İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSI ROBOTLARDA YÜRÜME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sabri YILMAZ

Kontrolve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSI ROBOTLARDA YÜRÜME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sabri YILMAZ
(504111128)

Kontrolve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN

AĞUSTOS 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111128 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi **Sabri YILMAZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"İNSANSI ROBOTLARDA YÜRÜME"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Seta BOĞOSYAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Dr. Erhan AKDOĞAN Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **29 Ağustos 2013**
Savunma Tarihi : **20 Ağustos 2013**

Aileme ve Sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Hayatımın her aşamasında yanımda olan ve beni destekleyen aileme, akademik hayatım boyunca yardımlarını esirgemeyen ve anlayışla yaklaşan Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN'a teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca sağladığı maddi destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Ağustos 2013

Sabri YILMAZ

(Kontrol Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. ANATOMİK İNCELEME **3**
2.1 Yürüme Siklusu 3
2.2 İnsan Yürüyüşünü Oluşturan Sistemler 4
2.3 Yürüme Boyunca Temel Yer Değiştirmeler 4
3. KİNEMATİK ANALİZ **7**
3.1 İleri Kinematik Analiz 7
3.2 Ters Kinematik Analiz 15
4. DİNAMİK ANALİZ **19**
4.1 Euler-Lagrange Yöntemi 19
5. MODELLEME **21**
5.1 Robotun Gerçeklenmesi 21
5.2 Kinematik Modelleme 24
5.3 Dinamik Modelleme 29
6. YÜRÜME PLANLAMA **31**
7. SİMÜLASYON SONUÇLARI **35**
8. SONUÇ **47**
KAYNAKLAR **49**
ÖZGEÇMİŞ **51**

KISALTMALAR

DH	**:**Denavit-Hartenberg
SD	**:** Serbestlik Derecesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Örnek DH tablosu. 11
Çizelge 3.2 : Model için çıkartılan DH tablosu. 12
Çizelge 5.1 : Sağdan sola DH parametreleri. 27
Çizelge 5.2 : Soldan sağa DH parametreleri. 27
Çizelge 7.1 : Bacağın yere dik konumu için üretilen torklar. 38
Çizelge 7.2 : Bacağın yere paralel konumu için üretilen torklar. 38

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1:Sırasıyla ASIMO, HRP, LOLA, Johnnie ve Süralp 1
Şekil 2.1:Yürüme siklusu.. 3
Şekil 2.2:İskelet, kas ve sinir sistemleri 4
Şekil 2.3: Eklemlere yerleştirilen eksen takımlarının yönü 5
Şekil 3.1: Robot manipülatörlerde kullanılabilecek eklem tipleri. 7
Şekil 3.2: Kinematik incelemesi yapılan bacak modeli. 8
Şekil 3.3: Kinematik incelemesi yapılan bacak modeli. 9
Şekil 3.4: Eksen takımları..... 10
Şekil 3.5: Eklemler ve uzuvlar..... 11
Şekil 5.1: Bacak çiftinin çubuk modeli..... 21
Şekil 5.2: Bacağın Solidworks çizimi (karşıdan ve yandan görünüş). 22
Şekil 5.3: Bacakların Solidwork montajı (perspektif). 23
Şekil 5.4: Bacaklar ve çubuk modelleri. 24
Şekil 5.5: Bacak parametreleri. 25
Şekil 5.6: Sağdan sola doğru eksen takımları. 26
Şekil 5.7: Soldan sağa eksen takımları. 28
Şekil 6.1:Ağırlık merkezi yörünge. 32
Şekil 6.2: Sağ ayak yörünge. 33
Şekil 6.3: Sağ ayak yörünge (zamana göre). 33
Şekil 6.4: Sol ayak yörünge. 34
Şekil 6.5: Sol ayak yörünge (zamana göre). 34
Şekil 6.6:Yörüngeler, ağırlık merkezi (mavi), sağ ayak (siyah), sol ayak (kırmızı). 34
Şekil 7.1: Altı parçaya bölünmüş adım..... 35
Şekil 7.2: On altı parçaya bölünmüş adım. 36
Şekil 7.3: Adım (karşıdan görünüş). 37
Şekil 7.4:Yürümenin perspektif görünüşü. 37
Şekil 7.5: Ayağın dik konumundaki simülasyon sonuçları. 39
Şekil 7.6: Ayağın yere paralel konumundaki simülasyon sonuçları..... 40
Şekil 7.7: Tork eğrileri..... 41
Şekil 7.8: Tepki kuvvetleri (x-ekseni). 41
Şekil 7.9: Tepki kuvvetleri (y-ekseni). 42
Şekil 7.10: Tepki kuvvetleri (z-ekseni). 42
Şekil 7.11: Gerçek ağırlık merkezinin hareketi. 43
Şekil 7.12: Sanal ağırlık merkezinin hareketi. 43
Şekil 7.13:Ağırlık merkezleri xy eksenlerinde (x gerçek, o sanal)..... 44
Şekil 7.14:Ağırlık merkezleri xz eksenlerinde (x gerçek, o sanal).. 44
Şekil 7.15:Ağırlık merkezleri yz eksenlerinde (x gerçek, o sanal).. 45

İNSANSI ROBOTLARDA YÜRÜME

ÖZET

İnsansı robotlar insanlara benzerlikleri ve insanlar için uygun olan ortamlarda hareket edebilme kabiliyetleri nedeniyle mobil robotlar içinde dikkat çekici bir yere sahiptirler. Tekerlekli robotlarla kıyaslanacak olursa, insansı robotlar iç ortam ve dış ortam koşullarında daha özgürce hareket edebilirler. Merdiven çıkabilirler veya engellerin üzerinden adım atabilirler. Robotik ve otonom sistemler açısından bakılırsa, hareket-yörünge planlaması daha yoğun ilgilenilen bir çalışma alanıdır, çünkü bu tarz sistemlerin kinematik yapıları oldukça karışık ve serbestlik dereceleri yüksek sayılardır.

İnsan yürüyüşünün teknik adı iki bacaklı yürümedir, humanoid robotların da yer değiştirme sistemleri bu iki bacaklı yürümeye dayanmaktadır. İnsansı bacağa çalışmalarda kullanılabilecek en yakın model altı serbestlik dereceli modeldir.

Robotiğin tarihi antik çağlara dayanmaktadır. Endüstride kullanılan günümüz robotlarından daha önce Yunan Tanrısı Hephaestus atölyesinde kendisi için çalışacak bir robot üzerinde çalışmaktaydı, bu tarz çalışmalar başarısız olmuştur.

Son yıllarda otonom makinalara ilgi artmaktadır. Robotların kullanım alanları hizmet ve endüstriyel robotlar olarak ikiye ayrılabilir. Hizmet alanında kullanılan robotlar; askeri alanlarda kullanılabilir, tıp alanında kullanılabilir ya da astronomi alanında kullanılabilir. Endüstriyel robotlarsa üretim sürecinin hatalarının minimize edilmesi, üretimin hızlanması ve insan gücünün yetersiz kalacağı yerlerde kullanılabilir.

Robot hareketi parçaları uzayda hareket ettirmek olarak isimlendirilebilir. Uzayda çalışabilmek için eksen takımlarının tanımlanması ve bu eksen takımlarının kendi içlerinde konumları ve oryantasyonlarının tanımlanması gereklidir. Robot eyleyiciler eklemler ve uzuvların kombinasyonlarından oluşur. Robotlarda kullanılabilecek altı farklı eklem tanımlanabilir, bunlar; dairesel, prizmatik, silindirik, düzlemsel, küresel ve vida tipinde olabilir.

Bir insan bacağı altı dairesel eklem ve ara uzuvlarla tanımlanabilir ve bu altı serbestlik dereceli robot manipulatör olarak isimlendirilebilir. Çünkü insan bacağında kalçada üç eksen etrafında dönme, dizde bir eksen etrafında dönme ve bilekte iki eksen etrafında dönme hareketleri söz konusudur, bu durum kinematik modelin çıkartılması sırasında kolaylık sağlayacaktır.

Kinematik analizin ardından modelin dinamik analizi yapılmıştır. Dinamik analiz ile harekete sebep olan kuvvetler ve torklar incelenecektir, kinematik analizde ise hareketin geometrik yorumu yaratılmaya çalışılmışıtır. Dinamik analiz ile amaçlanan, tasarım kriterlerinin bacak adım hareketini gerçekleştirirken eklemler

üzerindeki tepki kuvvetlerini ve eklemlerin üretmesi gereken tork değerleri kullanılarak belirlenmesidir.

Bu çözümleme sırasında hiçbir kontrolör sistemi kontrol etmediğinden, iterasyon sayısının hızlı çözümleme adına düşük olması ve gerek matris tersi alma işleminde Jacobien matrisinin kare matris olmaması nedeniyle yarattığı hatadan dolayı planlanan hareket ile elde edilen hareket arasında belli bir fark oluşmaktadır, yani sistem sürekli hal hatası yapmaktadır.

HUMANOID WALKING

SUMMARY

Humanoid robots are a particularly interesting group of mobile robots because of their resemblance to humans and their potential ability to operate in environments created for humans. In comparison to wheeled robots, humanoid robots can move more freely in indoor and outdoor environments. They can climb stairs, step over or onto obstacles. In robotics and autonomous systems however, motion planning for a biped walking robot is a rather demanding task because of the complex kinematics of such machines and the many degrees of freedom involved.

Man walking named as biped walking, biped means having two legs. Humanoid robots' locomotion system is based on biped walking. The most similar model to a human leg should have six degrees of freedom.

The projected leg with six degrees of freedom is drawn in Solid Works. Solid Works is 3D drawing program. This leg has three degrees of freedom in hip, one degree of freedom in knee and two degrees of freedom in wrist. For this purpose six servo motors will be used, every servo motor has one degree of freedom.

Robot, a mechanism that can move automatically explained in thesaurus. Robot has different meanings in literature. Robot is defined as any automated machine programmed to perform specific mechanical functions in the manner of a man in, or not controlled by man and a person who works, or behaves like a machine; automaton in dictionaries. From these meanings it can be understood that robot is an autonomous thing. But in 1921 the word robot was introduced the world by Czech writer Karel ĈapeK.

A reference by Professor Chudoba, to the Oxford Dictionary account of the word Robot's origin and its entry into the English language, reminds me of an old debt. The author of the play R.U.R. did not, in fact, invent that word; he merely ushered it into existence. It was like this: the idea for the play came to said author in a single, unguarded moment. And while it was still warm he rushed immediately to his brother Josef, the painter, who was standing before an easel and painting away at a canvas till it rustled. "Listen, Josef," the author began, "I think I have an idea for a play."

"What kind," the painter mumbled (he really did mumble, because at the moment he was holding a brush in his mouth). The author told him as briefly as he could. "Then write it," the painter remarked, without taking the brush from his mouth or halting work on the canvas. The indifference was quite insulting. "But," the author said, "I don't know what to call these artificial workers. I could call them Labori, but that strikes me as a bit bookish." "Then call them Robots," the

painter muttered, brush in mouth, and went on painting. And that's how it was. Thus was the word Robot born; let this acknowledge its true creator.

Robot manipulation is moving parts and tools in space. Because of working in space there must be coordinate systems and positions and orientation of these systems with respect to other defined systems, naturally. The manipulators are the combination of joints and links. There are six possible joints, revolute, prismatic, cylindrical, planar, screw and spherical joints.

In this study for working on two legs, half of the length of the hip is added to the legs so that the legs are not on the same plane, there is a hip offset between the legs, naturally. First of all the kinematics models of the legs are derived, for this purpose joints and the links have to be defined. Firstly the axes must be defined on the joints. In Denavit-Hartenberg approach the z-axes are found on the joints with respect to their degrees of freedom, the moving direction. This model leg has six revolute joints so that these joints are rotating around an axis. The rotation axes are the z-axes.

The joint parameters are written with a mark above themselves. With this approach, transformation matrix will be found. Transformation matrix is a matrix that gives the translation and the rotation of the target joint with respect to another joint. Transformation matrix includes a translation and a rotation matrix in itself. Rotation matrix gives the rotation of the target joint around the defined axes with respect to another joint.

After implementing forward kinematics with respect to Denavit-Hartenberg, the inverse kinematics will be studied. Inverse kinematics is needed because when robot manipulator is moving, there must be a path that is followed. In this path joints will be in different positions and orientations, inverse kinematic gives the results of unsolved joint parameters across this path. In this work Jacobian matrix is used to find the inverse kinematics solution.

Manipulator arm must have at least six degrees of freedom in order to locate its end-effector at an arbitrary point with an arbitrary orientation in space. Manipulator arms with less than six degrees of freedom are not able to perform such arbitrary positioning. On the other hand, if a manipulator arm has more than six degrees of freedom, there exist an infinite number of solutions to the kinematic equation. So the humanoid legs are modeled by six degrees of freedom for each other.

For path planning, this study aims walking across linear path so yaw axis has no effect on walking. Legs are modeled by six degrees of freedom but their homogenous transformation matrices are suitable for multiplication so that biped can be considered by twelve degrees of freedom. So that the kinematics models can be used separately or together, this gives the chance of controlling Jacobian matrices with respect to each other.And alsoeach leg has two different Jacobian matrixes. One is for the leg’s support position, other one is for swing position. When right leg is the support leg, the base frame of Jacobian matrix will be on right foot, and the first tip will be on center of gravity. Second Jacobian matrix will take center of gravity as the base frame and will take left foot as tip point. At this configuration again one part of the partial function will be used as path.

After defining kinematic side of the walking, dynamic modeling is derived. There are two widely used models available. Zero-Moment Point (ZMP) and Inverted

Pendulum (IP). ZMP is based on controlling the motion of the ZMP where movement and body dynamics do not cause any moments. IP uses pendulum model and controls the leg as a pendulum. In this study, instead of these models another path is defined for center of gravity, where is accepted between two legs. The path that is defined for center of gravity is another half circular path but width and period of this sinusoidal function is different from path that is defined for legs.

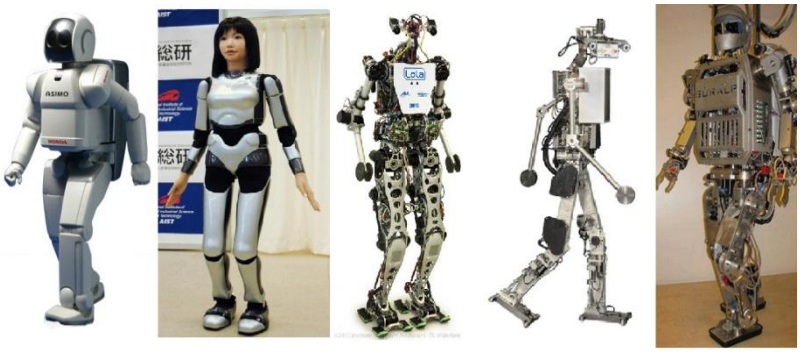
When support leg and swing leg change the kinematic models change. Biped modeled by four different models and every configuration has two models. By this division biped uses two different kinematic models for one step. By using two different models, center of gravity and swing leg can be controlled separately. Support leg can be taken as a robot arm, and swing leg can be taken as robot arm that is on the moving platform. Defining sinusoidal paths makes solution very fast and simple. Controlling bipeds swing leg and center of gravity by simple sinusoidal functions gives chance to consider dynamic model by kinematic solution.

After defining models dynamic analysis of the walking is done, for this purpose forces on the joints and torques of the joints are found by Matlab SimMechanics Toolbox. The motion of the real center of gravity is found and analyised. Projected biped is built and for the future works all this simulation work must be implemented onto the real robot and the success of this study must be inspected. After having results this open loop path planning must be controlled with proper controllers, control theory must be studied.

1. GİRİŞ

Antik zamanlardan günümüze kadar insan ve hayvan hareketlerinin analizi en önemli araştırma konuları arasında yer almıştır. Örneğin; Yunan Tanrılarından Hephaestus atölyesinde kendi hizmeti için çalışacak bir robot üzerinde çalışmış ancak başarılı olamamıştır. Hephaestus ile başlayan süreç, Platon, Aristotales, Leonardo Da Vinci, Galileo Galilei, Borelli, Marey gibi bilim adamları ile devam etmiş ve gelecekteki çalışmalar için zemin hazırlamıştır. Weber kardeşler ilk olarak 1836 yılında yürüme mekaniğini bilimsel olarak açıkladıktan sonra, özellikle son 30 yılda, konuyla ilgili çalışmalar müthiş bir ivme ile artmıştır [1]. Bilimsel ve teknolojik gelişmeler ile robotik bilimi endüstriyel alanda gelişme imkanı bularak çalışma yelpazesini genişletmiş; insansı robotların kazandığı popülerite ile kamuoyunda geniş yankı uyandırmıştır.

İnsan görünüşüne benzeyen, insanlarla irtibata geçebilen ilk robot tasarımı çalışmaları 1986 yılında Honda firması tarafından başlatılmış ve ASIMO isimli robotlarıyla bu alandaki gelişmeleri tetiklemiştir [2]. Akabinde Japon Ekonomi Bakanlığı'nın destekleriyle geliştirilen HRP adlı robotlar ile Almanya'da Münih Teknik Üniversitesi'nin geliştirdiği Johnnie ve LOLA isimli insansı robotlar bu alanda başarı sağlamışlardır. Türkiye'de ise robot teknolojisi, yukarıda bahsi geçen ülkelere nazaran daha düşük bir ivmeyle gelişim göstermiştir. Sabancı Üniversitesi tarafından 2009 yılında geliştirilen SÜRALP isimli robot, Türkiye'de bu konuda yapılan çalışmalardan en önemlisidir [3].



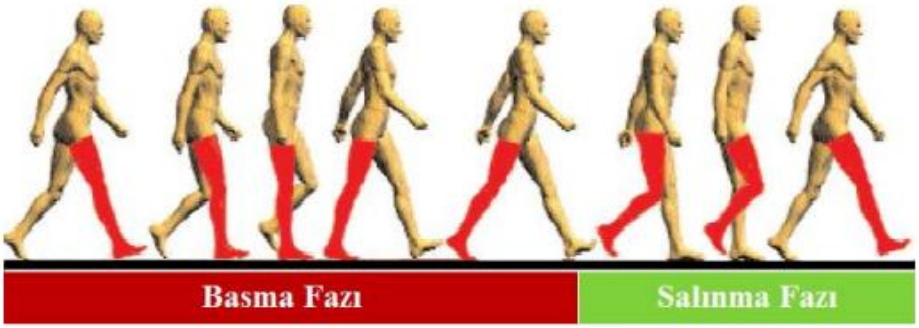
Şekil 1.1 : Sırasıyla ASIMO, HRP, LOLA, Johnnie ve Süralp [4].

2. ANATOMİK İNCELEME

Tasarımı yapılacak robotun modellenmesinin hemen hemen her aşamasında yürüme aşamalarının ve yürüme sistemlerinin incelenmesi ışık tutmaktadır bu nedenle yürüme anatomisinin iyi algılanmış olması gerekmektedir. Yürüme en az bir ayağın zeminle bağlantı halinde olduğu hareket etme biçimidir. Düz bir zeminde yapılan basit bir yürüyüş iki ana aşamadan oluşur; birincisi yalnızca bir ayağın zeminle bağlantı halinde olduğu, ikincisi ise her iki ayağın da zeminle bağlantı halinde olduğu aşamadır [1]. Standart insan yürüyüşü, uzuvlar ve gövde sayesinde ağırlık merkezinin öne doğru yönelimiyle gerçekleşen bir takım hareketler bütünüdür [5]. Yürüme esnasında yük ve temel yer değiştirmeler bacaklar tarafından gerçekleştirilir. Vücudun geri kalan kısmı ise bacakların bu hareketinden ileri doğru kayan ağırlık merkezi değişimlerine uyum sağlayarak ilerlemektedir.

2.1 Yürüme Siklusu

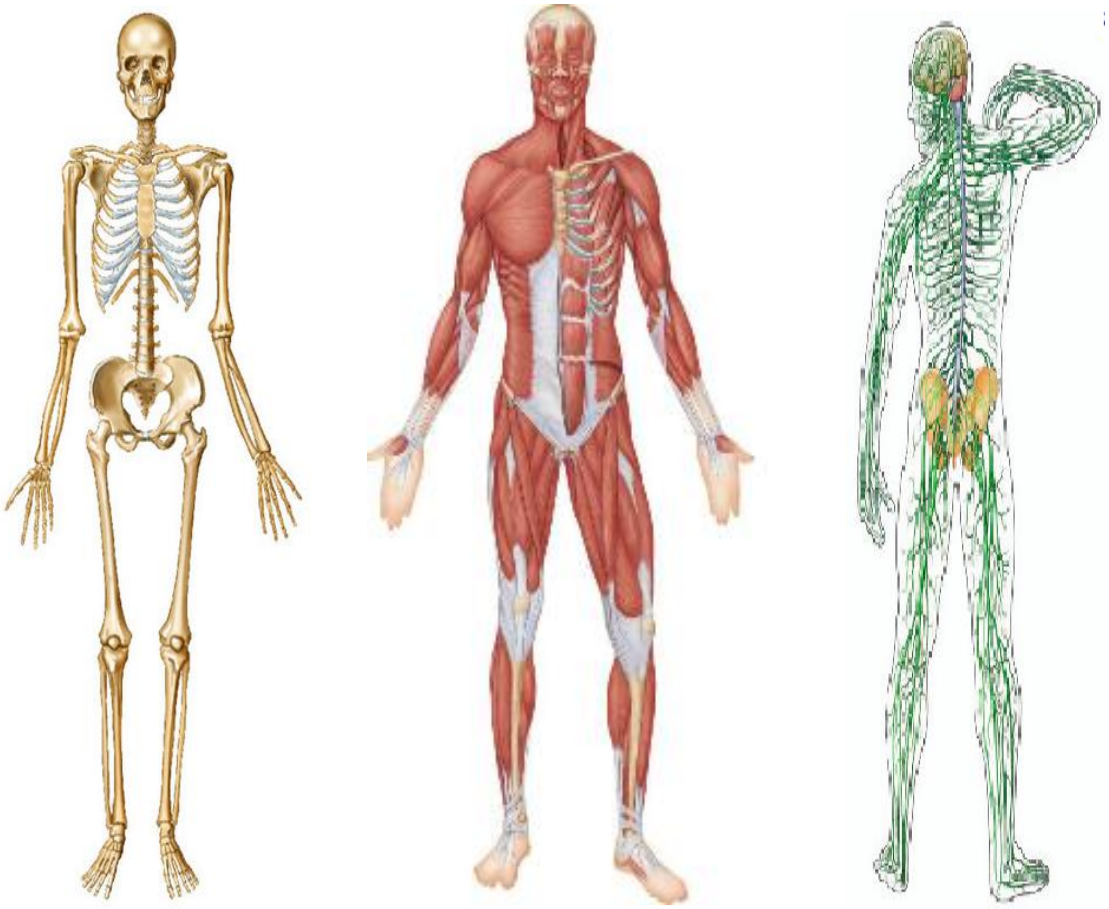
Bir takım periyodik hareketlerden oluşan yürümenin her bir periyoduna yürüme siklusu adı verilir. Yürüme siklusu birbiriyle ardışık rol alan iki fazdan oluşur. Bunlar; basma fazı ve salınma fazı olarak adlandırılır. Duruş fazı olarak da bilinen basma fazı yürüme siklusunun %60'ını oluşturur. Topuğun yere değmesiyle başlayan bu faz aynı ayağın parmaklarının yerden ayrılmasıyla sona erer. Yürüme siklusunun %40'ını oluşturan salınım fazı ise basma fazını takiben parmakların yerden ayrılmasıyla başlar ve aynı ayağın topuğu yere değene kadar devam eder [5].



Şekil 2.1 : Yürüme siklusu [5].

2.2 İnsan Yürüyüşünü Oluşturan Sistemler

İnsan yürüyüşünü oluşturan sistemler incelenecek olursa; iskelet sistemi, kas sistemi ve sinir sisteminin insan yürüşünde aktif rol oynadığı görülmektedir. Yürümede bir çatı görevi gören iskelet sistemi kemikler, eklemler ve kemikler ile eklemler arasındaki bağlardan oluşur. Kaslar ve tendonlardan oluşan kas sistemi iskelet sistemine hareketini vermektedir. Nöronlardan oluşan sinir sistemi ise kas sisteminin hareketlerini kontol etmektedir [1].

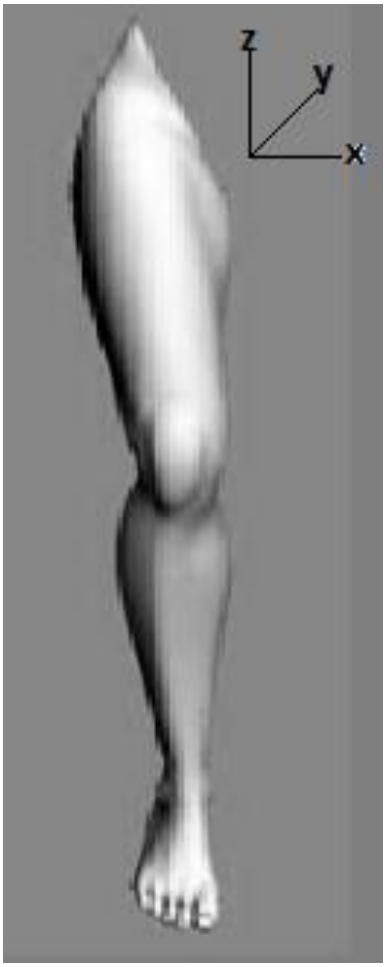


Şekil 2.2 : İskelet, kas ve sinir sistemleri [6].

2.3 Yürüme Boyunca Temel Yer Değiştirmeler

İnsan bacağı incelendiğinde yürüme sırasında temelde yedi serbestlik dereceli bir hareket söz konusudur. Kalça, diz, bilek ve parmak eklemlerine yerleştirilen sabit bir eksen takımının olduğu ve x ekseninin yürüme yönüne dik, y ekseninin yürüme yönüne paralel z ekseninin ise yere dik olarak yerleştirildiği düşünülerek yer değiştirmeler rahatlıkla tanımlanabilir. Bu çalışma sırasında örnek olarak verilen

modellerde tek bir bacak ele alınmış olup gösterim kolaylaştırılmıştır.Böyle bir eksen takım yerleşiminde; kalça eklemi x, y ve z eksenleri etrafında, diz eklemi yalnızca x ekseni etrafında, bilek eklemi x ve y eksenleri etrafında, parmak eklemi ise yalnızca x ekseni etrafında olmak üzere, tüm bacak toplamda yedi serbestlik dereceli bir hareket meydana getirmektedir. Şekil 2.3.'te eksen takımının nasıl yerleştirildiği gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Eklemlere yerleştirilen eksen takımlarının yönü [7].

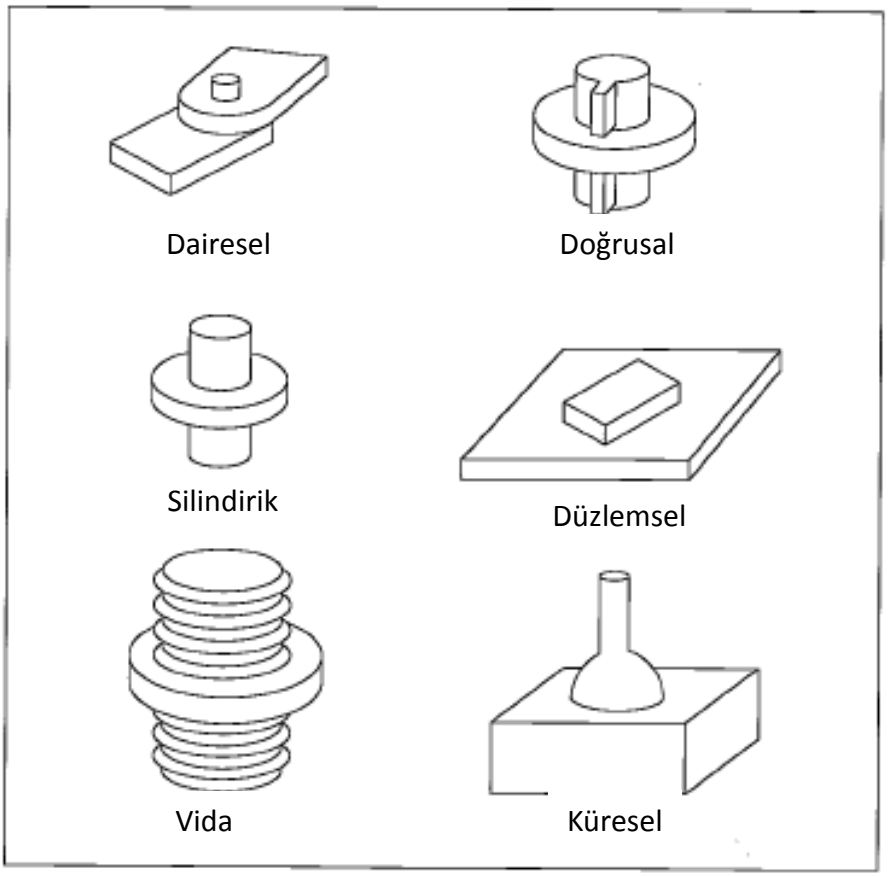
Bir bacak yürüme esnasında temelde yedi eksenli dönüş yapmaktadır. Çalışmalarda ise bir insan bacağı altı dairesel eklem ve ara uzuvlarla tanımlanmakta ve bu altı serbestlik dereceli robot manipulatör olarak isimlendirilmektedir [8].

Bunun nedeni, yürüme esnasında bu eklemin sağladığı kolaylığın, konstrüktif yapıda meydana getirdiği karmaşıklığın yanında dikkate alınmayacak kadar küçük bir etkiye sahip olmasıdır.

3. KİNEMATİK ANALİZ

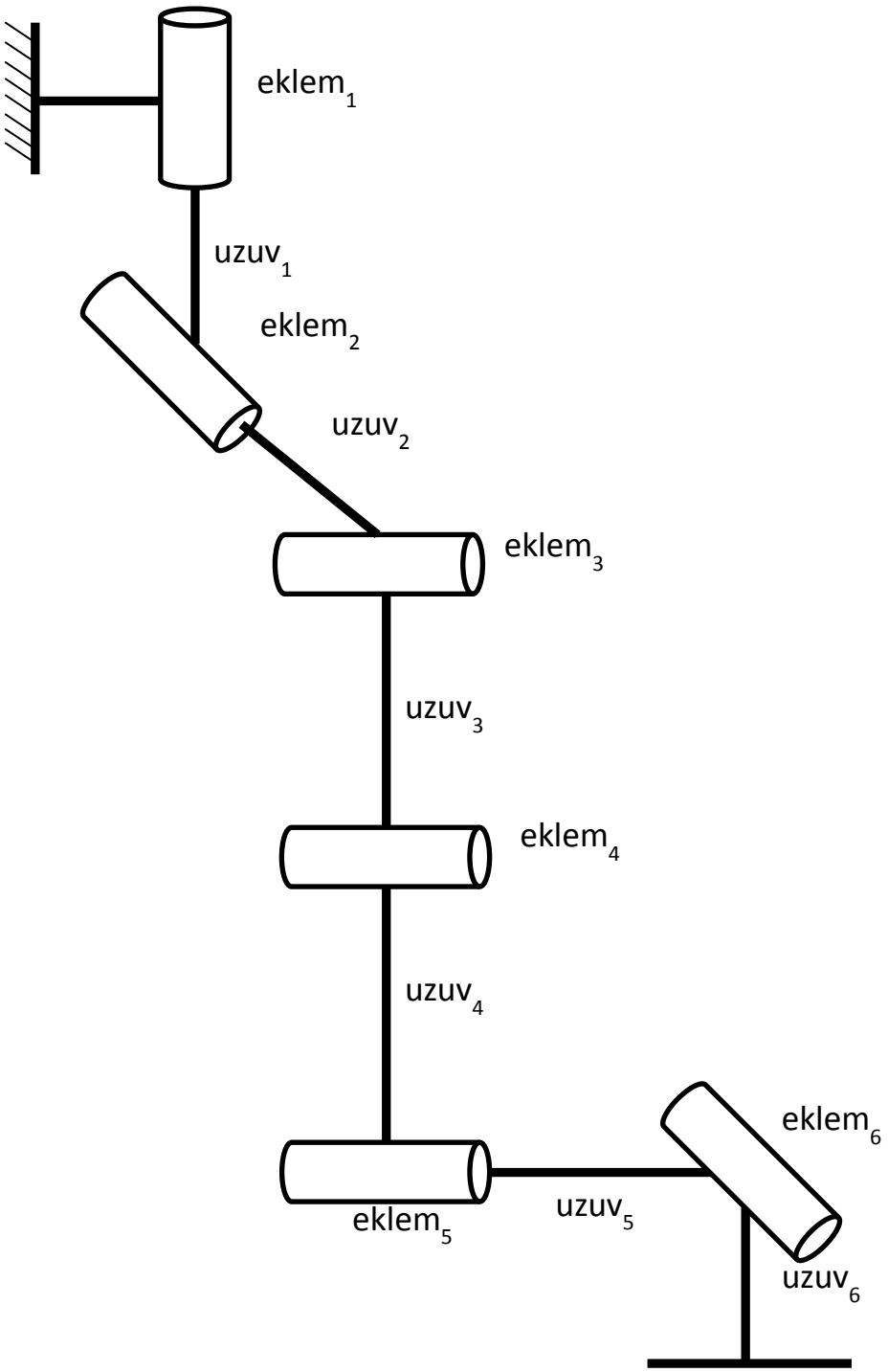
3.1 İleri Kinematik Analiz

Robot hareketi parçaları uzayda hareket ettirmek olarak isimlendirilebilir. Uzayda çalışabilmek için eksen takımlarının tanımlanması ve bu eksen takımlarının kendi içlerinde konumları ve oryantasyonlarının tanımlanması gereklidir. Robot eyleyiciler, eklemler ve uzuvların kombinasyonlarından oluşur. Robotlarda kullanılabilecek altı farklı eklem tanımlanabilir, bunlar; dairesel, prizmatik, silindirik, düzlemsel, küresel ve vida tipinde olabilir.



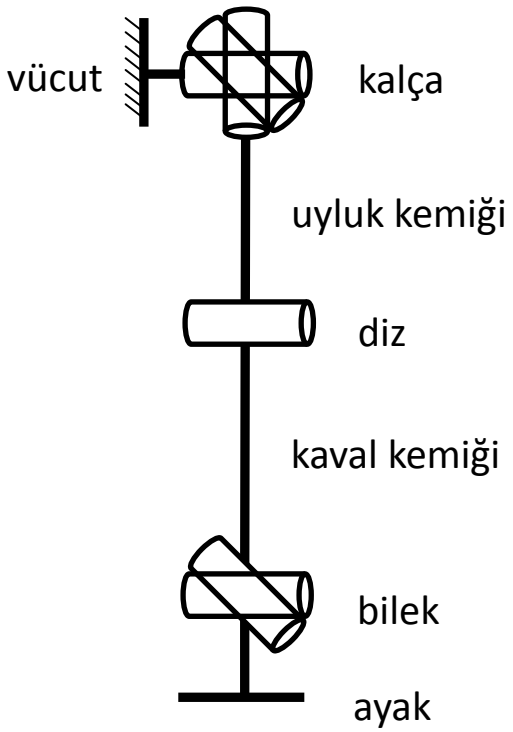
Şekil 3.1 : Robot manipülatörlerde kullanılabilecek eklem tipleri [8].

Bir insan bacağı altı dairesel eklem ve ara uzuvlarla tanımlanabilir ve bu altı serbestlik dereceli robot manipulatör olarak isimlendirilebilir [8].



Şekil 3.2 : Kinematik incelemesi yapılan bacak modeli.

Silindirik şekiller eklemleri, çizgilerse uzuvları betimlemektedir. En alt nokta uç nokta olarak isimlendirilmektedir. Bu şekildeki birinci, ikinci ve beşinci uzuvlar sıfır uzunluklu kabul edilirse Şekil 3.2. tam bir bacak modeli olarak isimlendirilebilir. Çünkü insan bacağında kalçada üç eksen etrafında dönme, dizde bir eksen etrafında dönme ve bilekte iki eksen etrafında dönme hareketleri söz konusudur, bu şekil kinematik modelin çıkartılması sırasında kolaylık sağlayacaktır.

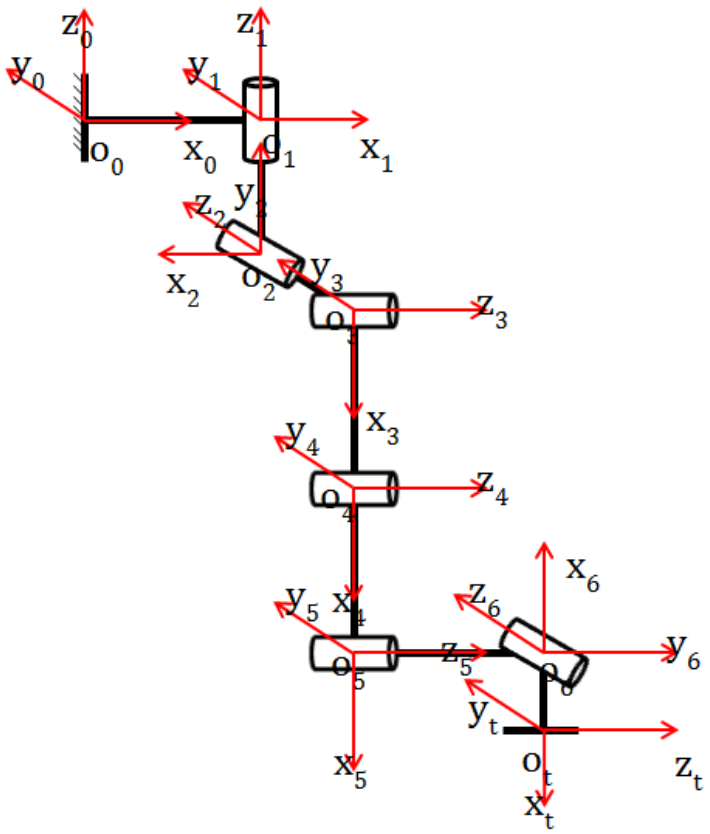


Şekil 3.3 : Kinematik incelemesi yapılan bacak modeli.

Şekil 3.3. te bacağın sıfır uzunluklu uzuvlarının kaldırılmış hali görülmektedir. Bu çalışmada eklem ve uzuv parametreleri ve eksen takımlarının belirlenmesinde Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmıştır[9]. Bu yöntem 4x4 boyutlu matrislerle manipulatörün pozisyon ve oryantasyonunun ifade edilmesine dayanmaktadır. Tüm kinematik ilişkileri yazabilmek için en az sayıda parametreyi kullanan yöntem olarak bahsedilmiştir [10].

Çalışmanın yapılabilmesi için ilk olarak tüm eklemler ve uzuvlar tanımlanmalıdır. Eklemler üzerindeki eksen takımları belirlenmelidir. Denavit-Hartenberg yönteminde z eksenleri eklemlerin serbestlik derecelerine göre hareket ettikleri eksen üzerinde hareket doğrultusunda bulunur. Bu çalışmada kullanılan tüm eklemler dairesel hareket yapmaktadırlar, böylece altı eklem de z eksenleri üzerinde dairesel hareketlerini yapmaktadırlar. Şekil 3.4. ten görüleceği üzere bir bacak için sekiz adet eksen takımı belirlenmiştir. Bunun nedeni başlangıç eksen takımı ve daha önce anlatılan uç noktanın eksen takımının belirlenmesidir. Z eksenleri şekildeki gibi sırasıyla başlangıç noktası, eklemler ve uç nokta üzerinde tanımlandıktan sonra x eksenleri tanımlanmıştır. Denavit-Hartenberg yönteminde x ekseninin tanımlanması duruma göre çeşitlilik göstermektedir. Örneğin, i numaralı uzva birleştirilmiş eklemlerin i-1 ve i olarak numaralandırıldığı kabulüyle, i-1 numaralı eklemin z

ekseninden çekilen normal, i numaralı eklemin z eksenine dikse x_i normal doğrultusunda olur. Çekilen normal z_i üzerindeyse x_i sağ el kuralına göre i-1 den i yönünde belirlenir. Kesişim noktalarında orijin o_i belirlenir. Sırasıyla z eksenleri, orijinler ve x eksenleri belirlendikten sonra, sağ el kuralına göre y eksenleri belirlenir ve eklemler için eksen takımları belirleme işlemi tanımlanmış olur. Şekil 3.4. te kinematik olarak incelemede kolaylık sağlayacağı bahsedilen model üzerinde eksen takımları Denavit-Hartenberg yöntemine göre belirlenmiştir.



Şekil 3.4 : Eksen takımları.

Çalışmanın bu aşamasında gösterimler tek bir bacak üzerinden yapılmıştır. Yürüme hareketinin sağlanması için tek bir bacağın yetersiz olacağı ortadadır, ifadelerin daha kısa olması için çıkarımlar tek bir bacak üzerinde gösterilmiştir.

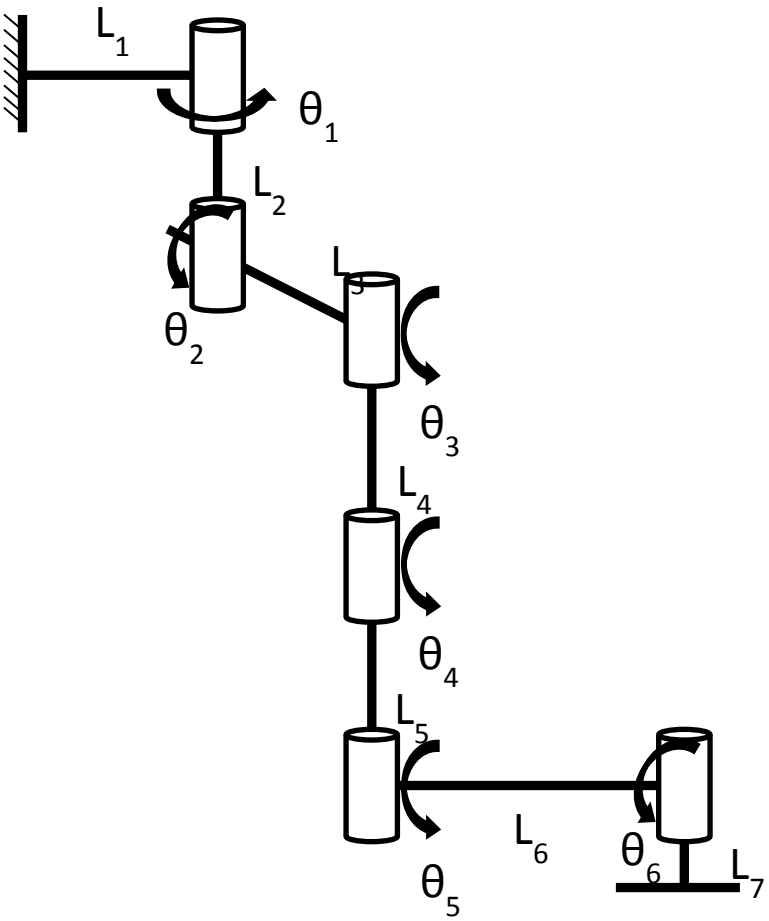
Denavit-Hartenberg yöntemine göre eksen takımları belirlendikten sonra her uzva ait dört ayrı parametrenin belirlenmesi ve kolaylık sağlaması açısından Denavit-Hartenberg Tablosu'na yazılması gerekmektedir. Bunlar a, α, d ve θ dır. z_{i-1} ve x_i nin kesişimin x_i boyunca o_i ye uzaklığı a_i olarak isimlendirilmiştir. x_i çevresinde z_{i-1} den

z_i ye doğru olan açı α_i dir. z_{i-1} ve x_i nin kesişimin z_{i-1} boyunca o_{i-1} e uzaklığı d_i olur. z_{i-1} çevresinde x_{i-1} den x_i ye doğru olan açı θ_i dir.

Çizelge 3.1: Örnek DH tablosu.

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	L_1	90	0	0
2	0	0	L_2^*	θ_1^*
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.

Çizelge 3.1 de örnek bir DH tablosu ve parametreleri görülmektedir. Bu parametreler kısaca, uzuv uzunluğu, uzuv açısı, eklem ötelemesi ve eklem açısı olarak isimlendirilmişlerdir. Şekil 3.5 te uzuvların ve eksenlerin isimleri görülmektedir.



Şekil 3.5 : Eklemler ve uzuvlar.

Çizelge 3.2: Model için çıkartılan DH tablosu.

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	L_1	0	0	0
2	0	90	L_2^*	θ_1^*
3	0	90	L_3^*	θ_2^*
4	L_4	0	0	θ_3^*
5	L_5	0	0	θ_4^*
6	0	90	L_6^*	θ_5^*
7	L_7	90	0	θ_6^*

Çizelge 3.2 de yıldızla işaretlenen parametreler eklem parametreleridir. Denavit-Hartenberg Tablosu yukarıdaki gibi belirlendikten sonra dönüşüm matrisleri bulunur. Dönüşüm matrisi ilgili eklemin pozisyonunu ve oryantasyonunu bir arada veren 4x4 boyutunda bir matristir. Dönüşüm matrisindeki rotasyon matrisi ve pozisyon vektörü, dönüşüm matrisinin başlangıç noktası olarak belirlenen eksen takımına göre ilgili eksen takımının durumunu belirtir. Elde edilen 3x4 boyutundaki matrise birim elemanlar eklenerek 4x4 boyutunda kare matris elde edilir. A_i dönüşüm matrisi i numaralı eklemin i-1 numaralı ekleme göre dönüşümünü gösterdiği kabul edilirse aşağıdaki bağıntılara ulaşılır.

$$T_i^0 = \begin{bmatrix} R_i^0(q) & o_i^0(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

$$T_i^{i-1} = A_i = Trans_{z_{i-1},\, d_i} * Rot_{z_{i-1},\, \theta_i} * Trans_{x_i,\, a_i} * Rot_{x_i,\, \alpha_i} \tag{3.2}$$

$$T_i^{i-1} = A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

$$T_i^{i-1} = A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i * \cos\alpha_i & \sin\theta_i * \sin\alpha_i & a_i * \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i * \cos\alpha_i & -\cos\theta_i * \sin\alpha_i & a_i * \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

A dönüşüm matrisi a, α, d ve θ nın bir fonksiyonudur, eğer tüm bu parametrelerin değeri sıfır olursa A matrisi birim matris olur. Matematiksel olarak karşılığı da herhangi bir dönme ve ötelenmenin olmamasıdır.

$$A=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.5)}$$

Öngörülen model için dönüşüm matrisleri sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$T_1^0=A_1=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & L_1\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.6)}$$

$$T_1^0=A_1=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & L_1\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.7)}$$

Şekil 3.6. daki model tekrardan incelenecek olursa birinci uzuv eklem için sadece kalça bölgesine eklenen öteleme L_1 dönüşüm matrisinde eklenmiştir. Sırasıyla diğer uzuvlar için dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibidir.

$$T_2^1=A_2=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & L_2^*\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}\cos\theta_1^* & -\sin\theta_1^* & 0 & 0\\ \sin\theta_1^* & \cos\theta_1^* & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$T_2^1=A_2=\begin{bmatrix}\cos\theta_1^* & 0 & \sin\theta_1^* & 0\\ \sin\theta_1^* & 0 & -\cos\theta_1^* & 0\\ 0 & 1 & 0 & L_2^*\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.8)}$$

$$T_3^2=A_3=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & L_3^*\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}\cos\theta_2^* & -\sin\theta_2^* & 0 & 0\\ \sin\theta_2^* & \cos\theta_2^* & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$T_3^2=A_3=\begin{bmatrix}\cos\theta_2^* & 0 & \sin\theta_2^* & 0\\ \sin\theta_2^* & 0 & -\cos\theta_2^* & 0\\ 0 & 1 & 0 & L_3^*\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.10)}$$

$$T_4^3=A_4=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}\cos\theta_3^* & -\sin\theta_3^* & 0 & 0\\ \sin\theta_3^* & \cos\theta_3^* & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1&0&0&L_4\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$T_4^3=A_4=\begin{bmatrix}\cos\theta_3^* & -\sin\theta_3^* & 0 & L_4*\cos\theta_3^*\\ \sin\theta_3^* & \cos\theta_3^* & 0 & L_4*\sin\theta_3^*\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad \textbf{(3.11)}$$

$$T_5^4=A_5=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}\cos\theta_4^* & -\sin\theta_4^* & 0 & 0\\ \sin\theta_4^* & \cos\theta_4^* & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1&0&0&L_5\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$T_5^4=A_5=\begin{bmatrix}\cos\theta_4^* & -\sin\theta_4^* & 0 & L_5*\cos\theta_4^*\\ \sin\theta_4^* & \cos\theta_4^* & 0 & L_5*\sin\theta_4^*\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad \textbf{(3.12)}$$

$$T_6^5=A_6=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&L_6^*\\0&0&0&1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}\cos\theta_5^* & -\sin\theta_5^* & 0 & 0\\ \sin\theta_5^* & \cos\theta_5^* & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&0&-1&0\\0&1&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$T_6^5=A_6=\begin{bmatrix}\cos\theta_5^* & 0 & \sin\theta_5^* & 0\\ \sin\theta_5^* & 0 & -\cos\theta_5^* & 0\\ 0 & 1 & 0 & L_6^*\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad \textbf{(3.13)}$$

$$T_7^6=A_7=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}\cos\theta_6^* & -\sin\theta_6^* & 0 & 0\\ \sin\theta_6^* & \cos\theta_6^* & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1&0&0&L_7\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&0&-1&0\\0&1&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$T_7^6=A_7=\begin{bmatrix}\cos\theta_6^* & 0 & \sin\theta_6^* & L_7*\cos\theta_6^*\\ \sin\theta_6^* & 0 & -\cos\theta_6^* & L_7*\sin\theta_6^*\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad \textbf{(3.14)}$$

Yukarıdaki dönüşüm matrisleri ardışık olarak eklemler arasında tanımlanmıştır. Bu matrisler çarpılarak istenilen eklemin istenilen ekleme göre pozisyonu ve rotasyonu rahatlıkla bulunabilir.

3.2 Ters Kinematik Analiz

Denavit-Hartenberg yöntemine göre ileri kinematik analiz yapıldıktan sonra ters kinematik analiz çalışılmıştır. Ters kinematik analiz uç noktadan eklemlere doğru bir yöntem olduğu için robot hareketlerinin incelenmesi sırasında gerekli bir analizdir. Uç noktanın izleyeceği yörünge belirlenir ve bu yörüngeye göre aradaki eklemlerin alacakları pozisyonlar veya dönme değerleri hesaplanır. Bu çalışmada ters kinematik çözümün bulunmasında geometrik Jacobien kullanılmıştır[11].

$$v_n^0=J_v\dot{q} \tag{3.15}$$

$$w_n^0=J_w\dot{q} \tag{3.16}$$

$$\xi=J\dot{q} \tag{3.17}$$

$$\xi=\begin{bmatrix} v_n^0 \\ w_n^0 \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Jacobien matrisinin elemanları eklem hareketine göre iki tipe ayrılır.

$$J=\begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

Eğer i numaralı eklem dairesel hareket yapıyorsa:

$$w_{i-1,i}^{i-1}=\dot{q}_i z_{i-1}^{i-1}=q_i k \tag{3.20}$$

$$k=[0 \quad 0 \quad 1]^T \tag{3.21}$$

Eğer i numaralı eklem doğrusal hareket yapıyorsa:

i numaralı eklemin i-1 numaralı ekleme göre açısal hızı sıfırdır.

Dairesel hareket yapan eklem için:

$$\dot{o}_n^0=w_{i-1,i}^0\times r \tag{3.22}$$

$$\dot{o}_n^0=\dot{\theta}_i z_{i-1}^0\times r \tag{3.23}$$

$$\dot{o}_n^0=\dot{\theta}_i z_{i-1}^0 \times (o_n - o_{i-1}) \quad \textbf{(3.24)}$$

$$J_{v_i}=z_{i-1}^0 \times (o_n - o_{i-1}) \quad \textbf{(3.25)}$$

Doğrusal hareket yapan eklem için:

$$\dot{o}_n^0=\dot{d}_i R_{i-1}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.26)}$$

$$\dot{o}_n^0=\dot{d}_i z_{i-1}^0 \quad \textbf{(3.27)}$$

$$J_{v_i}=z_{i-1}^0 \quad \textbf{(3.28)}$$

Böylece:

$$J_{v_i}=\begin{cases} z_{i-1} \times (o_n - o_{i-1}) & \text{dairesel} \\ z_{i-1} & \text{doğrusal} \end{cases} \quad \textbf{(3.29)}$$

$$J_{w_i}=\begin{cases} z_{i-1} & \text{dairesel} \\ 0 & \text{doğrusal} \end{cases} \quad \textbf{(3.30)}$$

Dönüşüm matrisinin üçüncü sütununun ilk üç elemanı z ve dördüncü sütununun ilk üç elemanı o ismini alır ve böylece Jacobien matrisi oluşturulur.

Bir robot kolunun uç noktasının uzayda herhangi bir noktada herhangi bir açıda bulunması için, o robot kolu en az altı serbestlik derecesine sahip olmalıdır. Altı serbestlik derecesinden daha düşük serbestlik derecesine sahip robot kolları bu şekilde herhangi bir pozisyona ulaşma becerisine sahip değildirler. Ayrıca robot kolu altı serbestlik derecesinden daha fazla serbestlik derecesine sahip olursa, kinematik eşitlikte sonsuz sayıda çözüm meydana gelir [10]. Bu incelemede kullanılan tek bacak modeli yedi serbestlik dereceli olarak kabul edilebilir. Kalça için gerekli öteleme de ayrı bir uzuv olarak eklenmiştir, ama herhangi bir dönme hareketi sağlamamaktadır.

$$J=\begin{bmatrix} z_0^0 \times (o_7 - o_0) & z_1^0 \times (o_7 - o_1) & z_2^0 \times (o_7 - o_2) & \cdots & z_6^0 \times (o_7 - o_6) \\ z_0^0 & z_1^0 & z_2^0 & & z_6^0 \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.31)}$$

İki bacak ayrı ayrı yedi serbestlik derecesine sahip iki farklı manipulatör olarak ele alınmış olup dört adet kare olmayan Jacobien matrisine ulaşılmıştır. Yürüme üç

farklı aşamaya ayrılmıştır. Bunlar sağ ayağın sabit olduğu sol ayağın salındığı aşama, sol ayağın sabit sağ ayağın salındığı aşama ve iki ayağın da yere temas ettiği yani kapalı zincir oluşturan aşama belirlenmiştir. Bu yüzden toplamda dört adet Jacobien matrisi belirlenmiştir.

Jacobien matrisleri yukarıda gösterilen yapıda belirlendikten sonra, uç noktanın hızı ve Jacobien matrisinin tersi ile eklemlerin açısal hızlarına ulaşılmıştır. Robotik çalışmalarında en önemli çalışma konularından birisi yörünge planlamadır. Belirlenen yörünge zamana göre türetilerek, eklemlerin hedeflenen hareketi sağlayabilmeleri için hızları hesaplanmalıdır.

$$V=\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

Bu çalışmada uç noktanın çizgisel hızı kullanılmıştır.

$$V=\begin{bmatrix} v \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

Böylece hız matrisi olarak 3x1 boyutunda matris kullanılmıştır.

$$V=[v] \tag{3.34}$$

$$V=\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

$$\theta'=J^{'}V \tag{3.36}$$

Yukarıdaki aşamalar ile tüm eklemlerin açısal hızlarına ulaşılabilir, matematiksel işlemler sırasında Jacobien matrisinin tersi alınmıştır. Jacobien matrisi robot manipulatorun yapısına göre kare olmayabilir, bu çalışmada bahsedilen kalça ötelemesinden dolayı Jacobien matrisi 6x7 boyutunda bir matris çıkmaktadır, bu yüzden matris tersi alınırken pseudo ters alma işlemi yapılmıştır.

4. DİNAMİK ANALİZ

Kinematik analizin ardından modelin dinamik analizi yapılacaktır. Dinamik analiz ile harekete sebep olan kuvvetler ve torklar incelenecektir, kinematik analizde ise hareketin geometrik yorumu yaratılmaya çalışılmışıtır. Dinamik analiz ile amaçlanan, tasarım kriterlerinin bacak adım hareketini gerçekleştirirken eklemler üzerindeki tepki kuvvetlerini ve eklemlerin üretmesi gereken tork değerleri kullanılarak belirlenmesidir.

Bu çalışmada dinamik analiz için Euler-Lagrange yöntemi kullanılarak bulunan sonuçların kontrolü Simulink ve SimMechanics simülasyon programları kullanılarak yapılmıştır. Euler-Lagrange yönteminin yavaşlığı nedeniyle sonuçların doğruluğunun belirlenmesi için kullanıldıktan sonra motor seçimi için gerekli olan tork değerleri ve uzuvların gerilme analizleri için gerekli olan tepki değerleri simülasyon sonuçlarından alınmıştır.

4.1 Euler-Lagrange Yöntemi

Euler-Lagrange yöntemi eklemlerin hareketi gerçekleştirebilmek için sağlamaları gereken tork veya kuvvet değerlerini hareket enerjisi üzerinden hesaplamada kullanılan bir yöntemdir. Euler-Lagrange yöntemi, bu çalışmadaki tüm eklemler mafsal tipinde seçildiğinden eklemlerin üretmeleri gereken tork değerlerinin bulunması için kullanılmıştır. İleri kinematik analiz sonucu bulunan dönüşüm matrislerindeki eksen koordinatları yardımıyla her bir uzuv-eklem sisteminin ağırlık merkezi bulunmuştur ve bu ağırlık merkezlerinin zamana göre türevi alınarak kinetik enerjide kullanılacak hız değerleri bulunmuştur. Yapılan bu hesaplamalarla öncelikli olarak eklemlerin kinetik ve potansiyel enerjileri bulunmuştur.

$$K = \frac{1}{2} * m * \left(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2\right) + \frac{1}{2} * I * w^2 \qquad \textbf{(4.1)}$$

$$P = m * g * h \qquad \textbf{(4.2)}$$

Yukarıdaki denklemlerde K kinetik enerji ifadesi ve P potansiyel enerji ifadesidir. w değeri eklem değişkeni olan Θ'nın zamana göre türevinin alınması ile elde edilmiş

olup h değeri ise tanımlanan eksen takımı nedeniyle z eksenindeki koordinatları ifade etmektedir. V_x , V_y ve V_z eklemin üç eksendeki çizgisel hızlarıdır, m hareket eden cismin ağırlığı ve I hareket eden cismin eylemsizliğidir. Her bir eklem hareketi için kinetik ve potansiyel enerjiler elde edildikten sonra Lagrange ifadesi bulunur.

$$L = K - P \tag{4.3}$$

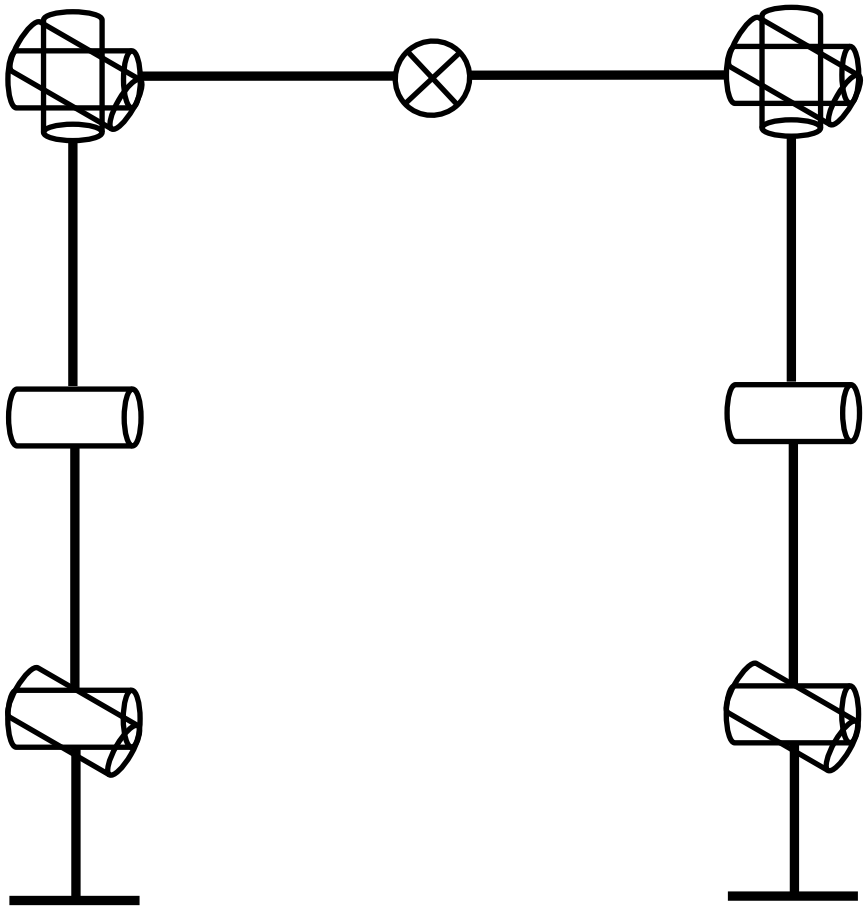
Lagrange ifadesi bulunduktan sonra Euler denklemine yerleştirilir.

$$\tau = \frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}}\right) - \left(\frac{\delta L}{\delta q}\right) \tag{4.4}$$

Euler denklemi kullanılarak her eklemin üretmesi gereken tork değeri parametrik olarak bulunmuş olur. Tork değerlerinin sayısal ifadelerinin elde edilebilmesi için yapılması planlanan hareketin açısal konum, açısal hız ve açısal ivme değerleri yerlerine yerleştirilir [12].

5. MODELLEME

İnsansı bacak daha önce de bahsedildiği gibi bu çalışmada da altı serbestlik derecesi ile modellenmiştir, iki bacak olacağından toplamda on iki serbestlik derecesine sahip bir robot olarak düşünülebilir. Şekil 5.1 de on iki serbestlik dereceli bacak çiftinin çubuk modeli görülmektedir.

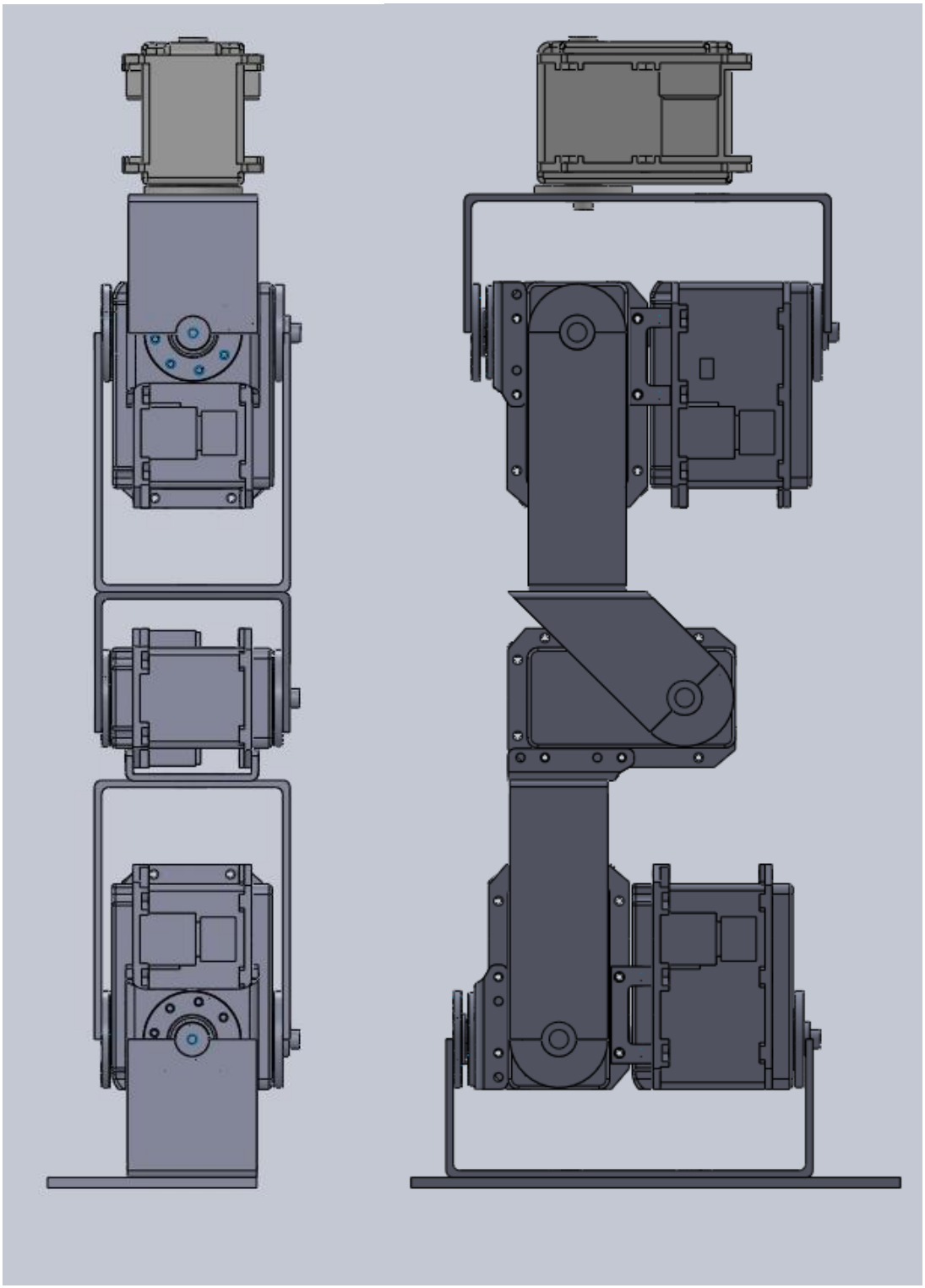


Şekil 5.1 : Bacak çiftinin çubuk modeli.

5.1 Robotun Gerçeklenmesi

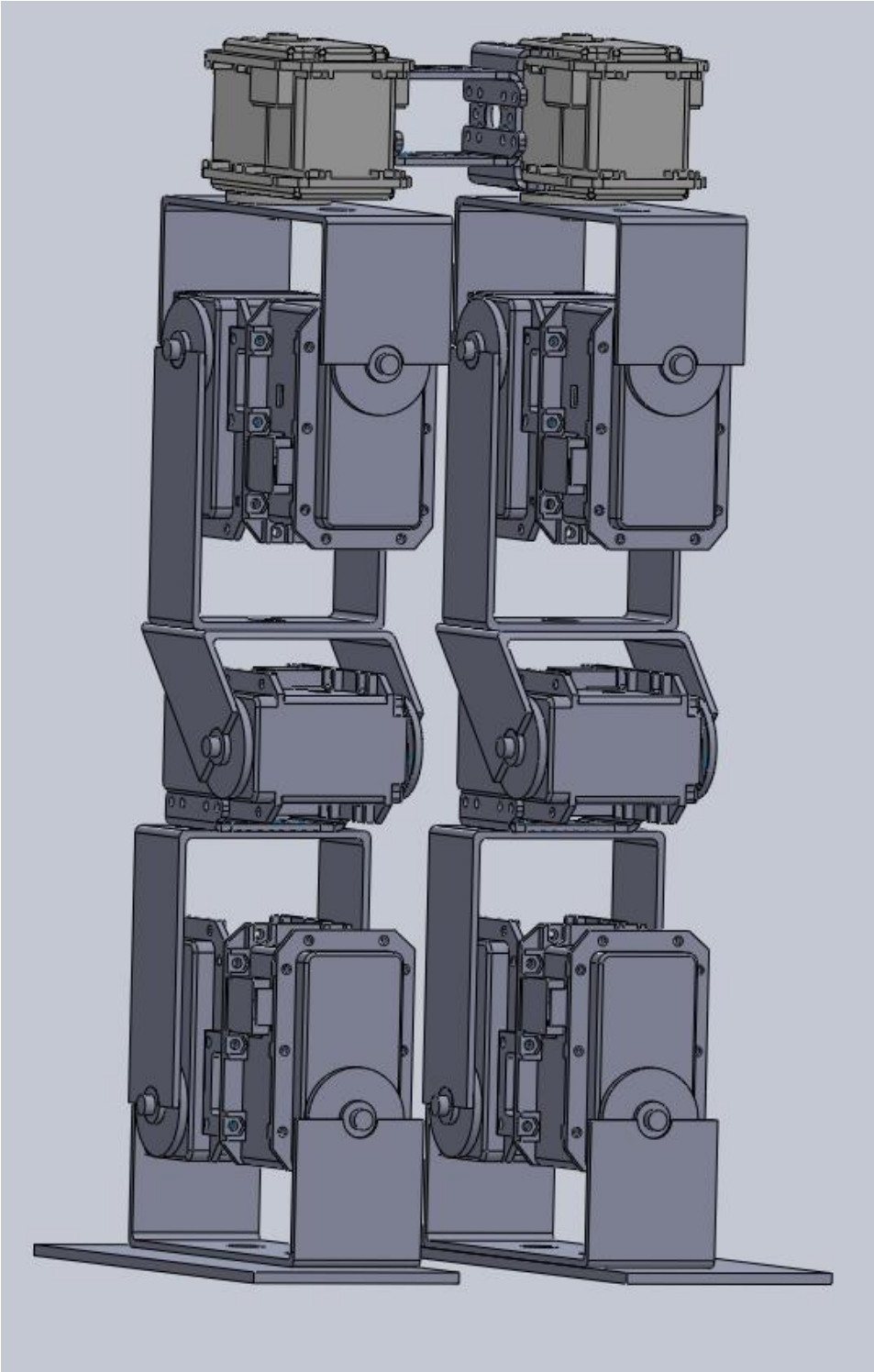
Çalışmanın gerçeklenmesi aşamasında kullanılmak üzere, Dynamixel firmasının ürettiği insansı robot bacaklar kullanılmıştır [13]. Kinematik model ve dinamik model, motorların ve ara parçaların fiziksel özellikleri kullanılarak oluşturulmuştur. Motorların boyut, eylemsizlik ve kütle değerleri firma tarafından sağlanmıştır [14].

Ara parçalar ise standart olmayan butik parçalar olduğundan Solidworks 3D çizim programında boyutlarına uygun şekilde çizilmiş ve imalat malzemesi olan alüminyumun özkütle değeri girilerek, eylemsizlik ve kütle değerlerine ulaşılmıştır [15].



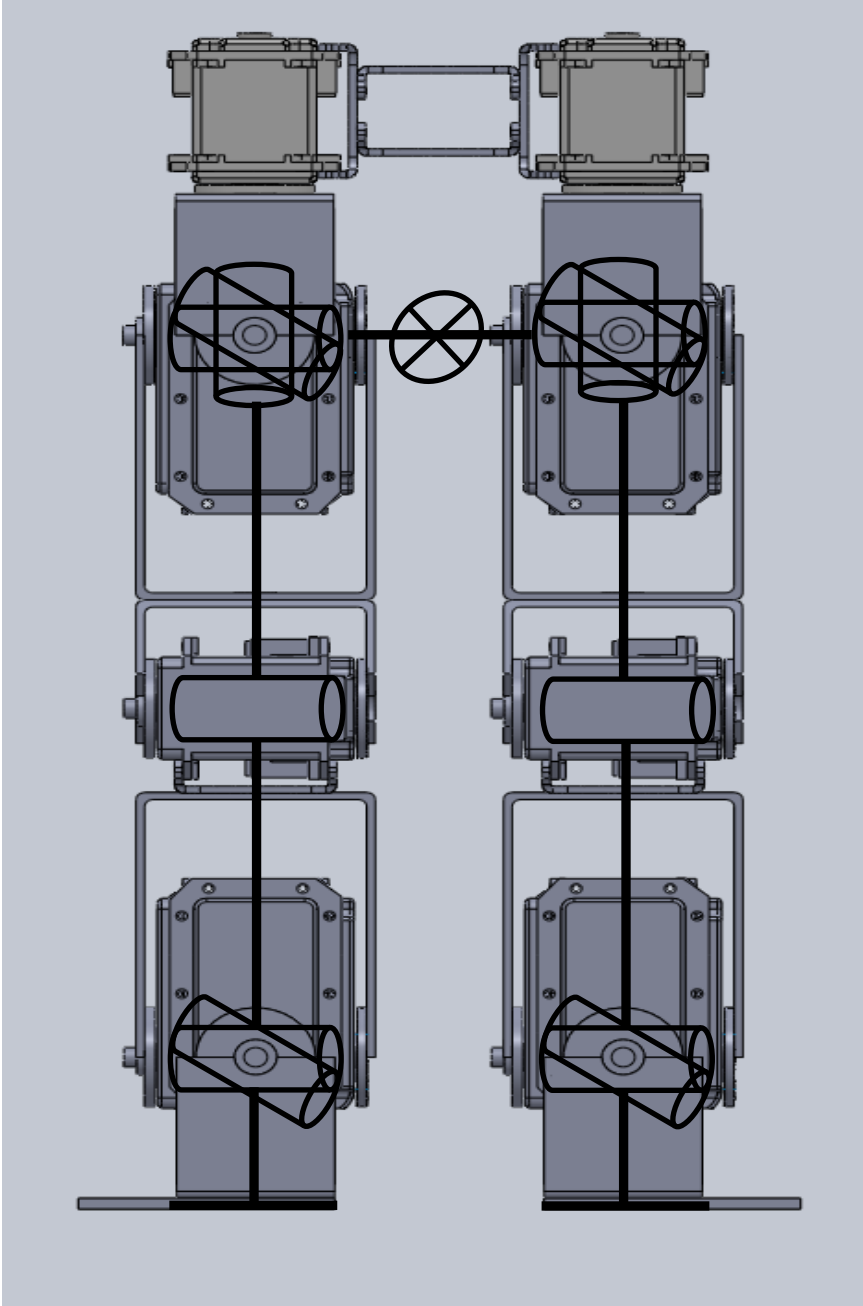
Şekil 5.2 : Bacağın Solidworks çizimi (karşıdan ve yandan görünüş).

Şekil 5.2 de bahsedilen bacağın çizimi görülmektedir, görüldüğü gibi kalçada üç motor, dizde bir motor ve bilekte iki motor bulunmaktadır[16]. Kalçadaki üç motorun dönme eksenleri kesişmekte ve yine bilekteki iki motorun da dönme eksenleri kesişmektedir. Şekil 5.3 te bacak çiftinin üç boyutlu çizimi ve montajı görülmektedir.



Şekil 5.3 : Bacakların Solidworks montajı (perspektif).

Şekil 5.4 te bacakların modellenilmesinde kullanılan çubuk model görülmektedir. Bu çubuk modelin Denavit-Hartenberg parametrelerinin daha sağlıklı ve kolay çıkarılması için bahsedilen sanal uzunluklar eklenecek ve model o şekilde çıkartılacaktır.

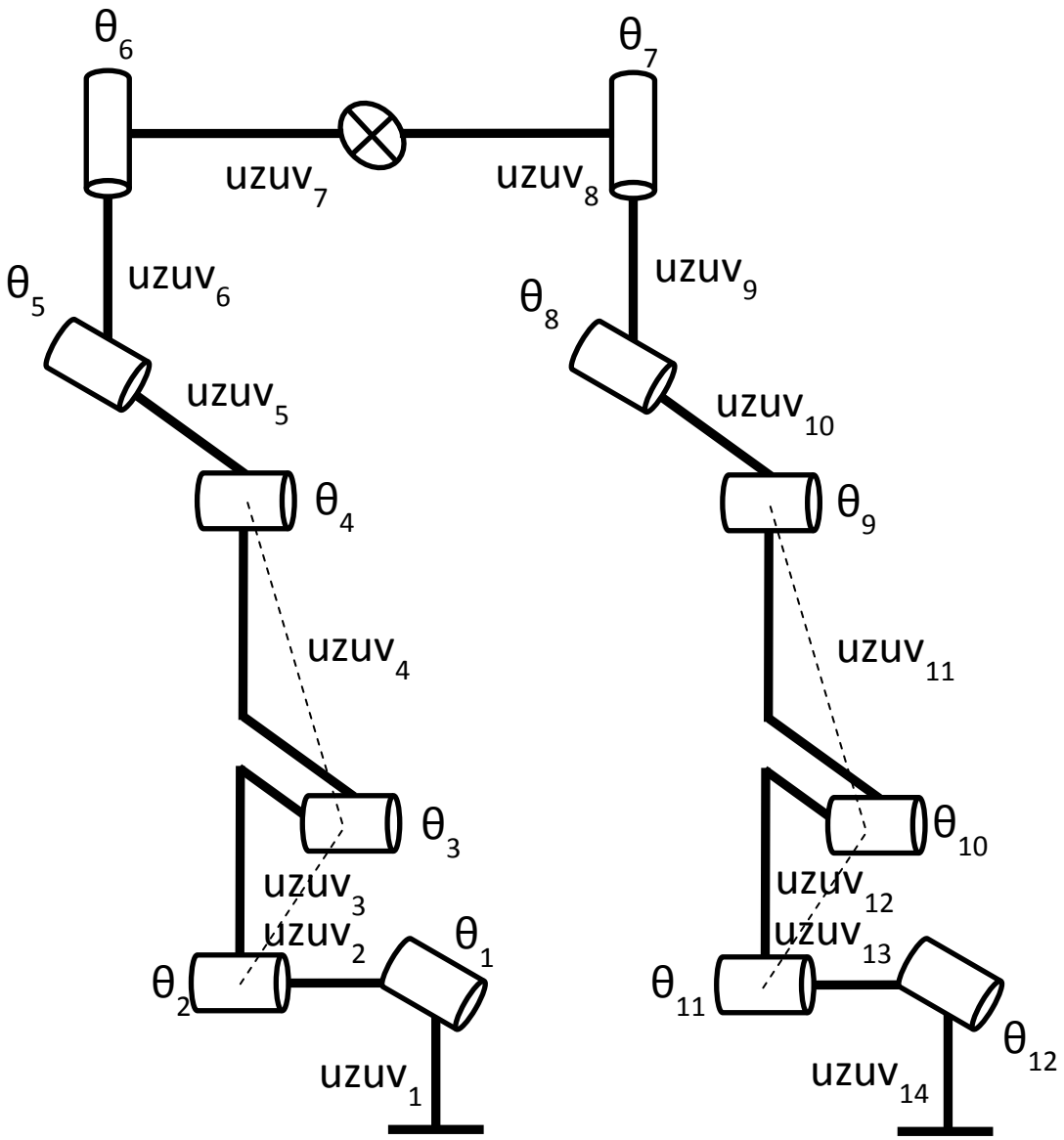


Şekil 5.4 : Bacaklar ve çubuk modelleri.

5.2 Kinematik Modelleme

Bahsedildiği gibi her bacakta kalça bölgesinde üç serbestlik derecesi, dizde bir serbestlik derecesi ve bilek kısmında iki serbestlik derecesi bulunmaktadır.

Kinematik model çıkartılmasında Denavit-Hartenberg yöntemi kullanıldığından, modelleme işlemi sırasında kolaylık sağlaması için Şekil 5.5 te görülen yapı kullanılmıştır.

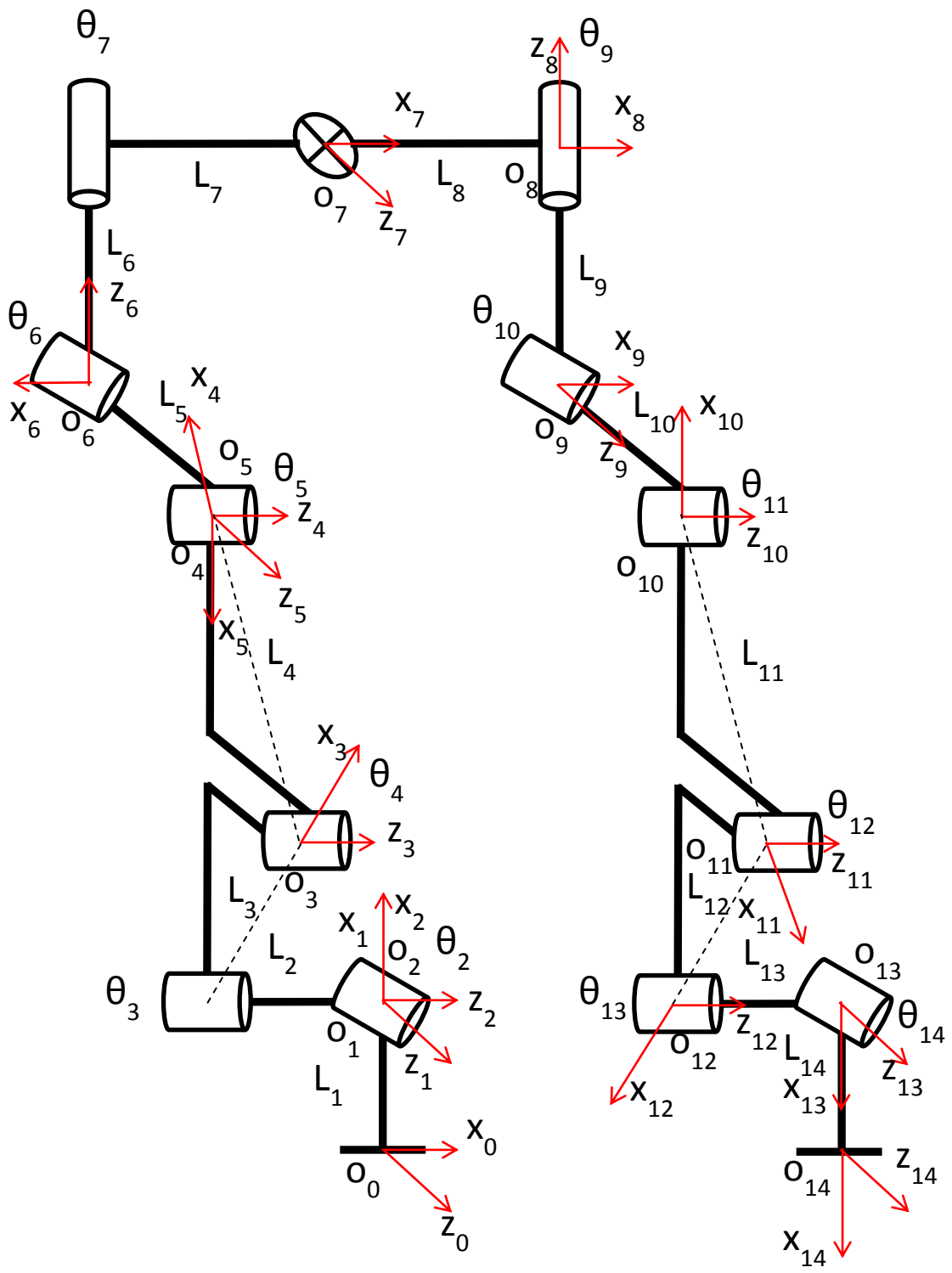


Şekil 5.5 : Bacak parametreleri.

Bu yapıda $uzuv_1$ sağ ayak yüksekliğini, $uzuv_2$ tamamen matematiksel olarak kolaylık sağlaması açısından kullanılan sanal uzunluk, $uzuv_3$ kaval kemiğini, $uzuv_4$ uyluk kemiğini, $uzuv_5$ ve $uzuv_6$ kalça bölgesinde matematiksel kolaylık için kullanılan sanal uzunluklar ve $uzuv_7$ iki bacağın orta noktasına uzaklık yani kalçanın yarı uzunluğnu göstermektedir. Aynı tanımlamalar sol bacak için de geçerlidir.

Bu çalışma sırasında tasarlanan yürüme algoritmasında; bacağın modelleri parçalı ve iki farklı yönde uçtan uca tanımlanmıştır [17]. Yani on iki serbestlik dereceli olarak

düşünülen bacak çiftinin bir modelinde sağ ayak sabit nokta ve sol ayak uç noktadır, diğer modelinde ise tam tersi şekilde sol ayak sabit nokta ve sağ ayak uç noktadır. Şekil hede hödöde sağ ayak sabit nokta olarak belirlenmiş ve eksen takımları eklemler üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.6 : Sağdan sola doğru eksen takımları.

Şekil 5.6 da sol ayak sabit nokta olarak belirlenmiş ve eksen takımları eklemler üzerine yerleştirilmiştir.

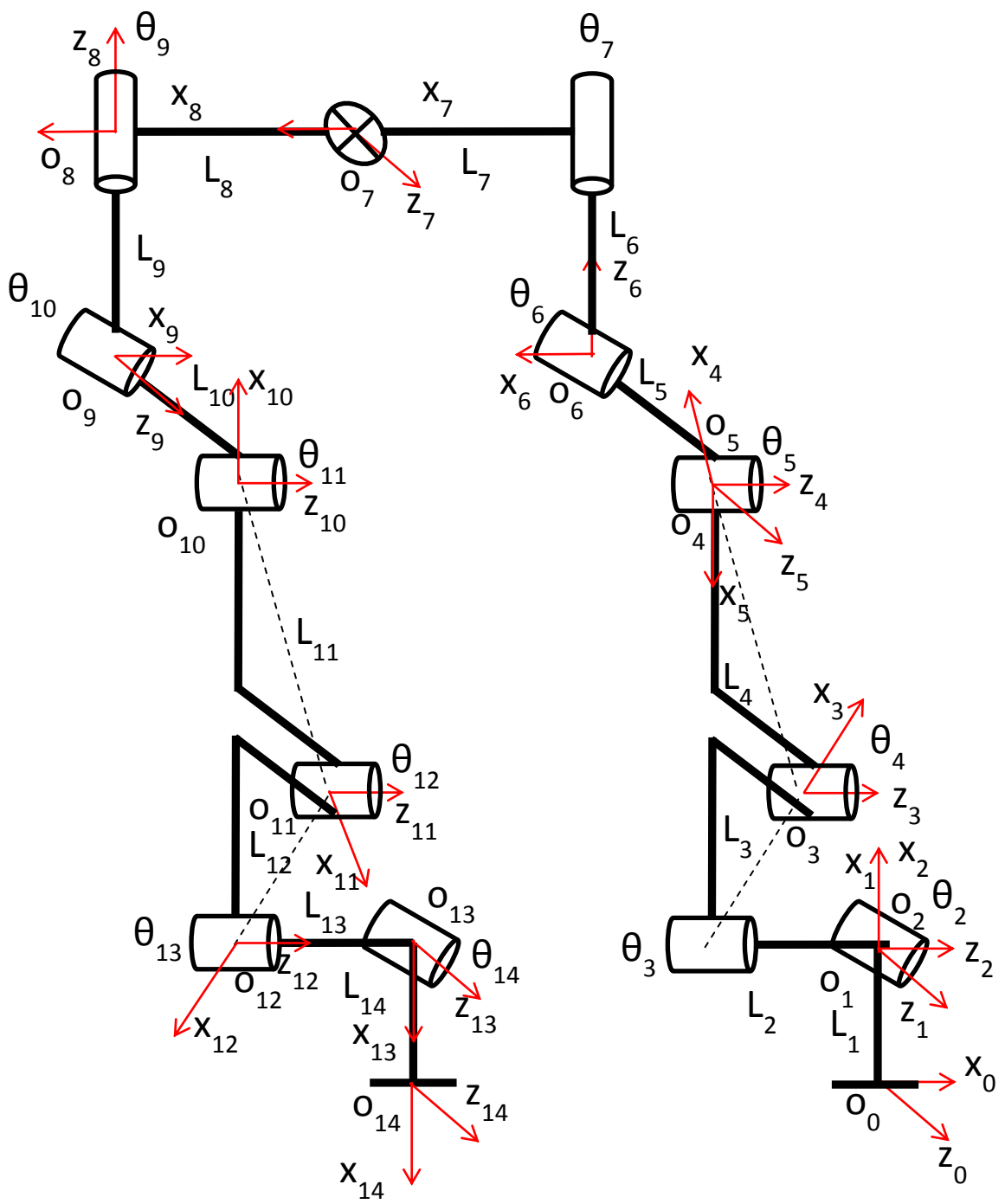
Çizelge 5.1: Sağdan sola DH parametreleri.

	a	α	d	θ
1	L_1	0	0	0
2	0	pi/2	0	θ_1
3	L_3	0	L_2	θ_2
4	L_4	0	0	θ_3
5	0	pi/2	0	θ_4
6	0	pi/2	L_5	θ_5
7	L_7	pi/2	L_6	θ_6
8	L_8	3pi/2	0	0
9	0	pi/2	L_9	θ_7
10	0	pi/2	L_{10}	θ_8
11	L_{11}	0	0	θ_9
12	L_{12}	0	0	θ_{10}
13	0	pi/2	L_{13}	θ_{11}
14	L_{14}	0	0	θ_{12}

Çizelge 5.2: Soldan sağa DH parametreleri.

	a	α	d	θ
1	L_1	0	0	0
2	0	pi/2	0	θ_1
3	L_3	0	L_2	θ_2
4	L_4	0	0	θ_3
5	0	pi/2	0	θ_4
6	0	pi/2	L_5	θ_5
7	L_7	3pi/2	L_6	θ_6
8	L_8	pi/2	0	0
9	0	pi/2	L_9	θ_7
10	0	pi/2	L_{10}	θ_8
11	L_{11}	0	0	θ_9
12	L_{12}	0	0	θ_{10}
13	0	pi/2	L_{13}	θ_{11}
14	L_{14}	0	0	θ_{12}

Sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 de iki model için çıkartılan parametreler görülmektedir. Eksen takımlarının yerleşimlerine bakıldığında yön ve yerleşim olarak farklar oluşsa da, parametrelerin eş oldukları görülmektedir. Bunun nedeni başlangıç eksenlerinin yerleşiminin eş olması ve bacakların tamamen eş olmasıdır.



Şekil 5.7 : Soldan sağa eksen takımları.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 üzerindeki eksen takımları yerleştirilmiş ve çizelgelerdeki DH parametreleri bulunmuştur.

Bu şekilde çıkartılan modeller de kendi içlerinde bölünmüşlerdir. Bunlar sırasıyla birinci model için –sağdan sola- sağ ayaktan orta noktaya, orta noktadan sol ayak ucuna ve ikinci model için –soldan sağa- sol ayaktan orta noktaya, orta noktadan sağ

ayak ucuna şeklindedir. Bu durum yorumlanacak olursa, sağ ayağın sabit olacağı durumda, orta nokta uç nokta görevi görecektir böylece orta nokta istenildiği gibi yönlendirilebilecektir. İkinci parçada ise orta nokta kendi eksen takımına göre göre sabit olacak ve uç nokta –sol ayak- orta noktaya göre yönlendirilebilecektir. Böylece birinci parça sabit manipülatör, ikinci parça hareketli manipülatör gibi davranacaktır. Aynı durum sol ayağın sabit olacağı durum için de geçerlidir.

İki ayrı yönde çıkartılan modelin, kendi içinde de ikiye ayrıldığı düşünülürse toplamda dört adet kinematik model vardır ve bu dört kinematik model ile dört ayrı Jacobien matrisi tanımlanmıştır.

5.3 Dinamik Modelleme

Dinamik modelleme için bahsedildiği gibi Euler-Lagrange yöntemi kullanılmıştır, ama daha hızlı sonuç alınabilmesi için belli bir noktadan sonra Matlab SimMechanics Toolbox kullanılmıştır. Modellemenin doğruluğunun incelenmesi açısından bazı sonuçlar kıyaslanmıştır.

Euler-Lagrange yöntemi için motorların ve uzuvların ağırlık, eylemsizlik ve boyutları kullanılmıştır. Çubuk model üzerine bu değerler yerleştirilerek yöntem uygulanmaya başlamıştır. Sembolik çalışma uygulanacağı için ara işlemler Matlab Symbolic Toolbox kullanılarak yapılmıştır.

6. YÜRÜME PLANLAMA

Tasarlanan ve modellenen robotun yürüme planlamasında sinüzoidal fonksiyonlar kullanılmıştır, bu fonksiyonlar sayesinde yarım dairesel yörünge izlenecektir[18]. Bu fonksiyonlar robotun parçalı kinematik modellerine uygulanacaktır.

Yürüme hareketine sağ ayak başlayacak şekilde çalışılmaya başlanmıştır. Jacobien matrislerine sırasıyla, sağdan sola tanımlanan modelde, sağ ayak ucundan orta noktaya kadar olan matrise J_1, orta noktadan sol ayak ucuna kadar olan matrise J_2; soldan sağa tanımlanan modelde, sol ayak ucundan orta noktaya kadar olan matrise J_3 ve orta noktadan sağ ayak ucuna kadar olan matrise J_4 isimleri verilmiştir.

Sağ ayak ile yürümeye başlandığında yani salınan ayak sağ ayak olduğunda, soldan sağa doğru model aktif olacak; J_3 ve J_4 Jacobien matrisleri ile ters kinematik çözümleme yapılacaktır. Devamında sağ ayak yere temasında sabit ayak olacak ve sol ayak salınan ayak olacaktır, bu sefer de J_1 ve J_2 matrisleri ters kinematik çözümleme yapılacaktır. Burada yapılan iki temel kabul, ayaklar ve zemin arasındaki sürtünme katsayısının kaymayı engelleyecek kadar büyük olması ve ağırlık merkezinin modellerde de kullanılan orta noktada kalmasıdır. Bu kabulden yola çıkarak, salınan ayaklar yarım dairesel yörünge izlerken, orta nokta yani ağırlık merkezi de ayrı bir yörünge takip ettirelebilecektir. Böylece istendiği gibi robotun dengede kalması sağlanacaktır.

Ara adımlar da yine aynı şekilde ardışık olarak değişen modellere çözülecektir, ilk ve son adımın tek farkı, hareket genliğinin ara adımların yarısı kadar olmasıdır.

İlk adım:

$$\begin{cases} X_{cg} = 0.075\cos\left(\dfrac{2\pi t}{0.6}\right) \\ Z_{cg} = 0.03\cos\left(\dfrac{2\pi t}{0.6}\right) \end{cases} \quad (0 \le t \le 0.3\text{s}) \qquad \textbf{(6.1)}$$

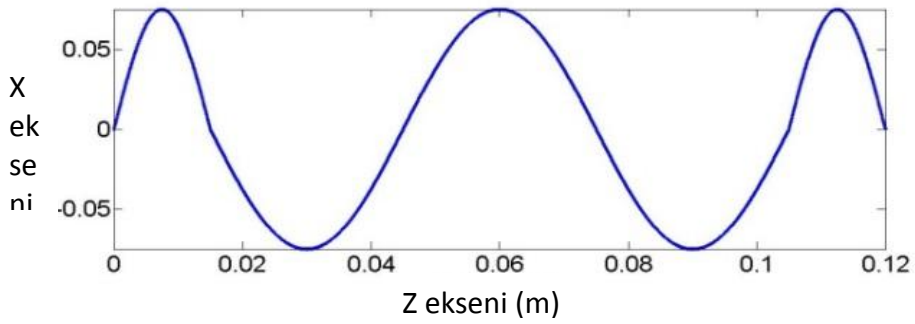
Ara adımlar:

$$\begin{cases} X_{cg} = 0.075\cos\left(\dfrac{\pi(t-0.3)}{0.6}\right) \\ Z_{cg} = 0.06\sin\left(\dfrac{\pi(t-0.3)}{0.6}\right) \end{cases} (0.3 \le t \le 0.9\,s) \qquad \textbf{(6.2)}$$

Son adım:

$$\begin{cases} X_{cg} = 0.075\cos\left(\dfrac{2\pi(t-0.3)}{0.6}\right) \\ Z_{cg} = 0.03\sin\left(\dfrac{2\pi(t-0.3)}{0.6}\right) \end{cases} (0.9 \le t \le 1.2\,s) \qquad \textbf{(6.3)}$$

Ağırlık merkezi için yukarıda hazırlanan parçalı fonksiyonlara bakılacak olursa, bahsedildiği gibi ilerleme eksenin ağırlık merkezi ara adımlarda ilk ve son adımın iki katı kadar yer değiştirmeye sahiptir. Şekil 6.1 de oluşturulan eğri gösterilmektedir.



Şekil 6.1 : Ağırlık merkezi yörünge.

Ayaklar için de ağırlık merkezine benzer şekilde parçalı fonksiyonlarla yörünge hazırlanmıştır.

İlk adım:
Sağ ayak:

$$\begin{cases} Y = 0.06 * \cos\left(\dfrac{4\pi t}{0.6}\right) \\ Z = 0.03 * \sin\left(\dfrac{4\pi t}{0.6}\right) \end{cases} (0 \le t \le 0.15\,s) \qquad \textbf{(6.4)}$$

Ara adımlar:
Sol ayak:

$$\begin{cases} Y = 0.075 * \cos\left(\dfrac{2\pi(t-0.15)}{0.6}\right) \\ Z = 0.06 * \sin\left(\dfrac{2\pi(t-0.15)}{0.6}\right) \end{cases} (0.15 \le t \le 0.45\,s) \qquad \textbf{(6.5)}$$

Sağ ayak:

$$\begin{cases} Y = 0.075 * \cos\left(\dfrac{2\pi(t+0.15)}{0.6}\right) \\ Z = 0.06 * \sin\left(\dfrac{2\pi(t+0.15)}{0.6}\right) \end{cases} (0.45 \le t \le 0.75\,s) \qquad \textbf{(6.6)}$$

Sol ayak:

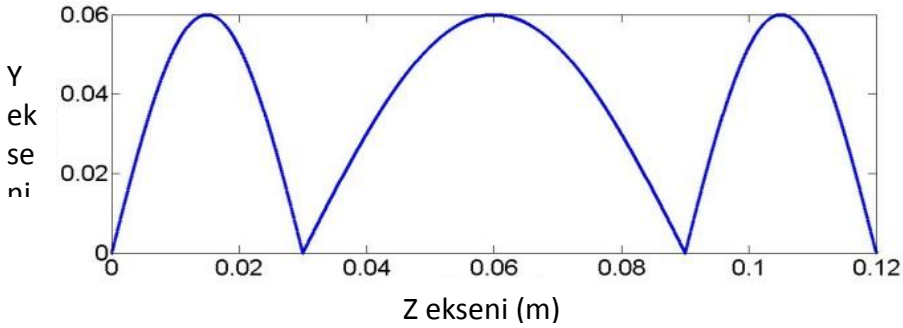
$$\begin{cases} Y = 0.075 * \cos\left(\dfrac{2\pi(t-0.3)}{0.6}\right) \\ Z = 0.06 * \sin\left(\dfrac{2\pi(t-0.3)}{0.6}\right) \end{cases} (0.75 \le t \le 1.05\,s) \qquad \textbf{(6.7)}$$

Son adım:

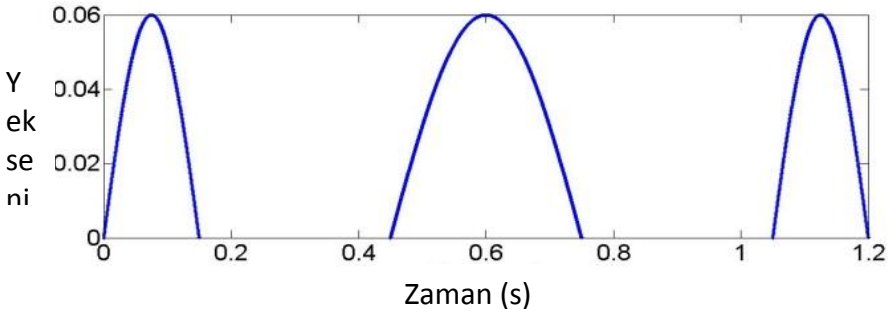
Sağ ayak:

$$\begin{cases} Y = 0.06 * \cos\left(\dfrac{4\pi(t-0.15)}{0.6}\right) \\ Z = 0.03 * \sin\left(\dfrac{4\pi(t-0.15)}{0.6}\right) \end{cases} (1.05 \le t \le 1.2\,s) \qquad \textbf{(6.8)}$$

Yine bu fonksiyonlar incelenecek olursa, ilk ve son adımların ilerleme eksenindeki genlikleri ara adımların genliklerinin yarısı kadardır.

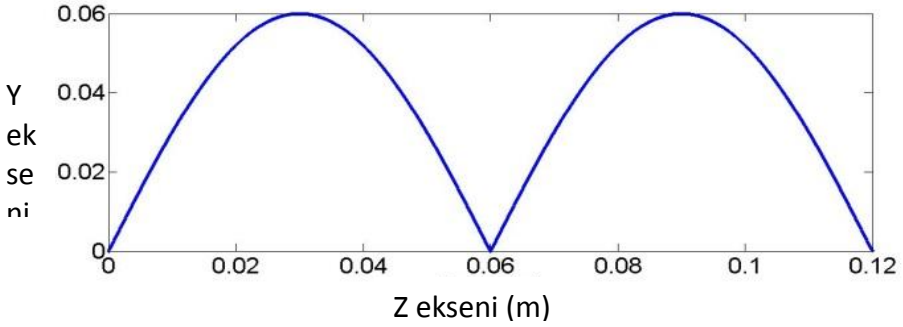


Şekil 6.2 : Sağ ayak yörünge.

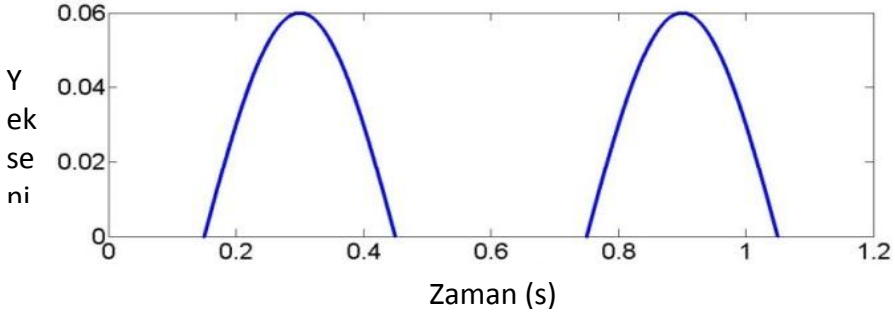


Şekil 6.3 : Sağ ayak yörünge (zamana göre).

Şekil 6.2 de sağ ayağın iki eksendeki hareketi görülmektedir ve yine Şekil 6.3 te sağ ayağın hareketi zaman ekseninde gösterilmiştir.

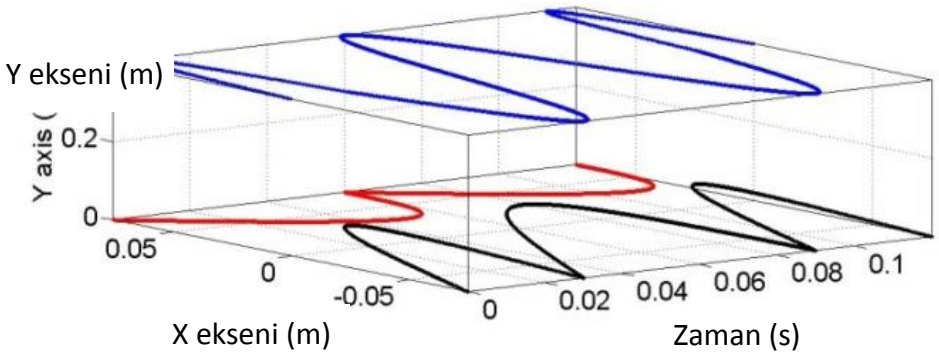


Şekil 6.4 : Sol ayak yörünge.



Şekil 6.5 : Sol ayak yörünge (zamana göre).

Şekil 6.4 te sol ayağın iki eksendeki hareketi görülmektedir ve yine Şekil 6.5 te sol ayağın hareketi zaman ekseninde gösterilmiştir.

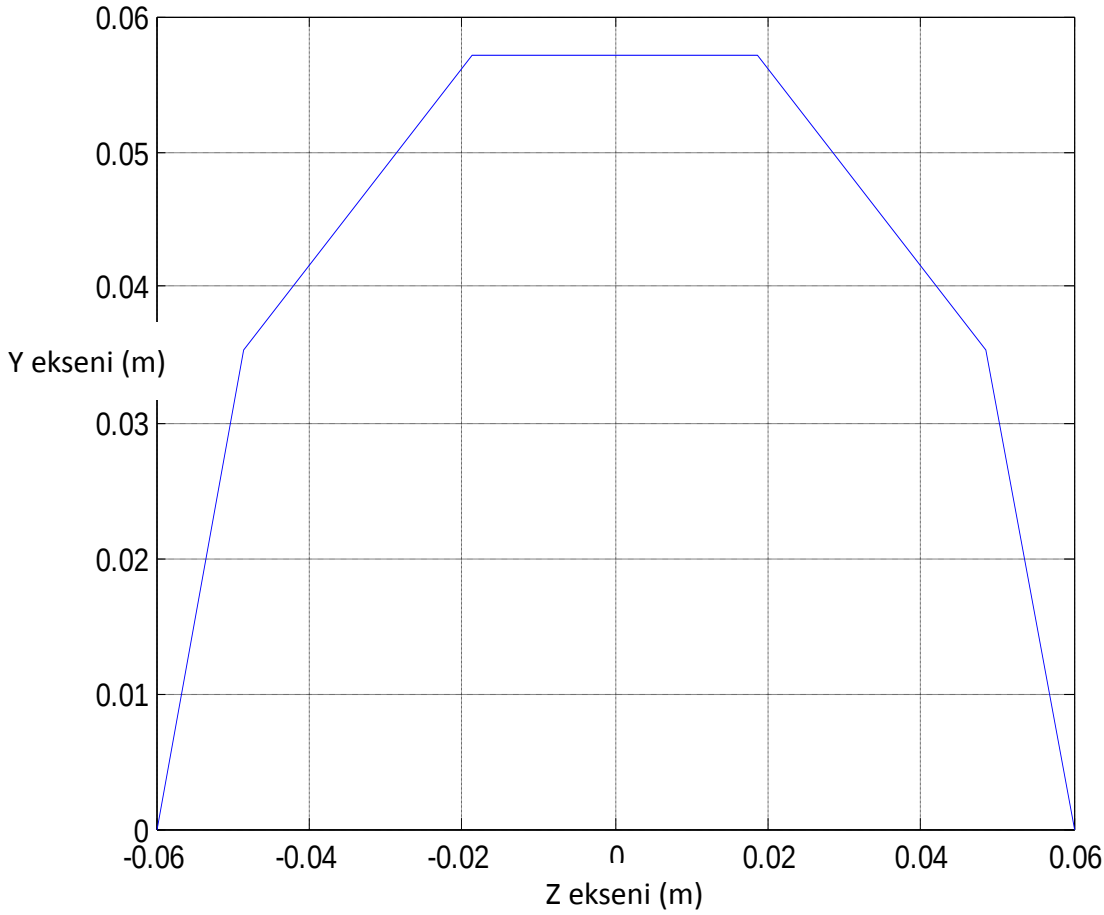


Şekil 6.6 :Yörüngeler, ağırlık merkezi (mavi), sağ ayak (siyah), sol ayak (kırmızı).

Şekil 6.6 da ağırlık merkezi ve ayakların yer değiştirmeleri gösterilmiştir. Bahsedildiği gibi sağ ayak harekete başlamakta ve bu sırada ağırlık merkezi sol ayak üzerine geçmektedir, sağ ayak yere temas ettiğinde ağırlık merkezi iki ayağın arasında kalmaktadır. Sağ ayak yere temas ettikten sonra sol ayak harekete başlamakta ve ağırlık merkezi sağ ayak üzerine kaymaktadır. Sol ayak yere temas ettiğinde ağırlık merkezi tekrardan iki ayağın orta noktasına gelmektedir, döngü bu şekilde devam eder [19].

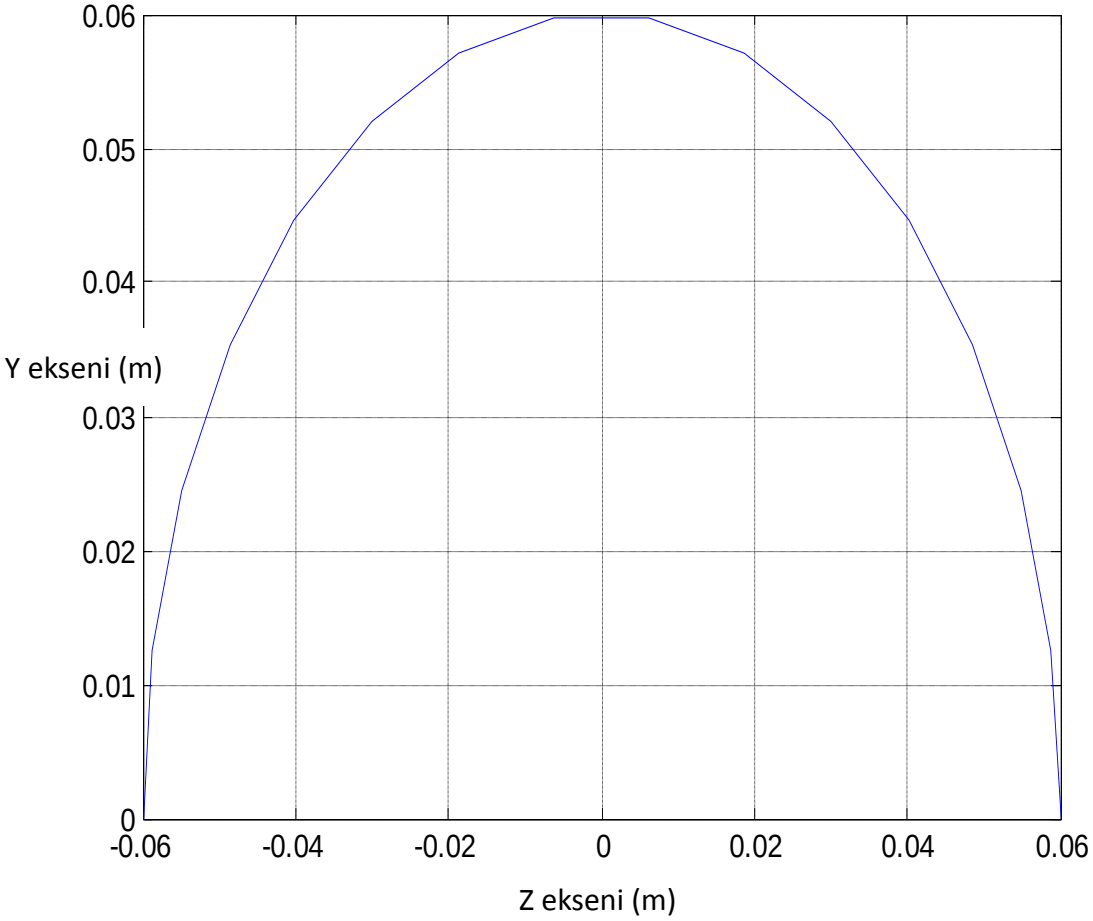
7. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde tasarımı yapılan ve yürüme planlaması yapılan iki bacaklı robotun yürüme simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon için Matlab kullanılmıştır. Şekil 7.1 de robotun adımının altı parçaya bölünmesi durumu görülmektedir.



Şekil 7.1 : Altı parçaya bölünmüş adım.

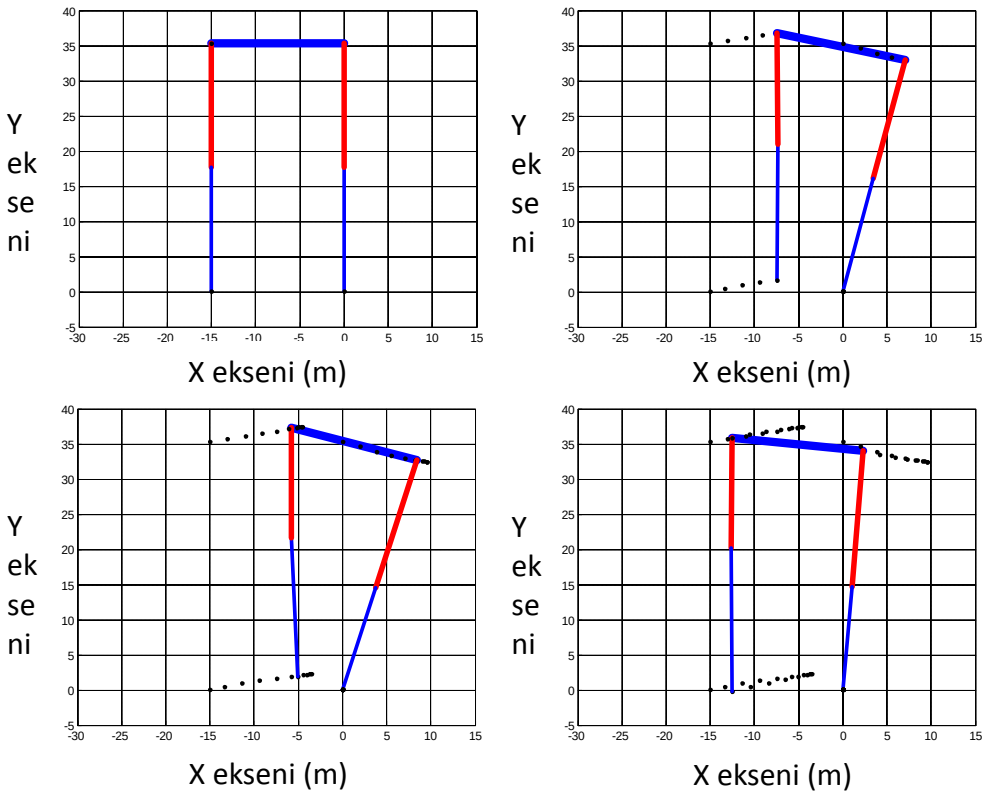
Şekil 7.2 de yarım dairesel adımın on altı parçaya bölünerek oluşturulduğu grafik görülmektedir. Çalışma süresince her yarım dairesel adım on altı parçada attırılmıştır.



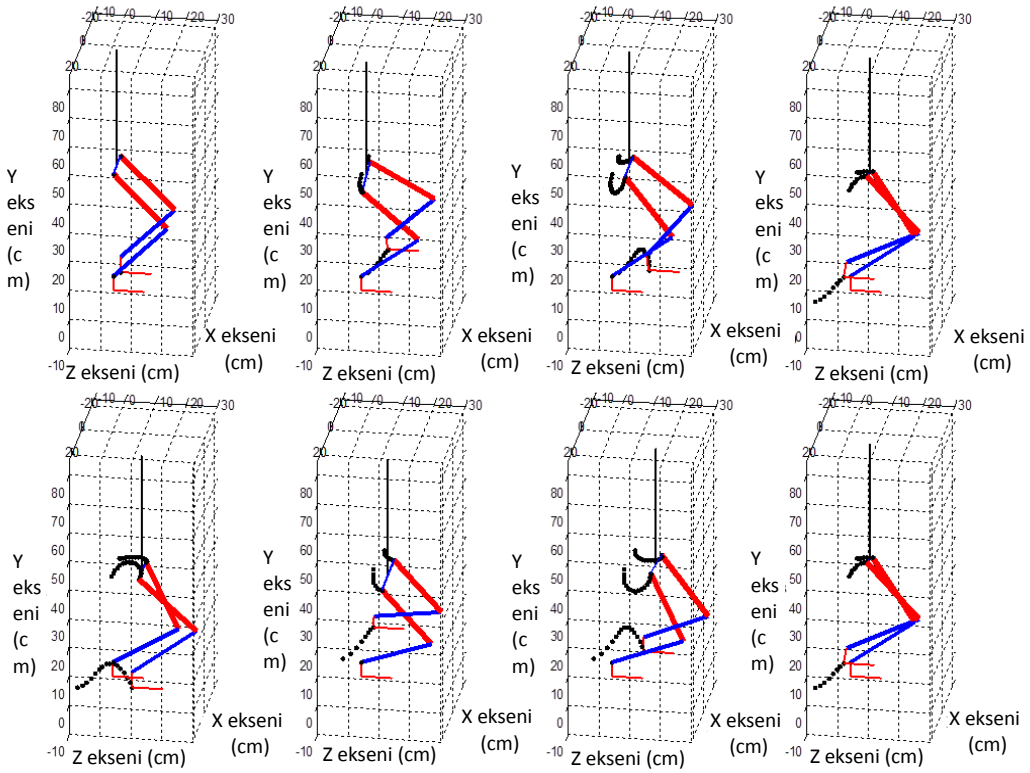
Şekil 7.2 : On altı parçaya bölünmüş adım.

Gözlemler sonucunda hareket doğruluğu adına adımların daha küçük parçalara ayrılarak daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir, ama çözüm süreci artacağından getireceği doğruluğun avantajlı olmayacağ sonucuna varılmıştır.

Şekil 7.3 te bacağın bir adım atarken hareket aşamaları, bacağı karşıdan göstermektedir. Amaçlanan yürüme planlaması doğrultusunda, salınan ayak –sağ ayak-, yerden kalkarken ağırlık merkezi –orta nokta- destek ayağı üzerine hareket etmektedir, böylece destek ayak alanı içerisinde kalarak yere göre bir moment yaratmayarak dengeyi bozmayacaktır. Sırasıyla orta nokta ve sağ ayak kendilerine tanımlanan yarım dairesel yörüngeleri izlemektedirler.



Şekil 7.3 : Adım (karşıdan görünüş).



Şekil 7.4 : Adım (perspektif).

Şekil 7.4 te robotun adımının aşamaları perspektif olarak verilmiştir. Robot yürümeye hazır pozisyondan harekete başlamakta, ilk adımın atmakta, salınan ayak yere değdiğinde salınan ve sabit ayaklar değişmekte ve bu hareket ardışık olarak anahtarlamalı bir şekilde devam etmektedir.

Matlab Symbolic Toolbox kullanılarak hazırlanan çalışmada bacağın dik durduğu durumdaki tork değerleri hesaplannmıştır.

Çizelge 7.1: Bacağın dik konumu için üretilen torklar.

Eklem	Tork
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0

Çizelge 7.1 de bacağın dik durduğu pozisyon için eklemlerin üretmesi gereken torklar Euler-Lagrange metodu ile hesaplanmıştır ve beklendiği gibi bacağın dik konumunda eklemlerin tork üretmesi gerekmemektedir. Bacağın yere paralel konumu göz önüne alınmıştır.

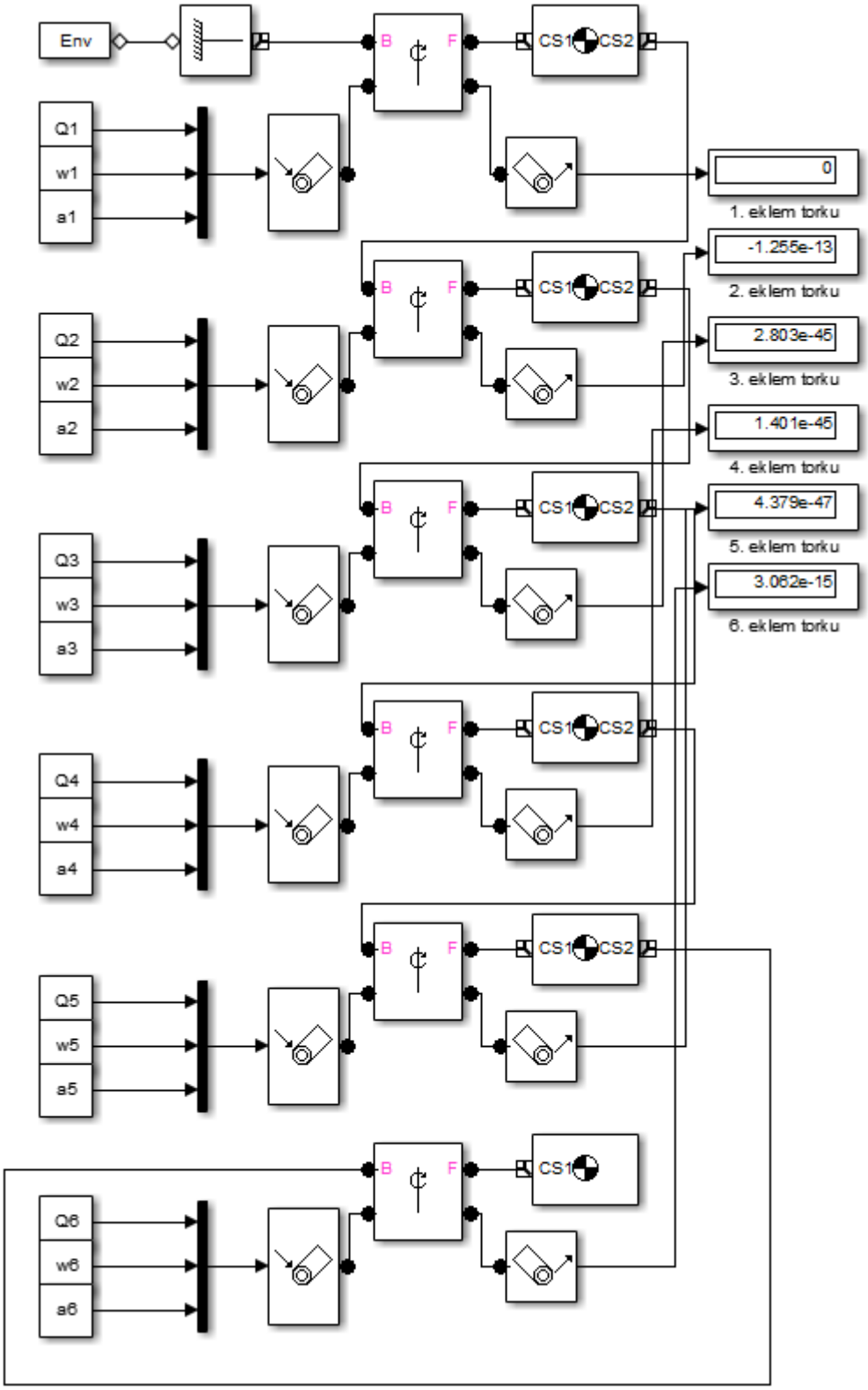
Çizelge 7.2: Bacağın yere paralel konumu için üretilen torklar.

Eklem	Tork
1	0
2	0
3	-2050
4	-800
5	-50
6	0

Çizelge 7.2 de yine Euler-Lagrange metoduyla ayağın yere paralel durduğu pozisyonunda üretilen torklar görülmektedir, bu durumda ise yere paralel tutmaya çalışan eklemlerde zorlanma görülmektedir.

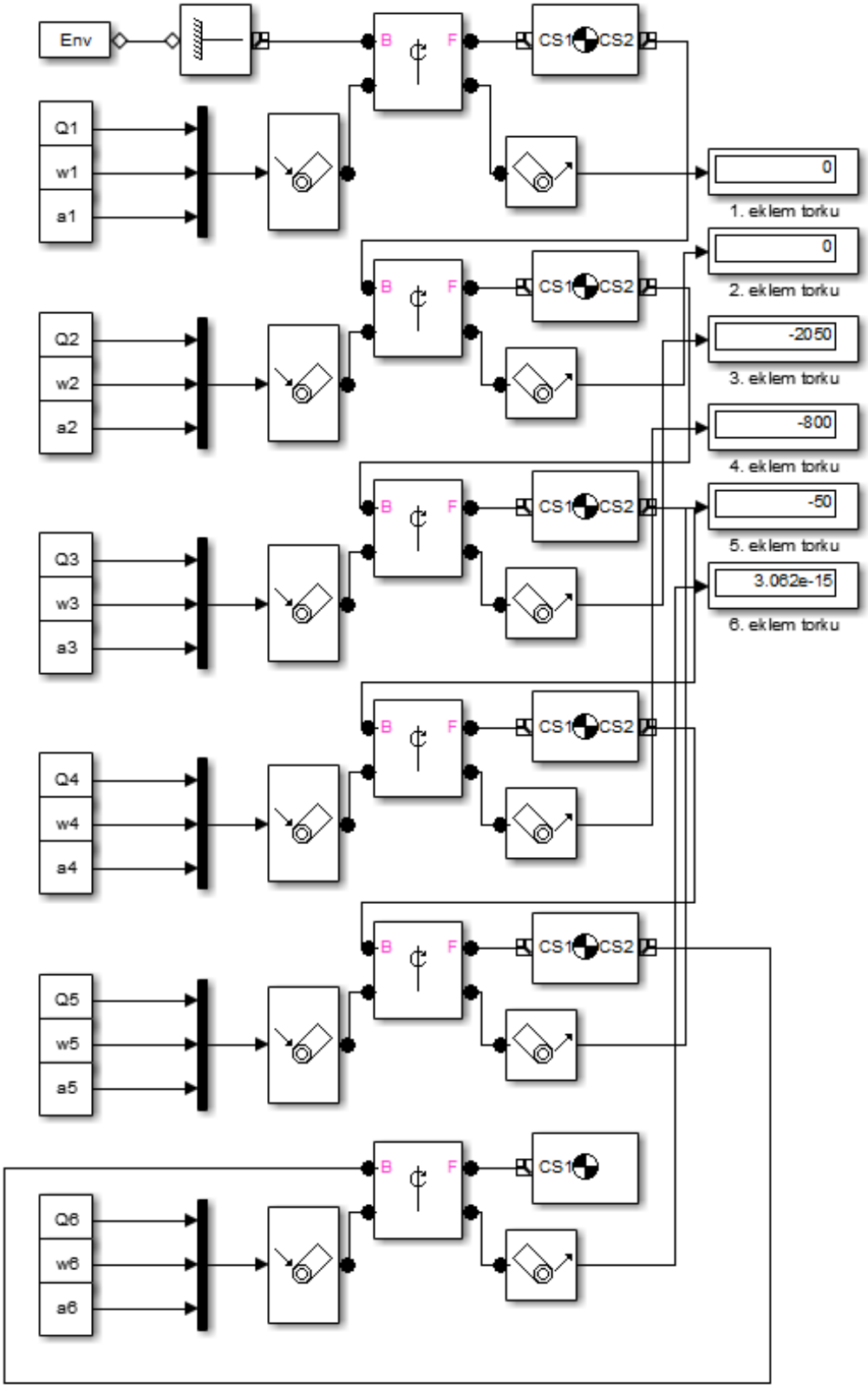
Aynı durumlar simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanacak olursa :

Birinci durumda :



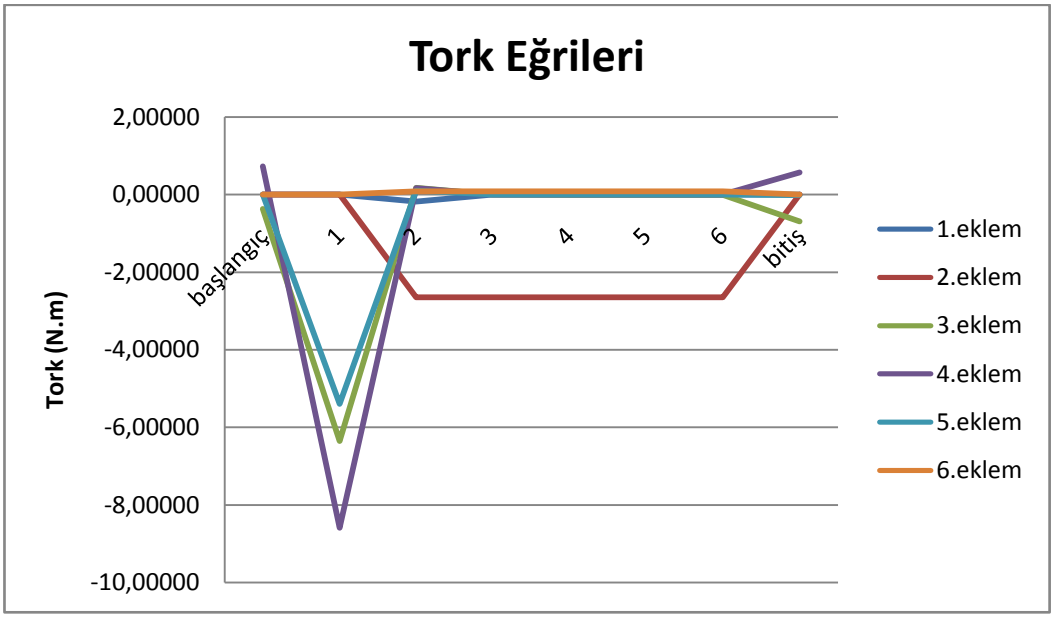
Şekil 7.5 : Ayağın dik konumundaki simülasyon sonuçları.

İkinci durumda :



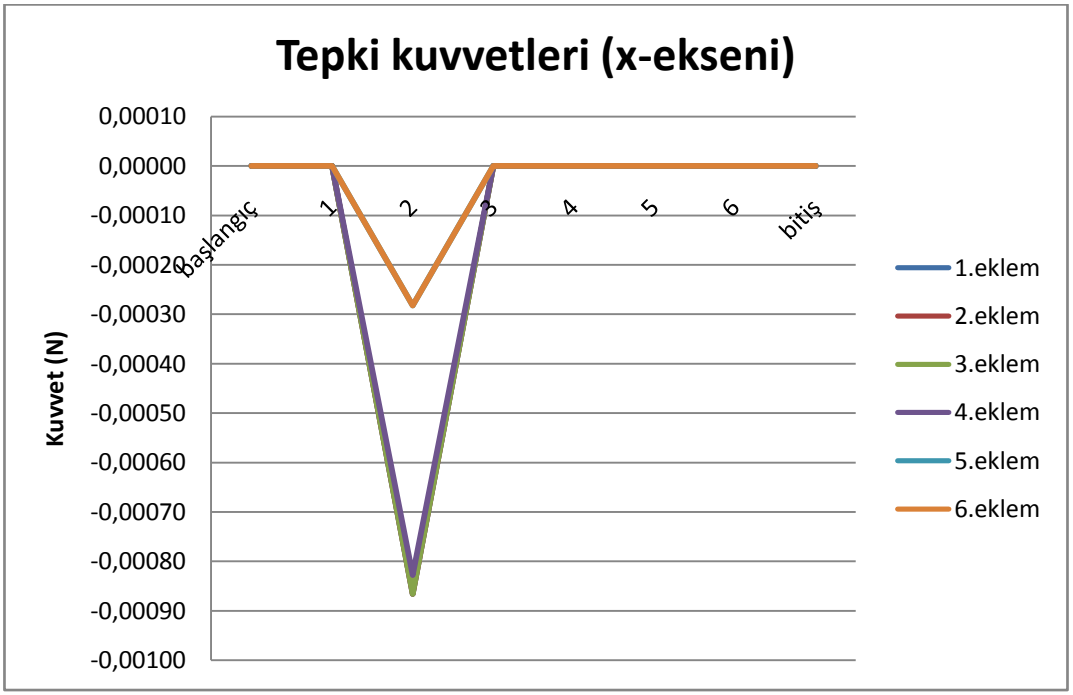
Şekil 7.6 : Ayağın yere paralel konumundaki simülasyon sonuçları.

Ters kinematik analiz ile bulunan eklem pozisyonları, hızları ve ivmeleri Simulink'te hazırlanan simülasyon dosyasına eklenerek tasarlanan hareketin oluşturacağı dinamik etkiler bulunabilir.

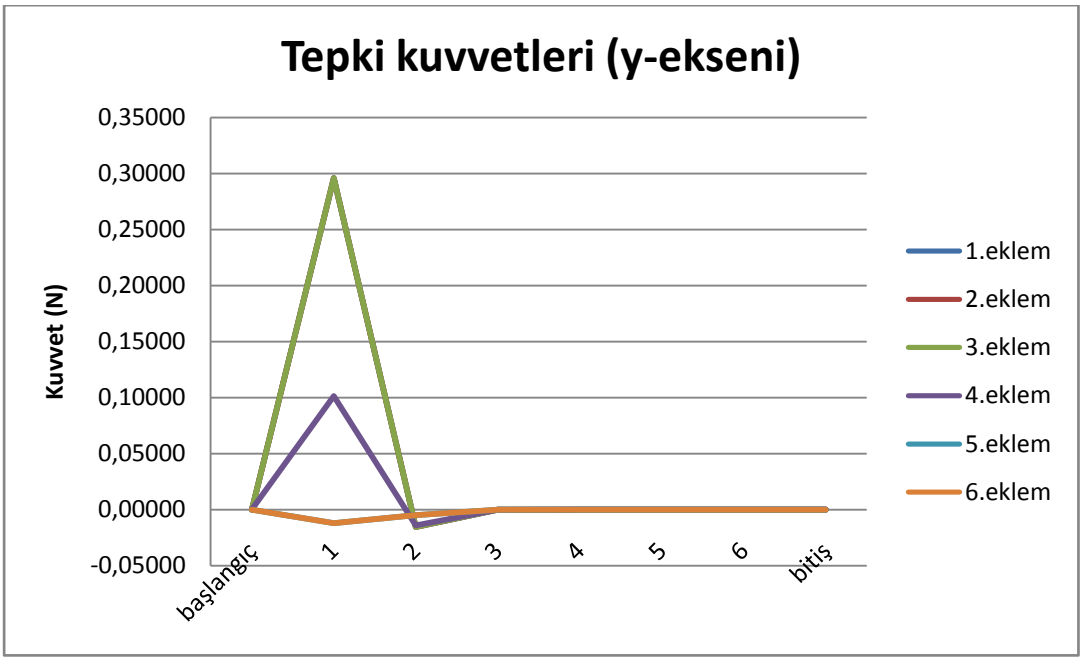


Şekil 7.7 : Tork eğrileri.

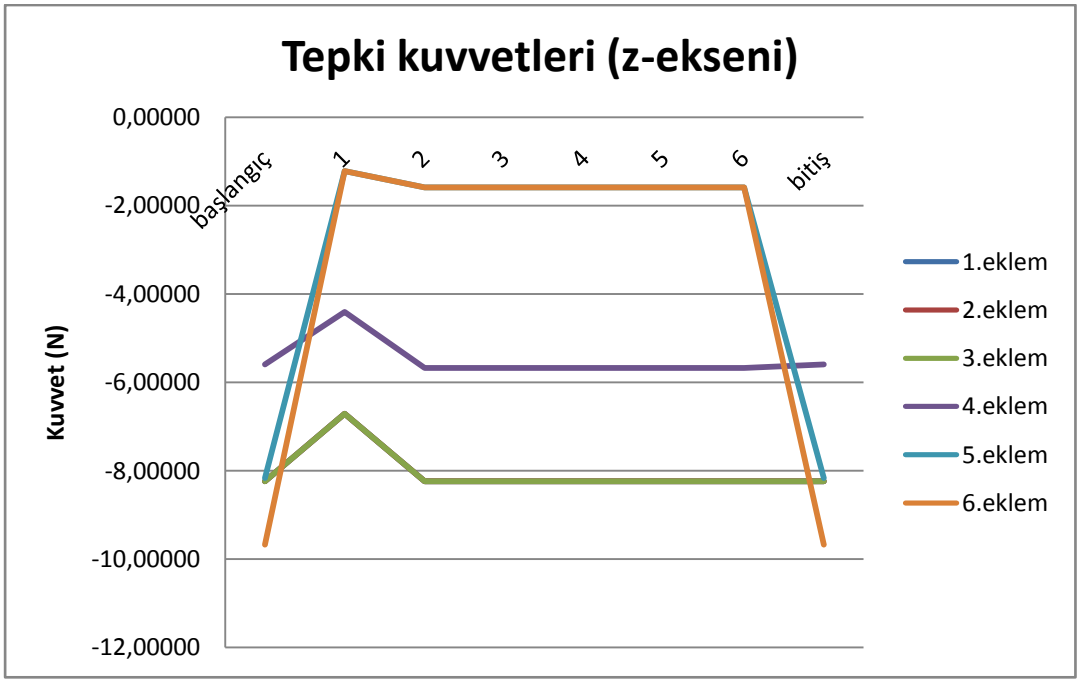
Şekil 7.7 de bacağın hareketi sırasında eklemlerin üretmesi gereken tork değerleri görülmektedir. Tork değeri ortalama olarak en yüksek değerine harekete başlangıç sırasında ulaşmaktadır.



Şekil 7.8 : Tepki kuvvetleri (x-ekseni).

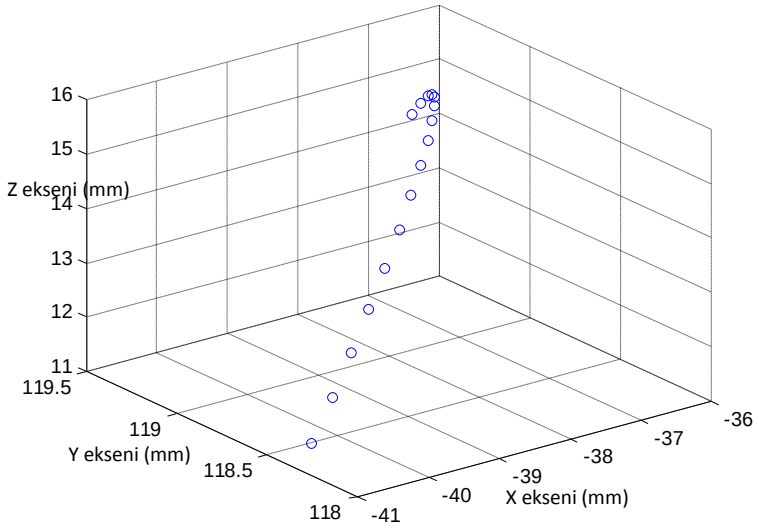


Şekil 7.9 : Tepki kuvvetleri (y-ekseni).



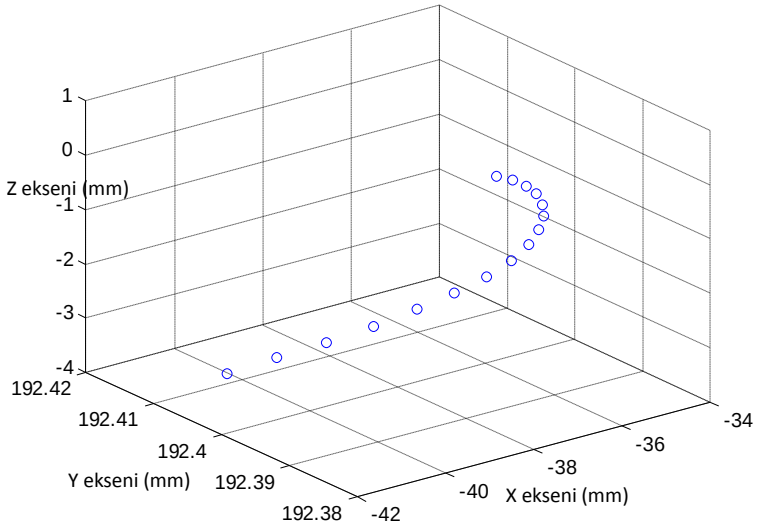
Şekil 7.10 : Tepki kuvvetleri (z-ekseni).

Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.10 incelenecek olursa, düşey olarak tepki kuvvetleri en büyük değerlerine bacağın yere temas ettiği konumda ulaşmıştır, diğer iki eksende kalan tepki kuvvetleri ,bu hareket sırasında en büyük değerlerine hareketin başladığı anda ulaşmaktadırlar. Bunun nedeni hareketin başlangıcındaki ivme değerinin hareketin diğer aşamalarına göre daha büyük değerlere ulaşmasıdır.



Şekil 7.11 : Gerçek ağırlık merkezinin hareketi.

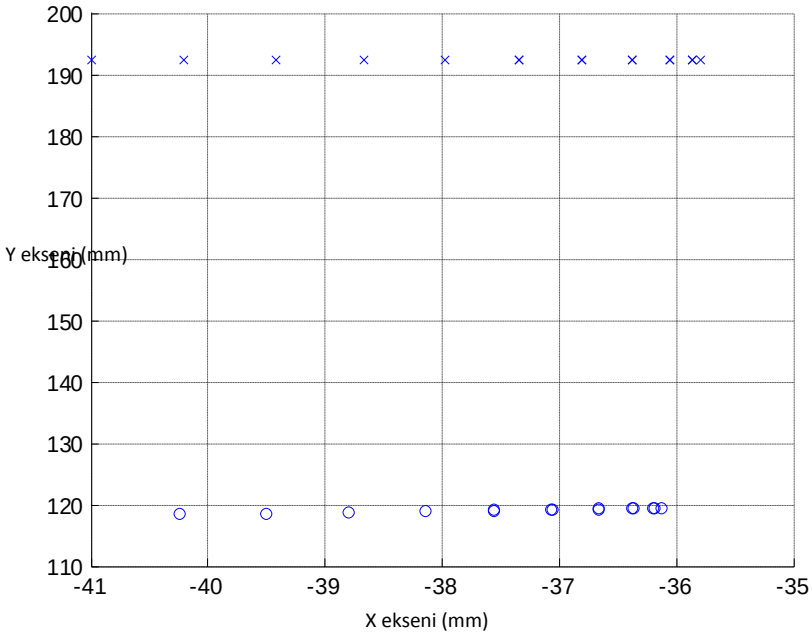
Şekil 7.11 de bacağın tüm parçalarının ağırlıkları hesaplanarak bulunan gerçek ağırlık merkezinin izlediği yörünge görülmektedir.



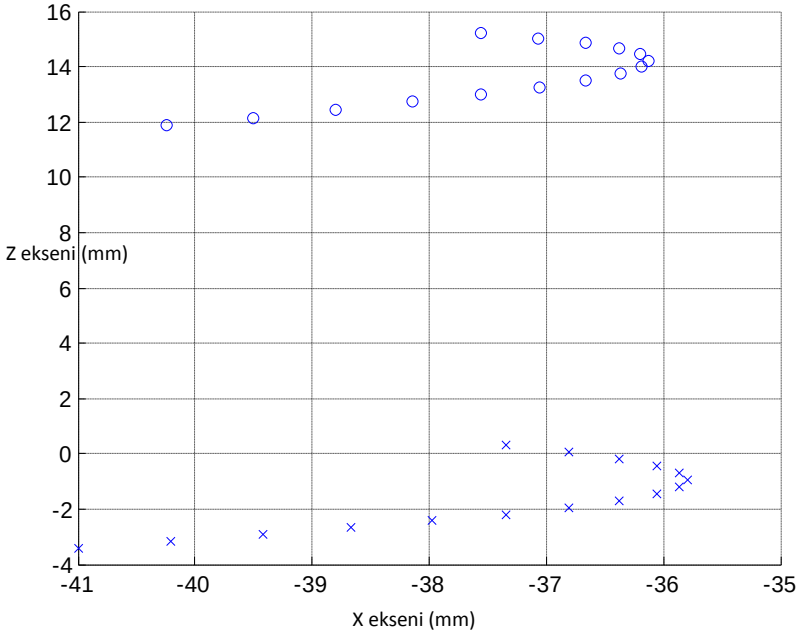
Şekil 7.12 : Sanal ağırlık merkezinin hareketi.

Şekil 7.12 de bacağın çalışma başlangıcında ağırlık merkezi olarak kabul edilen orta noktasının yaptığı hareket görülmektedir. Sanal ağırlık merkezinin hareketinin gerçek ağırlık merkezi ile hareket formu benzerlik göstermektedir, beklendiği gibi hareketlerin yere dik olan düzlemdeki genlikleri farklıdır. Bunun nedeni sanal ağırlık

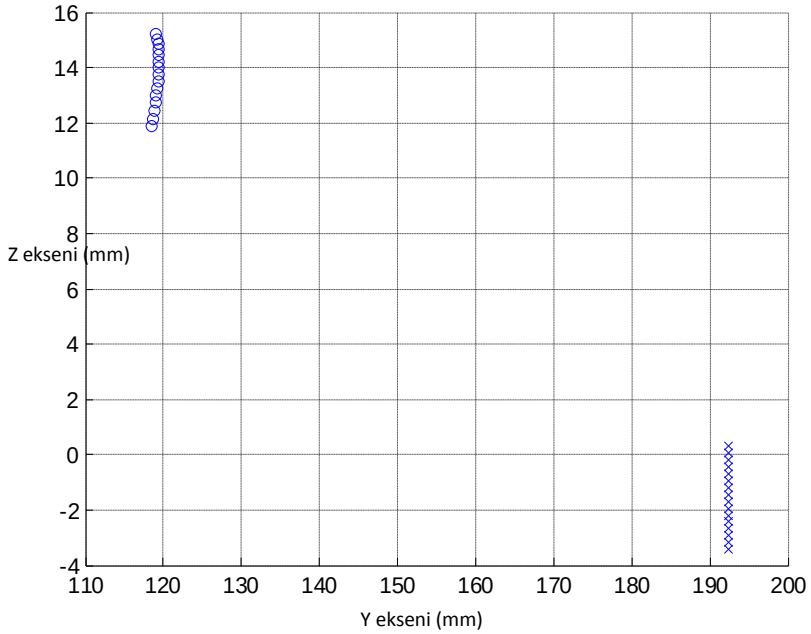
merkezinin iki bacağın tam orta noktasında bulunması ve kalça üstünde kabul edilmesidir. Gerçek ağırlık merkeziyse bacaklardaki her parçanın ağırlığı ve ağırlık merkezleri baz alınarak hesaplanmıştır, böylece yer düzlemine dik düzlemde hareket etmektedir.



Şekil 7.13 : Ağırlık merkezleri xy eksenlerinde (x gerçek, o sanal).



Şekil 7.14 : Ağırlık merkezleri xz eksenlerinde (x gerçek, o sanal).



Şekil 7.15 : Ağırlık merkezleri yz eksenlerinde (x gerçek, o sanal).

Şekil 7.13, Şekil 7.14 ve Şekil 7.15 te ayrı ayrı eksenler üzerinde sanal ve gerçek ağırlık merkezlerinin hareketleri görülmektedir. Ağırlık merkezi için kabul edilen iki bacağın tam ortasında olması önermesi incelenecek olursa, tam aynı noktada olmayacağı aşikardır fakat, robotun bacaklarının başlangıç açıları daha düşük değerlere alınırsa, ağırlık merkezleri yaklaşık olarak yer düzleminde aynı nokta üzerine çekilebilir. Hareketleri incelenecek olursa, iki ağırlık merkezi de aynı şekilde hareket etmektedir, böylece başlangıçta yapılan kabul üzerinden çalışmanın yapacağı hatalar kabul edilebilir olacaktır.

8. SONUÇ

Yapılan bu tez çalışmasının sonucunda, insansı bir bacağa ait dinamik ve kinematik modeller çıkartılmış ve Matlab ortamında simülasyonlar yapılmıştır. İlk olarak robotlarla ilgili genel bilgilerden bahsedilmiştir. Sonrasında ise robot sistemlerinde kinematik ve dinamik modellerin nasıl çıkartılacağından, hangi prensiplerin kullanılacağından bahsedilmiştir ve örnek çıkarımlar yapılmıştır. Daha sonra bu örnek çıkarımlarla birlikte genel kısıtlar belirlenmiş, ve gerçekleme düzeneği için seçimler yapılmıştır.

Çalışmada modeller çıkarılıp gerçekleme düzeneği elde edildikten sonra, yürüme planlama üzerine çalışılmıştır. Bu kısımda hızlı ve pratik şekilde robota adım attıracak bir yürüme algoritması hedeflenmiştir. Bu bağlamda hazırlanan yürüme algoritması yine Matlab üzerinde denenmiş, yapılan varsayımların doğru sonuçlandığı ve bu planlamayla yürümenin gerçeklenebileceği sonucuna varılmıştır.

Son olarak da yürüme hareketinin dinamik ve kinematik sonuçları irdelenmiş olup, yorumlar yapılmıştır.

Çalışmada bilindiği üzere açık çevrim bir yapı olduğundan beklenen hatalarla karşılaşılmıştır.

İlerleyen çalışma olaraksa, bu tezde çalışılan yürüme algoritması gerçek sistem üzerinde denenmelidir. Deneysel sonuçlar elde edilmeli ve açık çevrim çalışmanın başarısı literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslanıp kontrolör tasarlanmalıdır. Bu çalışma sadece yürüme üzerine olduğundan, robotun diğer çalışma konuları ve uzuvları üzerinde ayrı çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

[1]**Morecki, A., Waldron, K.J.**, 1997. Human & Machine Locomotion, pp. 80-83-92.

[2]**Url-1** <http://www.honda.com.tr/asimo_genel_bakis.aspx> , alındığı tarih 23.04.2013.

[3]**Gerçek, A.**, 2011, İki Ayaklı Yürüyen Robot Tasarımı ve Prototip İmalatı.

[4]**Url-2** <http://www.gazeteci.tv/bize-en-cok-benzeyen-turk-robot-suralp-2610h.htm>, alındığı tarih 24.03.2013.

[5]**Url-3** <http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/modul_pdf/725TTT017.pdf> , alındığı tarih 24.04.2013.

[6]U**rl-4** <http://www.docstoc.com/docs/81400281/The-Muscular-System-The-Muscular-System-3-Major-Types-of> , alındığı tarih 25.04.2013.

[7]**Url-5** <http://bilgipaneli.com/max/model/sol-ve-sag-bacak-insan-ayak-tasarim-3-ds-3d-studio-maxl82.html> , alındığı tarih 25.04.2013.

[8]**Craig, J.C.**, 2005. Introduction to Robotics, Third Edition, pp. 6-62.

[9]**M. Tarokh and M. Lee,** "Kinematics Modeling Of Multi-Legged Robots Walking On Rough Terrain", Second International Conference on Future Generation Communication and Networking Symposia, 2008

[10]**Yılmaz, S.**, 2011. Kinematic Analysis of Humanoid Leg.

[11]**D. Wholherr and M. Buss,** "Posture Modification For Biped Humanoid Robots Based On Jacobian Method", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 124-129, 2004.

[12]**Serbes, A., Yılmaz, S.**, 2013. İnsansı Bacak Tasarımı.

[13]**Dynamixel Servo Motors Manual**

[14]**Dynamixel MX-106 Servo Motor Technical Drawing**

[15]**Url-6** <http://www.solidworks.com/sw/products/10156_ENU_HTML.htm>, alındığı tarih 24.05.2013.

[16]**J. L. Yan, and H. P. Huang,** "A Fast And Smooth Walking Pattern Generator Of Biped Robot Using Jacobian Inverse Kinematics", 2007.

[17]**Yilmaz, S., Gokasan, M., Bogosyan, S.,** "Center of Gravity Based, Switching and Partial Modeled Gait Planning", *International Conference on Computer Technology and Science*, ICCTS 2013, Dubai, 3-4 August 2013.

[18]**Q. Zhang, D. Chen and H. Li,** "A Gait Planning Method For Biped Heel-And-Toe Robot", International Conference on Future Energy, Environment, and Materials, pp. 1799-1805, 2012.

[19]**Yılmaz, S., Gökaşan, M., Boğosyan, S.,**"Anahtarlama Modelli Yürüme Planlama", *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, TOK 2013, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad:	Sabri YILMAZ
Doğum Yeri ve Tarihi:	Samsun, 08.03.1988
Adres:	Ataşehir, İstanbul
E-Posta:	yilmazsabr@itu.edu.tr
Lisans:	İTÜ - Kontrol Mühendisliği (2007-2011)
	İTÜ - Makine Mühendisliği (2008-2013)
Mesleki Deneyim:	İTÜ Kontrol Müh. Bölümü Araş. Gör. (2013 - …)

Yayın Listesi:

1. S. Yilmaz, M. Gokasan, S. Bogosyan, "Center of Gravity Based, Switching and Partial Modeled Gait Planning", *International Conference on Computer Technology and Science*, ICCTS 2013, Dubai, 3-4 August 2013.

2.S. Yılmaz, M. Gökaşan, S. Boğosyan, "Anahtarlama Modelli Yürüme Planlama", *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, TOK 2013, Malatya, Türkiye,26-28 Eylül 2013.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **S. Yilmaz**, M. Gokasan, S. Bogosyan, "Center of Gravity Based, Switching and Partial Modeled Gait Planning", *International Conference on Computer Technology and Science*, ICCTS 2013, Dubai, 3-4 August 2013.
- **S. Yılmaz**, M. Gökaşan, S. Boğosyan, "Anahtarlama Modelli Yürüme Planlama", *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, TOK 2013, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.