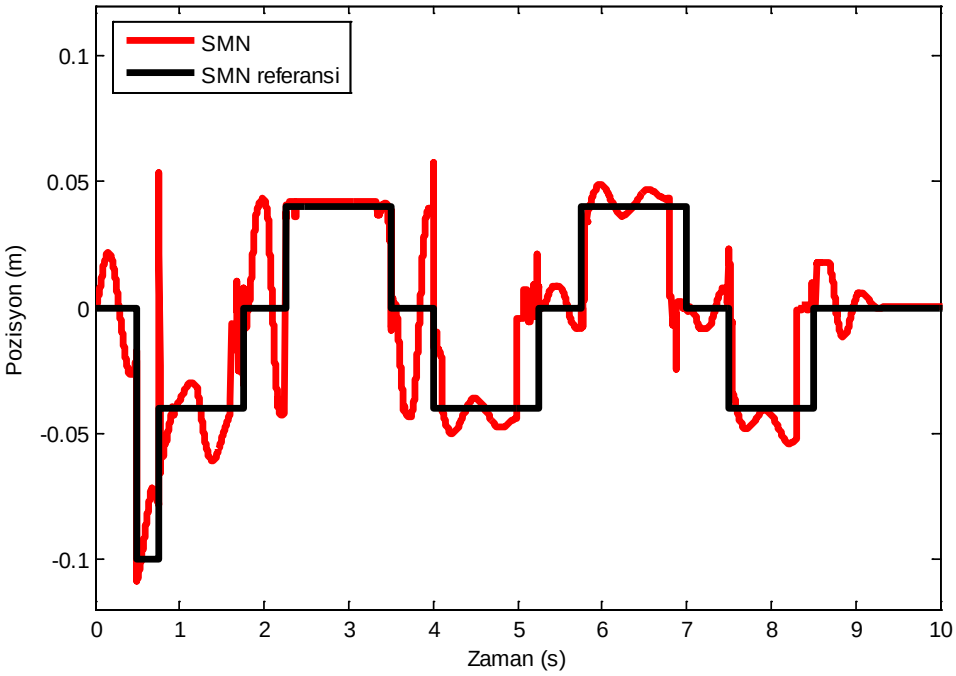
(a) t = 0 s. (b) t = 2.09 s. (c) t = 3.56 s.

(d) t = 5.41 s. (e) t = 7.01 s. (f) t = 8.29 s.

Şekil 4.10 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın dinamik yürüme sonuçları.

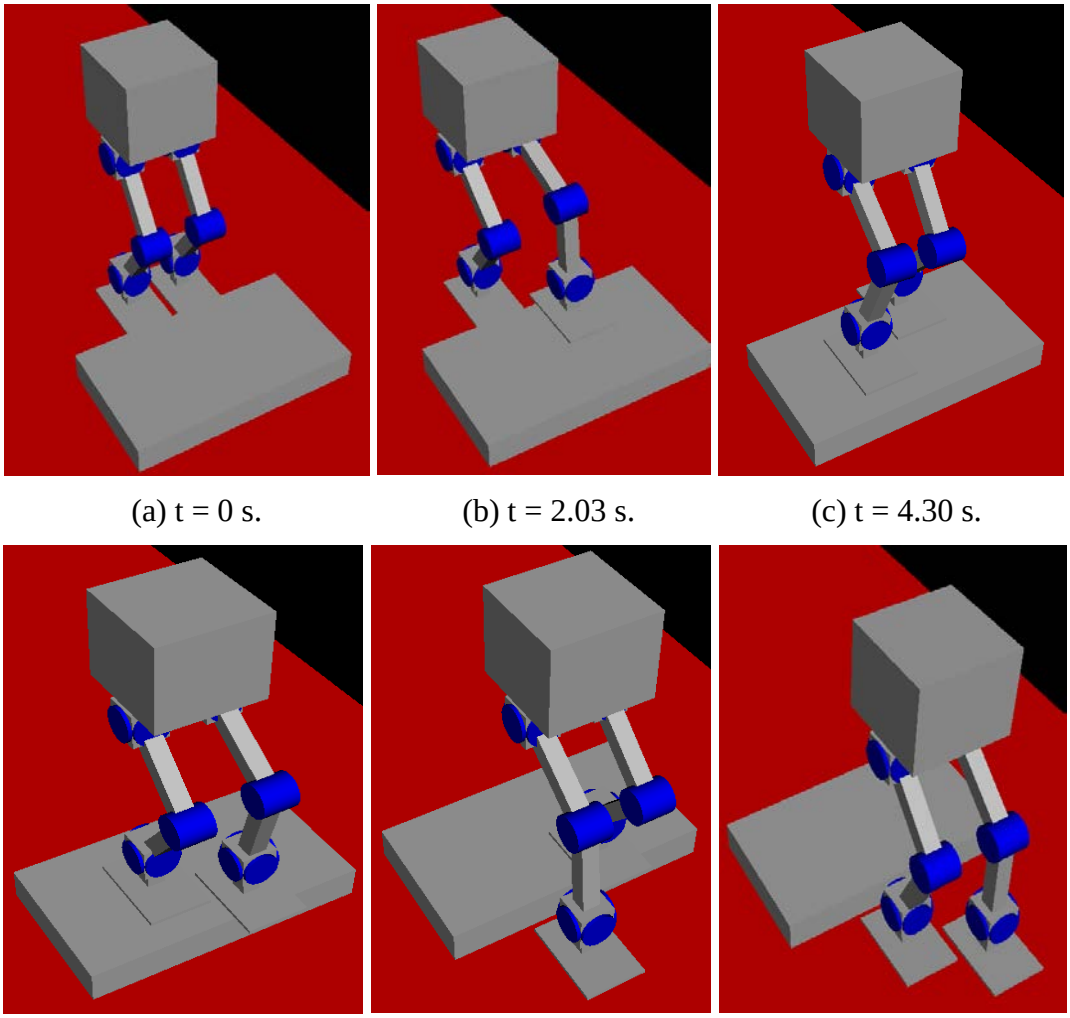


(a) x ekseni doğrulutsunda SMN simulasyon sonuçları.



(b) y ekseni doğrultusunda SMN simülasyon sonuçları.

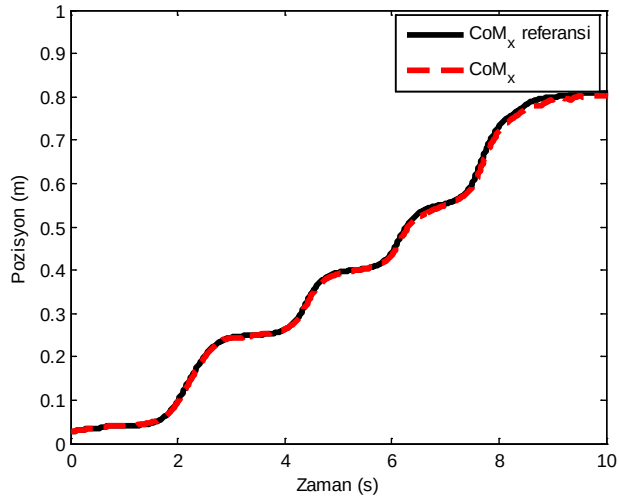
Şekil 4.11 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın SMN simulasyon sonuçları.



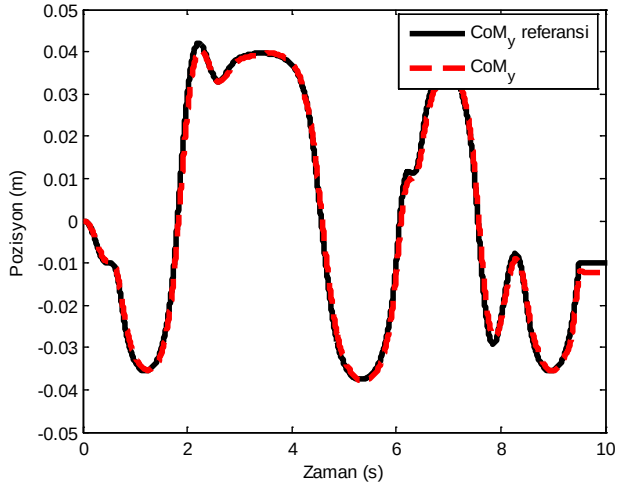
(a) t = 0 s. (b) t = 2.03 s. (c) t = 4.30 s.

(d) t = 6.0 s. (e) t = 8.01 s. (f) t = 9.58 s.

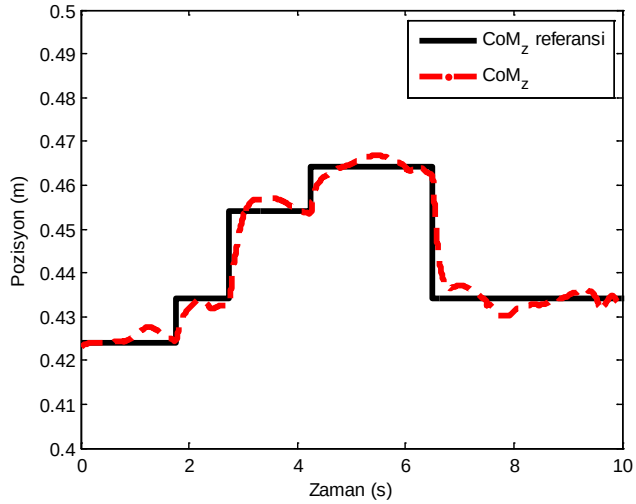
Şekil 4.12 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın engebeli yüzeyde yürüme sonuçları.



(a) x ekseni doğrultusunda kütle merkezi kontrol sonuçları.



(b) y ekseni doğrultusunda kütle merkezi kontrol sonuçları.



(c) z ekseni doğrultusunda kütle merkezi kontrol sonuçları.

Şekil 4.13 : İki bacaklı yürüyen mekanizmanın engebeli yüzeyde yürürken kütle merkez kontrolünün sonuçları.

5. İNSANSI ROBOTLARIN TÜM VÜCUT KONTROLÜ

Bu bölümde insansı robotların alt ve üst vücut kontrolleri bir başka deyişle tüm vücut kontrolü ele alınmıştır. Literatürde alt vücut kontrol araştırmaları insansı robot çalışmalarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Fakat insansı robotların hareket yeteneklerinin arttırılması için üst vücut kontrolün de göz önünde bulundurulması zorunludur. İnsansı robotlardan beklenen en temel özellik insanların yaşam ortamlarında insanlarla beraber çalışarak onların yaşam kalitelerini arttırmalarıdır. Eğer insanların günlük yaşamda yaptıkları temel hareketleri göz önünde bulundurursak üst vücut kontrol çalışmalarının ne kadar önemli olduğunu daha iyi kavrayabiliriz. Bir yönün işaret edilmesi ya da bir nesnenin ittirilmesi gibi hareketlerin yapılabilmesi için üst vücut kontrolünün gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Üst vücut kontrol çalışmaları serbest ve kısıtlı hareket kontrolü olmak üzere iki temel bölümde incelenmiştir. Serbest hareket kontrolünde robotun üst vücudu – gövde ve kolları – çevre ile etkileşime girmeden hareket etmektedir. Kontak kontrolü olarak da adlandırlabilecek kısıtlı hareket kontrolünde ise robotun üst vücudu çevre ile etkileşime girmektedir. Yukarıda verilen yön gösterme ve bir nesneyi ittirme örnekleri serbest ve kısıtlı hareket kontrollerin kullanıldığı temel günlük yaşam hareketleridir.

Bu bölümde ilk olarak serbest hareket kontrolü ele alınmış ve insansı robotun kolları için alt vücuttan bağımsız dayanıklı pozisyon kontrolörleri tasarlanmıştır. Daha sonra serbest hareket kontrolü kullanılarak insansı robotların dinamik yürüme kararlılığının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Kısıtlı hareket kontrolü için bölüm 2'de verilen tepki kuvvet gözetleyicisi kullanılmış ve kuvvet sensörü gerekmeksizin dayanıklı kuvvet kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kısıtlı hareket kontrolü uygulamalarında robot kolları bölüm 2'de verilen dayanıklı hibrit hareket kontrolörü kullanılarak kontrol edilmiştir. İnsansı robotun bilinmeyen bir çevrede bir nesneye güvenli bir şekilde yaklaşarak dokunması ve bu nesneyi ittirmesi uygulaması serbest ve kısıtlı hareket kontrolörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

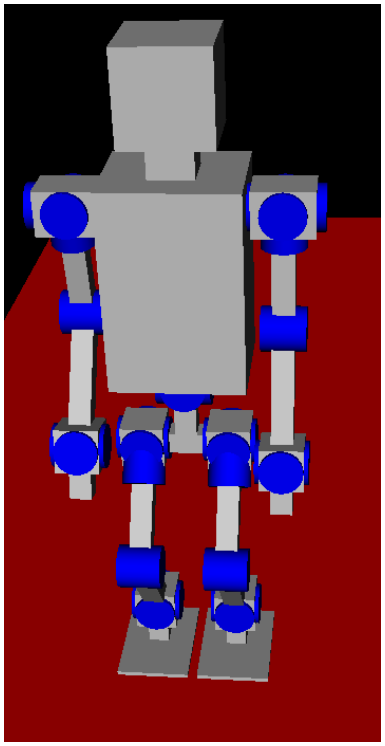
Yukarıda bahsedilen gerek alt gerekse de üst vücut kontrol uygulamalarında insansı robotlar için bazı temel görevler belirlenmiş ve bu temel görevlerin yerine getirilmesini sağlayacak yörüngeler tasarlanmıştır. Örneğin SMN dinamik yürüme denge kararlığını sağlayacak kütle merkez yörüngelerinin üretilmesi için kullanılmış ya da robot kollarının hibrit koordinat eksenleri doğrultusundaki pozisyon ve kuvvet kontrolleri için gereken yörünge planlamaları yapılmıştır. Fakat insanların yaşam ortamları gibi bilinmeyen çevrelerde yörünge planlama tabanlı kontrol uygulamalarının gerçekleştirilmesi oldukça güçtür. Robotların çevre ile uyumlu olarak çalışmaları, çevreye zarar vermemeleri ve çevreden gelen bozuculara karşı da dayanıklı olmaları gerekmektedir. İnsanların yaşam ortamlarında çalıştırılacak insansı robotların güvenli olmaları robot kontrolünde karşılaşılan en zor problemlerden bir tanesidir. Bu nedenle insansı robotların çevre ile daha uyumlu olmalarını sağlayacak kontrol yapıları üzerinde durulmalıdır. Bu bölümde en son olarak insansı robotların kontrolü için çift taraflı hareket kontrolü (ÇTHK) yapısı önerilmiştir [99 ve 100]. ÇTHK'da bir yöneten (master) ve bir de yönetilen (slave) bulunmaktadır. ÇTHK'nın temel amacı yönetilenin yönetenden aldığı yörüngeleri – pozisyon ve kuvvet kontrol yörüngelerini- gerçekleştirmesidir. Eğer yöneten bir insan yönetende insansı robot olursa robot insanın yeteneklerini kopyalarak karmaşık hareketleri basit bir şekilde gerçekleştirebilir. ÇTHK insanların yeteneklerini insansı robotlara aktararak onların insanların yapabildikleri karmaşık hareketleri gerçekleştirmelerine olanak sağlar. Bu sayede insanların bulunamayacağı ya da bulunmak istemeyeceği ortamlardaki insan yeteneklerine gereksinim duyulan görevler insansı robotlar aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Örneğin yakın zamanda gerçekleşen büyük Japonya depreminde Fukushima nükleer santralinde yaşanan müdahale problemi gibi problemler insan hareketlerini taklit edebilen insansı robotlar kullanılarak basit bir şekilde çözülebilir. Bu tezde ÇTHK dört kanallı çift taraflı hareket kontrolörü (4K_ÇTHK) kullanılarak elde edilmiştir [101]. Bu yapının kullanılmasının temel nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Basit bir şekilde uygulanabilmesi
- Simülasyon ve uygulamalarda yüksek performanslı çift taraflı kontrol sonuçlarının elde edilebilmesi
- Literatürde bölüm 2'de sunulan dayanıklı kontrolör yapılarını kullanarak gerçekleştirilen birçok uygulamasının bulunması

Bu bölümde iki farklı 4K_ÇTHK yapısı sunulmuştur. Bunlardan ilki geleneksel 4K_ÇTHK yapısıdır. Bu yapıda kontrolör eklem uzayının parametreleri kullanılarak model uzayında tasarlanır. Model uzayı ilerleyen bölümde açıklanacaktır. Geleneksel 4K_ÇTHK oldukça basit bir yapıya sahip olmasına karşın insansı robot uygulamalarında bazı pratik kısıtlamalara yol açmaktadır. Örneğin geleneksel yapının kullanılabilmesi için yöneten ve yönetilenin aynı mekanizmalara sahip olması gerekir. Yani insansı robotun mekanik yapısına uygun bir giyilebilir robot tasarlanması gerekmektedir. Bu durum kontrol kolaylığı sağlamasına karşın maliyetin artması açısından problem oluşturabilir. Diğer ve daha önemli problem ise tüm vücut kontrolün gerçekleştirilebilmesi için yöneten ve yönetilenin aynı ortamda olma zorunluluğudur. Bu kısıtlamalar geleneksel 4K_ÇTHK'nın insansı robotlardaki uygulama alanlarını daraltmasına rağmen geleneksel yapı kullanılarak çok ilginç ve yararlı uygulamalar da gerçekleştirilebilir. Örneğin geleneksel 4K_ÇTHK yapısı ve iki tane aynı mekanizmaya sahip giyilebilir robot kullanılarak fiziksel iyileştirme uygulamaları gerçekleştirilebilir. İkinci yöntem de ise model uzayındaki kontrolör uygulama uzayının parametreleri kullanılarak tasarlanmıştır. Bu yöntemde yöneten ve yönetilen robotları farklı mekanizmalar kullanılarak tasarlanabilmektedir. Böylece yöneten robotların tasarımında büyük bir serbestlik elde edilmiştir. Ayrıca insansı robot otomatik ve çift taraflı kontrol yapıları kullanılarak eş zamanlı olarak kontrol edilmiştir. Boylece robotların farklı ortamlarda çalışmaları problemi de ortadan kaldırılmıştır. Hareket yeteneklerinin arttırılması için otomatik kontrol alt vücut kontrolünde çift taraflı kontrol ise üst vücut kontrolünde kullanılmıştır.

5.1 İnsansı Robotun Yapısı

Simülasyon çalışmalarında kullanılan insansı robotun yapısı şekil 5.1'de gösterilmektedir. Her bir bacak ve kol uzvunda 6 serbestlik derecesi ve belde üç serbestlik derecesi olmak üzere toplamda 27 serbestlik derecesi vardır. Ayrıca her bir bacak ve kolda iki serbestlik derecesi ön düzleme dik üç serbestlik derecesi yan düzleme dik ve bir serbestlik derecesi de dikey eksen doğrultusunda bulunmaktadır. İnsansı robotun dinamik davranışına etkisi gözardı edilebileceğinden dolayı hem analizi hem de kontrol tasarımını kolaylaştırmak için boyun bölgesinde eklem kullanılmamıştır. Robotun kinematik çözümleri için bölüm 4'de açıklanan D-H ve diferansiyel kinematik yöntemleri kullanılmıştır.

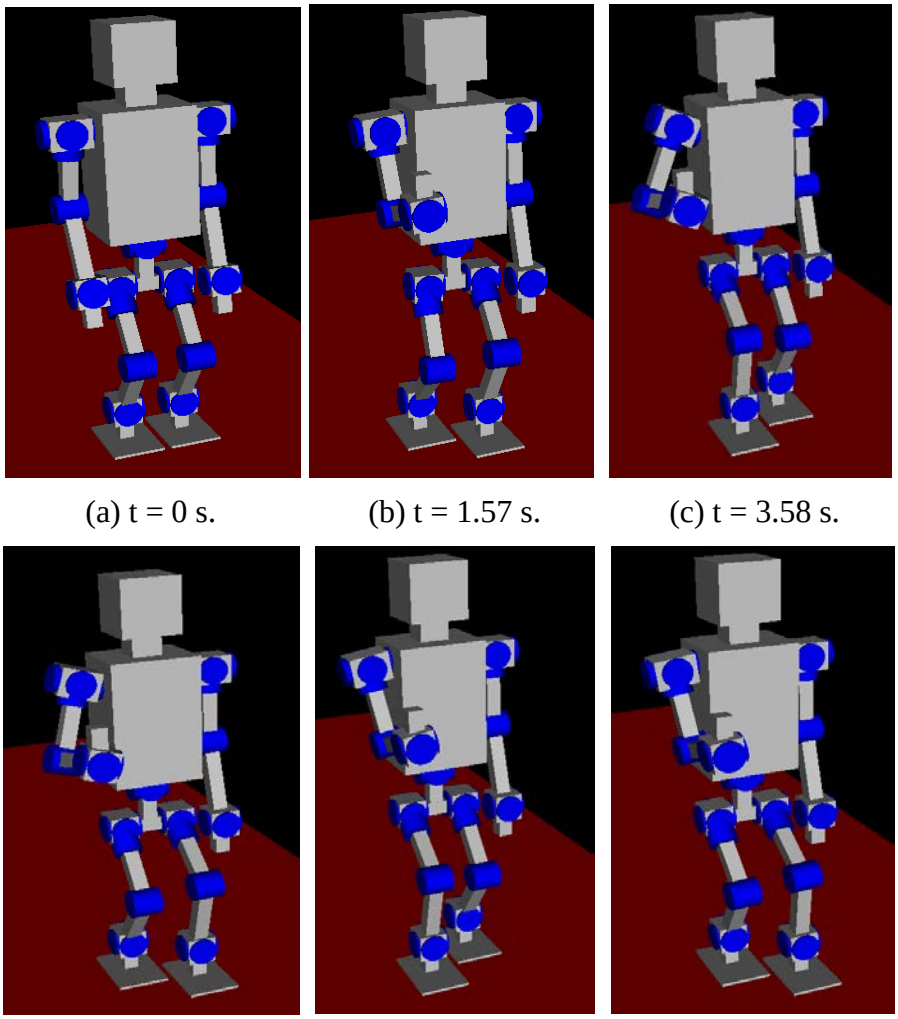


Şekil 5.1 : Simülasyonlarda kullanılan insansı robotun yapısı.

5.2 Serbest Hareket Kontrolü

Bu bölümde şekil 5.1'de gösterilen insansı robotun üst vücut serbest hareket kontrolü gerçekleştirilmiştir. İlk olarak üst vücut kontrolü için bağımsız bir pozisyon kontrolörü tasarlanıp robotun düzlem üzerinde yürümesi sağlanmıştır. Daha sonra dinamik yürüme kararlılığını iyileştirecek üst vücut yörüngeleri elde edilmiştir.

Şekil 5.2'de üst vücut serbest hareket kontrolünün simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Bu şekilde robotun bir düzlem üzerinde yürümesi ve yürürken sağ elini havaya kaldırarak el sallama hareketini gerçekleştirmesi gösterilmektedir. Alt vücut kontrolünde SMN tabanlı dinamik yürüme algoritması kullanılmıştır. Robotun denge kararlılığının iyileştirilmesi için üst vücut hareketlerinde oluşan kütle merkezi değişimleri yürüme kontrolörü tasarlanırken hesaba katılmıştır. Böylece üst vücut için bağımsız bir poziyon kontrolörü ve alt vücutta kütle merkez değişimlerini hesaba katarak denge kararlılığını sağlayan bir kontrol yapısı önerilmiştir. Şekil 5.3'de robotun sağ eli için tasarlanan pozisyon kontrolünün sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.2 ve şekil 5.3'den de görülebileceği üzere robot dinamik yürüme hareketini gerçekleştirirken tasarlanan üst vücut hareketleri de önerilen kontrol yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

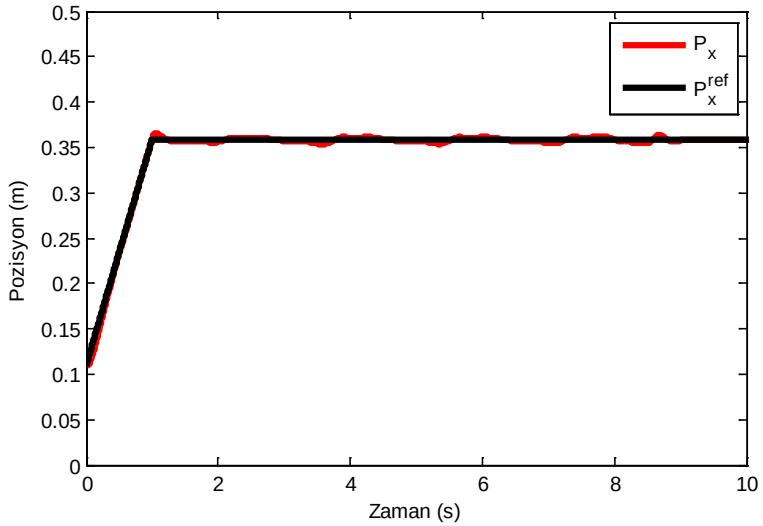


(a) t = 0 s. (b) t = 1.57 s. (c) t = 3.58 s.

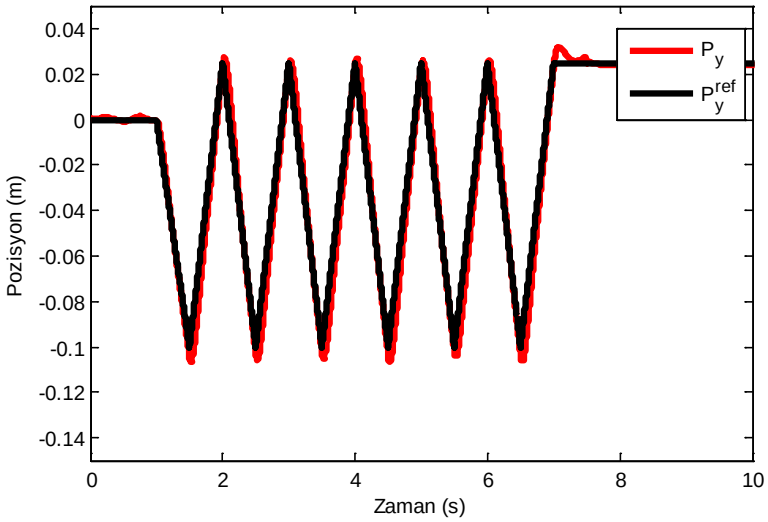
(d) t = 5.32 s. (e) t = 6.49 s. (f) t = 8.12 s.

Şekil 5.2 : İnsansı robotun bir düzlem üzerinde yürümesini ve yürürken sağ elini sallamasını geçerkleştirdiği simülasyon sonuçları.

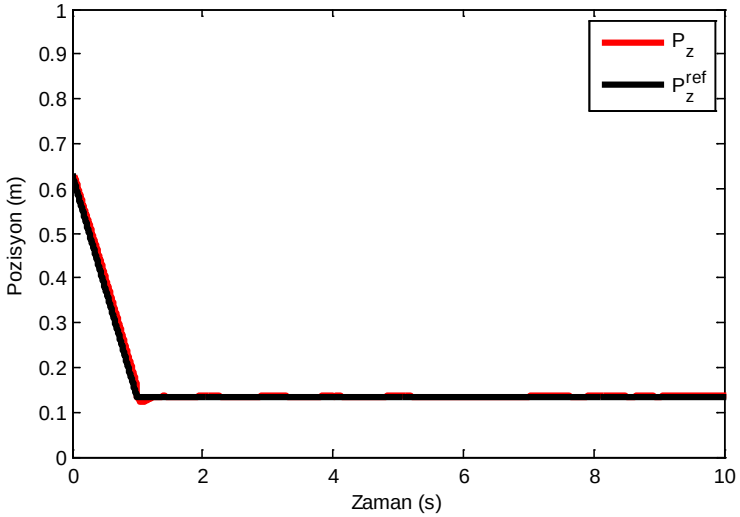
Bölüm 4'de gösterildiği üzere SMN tabanlı dinamik yürüme algoritmaları geliştirilirken sabit ayak üzerinde bulunan bir noktaya etki eden yatay düzlem üzerindeki momentler göz önünde bulundurulur. Bu momentlerin sıfır olduğu nokta bize SMN'i verir. Genel olarak dikey eksen doğrultusundaki momentler göz ardı edilsede eğer zemin sürtünme kuvvetleri bu momentleri bastırmada yetersiz kalırsa robotun devrilmesi kaçınılmazdır. Özellikle dinamik yürümedeki hızlar arttırıldıkça dikey eksen doğrultusundaki momentlerin de etkileri artar. Dikey eksen doğrultusundaki momentlerin bastırılması için dinamik yürüme esnasında üst vücut kontrol kullanılabilir. İnsanlar yürürken ya da koşarken kollarını bacaklarıyla paralel şekilde yanal düzlemde sallarlar. Bu hareket yürüme hızı arrtıkça daha belirgin hale gelir. Yürüme esnasında kolların yanal düzlemde sallanmasının nedeni dengenin iyiliştirilmesidir. Bu durum aşağıdaki gibi analiz edilebilir.



(a) x ekseni doğrultusunda yörünge kontrolü.



(b) y ekseni doğrultusunda yörünge kontrolü.



(c) z ekseni doğrultusunda yörünge kontrolü.

Şekil 5.3 : İnsansı robotun sağ elini sallaması uygulamasında kullanılan el yörüngesi kontrol sonuçları.

Yeniden bir önceki bölümde verilen SMN hesaplama yöntemini ele alalım. Ayakta sabit bir noktaya etki eden moment aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{ZMP}} = \dot{\mathbf{L}}_{\mathbf{w}} + \sum_i m_i \left(\mathbf{p}_{\mathbf{CoM_i}} - \mathbf{p}_{\mathbf{ZMP}} \right) \times \left(\ddot{\mathbf{p}}_{\mathbf{CoM_i}} - \boldsymbol{\upsilon}_{\mathbf{g}} \right) \tag{5.1}$$

Burada $\mathbf{p}_{\mathbf{CoM_i}}$ ve $\ddot{\mathbf{p}}_{\mathbf{CoM_i}}$ sırasıyla i. bağlamın kütle merkezinin konumunu ve ivmesini; $\mathbf{p}_{\mathbf{ZMP}}$ ayakta bulunan bir noktayı; $\boldsymbol{\upsilon}_{\mathbf{g}}$ yerçekim ivmesine ait vektörü ve $\mathbf{L}_{\mathbf{w}}$ robota etki eden açısal momentumu ifade etmektedir. SMN noktası denklem 5.1'de yatay düzlemler doğrultusundaki momentlerin – x ve y düzlemleri doğrultusundaki momentler - sıfıra eşitlenmesi ile elde edilir. Açısal momentumu ihmal edersek dikey eksen –z ekseni - doğrultusundaki moment aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} {}^{z}\tau_{ZMP} &= \sum_i m_i \left({}^{x}p_{CoM_i} - {}^{x}p_{ZMP} \right) {}^{y}\ddot{p}_{CoM_i} - \sum_i m_i \left({}^{y}p_{CoM_i} - {}^{y}p_{ZMP} \right) {}^{x}\ddot{p}_{CoM_i} \\ &= {}^{z}\hat{\tau}_{ZMP} + \sum_j m_j^{arm} \left({}^{x}p_{CoM_j}^{arm} - {}^{x}p_{ZMP} \right) {}^{y}\ddot{p}_{CoM_j}^{arm} - \sum_j m_j^{arm} \left({}^{y}p_{CoM_j}^{arm} - {}^{y}p_{ZMP} \right) {}^{x}\ddot{p}_{CoM_j}^{arm} \end{aligned} \tag{5.2}$$

Burada ${}^{z}\hat{\tau}_{ZMP}$ robotun kolları dışında kalan tüm bağlamların hareketlerinden kaynaklı olarak z ekseni doğrultusunda oluşan momenti gösterirken ${}^{z}\tau_{ZMP}$ robota z ekseni doğrultusunda etki eden toplam momenti göstermektedir.

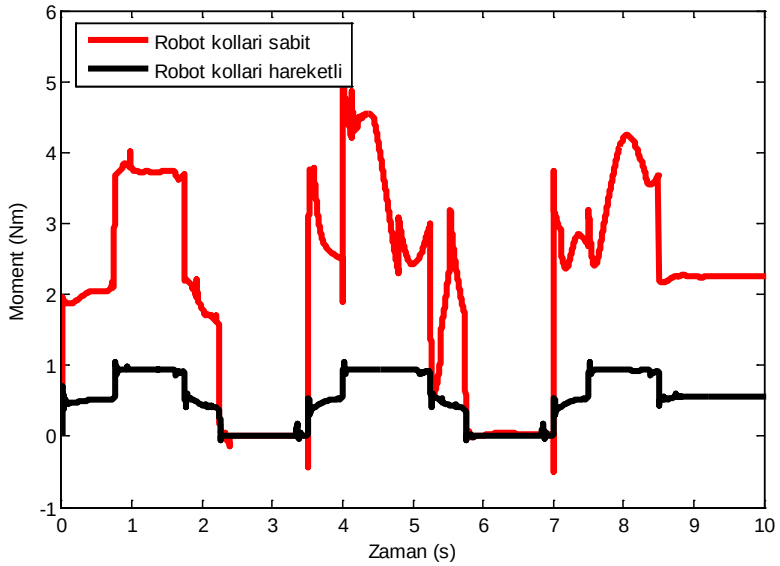
Eğer z ekseni doğrultusunda robota etki eden moment sıfıra eşitlenirse, bir başka deyişle ${}^{z}\tau_{ZMP} = 0$ ise, denklem 5.2 aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sum_j m_j^{arm} \left({}^{y}p_{CoM_j}^{arm} - {}^{y}p_{ZMP} \right) {}^{x}\ddot{p}_{CoM_j}^{arm} - \sum_j m_j^{arm} \left({}^{x}p_{CoM_j}^{arm} - {}^{x}p_{ZMP} \right) {}^{y}\ddot{p}_{CoM_j}^{arm} = {}^{z}\hat{\tau}_{ZMP} \tag{5.3}$$

Eğer robot kollarının yatay düzlemdeki ivmelerinden kaynaklı moment diğer bağlamların ivmelerinden kaynaklı momente eşit olursa robotun z eksenindeki momenti bastırılabilir. Hareketin daha doğal görünmesi için robot kolları yanal düzlemde hareket ettirilmiştir. Bu durumda robot kolunun yatay düzlemlerdeki yörüngesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} {}^{y}\ddot{p}_{CoM_j}^{arm} &= 0 \\ {}^{x}\ddot{p}_{CoM_j}^{arm} &= \frac{{}^{z}\hat{\tau}_{ZMP}}{\sum_j m_j^{arm} \left({}^{y}p_{CoM_j}^{arm} - {}^{y}p_{ZMP} \right)} = \frac{{}^{z}\hat{\tau}_{ZMP}}{M^{arm} \left({}^{y}p_{CoM}^{arm} - {}^{y}p_{ZMP} \right)} \end{aligned} \tag{5.4}$$

Şekil 5.4'de robot kollarının sabit tutulduğu ve denklem 5.4'de elde edilen yörünge kullanarak hareket ettirildiği yürüme simülasyon sonuçları



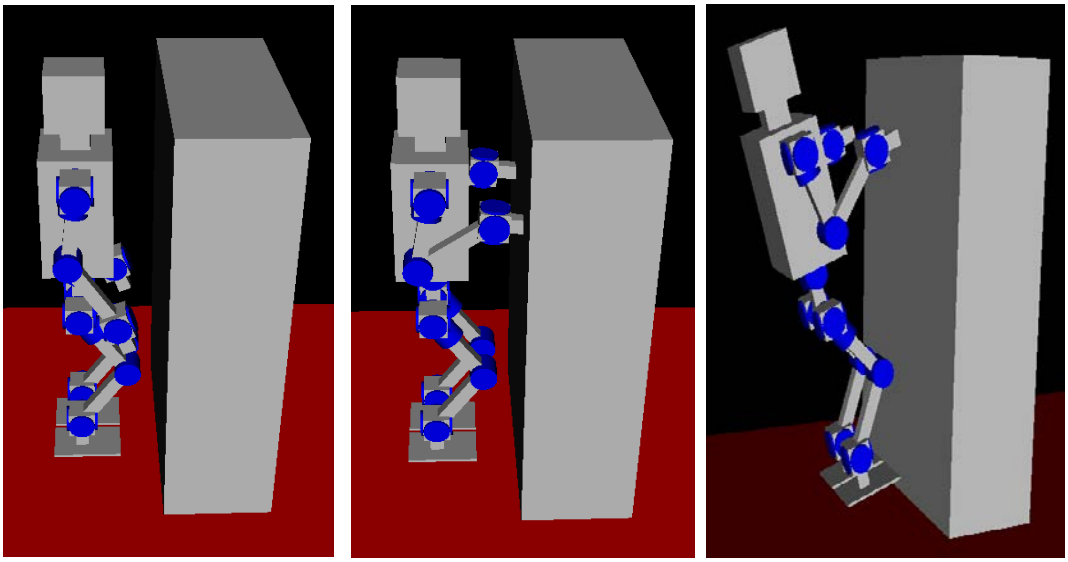
Şekil 5.4 : Dikey eksen doğrultusundaki moment kontrolü.

gösterilmektedir. Şekilden direk görülebileceği üzere robot kollarının hareketi dikey eksen doğrultusundaki momentlerin bastırılmasında kullanılabilir.

5.3 Kısıtlı Hareket Kontrolü

Bu bölümde insansı robotların bilinmeyen bir çevre ile etkileşime girmesini sağlayacak tüm vücut hareket kontrolörlerinin tasarımı üzerinde durulacaktır. Bölüm 3'de gösterildiği üzere endüstriyel robotların aksine insansı robotlarda sabit bir nokta bulunmamaktadır. Bu nedenle insansı robotlar çevre ile etkileşime girdiklerinde dış bozucu kuvvetlerden dolayı devrilebilirler. Kısıtlı hareket kontrolünde robotun dengesini koruyabilmek için robot kollarında uygulanan kuvvet kontrolünün yanı sıra robotun gövdesine etkiyen kuvvetler de göz önünde bulundurulmalıdır. Robot kollarının kontak kontrolü bölüm 2'de verilen hibrit hareket kontrolörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak insansı robotun bilinmeyen bir çevre ile güvenli bir şekilde etkileşime geçmesini sağlayacak kontrolör tasarımı üzerinde durulmuştur. Şekil 5.5'de insansı robotun bilinmeyen bir nesneye dokunmasına ait simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.6'da ise bilinmeyen çevre ile etkileşim sırasında insansı robotun dikey eksen – z ekseni - doğrultusundaki kütle merkezinin konumu ve x ekseni doğrultusunda robot kollarına uygulanan tepki kuvveti gösterilmektedir. Robot kollarında kullanılan hibrit kontrolörde y ve z eksenleri doğrultusunda

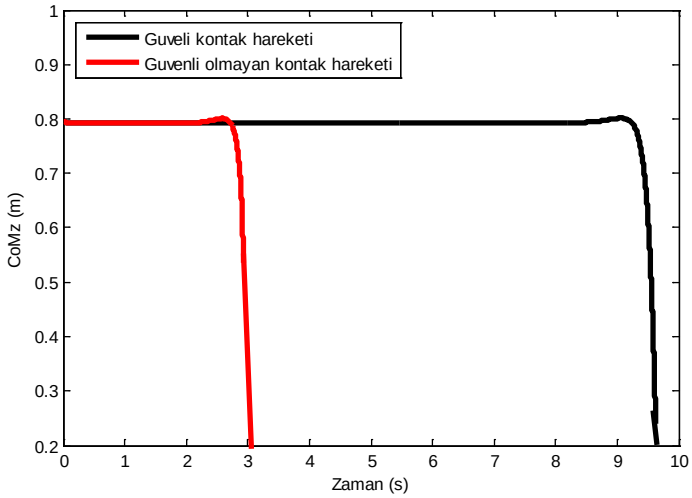


(a) t = 0 s. (b) t = 2 s. (c) t = 9 s.

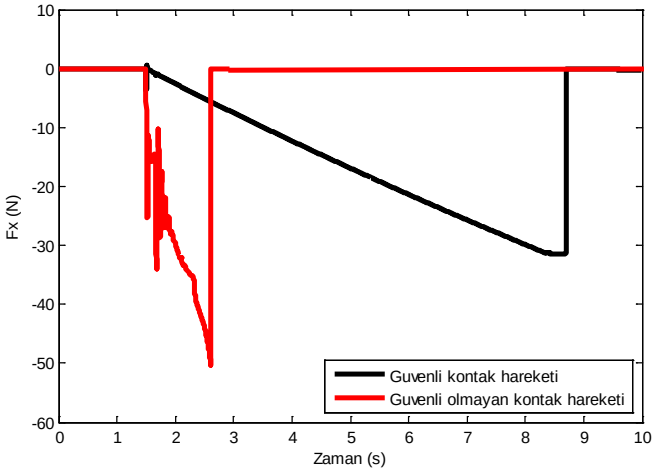
Şekil 5.5 : İnsansı robotun bilinmeyen bir nesneye dokunma simülasyonu.

pozisyon x ekseni doğrultusunda da kuvvet kontrolü gerçekleştirilmiştir. Robotun bilinmeyen çevre ile etkileşimi güvenli ve güvenli olmayan iki farklı hareket kontrolörü kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar şekil 5.6'da gösterilmiştir. İlk kontrolör tasarımında – güvenli kontak kontrolöründe – x ekseni doğrultusunda düşük kuvvet referansı ve düşük bant genişliğine sahip kuvvet kontrolörü kullanılmıştır. İkinci kontrolör tasarımında – güvenli olmayan kontak kontrolöründe – ise x ekseni doğrultusunda daha büyük kuvvet referansı ve daha büyük bant genişliğine sahip kuvvet kontrolörü kullanılmıştır. Robot çevre ile etkileşime geçtikten sonra robot kollarına uygulanan kuvvet referansı zamana göre doğrusal olarak arttırılmıştır. Yüksek kuvvet referansı robota etkiyen darbe kuvvetinin artmasına yüksek bant genişliğine sahip kuvvet kontrolörünün kullanılması da kontak hareketinin kararlılığının bozulmasına neden olur. Bu nedenle kontak anında robotun gövdesine etkiyen kuvvetler artar ve robotun dengesini koruması güçleşir. Şekil 5.6(b)'de robotun güvenli olmayan kontak hareketi sonucunda dengesinin kaybolduğu gösterilmektedir. Güvenli kontak kontrolü sağlanmış olsa bile robota etkiyecek dış bozucuların belli bir üst limiti vardır. Eğer dış bozucular bu üst limitten daha fazlaysalar robot dengesini kaybedip devrilecektir. Şekil 5.6(a)'da robot kolunun kuvvet referansı doğrusal olarak arttırılırken robotun her iki kontak hareketinde de devrildiği gösterilmektedir.

Kısıtlı hareket kontrolünde insansı robotlar ayaklarının yanı sıra ellerini veya kollarını da kullanarak çevre ile etkileşime girmektedirler. Bu durumda robotun



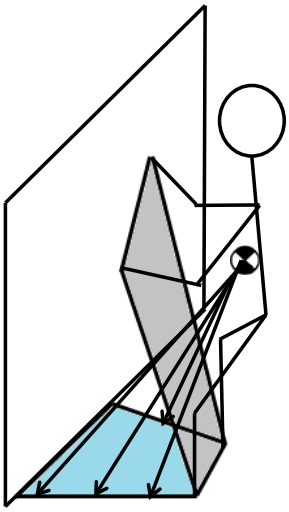
(a) Dikey eksen doğrultusunda kütle merkezinin konumu.



(b) x ekseni doğrultusunda robota etkiyen kuvvet.

Şekil 5.6 : Güvenli ve güvenli olmayan kontak kontrolü simülasyon sonuçları.

denge kararlığı için belirlenecek destek düzlemi robotun tüm dokunma noktaları göz önünde bulundurularak belirlenmelidir [102 ve 103]. Şekil 5.7'de el ve ayak kontak noktaları göz önünde bulundurularak insansı robotun destek düzlemi elde edilmiştir. Burada gri taralı alan robotun el ve ayaklarının kontak noktaları tarafından belirlenen destek düzlemini ve mavi taralı alan ise destek düzlemin zemine olan izdüşümünü belirtmektedir. Eğer robotun kütle merkezinin yere olan izdüşümü destek düzleminin izdüşümü içinde kalıyorsa robot dengeli bir şekilde kontak hareketini gerçekleştirebilir. Şekil 5.7'den kolayca anlaşılabileceği üzere denge kararlılığının iyileştirilmesi için robotun gövdesinin x ekseni doğrultusunda ilerletilmesi gerekmektedir. İnsanların bir nesneyi ittirmek için öne doğru eğilmelerindeki temel neden hareketin denge kararlılığını iyileştirmektir.



Şekil 5.7 : İnsansı robotun el ve ayak nokalarına göre belirlenen destek düzlemi.

Güvenli kontak hareketi ve genişletilmiş destek düzlemi yaklaşımı kullanılarak insansı robotun bilinmeyen bir nesneyi dinamik denge kararlılığını sağlayarak ittirmesi gerçekleştirilebilir. Fakat bu durumda SMN denklemleri robotun kontak noktalarına uygulanan tepki kuvvetleri göz önünde bulundurularak yeniden elde edilmelidir. Bir insansı robotun iki eli ile bir objeyi ittirmesi durumunda SMN denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{ZMP}} = \dot{\mathbf{L}}_{\mathbf{w}} + \sum_i m_i \left(\mathbf{p}_{\mathbf{CoM_i}} - \mathbf{p}_{\mathbf{ZMP}}\right) \times \left(\ddot{\mathbf{p}}_{\mathbf{CoM_i}} - \boldsymbol{\upsilon}_{\mathbf{g}}\right) + \sum_j \left(\mathbf{p}_j^{kol} - \mathbf{p}_{\mathbf{ZMP}}\right) \times \mathbf{f}_j^{kol} \tag{5.5}$$

Burada $\mathbf{f}_j^{kol}$ robot koluna $\mathbf{p}_j^{kol}$ noktasında uygulanan tepki kuvvetini belirtmektedir. Denklem 5.5 kullanılarak SMN aşağıdaki gibi elde edilir.

$${}^{x}\hat{p}_{ZMP} = \frac{M\,{}^{x}p_{CoM}\left({}^{z}\ddot{p}_{CoM} + g\right) - M\left({}^{z}p_{CoM} - {}^{z}p_{ZMP}\right){}^{x}\ddot{p}_{CoM} - {}^{y}\dot{L}_{w}}{M\left({}^{z}\ddot{p}_{CoM} + g\right)} - \sum_j \frac{\left({}^{z}p_j^{kol} - {}^{z}p_{ZMP}\right)}{M\left({}^{z}\ddot{p}_{CoM} + g\right)}{}^{x}f_j^{kol} \tag{5.6}$$

$${}^{y}\hat{p}_{ZMP} = \frac{M\,{}^{y}p_{CoM}\left({}^{z}\ddot{p}_{CoM} + g\right) - M\left({}^{z}p_{CoM} - {}^{z}p_{ZMP}\right){}^{y}\ddot{p}_{CoM} + {}^{x}\dot{L}_{w}}{M\left({}^{z}\ddot{p}_{CoM} + g\right)} - \sum_j \frac{\left({}^{z}p_j^{kol} - {}^{z}p_{ZMP}\right)}{M\left({}^{z}\ddot{p}_{CoM} + g\right)}{}^{y}f_j^{kol} \tag{5.7}$$

Denklem 5.6 ve 5.7 bize genişletilmiş SMN denklemlerini vermektedir. Denlemlerin sağında bulunan ilk terim serbest hareket kontrolünde kullanılan SMN'i belirtmektedir. Harada insansı robotun bir nesneyi ittirmesi için gerekli yörüngeleri SMN çözümlerin farkını kullanarak aşağıdaki gibi elde etmiştir [103].

$$\Delta_{{}^{x}p_{ZMP}} = {}^{x}\hat{p}_{ZMP} - {}^{x}p_{ZMP} = -\sum_j \frac{\left({}^{z}p_j^{kol} - {}^{z}p_{ZMP}\right)}{M\left({}^{z}\ddot{p}_{CoM} + g\right)}{}^{x}f_j^{kol} \tag{5.8}$$

$$\Delta_{{}^{y}p_{ZMP}} = {}^{y}\hat{p}_{ZMP} - {}^{y}p_{ZMP} = -\sum_{j} \frac{\left({}^{z}p_{j}^{kol} - {}^{z}p_{ZMP}\right)}{M\left({}^{z}\ddot{p}_{CoM} + g\right)} {}^{y}f_{j}^{kol} \tag{5.9}$$

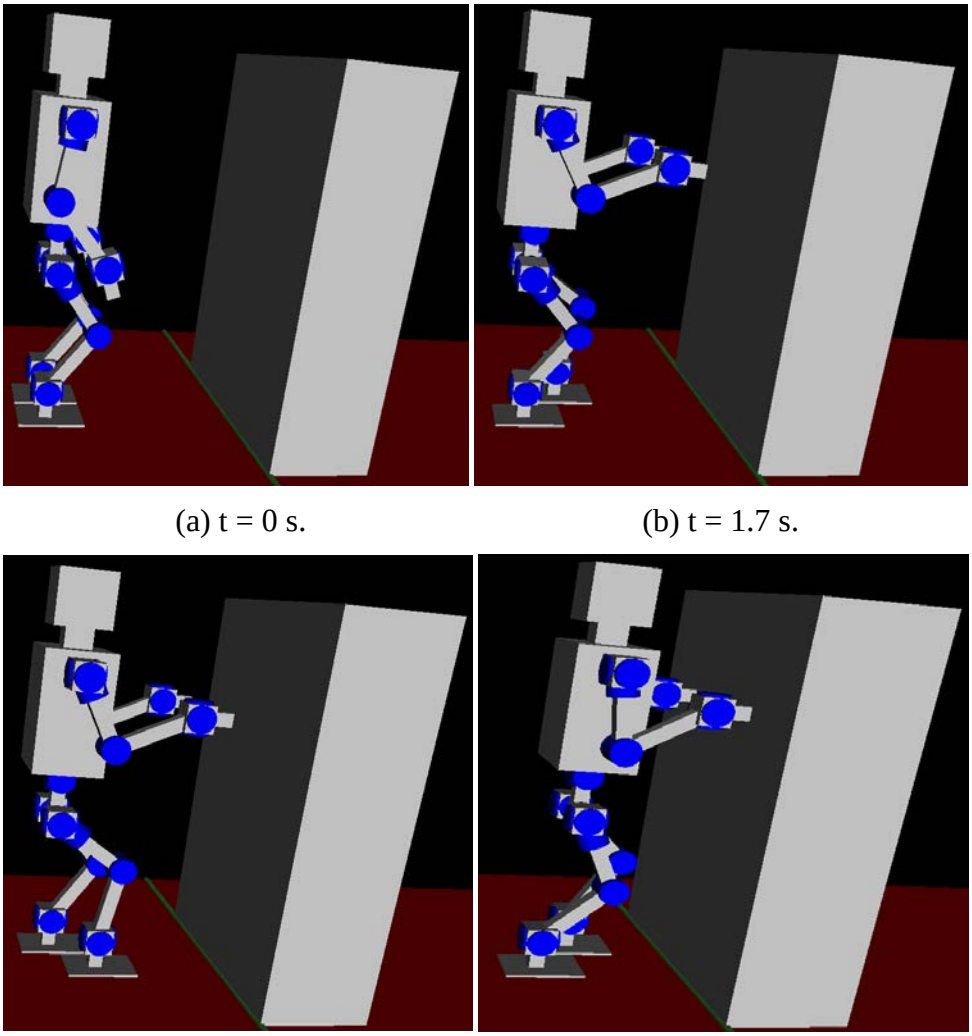
Burada ${}^{x}\hat{p}_{ZMP}$ ve ${}^{x}p_{ZMP}$ x ekseni doğrultusunda sırasıyla kontak varken ve yokken elde edilen SMN çözümlerini belirtmektedir.

Bilinmeyen bir nesne aşağıda verilen adımlar uygulanarak güvenli bir şekilde ittirilebilir.

- Robot bilinmeyen nesneye güvenli bir şekilde dokunmalıdır. Bunun için yukarıda belirtildiği gibi darbe kuvveti ve kontak hareketinin kararlılığı kontrol edilmelidir.
- Robot kontak hareketi sağlandıktan sonra nesneye uyguladığı kuvvet arttırmalıdır.
- Eğer hareket ettirilebilir bir nesne ise robot yörüngeleri ve uygulanacak kuvvet yukarıda verilen SMN yaklaşımı kullanılarak elde edilebilir.
- Eğer hareket ettirlebilir bir nesne değil ise bu durumda robotun nesneye uyguladığı kuvvet arttırımı üst limite ulaşmadan önce durdurulmalıdır.

Hareket ettirilebilir nesne ile belirtilmek istenen nesnenin robotun uygulayabileceği kuvvet sınırları içinde konumunu değiştirebilmesidir. Bu nesnenin ağırlığı ve yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetine bağlıdır. Robotun uygulayabileceği kuvvetin üst limiti vücut pozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin uygulanabilecek kuvvet vücudun öne eğilmesi ile arttırılabilirken vücudun dikey olması durumunda daha az kuvvet uygulanabilir.

Şekil 5.8 ve şekil 5.9'da insansı robotun bilinmeyen bir nesneyi ittirmesi simülasyonlarının sonuçları gösterilmektedir. Bu simülasyonlarda robot konumu, yapısı ve hareket ettirilebilir olup olmadığı bilinmeyen bir nesne ile etkileşime girmektedir. Robot ilk olarak nesne ile güvenli kontak kontrolünü yukarıda verilen yöntem kullanılarak gerçekleştirmiştir. Daha sonra nesnenin hareket ettirilebilir olup olmadığı uygulanan kuvvet arttırılarak belirlenmiştir. Şekil 5.8'de robot hareket ettirilemeyen bir nesne ile etkileşime girmiş ve nesnenin doğrultusunda olan hareketini devrilmemek için sonlandırmıştır. Şekil 5.9'da ise robotun etkileşime geçtiği nesne hareket ettirilebilirdir ve robot x ekseni boyunca nesneyi ittirerek hareketine devam etmiştir.



(a) t = 0 s. (b) t = 1.7 s.

(c) t = 3.57 s. (d) t = 12 s.

Şekil 5.8 : İnsansı robotun hareket ettirilemeyen bir nesne ile kontak hareketi.

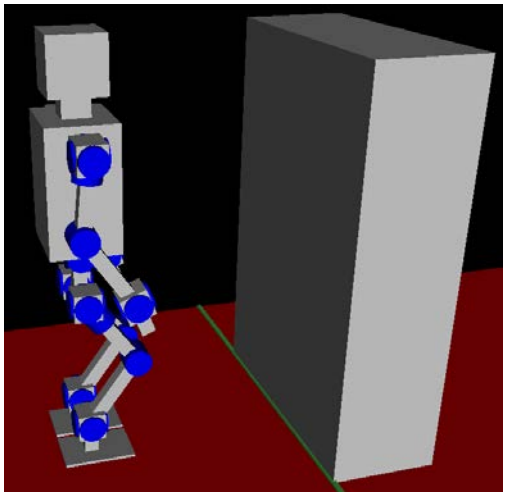
5.4 Çift Taraflı Kontrol

Bu bölümde çift taraflı hareket kontrolü dört kanallı çift taraflı hareket kontrol yapısı kullanılarak açıklanmaktadır. ÇTHK'da temel hedef yöneten ve yönetilen robotlarda aynı pozisyon ve kuvvet yörüngelerinin elde edilmesidir. Bu kontrol hedefi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

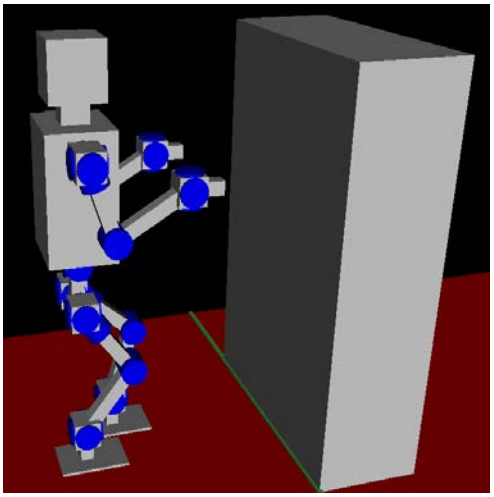
$$f_M^{etki} = -f_M^{tepki} = -f_S^{tepki} \tag{5.10}$$

$$x_M = x_S \tag{5.11}$$

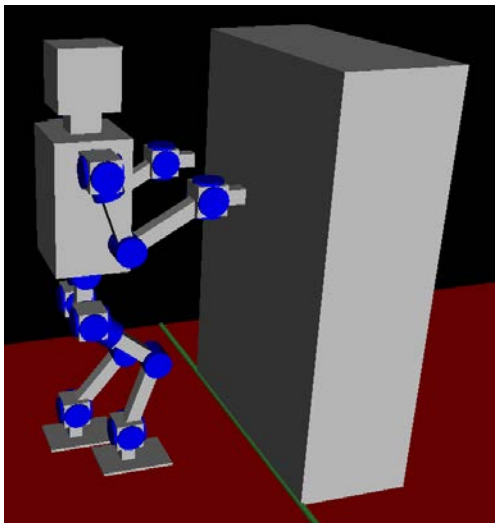
Burada $\bullet_M$ ve $\bullet_S$ sırasıyla yöneten ve yönetilen robotları ve $f_\bullet$ ve $x_\bullet$ sırasıyla kuvvet ve pozisyonu belirtmektedir. Eğer 5.10 denkleminde etki ve tepki kuvvetlerinin yönleri dikkate alınırsa model uzayında kontrol hedefleri aşağıdaki gibi ifade edilirler.



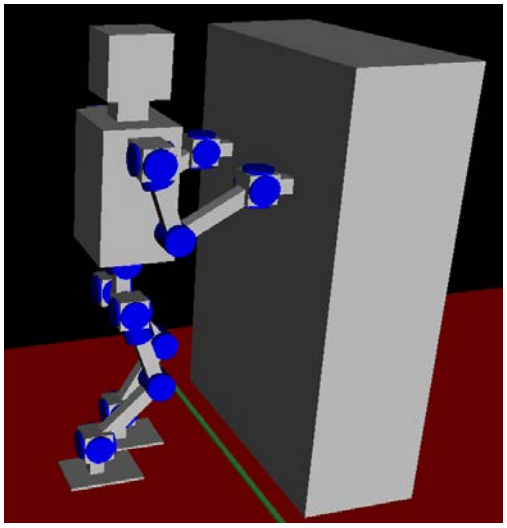
(a) t = 0 s.



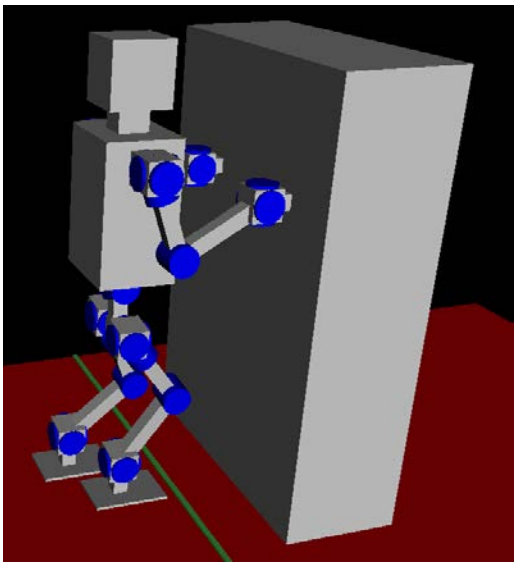
(b) t = 2.05 s.



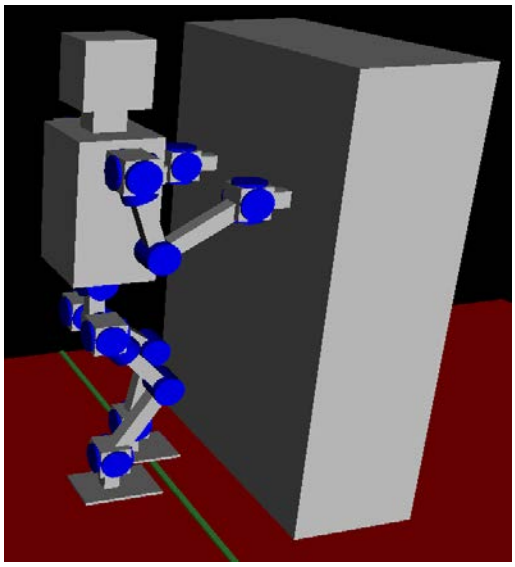
(c) t = 4.01 s.



(d) t = 5.49 s.



(e) t = 8.12 s.



(f) t = 12 s.

Şekil 5.9 : İnsansı robotun hareket ettirilebilir bir nesne ile kontak hareketi.

$$f_M^{etki} + f_S^{tepki} = 0 \tag{5.12}$$

$$x_M - x_S = 0 \tag{5.13}$$

5.12 ve 5.13 denklemleri model uzayında tanımlı kontrol hedefleri olup literatürde toplam ve fark modları olarak isimlendirilirler.

Yöneten ve yönetilen robotlar arasındaki transfer fonksiyonu matris denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} f_M \\ x_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_S \\ -f_S \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

Yönetilen robotun çevre ile etkileşimde olduğunu ve çevrenin de empedansının Z_{env} olduğunu varsayalım. Bu durumda yönetilen robotun hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F_S = Z_{env} X_S \tag{5.15}$$

Eğer 5.14 denklemi 5.15 denkleminde kullanılırsa yöneten robotta oluşan empedans aşağıdaki gibi elde edilir.

$$f_M = \left(\frac{-H_{12}}{H_{21} - H_{22} Z_{env}} Z_{env} + \frac{H_{11}}{H_{21} - H_{22} Z_{env}} \right) x_M \tag{5.16}$$

$$f_M = P_R Z_{env} x_M + P_O x_M \tag{5.17}$$

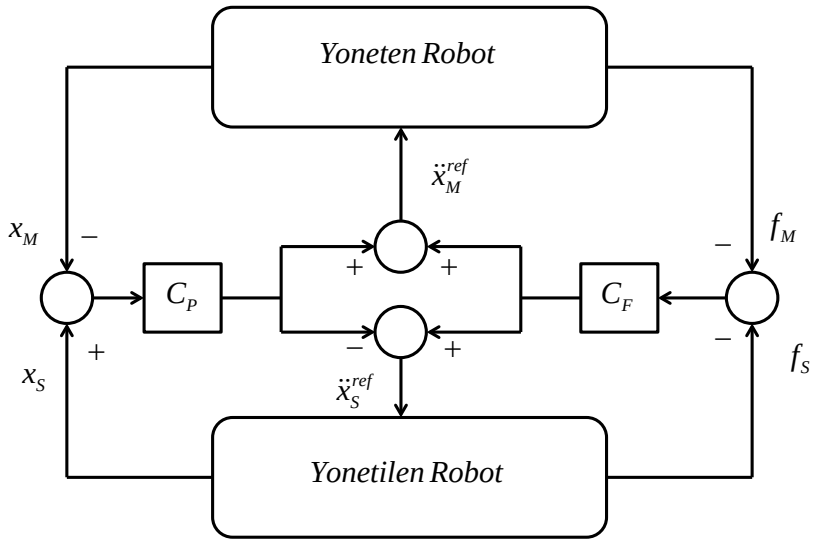
Burada P_R ve P_O çift taraflı kontrolde sıklıkla kullanılan çok önemli iki performans kriterini belirtmektedir. Bunlardan ilki yöneten ve yönetilen sistemlerde kuvvet kontrolünün performansını, ikincisi ise operatörün sistemi kontrol etmesi için nekadar kuvvet kullandığını belirtir. İdealde $P_R = 1$ ve $P_O = 0$ olmalıdır. Eğer ideal koşul sağlanırsa denklem 5.14 aşağıdaki gibi elde edilir. Kontrol sistemlerinin uygulamadaki kısıtları ve kararlılık problemlerinden dolayı ideal durum pratikte elde edilemez.

$$\begin{bmatrix} f_M \\ x_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_S \\ -f_S \end{bmatrix} \tag{5.18}$$

Çift taraflı hareket kontrolü üzerine literatürde çok çeşitli kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında dört kanallı çift taraflı kontrol yöntemi (Four channel bilateral control) yüksek performans ve kolaylığı nedeniyle tercih edilmiştir

[101]. Geleneksel dört kanallı çift taraflı hareket kontrol yönteminin blok şeması şekil 5.10'da gösterilmektedir.

Geleneksel dört kanallı çift taraflı kontrol yönteminde yöneten ve yönetilen robotlarda aynı mekanizmalar kullanılır ve model uzayındaki kontrolörler eklem uzay parametreleri kullanılarak tasarlanır. Bir başka deyişle yöneten ve yönetilen robotların her bir ekleminin pozisyon ve kuvvetleri birbirine eşitlenerek çift taraflı kontrol sistemi elde edilir. Bu yöntemin temel avantajı çok basit olması ve tekil nokta gibi problemlerden bağımsız olarak karmaşık robot sistemlerine uygulanabilmesidir. Fakat insansı robot uygulamalarında geleneksel çift taraflı konrol sistemi bazı kısıtlamalara neden olur. Geleneksel yöntemin uygulanması için yöntenen ve yönetilen robotların aynı mekanizmalara sahip olması gerekmektedir. İnsansı robotlar genel olarak karmaşık ve maliyeti yüksek olan sistemlerdir. Geleneksel yöntemde insansı robotun kontrol edilebilmesi için onun gibi karmaşık bir yöneten robotun da üretilmesi gerekmektedir. Yöneten robotta insan yeteneklerinin kullanılması hedeflendiğinden bu mekanizma giyilebilir robot şeklinde tasarlanmalıdır. Diğer bir kısıtlama ise eğer tüm vücut çift taraflı kontrol sistemi kullanılarak kontrol ediliyorsa yürüme algoritmalarının başarılı olabilmesi için yöneten ve yönetilen robotların aynı ortamda bulunmaları gerekmektedir. Ya da yöneten robotun çevre bozucularından bağımsız olarak hareket edebileceği bir ortam tasarlanmalıdır ki bu da maliyeti arttıran bir başka unsurdur. Bu nedenlerden dolayı geleneksel çift taraflı kontrol yönteminin uygulama alanları sınırlıdır. Örneğin geleneksel çift taraflı kontrol yapısı kullanılarak iyileştirme uygulamaları



Şekil 5.10 : Geleneksel dört kanallı çift taraflı kontrolörün blok şeması.

gerçekleştirilebilir. Bu uygulamada yöneten ve yönetilen sistemler için iki adet aynı yapıda giyilebilir robotun tasarlanması gerekmektedir. Kullanılan dayanıklı kontrolörler aracılığıyla yöneten ve yönetilen sistemler arasındaki atalet farklarının etkileri ortadan kaldırılabilir. Ya da ilerleyen bölümde de gösterileceği üzere bozucu gözetleyici model uzayında tasarlanarak bu etkiler ortadan kaldırılabilir [104]. Bu tez çalışmasında kullanılmamasına rağmen literatürde "oblique coordinat" sistemleri farklı kütlelere sahip yöneten ve yönetilen robotların kontrolünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [105 ve 106].

Çift taraflı hareket kontrol yapısında farklı tasarım parametreleri kullanılarak farklı kontrolörler model uzayında aşağıdaki gibi oldukça basit bir şekilde tasarlanabilirler.

$$\begin{bmatrix} f_M \\ x_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha \\ \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_S \\ -f_S \end{bmatrix} \tag{5.19}$$

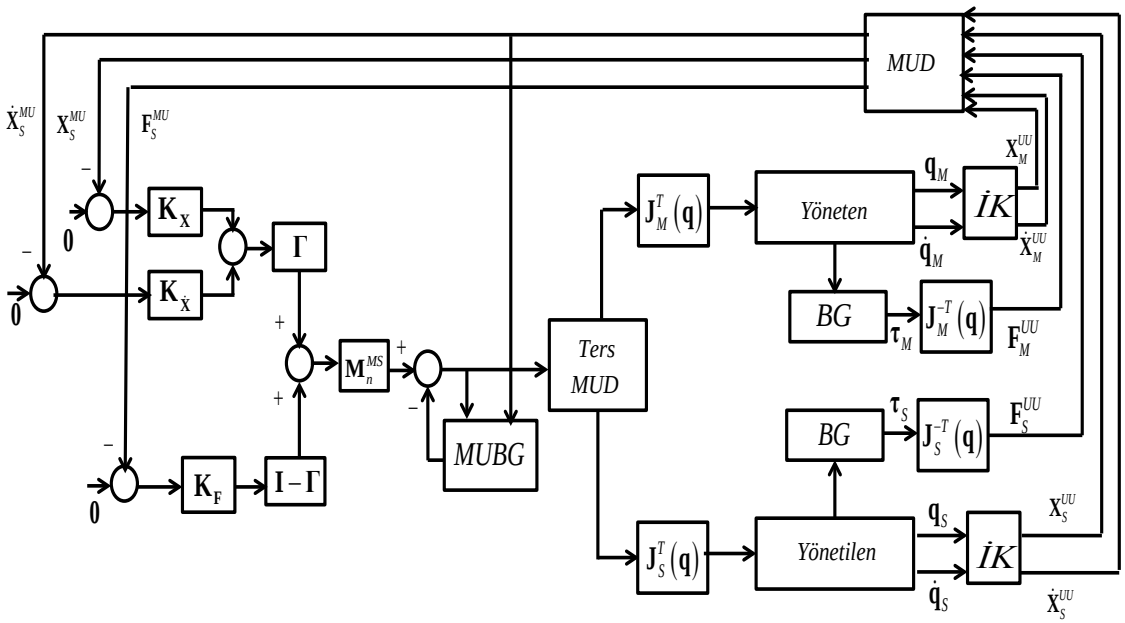
Böylece çift taraflı hareket kontrol yapısı çok farklı uygulamalarda kullanılabilir. Örneğin insanların çok küçük boyuttaki işleri gerçekleştirebilimeleri için yapılması gereken yalnızca β parametresini değiştirmek ve az kuvvet uygulayarak daha büyük kuvvetli işleri yapabilmeleri için gereken yalnızca α parametresini değiştirmektir.

Geleneksel dört kanallı çift taraflı kontrol yapısının kısıtlamalarını ortadan kaldırmak için çift taraflı kontrol eklem uzayı parametreleri yerine uygulama uzayı parametreleri kullanılarak tasarlanmıştır. Bu tasarımda kontrol hedefleri model uzayında aşağıdaki gibi belirtilir.

Toplam modu: $$\mathbf{F}_M^{etki} + \mathbf{F}_S^{tepki} = \mathbf{0} \tag{5.20}$$

Fark modu: $$\mathbf{X_M} - \mathbf{X_S} = \mathbf{0} \tag{5.21}$$

Önerilen çift taraflı kontrol yapısı geleneksel ÇTHK yapısına çok benzemektedir. Temel fark model uzayındaki kontrolör parametrelerinin eklem uzayı yerine uygulama uzayı kullanılarak elde edilmesidir. Bu tasarımın daha karmaşık hale gelmesine ve çift taraflı kontrol sisteminin tekil nokta probleminden etkilenmesine neden olsa da yöneten sistemler için tasarım serbestliği sağlamaktadır. Bu yöntem kullanılarak farklı yöneten ve yönetilen sistemleri tasarlanıp çift taraflı kontrol sistemleri gerçekleştirilebilir. Şekil 5.11'de önerilen çift taraflı kontrol sisteminin blok şeması gösterilmetedir. Bu şekilde *MUD* model uzayı dönüşümünü; *BG* ve *MUBG* sırasıyla eklem ve model uzayında tasarlanmış bozucu gözetleyicilerini; *İK*



Şekil 5.11 : Önerilen çift taraflı kontrolörün blok şeması.

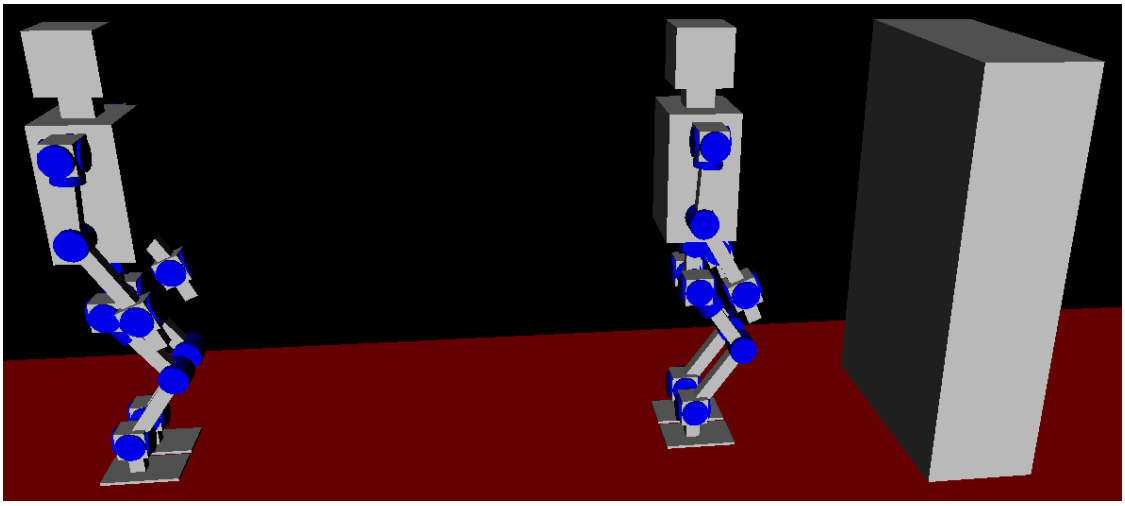
ileri kinematik çözümlemeyi; $\bullet_M$ ve $\bullet_S$ sırasıyla yöneten ve yönetilen robotlara ait parametreleri; $\bullet^{UU}$ ve $\bullet^{MU}$ sırasıyla uygulama ve model uzayındaki parametreleri; $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$ ve $\boldsymbol{\tau}$ sırasıyla eklem uzayına ait pozisyon hız ve kuvvet veya torkları; $\mathbf{X}$, $\dot{\mathbf{X}}$ ve $\mathbf{F}$ sırasıyla uygulama veya model uzayına ait pozisyon hız ve kuvvetleri; $\mathbf{K}_{\mathrm{X}}, \mathbf{K}_{\dot{\mathrm{X}}}$ ve $\mathbf{K}_{\mathrm{F}}$ model uzayında tasarlanan pozisyon ve kuvvet kontrolörüne ait parametreleri; $\boldsymbol{\Gamma}$ hibrit kontrolöründe kullanılan pozisyon ve kuvvet kontrolörlerinin seçim matrisini; ve $\mathbf{J}$ Jakobiyen operatörünü belirtmektedir. Bu tasarımda bozucu gözetleyici model uzayında tasarlanmıştır. Böylece hem sistemin dayanıklılığı sağlanmış hem de model uzayında pozisyon ve kuvvet kontrolörlerinin birbirlerine olan etkileri bastırılmıştır.

İnsansı robot uygulamalarında otomatik ve çift taraflı kontrol yapıları bir arada kullanılarak insansı robotların hareket yetenekleri arttırılabilir. Genel olarak insanlar üst vücutları aracılığıyla daha karmaşık işleri gerçekleştirmektedirler. Bu nedenle bölüm 4'de verilen alt vücut kontrolü kullanılarak yürüme problemi ve önerilen çift taraflı kontrol yapısı kullanılarak da karmaşık görevleri yerine getirme problemleri çözülebilir. Bu bölümde her iki uygulama için de simülasyon sonuçları verilmiştir.

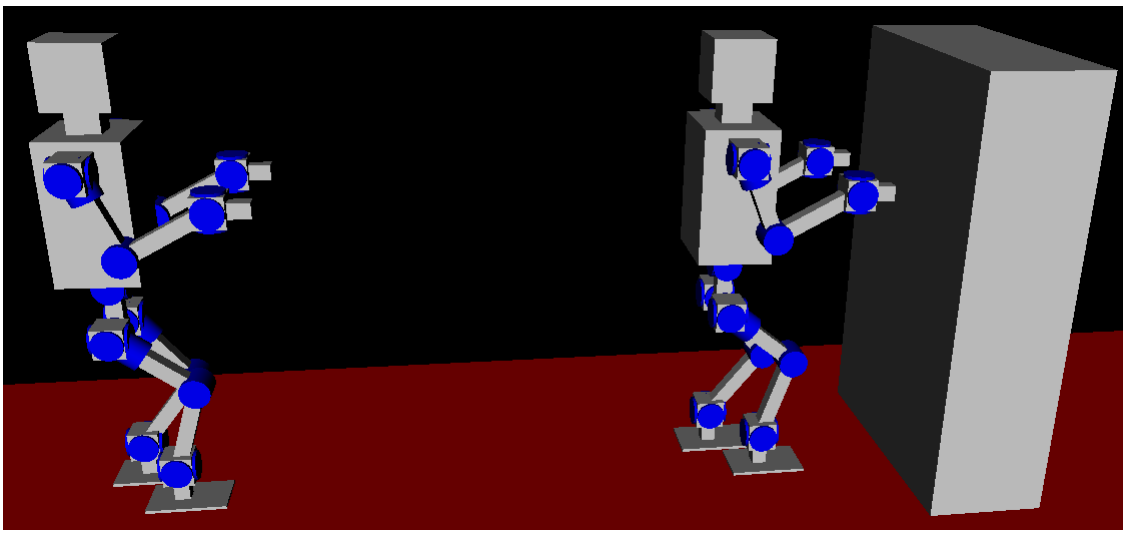
Şekil 5.12 ve şekil 5.13'de geleneksel ve önerilen çift taraflı kontrol yapıları için simülasyon sonuçları verilmiştir. Geleneksel yapıda iki tane insansı robot kullanılmıştır. Şekilde arkada görünen insansı robot yöneten ve diğeri ise yönetilen robottur. Yöneten robot için otomatik kontrol kullanılarak hareket yörüngeleri elde

edilmiş ve yönetilen robotun kontrolü 4K_ÇTHK ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen yapıda ise yöneten robot iki link üç serbeslik dereceli basit bir robot mekanizması kullanılarak tasarlanmıştır. Robotun alt vücudunun kontrolü dinamik yürüme yörüngeleri tasarlanarak elde edilmiştir. Üst vücutta ise robot kollarına çift taraflı kontrol sistemi uygulanmıştır. Yöneten robot için y ve z düzlemlerinde pozisyon x düzleminde ise kuvvet kontrolü yapan bir hibrit kontrolör tasarlanmıştır. Çift taraflı kontrol sisteminin pozisyon ve kuvvet kontrol sonuçları şekil 5.14'de gösterilmektedir. Bu şekilden de görülebileceği üzere kontrol hedefleri uygulama uzayında elde edilmiştir.

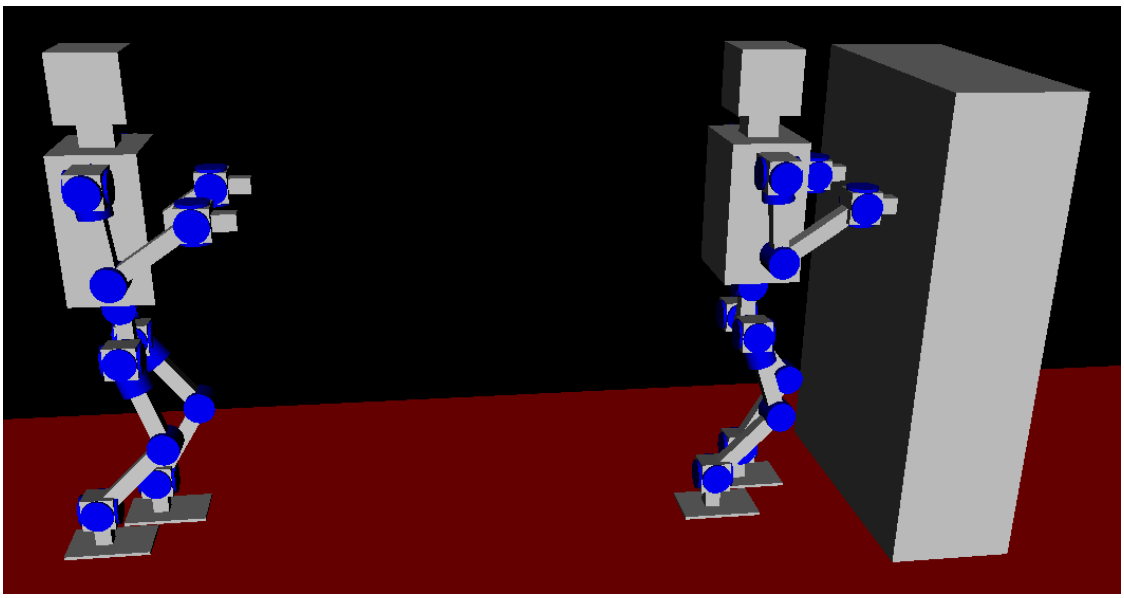
.



(a) t = 0 s.

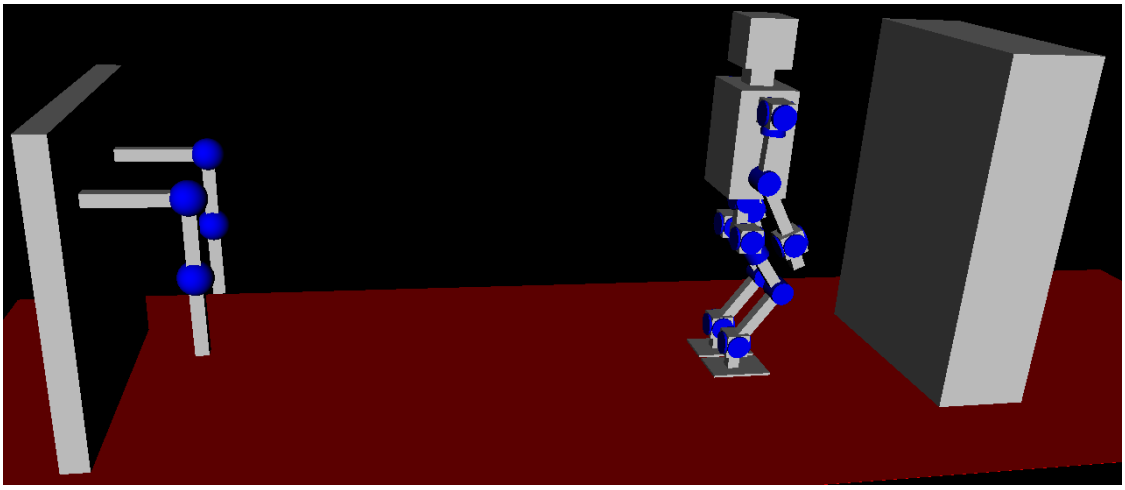


(b) t = 3.46 s.

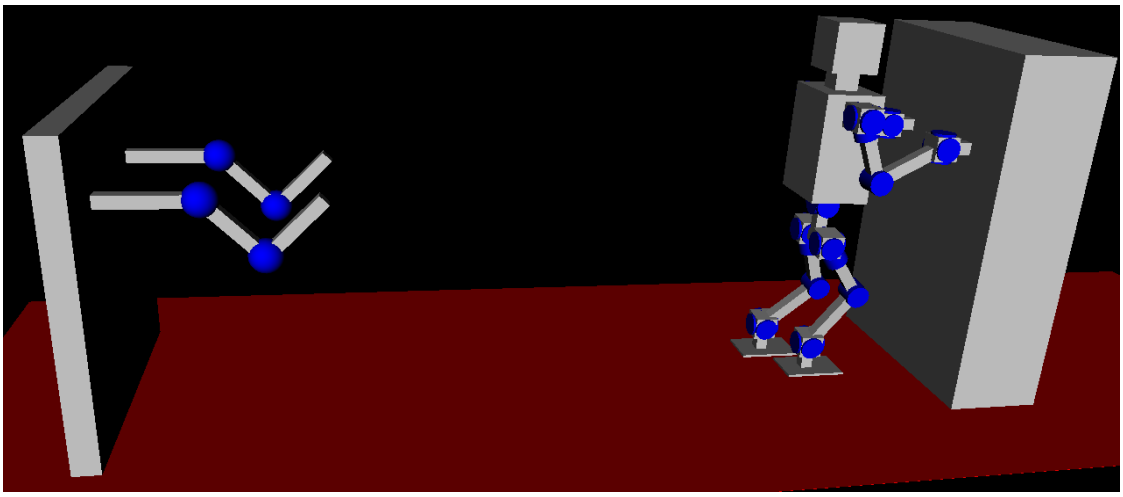


(c) t = 5.32 s.

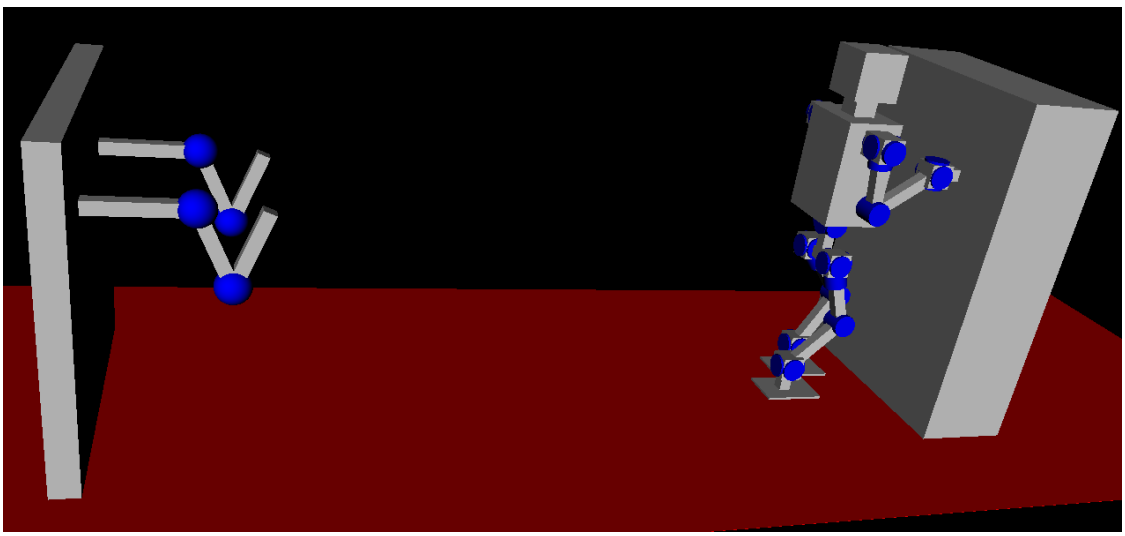
Şekil 5.12 : Geleneksel çift taraflı kontrol yapısı kullanılarak insansı robotun kontrol edilmesi.



(a) t = 0 s.

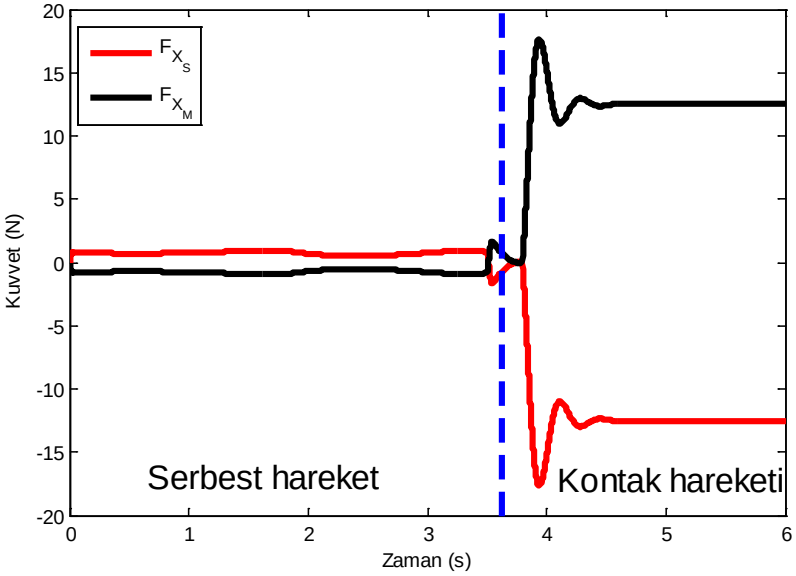


(b) t = 1.43 s.

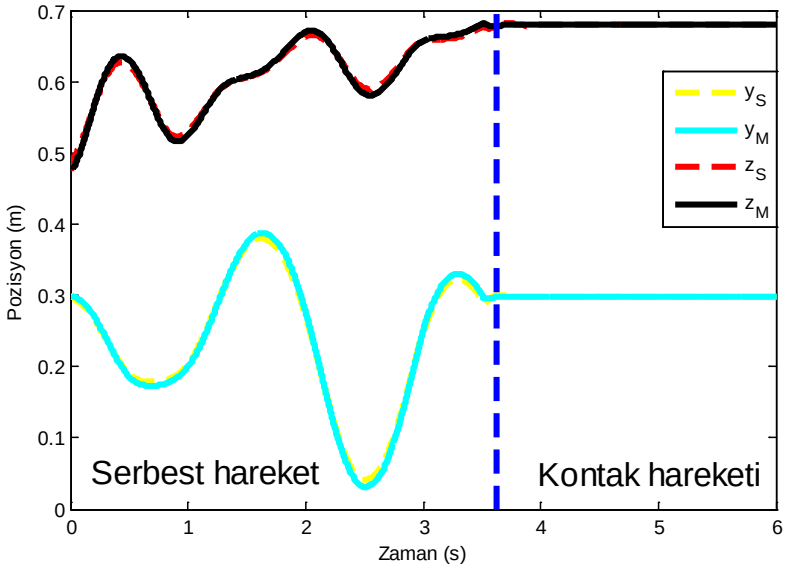


(c) t = 3.57 s.

Şekil 5.13 : Önerilen çift taraflı kontrol yapısı kullanılarak insansı robotun kontrol edilmesi.



(a) Kuvvet kontrol cevabı.



(b) Pozisyon kontrol cevabı.

Şekil 5.14 : Önerilen çift taraflı kontrol yapısı kullanıldığında elde edilen pozisyon ve kuvvet kontrol sonuçları.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında insansı robotların hareket yeteneklerinin arttırılması ve onların insanların günlük yaşamda yaptıkları engebeli bir yüzeyde yürüme veya bir nesneyi ittirme gibi temel davranışları gerçekleştirebilmeleri hedeflenmiştir. İnsansı robotların dinamik modeli kayan nokta dinamiği kullanılarak elde edilmiştir. Kayan nokta dinamiği hem insansı robotların hareketlerini daha iyi anlamamıza hem de hareket denklemlerini sürekli bir dinamik model kullanarak ifade etmemize olanak sağlar. Kayan nokta dinamiği tabanlı modelin elde edilmesinde nümerik ve analitik iki farklı yöntem kullanılmıştır. Nümerik yöntemde literatürde yüksek serbestlik derecesine sahip mekanizmaların modellenmesinde sıkça kullanılan Newton-Euler algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmanın avantajı dinamik modelin sistematik bir şekilde kolayca elde edilmesine olanak sağlaması, dezavantajı ise insansı robotların dinamik davranışları hakkında detayli bilgi vermemesidir. Bu nedenle kayan nokta dinamiğinin temelleri göz önünde bulundurularak insansı robotların dinamik modeli analitik bir yaklaşım kullanılarak tekrar elde edilmiştir. Analitik yaklaşım insansı robotların dinamik davranışlarını mühendislik açısından daha iyi kavramamıza olanak sağlar. Tüm vücut dinamik modelin elde edilmesi hem insansı robotların hareket temellerini kavramak hem de daha gelişmiş kontrolörler tasarlamak açısından çok önemlidir. Ayrıca dinamik model gözetleyici tabanlı sensörsüz kuvvet kontrolörünün tasarlanması için gerekmektedir. Elde edilen dinamik model ve MATLAB'ın sanal gerçeklik eklentisi kullanılarak yeni bir simülatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Simülatör insansı robotun analizi ve yeni kontrolörlerin güvenli bir şekilde tasarımı açısından çok yararlıdır.

İnsansı robotların kontrol problemi temelde alt ve üst vücut kontrolleri olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Alt vücut kontrolünde yörünge belirleme tabanlı bir yaklaşım kullanılarak iki bacaklı yürüyen bir mekanizmanın statik ve dinamik denge kararlılık kriterleri üzerinde durulmuştur. Statik yürüme dinamik yürümeye göre daha kararlıdır ancak bu yöntemde robotlar düşük hızlarda yüksek enerjiler kullanılarak kontrol edilebilirler. Bu nedenle araştırmalar dinamik yürüme üzerine

yoğunlaşmıştır. Bu tezde dinamik yürüme problemi sıfır moment noktası (SMN) yaklaşımı kullanılarak çözülmüştür. SMN düzlem üzerinde gerçekleştirilen dinamik yürümede kullanılan bir denge kararlılık kriteridir ve doğrudan robotun kütle merkezinin yörüngelerinin elde edilmesinde kullanılır. Fakat insanlar günlük hayatlarında yalnız düzlem üzerinde hareket etmezler. Merdiven ve kaldırımlar gibi engebelerin bulunduğu yüzeyler insanların günlük yaşamlarında sıkça hareket ettiği ortamlardır. Bu nedenle engebeli yüzeylerde dinamik yürüme problemi ele alınmıştır. Bu problemin çözümünde sanal SMN ve sanal destek düzlemi yaklaşımı kullanılmış ve iki bacaklı bir robotun engebeli bir yüzeyde dinamik yürümesi gerçekleştirilmiştir. Sanal SMN ve sanal destek düzlemi yaklaşımı SMN yaklaşımına benzemesi açısından oldukça avantajlıdır. Fakat dinamik yürümenin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için engebeli yüzeyin önceden bilinmesi gerekmektedir. Bu durum sanal SMN yaklaşımının uygulama alanlarını kısıtlamaktadır.

İnsanlar günlük yaşamlarında üst vücutlarını kullanarak birçok davranışı gerçekleştirirler. Örneğin iki insansın tokalaşması veya bir yönün gösterilmesinde üst vücut aktif bir şekilde kullanılır. Bu nedenle insansı robotların üst vücut kontrolü ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Üst vücut kontrolü temel olarak serbest ve kısıtlı hareket kontrolleri olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. Serbest hareket kontrolünde robotun kolları çevre ile etkileşime girmeden hareket etmekte, kısıtlı hareket kontrolünde ise robot kolları aracılığıyla çevre ile temasa geçmektedir. Serbest hareket kontrolünde robotun üst vücut yörüngelerinin ivmeleri düşük tutularak alt ve üst vücut kontrolörleri bağımsız olarak tasarlanmıştır. Robot dinamik yürüme hareketini gerçekleştirirken üst vücutta da el sallama hareketini alt vücuttan bağımsız bir kontrolör kullanarak gerçekleştirmiştir. Ayrıca serbest hareket kontrolü kullanılarak robotun dikey eksen doğrultusunda oluşan momentleri bastırılmış ve dinamik yürümenin kararlılığı arttırılmıştır. Kısıtlı hareket kontrolünde robotun bilinmeyen bir çevre ile etkileşime girme problemi üzerinde durulmuş ve bilinmeyen bir nesneye dokunma ve nesneyi ittirme uygulamaları gerçekleştirilimiştir. Bilinmeyen bir çevre ile etkileşime girmede güvenli kontak hareketi gerçekleştirilmeli ve robotun çevreye uyguladığı kuvvet sınırlı tutulmalıdır.

Robotların bilinmeyen bir çevre ile etkileşime geçmeleri için çevrenin değişkenlerine uyum sağlamaları gerekmektedir. Fakat bilinmeyen bir çevreye uyum sağlayacak güvenli otomatik kontrolörlerin insansı robotlar için tasarlanması oldukça zor bir

görevdir. Eğer otomatik kontrolörler düzgün bir şekilde tasarlanmazlarsa robotlar çevreye veya kendilerine zarar verebilirler. Bu durum insan robot etkileşimi gibi uygulamalarda çok daha ciddi sonuçlara neden olabilir. Bu nedenle son olarak çift taraflı hareket kontrolü kullanılarak insanların yetenekleri insansı robotlara aktarılmış ve insansı robotların bilinmeyen bir çevreye uyum gösterme kabiliyetleri geliştirilmiştir. İki farklı ÇTHK yapısı önerilmiştir. İlk yöntemin tasarımı oldukça basittir fakat yöneten ve yönetilen robotların aynı mekanik yapıya sahip olması ihtiyacı pratik uygulamalarda problemler oluşturmaktadır. İkinci önerilen yöntemde yöneten ve yönetilen robotlar farklı mekanik yapılar kullanılarak tasarlanabilir fakat kontrolörün yapısı daha karmaşıktır.

Önerilen ÇTHK kontrol yapısı oldukça pratik ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Örneğin geleneksel ÇTHK yapısı fizik tedavi uygulamalarında tedavi uzmanının rahat bir şekilde hastanın hareketleri gerçekleştirmesini sağlamak için kullanılabilir. Bu uygulamada tedavi uzmanı ve hasta aynı eklemlerine benzer robotu giyerler. Hastadan tedavi uzmanına 4K_ÇTHK aracılığıyla aktarılan empedans bilgisi ile tedavi uzmanı hastanın durumunu anlayabilir, tedavi uzmanından hastaya aktarılan hareket bilgileri ile hastanın tedavisi gerçekleştirilebilir. Basit 4K_ÇTHK kontrolör tasarımları ile tedavi uzmanının daha az kuvvet harcayarak daha zor hareketleri gerçekleştirmesi sağlanabilir. Önerilen 4K_ÇTHK yapısı için pratike çok farklı uygulamalar önerilebilir. Örneğin Fukushima nükleer santrali gibi tehlikeli çevrelerde çalışabilecek insansı robotların yetenekleri önerilen kontrolör yapısı kullanılarak iyileştirilebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Westervelt, E. R., Grizzle, J. W., Chevallereau, C., Choi, J. H. & Morris, B.** (2007). *Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion*. Boca Raton, FL.: Taylor & Francis Group, LLC.

[2] **Fujimoto, Y. & Kawamura, A.** (1996). Three dimensional digital simulation of legged robots, *Journal of Robotics and Mechatronics*, *8* (3), 266–271.

[3] **Fujimoto, Y., Obata, S. & Kawamura, A.** (1998). Robust biped walking with force interaction control between foot and ground, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium : May 16-20.

[4] **Schmitt, D.** (2003). Insights into the evolution of human bipedalism from experimental studies of humans and other primates, *Journal of Experimental Biology*, *206*, 1437–1448.

[5] **Skoyles, J. R.** (2006). Human balance, the evolution of bipedalism and dysequilibrium syndrome, *Medical Hypotheses*, *66* (6), 1060–1068.

[6] **Vukobratovic, M. & Stepanenko, Y.** (1972). On the stability of anthropomorphic systems, *Mathematical Biosciences*, *15* (1-2), 1–37.

[7] **Sardain, P. & Bessonnet, G.** (2004). Forces acting on a biped robot. Center of pressure—zero moment point, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, *34* (5), 630–637.

[8] **Vukobratovic, M. & Borovac, B.** (2004). Zero-moment point –Thirty five years of its life, *International Journal of Humanoid Robot*, *1* (1), 157–173.

[9] **Yokokohji, Y. & Yoshikawa, T.** (1994). Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, *10* (5), 605–620.

[10] **Iida, W. & Ohnishi, K.** (2004). Reproducibility and operationality in bilateral teleoperation, *The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Kawasaki, Japan : March 25-28.

[11] **IEEE Spectrum: İnsansı robot çalışmaları.** (t.y.). Erişim: 23 Ocak 2016, http://spectrum.ieee.org/robotics/humanoids

[12] **Gelişmiş insansı robot çalışmaları.** (t.y.). Erişim: 23 Ocak 2016, http://www.androidworld.com/prod01.htm

[13] **Akhtaruzzaman, M. & Shafie, A. A.** (2010). Evolution of humanoid robot and contribution of various countries in advancing the research and development of the platform, *IEEE International Conference on Control Automation and Systems*, Gyeonggi-do, South Korea : October 27-30.

[14] **Tanie, K.** (2003). Humanoid Robot and Its Application Possibility. In Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, *MFI2003*. *Proceedings of IEEE International Conference on*, (pp. 213-214). Japan : Tokyo, July 30-August 1.

[15] **Kaneko, K., Kanehiro, F., Morisawa, M., Akachi, K., Miyamori, G., Hayashi, A. & Kanehira, N.** (2011). Humanoid robot HRP-4 - Humanoid robotics platform with lightweight and slim body, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA : September 25-30.

[16] **Ceccarelli, M.** (2004). *Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulation.* Dordrecht, The Netherlands: Springer.

[17] **İsmail El Cezirinin hayatı ve mühendislik çalışmaları.** (t.y.). Erişim: 23 Ocak 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Ismail_al-Jazari

[18] **Vukobratovic, M. K.** (2007). When were active exoskeletons actually born?, *International Journal of Humanoid Robotics, 4* (3), 459–486.

[19] **Gogu, G.** (2008). *Structural Synthesis of Parallel Robots Part 1: Methodology.* Dordrecht, The Netherlands: Springer.

[20] **Vukobratovic, M., Juricic, D. & Frank, A.** (1970). On the control and stability of one class of biped locomotion systems, *Transactions of ASME, Series D. Journal of Fluids Engineering, 92* (3), 328–332.

[21] **Vukobratovic, M., Frank, A. & Juricic, D.** (1970). On the stability of biped locomotion, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 17* (1), 25–36.

[22] **Kato, I., Mori, Y. & Masuda, T.** (1972). Pneumatically Powered Artificial Legs Walking Automatically Under Various Circumstances. *Proceedings of the 4th International Symposium in External Control of Human Extremities*, (pp. 458-470). Yugoslavia : Dubrovnik, August 28-September 2.

[23] **Kato, I.** (1973). Development of WABOT 1, *Biomechanism, 2*, 173–214.

[24] **Takanishi, A., Tochizawa, M., Takeya, T., Karaki, H. & Kato, I.** (1989). Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion Under Known External Force. *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Robotics*, (pp.299-310). USA : Columbus, Ohio, June 13–15.

[25] **Raibert, M. H.** (1986). *Legged Robots That Balance*. Cambridge, MA.: MIT Press.

[26] **Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y. & Kato, I.** (1985). The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD, *International Conference on Advanced Robotics*, Tokyo, Japan : March 25-28.

[27] **Siciliano, B. & Khatib, O.** (2008). *Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

[28] **Kajita, S. & Tani, K.** (1991). Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain–Derivation and application of the linear inverted pendulum

mode, *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Sacramento, CA, USA : April 9-11.

[29] **McGeer, T.** (1990). Passive dynamic walking, *International Journal of Robotic Researches, 9* (2), 62–82.

[30] **Hirose, M., Haikawa, Y., Takenaka, T. & Hirai, K.** (2001). Development of humanoid robot ASIMO, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Mui, Hawai : October 29 - November 3.

[31] **Boston Dynamics tarafından geliştirilen robotlar.** (t.y.). Erişim: 23 Ocak 2016, http://www.bostondynamics.com/index.html

[32] **Erbatur, K., Seven, U., Taşkıran, E., Koca, Ö., Yılmaz, M., Ünel, M., ...Onat, A.** (2011). Design and control of the humanoid robot SURALP, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 19* (5), 725-731.

[33] **Kanda, T., Hirano, T., Eaton, D. & Ishiguro, H.** (2004). Interactive robots as social partners and peer tutors for children: A field trial, *Human-Computer Interaction, 19* (1), 61–84.

[34] **Burke, J. L., Murphy, R. R., Rogers, E., Lumelsky, V. J. & Scholtz, J.** (2004). Final report for the DARPA/NSF interdisciplinary study on human-robot interaction, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 34* (2), 103–112.

[34] **Wahde, M. & Pettersson, J.** (2002). A Brief Review of Bipedal Robotics Research. *Proceedings of the 8th Mechatronics Forum International Conference*, (pp. 480-488). Netherlands : University of Twente, June 24-26.

[36] **Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D. & Stokic, D.** (1990). *Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application (Scientific Fundamentals of Robotics)*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

[37] **Shih, C. L. & Gruver, W. A.** (1992). Control of a biped robot in the double-support phase, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 22* (4), 729–735.

[38] **Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Yokoi, K. & Hirukawa, H.** (2002). A realtime pattern generator for biped walking, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington DC, USA : May 11-15.

[39] **Jovanovic, M.** (2006). Improved kinematics simulation model of general human and humanoid motion, *The 4th Serbian-Hungarian Joint Symposium on Intelligent Systems*, Subotica, Serbia : September 29-30.

[40] **Caux, S. & Zapata, R.** (1999). Modeling and control of biped robot dynamics, *Robotica, 17* (4), 413–426.

[41] **McGeer, T.** (1990). Passive walking with knees, *IEEE International Confernece on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA : May 13-18.

[42] **Kuo, A. D.** (1999). Stabilization of lateral motion in passive dynamic walking, *International Journal of Robotics Research*, *18* (9), 917–930.

[43] **Ohta, H., Yamakita, M. & Furuta, K.** (2001). From passive to active dynamic walking, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, *11* (3), 287–303.

[44] **Wisse, M., Schwab, A. L., Van der Linde, R. Q. & Van der Helm, F.C.T.** (2005). How to keep from falling forward: Elementary swing leg action for passive dynamic walkers, *IEEE Transactions of Robotics*, *21* (3), 393–401.

[45] **Kinugasa, T., Akiyama, T., Idris, M. A., Yoshida, K. & Iribe, M.** (2010). Experimental Analysis of 3D Passive Dynamic Walking: Body's Shape, CoM and Stability. *Proceedings of SICE Annual Conference*, (pp. 1825-1830). Taiwan : Taipei, August 18-21.

[46] **Matsuoka, K.** (1987). Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators, *Biological Cybernetics*, *56* (5-6), 345–353.

[47] **Taga, G., Yamaguchi, Y. & Shimizu, H.** (1991). Self-organised control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment, *Biological Cybernetics*, *65* (3), 147–159.

[48] **Miyakoshi, S., Taga, G., Kuniyoshi, Y. & Nagakubo, A.** (1998). Three dimensional bipedal stepping motion using neural oscillators-towards humanoid motion in the real world, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, Canada : October 13-17.

[49] **Nakanishi, J., Morimoto, J., Endo, G., Schaal, S. & Kawato, M.** (2003). Learning from demonstration and adaptation of biped locomotion with dynamical movement primitives, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, USA : October 27 - 31.

[50] **Morimoto, J. & Christopher, G. A.** (2009). Nonparametric representation of an approximated Poincare map for learning biped locomotion, *Autonomous Robots*, *27* (2), 131–144.

[51] **Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K. & Hirukawa, H.** (2003). Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan : September 14-19.

[52] **Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y. & Takenaka, T.** (1998). The development of Honda humanoid robot, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium : May 16-20.

[53] **Qiang, H., Yokoi, K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N. & Tanie, K.** (2001). Planning walking patterns for a biped robot, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, *17* (3), 280–289.

[54] **Sato, T., Sakaino, S. & Ohnishi, K.** (2011). Real-time walking trajectory generation method with three-mass models at constant body height for three-dimensional biped robots, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58* (2), 376–383.

[55] **Motoi, N., Suzuki, T. & Ohnishi, K.** (2009). A biped locomotion planning based on virtual linear inverted pendulum mode, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *56* (1), 54–61.

[56] **Erbatur, K. & Kurt, O.** (2006). Humanoid walking robot control with natural ZMP references, *The 32nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, Paris, France : November 6-10.

[57] **Sato, T., Sakaino, S. & Ohnishi, K.** (2009). Real-time walking trajectory generation method at constant body height in single support phase for three dimensional biped robot, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Gippsland, Victoria, Australia : February 10-13.

[58] **Nishiwaki, K., Kagami, S., Kuniyoshi, Y., Inaba, M. & Inoue, H.** (2002). Online generation of humanoid walking motion based on a fast generation method of motion pattern that follows desired zmp, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, EPFL, Switzerland : September 30-October 4.

[59] **Kagami, S., Kanehiro, F., Tamiya, Y., Inaba, M. & Inoue, H.** (2000). Autobalancer: An online dynamic balance compensation scheme for humanoid robots, *The 4th International Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics*, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, USA : March 16-18.

[60] **Khatib, O. & Chung, S-Y.** (2014). SupraPeds: Humanoid contact-supported locomotion for 3D unstructured environments, *IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China : May 31–June 7.

[61] **Motoi, N., Ikebe, M. & Ohnishi, K.** (2007). Real-time gait planning for pushing motion of humanoid robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *3* (2), 154–163.

[62] **Ohashi, E., Aiko, T., Tsuji, T., Nishi, H. & Ohnishi, K.** (2009). Collision avoidance method of humanoid robot with arm force, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *54* (3), 1632–1641.

[63] **Sentis, L. & Khatib, O.** (2005). Synthesis of whole-body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives, *International Journal of Humanoid Robotics*, *2* (4), 505–518.

[64] **Sentis, L.** (2007). *Synthesis and control of whole-body behaviors in humanoid systems* (Doctoral dissertation). Stanford University, Department of Electrial Engineering, California.

[65] **Sentis, L., Park, J. & Khatib, O.** (2010). Compliant control of multi-contact and center of mass behaviors in humanoid robots, *IEEE Transactions on Robotics*, *26* (3), 483–501.

[66] **Ohnishi, K., Shibata, M. & Murakami, T.** (1996). Motion control for advanced mechatronics, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *1* (1), 56–67.

[67] **Sariyildiz, E. & Ohnishi, K.** (2015). Stability and robustness of disturbance observer based motion control systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62* (1), 414–422.

[68] **Sariyildiz, E. & Ohnishi, K.** (2015). An adaptive reaction force observer design, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 20* (2), 750–760.

[69] **Murakami, T., Yu, F. & Ohnishi, K.** (1993). Torque sensorless control in multi-degree-of-freedom manipulator, *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 40* (2), 259–265.

[70] **Sato, T.** (2010). *Advanced motion control of biped robot* (Doctoral dissertation). Keio University, Graduate School of Science and Technology, Yokohama.

[71] **Spong, M. W., Hutchinson, S. & Vidyasagar, M.** (2006). *Robot Modeling and Control*. River Street, NJ.: John Wiley and Sons, Inc.

[72] **Craig, J. J.** (2005). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Upper Saddle River, NJ.: Prentice Hall.

[73] **Sciavicco L. & Siciliano, B.** (2000). *Modelling and Control of Robot Manipulators*. London: Springer-Verlag.

[74] **Asada, H. & Slotine, J. J. E.** (1986). *Robot Analysis and Control*. NY.: Wiley-Interscience.

[75] **Hurmuzlu, Y., Genot, F. & Brogliato, B.** (2004). Modeling, stability and control of biped robots-A general framework, *Automatica, 40* (10), 1647–1664.

[76] **Sariyildiz, E. & Temeltas, H.** (2014). An exact dynamic model for the Thomas-K biped robot: New simulator design, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Tianjin, China : August 3-6.

[77] **Golliday, C. L. & Hemami, H.** (1977). An approach to analyzing biped locomotion dynamics and designing robot locomotion controls, *IEEE Transactions on Automatic Control, 22* (6), 963–972.

[78] **Righetti, L., Buchli, J., Mistry, M. & Schaal, S.** (2011). Inverse dynamics control of floating-base robots with external constraints: A unified view, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, Chaina : May 9-13.

[79] **Greenwood, D.T.** (2003). *Advanced Dynamics*. NY.: Cambridge University Press.

[80] **Goldstein, H., Poole, C. & Safko, J.** (2001). *Classical Mechanics*. SF.: Addison Wesley.

[81] **Luh, J. Y. S., Walker, M. W. & Paul, R. P.** (1980). On-line computational scheme for mechanical manipulators, *Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 102* (2), 69–76.

[82] **Silver, W.** (1982). On the equivalence of Lagrangian and Newton—Euler dynamics for manipulators, *International Journal of Robotics Research, 1* (2), 60–70.

[83] **Tsuji, T. & Ohnishi, K.** (2002). A control of biped robot which applies inverted pendulum mode with virtual supporting point, *The 7th International Workshop on Advanced Motion Control*, Maribor, Slovenia : July 3-5.

[84] **Ohashi, E., Sato, T. & Ohnishi, K.** (2009). A walking stabilization method based on environmental modes on each foot for biped robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *56* (10), 3964–3974.

[85] **Ugurlu, B. & Kawamura, A.** (2012). Bipedal trajectory generation based on combining inertial forces and intrinsic angular momentum rate changes: Eulerian ZMP resolution, *IEEE Transactions on Robotics*, *28* (6), 1406–1415.

[86] **Lohmeier, S., Buschmann, T. & Ulbrich, H.** (2009). System design and control of anthropomorphic walking robot LOLA, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *14* (6), 658–666.

[87] **Kaneko, K., Kanehiro, F., Kajita, S., Yokoyama, K., Akachi, K., Kawasaki, T., ... Isozumi, T.** (2002). Design of prototype humanoid robotics platform for HRP, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, EPFL, Lausanne, Switzerland : September 30-October 4.

[88] **Erbatur, K., Seven, U., Taskran, E., Koca, O., Yilmaz, M., Unel, M., ... Onat, A.** (2009). SURALP: A new full-body humanoid robot platform, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, USA : October 10-15.

[89] **Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N. & Fujimura, K.** (2002). The intelligent ASIMO: System overview and integration, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, EPFL, Lausanne, Switzerland : September 30-October 4.

[90] **Yi, S-J., Byoung-Tak Z., Hong, D. & Lee, D. D.** (2011). Practical bipedal walking control on uneven terrain using surface learning and push recovery, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, California, USA : September 25-30.

[91] **Kibayashi, T., Sugimoto, Y., Ishikawa, M., Osuka, K. & Sankai, Y.** (2012). Experiment and analysis of quadrupedal quasi-passive dynamic walking robot "Duke", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, Portugal : October 7-12.

[92] **Asano, F. & Zhi-Wei, L.** (2008). Underactuated virtual passive dynamic walking with an upper body, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA : May 19-23.

[93] **Rai, J. K., Singh, V. P., Tewari, R. P. & Chandra, D.** (2012). Artificial neural network controllers for biped robot, *The 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, Allahabad India : December 17-19.

[94] **Luo, R. C., Chiung-wei, T., Po-zen, C. & Kao-wei, L.** (2007). Trajectory-tracking of nonlinear biped robot system based on adaptive fuzzy sliding mode control, *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Taipei, Taiwan : November 5-8.

[95] **Takao, S., Yokokohji, Y. & Yoshikawa, T.** (2003). FSW (feasible solution of wrench) for multi-legged robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan : September 14-19.

[96] **Hirukawa, H., Hattori, S., Harada, K., Kajita, S., Kaneko, K., Kanehiro, F., ... Morisawa, M.** (2006). A universal stability criterion of the foot contact of legged robots - adios ZMP, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, FL, USA : May 15-19.

[97] **Sato, T., Sakaino, S., Ohashi, E. & Ohnishi, K.** (2011). Walking trajectory planning on stairs using virtual slope for biped robots, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58* (4), 1385–1396.

[98] **Chiaverini, S., Siciliano, B. & Egeland, O.** (1994). Review of the damped least-squares inverse kinematics with experiments on an industrial robot manipulator, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *2* (2), 123–134.

[99] **Lawrence, D. A.** (1993). Stability and transparency in bilateral teleoperation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, *9* (5), 624–637.

[100] **Ohnishi, K., Katsura, S. & Shimono, T.** (2010). Motion control for real-world haptics, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, *4* (2), 16–19.

[101] **Suzuki, A. & Ohnishi, K.** (2013). Novel four-channel bilateral control design for haptic communication under time delay based on modal space analysis, *IEEE Transactions on Control Systems Technology, 21* (3), 882–890.

[102] **Kagami, S., Kitagawa, T., Nishiwaki, K., Sugihara, T. & Inaba, M.** (2002). A fast dynamically equilibrated walking trajectory generation method of humanoid robot, *Autonomous Robots, 12* (1), 71–82.

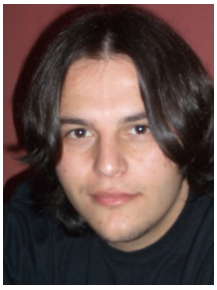
[103] **Harada, K., Kajita, S., Kaneko, K. & Hirukawa, H.** (2003). Pushing manipulation by humanoid considering two-kinds of ZMPs, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan : September 14-19.

[104] **Nozaki, T.** (2014). *Realization of human manipulation based on haptics* (Doctoral dissertation). Keio University, Graduate School of Science and Technology, Yokohama.

[105] **Sakaino, S., Sato, T. & Ohnishi, K.** (2011). Precise position/force hybrid control with modal mass decoupling and bilateral communication between different structures, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *7* (2), 266–276.

[106] **Sakaino, S., Sato, T. & Ohnishi, K.** (2011). Multi-DOF micro-macro bilateral controller using oblique coordinate control, *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 7* (3), 446–454.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad **:** Emre SARIYILDIZ

Doğum Yeri ve Tarihi **:** İstanbul, 12/12/1984

E-Posta **:** e-sariyildiz@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Yüksek Lisans** **:** 2007, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği.
- **Doktora** **:** 2014, Keio Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Yüksek Okulu, Sistem Tasarım Mühendisliği.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Sariyildiz, E.** & Temeltas, H. (2015). A dynamic simulator design for humanoid robots, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology, 4* (6), 8–19.
- **Sariyildiz, E.** & Temeltas, H. (2012). A new formulation method for solving kinematic problems of multi-arm robot systems using quaternion algebra in the screw theory framework, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *20* (4), 607–628.
- **Sariyildiz, E.,** Cakiray, E. & Temeltas, H. (2011). A comparative study of three inverse kinematic methods of serial industrial robot manipulators in the screw theory framework, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *8* (5), 9–24.
- **Sariyildiz, E.** & Temeltas, H. (2011). Performance analysis of numerical integration methods in the trajectory tracking application of redundant robot manipulators, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *8* (5), 25–38.
- **Sariyildiz, E.** & Temeltas, H. (2014). An exact dynamic model for the Thomas-K biped robot: New simulator design, *IEEE International Conference on*

Mechatronics and Automation, Tianjin, China : August 3-6.

- **Sariyildiz, E.** & Temeltas, H. (2011). A comparison study of the numerical integration methods in the trajectory tracking application of redundant robot manipulators, *International Conference on Electrical and Electronics Engineering,* Bursa, Turkey : December 1-4.
- **Sariyildiz, E.** & Temeltas, H. (2011). A comparison study of three screw theory based kinematic solution methods for the industrial robot manipulators, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Beijing, China : August 7-10.
- **Sariyildiz, E.** & Temeltas, H. (2011). A singularity free trajectory tracking method for the cooperative working multi-arm robots using screw theory, *IEEE International Conference on Mechatronics*, Istanbul, Turkey : April 13-15.
- **Sariyildiz, E.** & Temeltas, H. (2009). Solution of inverse kinematic problem for serial robot using quaterninons, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation,* Changchun, China : August 9-12.
- **Sariyildiz, E.** & Temeltas, H. (2009). Solution of inverse kinematic problem for serial robot using dual quaterninons and plücker coordinates, *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapore : July 14-17.
- **Sarıyıldız, E.** ve Temeltaş, H. (2013). Tekil nokta probleminden bağımsız ters kinematik çözümlerin vida teoremi kullanılarak elde edilmesi: Endüstriyel robot uygulaması, *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi*, Malatya, Türkiye : Eylül 26-28.