T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOT DİNAMİĞİNİN DENEYSEL VE TEORİK ARAŞTIRILMASI

TAŞKIN TEZ

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hilmi KUŞÇU

EDİRNE-2017

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Murat YURTCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Ayşegül ÖZTÜRK
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hilmi KUŞÇU
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir Doktora tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Prof. Dr. Selçuk ARIN	
Prof. Dr. Yılmaz ÇAN	
Doç. Dr. Hilmi KUŞÇU	
Doç. Dr. İlker H. ÇELEN	
Yrd. Doç. Dr. Altan MESUT	

Tarih: 16/01/2017

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

16/01/2017

Taşkın TEZ

Doktora Tezi
İki Ayaklı Yürüyen Robot Dinamiğinin Deneysel ve Teorik Araştırılması
Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Son yıllarda hızla gelişen elektronik, bilgisayar, makine ve kontrol teknolojisiyle birlikte, endüstride, tıpta, eğitimde, tarımda ve yaşamın tüm alanlarında robotik çalışmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Robotik çalışmalardaki artış ile birlikte, iki ayaklı yürüyen robotların yürüyüşleri gittikçe insanların yürüyüşlerine benzemeye başlamış ve iki ayaklı robotlar insan yürümesindeki göze hoş gelen harmoniyi sağlamaya başlamışlardır. Özellikle, büyük otomotiv üreticileri ve ünlü bilişim firmaları robotik çalışmalara destek vererek iki ayaklı yürüyen robotların gelişmesinde büyük rol oynamışlardır.

Doğadaki diğer canlılar ile karşılaştırıldığında iki ayak üzerinde yürüme, insanın en önemli özelliklerinde biri olup bu doktora tezinin en önemli kaynaklarından biri olmuştur. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı yapılan iki ayaklı yürüyen robotun hareketlerini insan yürüyüşüne benzetmektir. Ayrıca, insan yürüyüşündeki matematiksel harmoni de en önemli dayanaklarımızdan biri olmuştur.

Bu doktora tezi çalışmasında, iki ayaklı yürüyen robot yapmak için en son teknoloji ürünü olan 12 adet akıllı servo motor kullanılmıştır. Bu servo motorlar, insan bacaklarındaki eklemlerin yerine kullanılmıştır. İki ayaklı yürüyen robotun bileğinde 2 adet, dizinde 1 adet ve kalçasında 3 adet olmak üzere bir bacağında 6 DoF'a sahip bir kinematik model geliştirilmiştir.

İnsan yürümesindeki matematiksel harmoniyi ortaya çıkarmak için değişik katılımcıların yürüme analizleri yapılmış ve iki ayaklı robota uygulanmıştır. Ayrıca, iki ayaklı yürüyen robot için yürüme deseni üretme algoritmalarından yararlanarak yeni yürüme deseni oluşturuldu ve iki ayaklı yürüyen robota uygulayarak deneysel olarak robotun hareketleri incelenmiştir.

Geliştirilen ve üretilen yürüme desenleri açık kaynak kodlu derleyicilerle programlanıp, üzerinde mikrodenetleyici bulunan elektronik karta yükleyerek, robotun eklemlerinde bulunan akıllı servo motorları bir harmoni içinde çalıştırarak insan gibi yürüyen iki ayaklı robotun geliştirilmesi sağlanmıştır.

Yıl :2017
Sayfa Sayısı :106
Anahtar Kelimeler: İki ayaklı robot, yürüme analizi, servo kontrol, altın oran

Doctoral Thesis
Experimental and Theoretical Research of Biped Walking Robot Dynamics
Trakya University Institute of Natural Sciences
Mechanical Engineering

ABSTRACT

Robotic studies have gained a great momentum in all areas of life such as industry, medical, education, agriculture along with the rapidly developing electronic, computer, machine and control technologies in recent years. Walking of biped robots have increasingly begun to look alike the walking of human with the increase in robotic studies and the biped robots have begun to provide harmony pleasing to the eye in the walking of human. In particular, large automotive producers and famous informatics companies have supported robotic studies and in this way, they have played a major role in the development of the biped walking robots.

When compared to other living creatures in nature, the biped walking is one of the most important features of the human being, and it is one of the most important sources of this doctoral thesis. Therefore, the aim of this study was to simulate the movements of the human walking in the designed bipedal robot. Additionally, the mathematical harmony in human walking has also become one of the most important fulcrums.

In this doctoral thesis, the 12 smart servo motors, which are state-of-the-art, were used to produce the robot of biped walking. These servo motors were used in place of joints in human legs. It was developed a kinematic model with a total of 6 DoFs on one leg of the biped robot, including two DoFs on the wrist, one DoF on the knee and three DoFs on the hip of the produced biped robot.

Walking analysis of the different participants were carried out to reveal the mathematical harmony in the human walking and were applied to the biped robots. Moreover, the new walking pattern was created by using the walking pattern generation algorithms for the biped robot. It was applied to the biped robot then the motions of the robot were examined experimentally.

Finally, the developed and generated walking patterns were loaded onto the electronic card with the microcontroller, programming with open source code compilers. Thereafter, the smart servo motors in the robotic joints were operated in harmony, and the development of the biped robot walking like a human was provided.

Year :2017
Number of Pages :106
Keywords : Biped robot, gait analysis, servo control, golden ratio

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, beni bu tez ile ilgili araştırmaya teşvik eden, iki ayaklı yürüyen robotun tasarımı aşamasında devamlı ilgi gösteren, en zor anımda bilgi, tecrübe ve yenilikçi fikirleriyle bana destek ve motivasyon veren, Türkiye'de de robotik alanında çalışmalar yapılmasına öncülük eden değerli hocam Doç. Dr. Hilmi KUŞÇU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmalarım esnasında, beni destekleyen, motive eden, bilimsel çalışmalarıma yön veren değerli abim Prof. Dr. Coşkun TEZ'e teşekkür ederim.

Doktora tezi çalışmam boyunca bana her türlü desteği veren, her zaman yanımda olan, yoğun zamanlarımda anlayışlı davranan sevgili eşim Serap TEZ'e, kızım Turkuaz TEZ'e ve oğlum Kayra Batıhan TEZ'e çok teşekkür ederim.

Bu tezin fiziksel olarak gerçekleştirilebilmesi için maddi destek veren Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine(TÜBAP-2014/05) teşekkürlerimi arz ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **iii**
TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xi**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **xiv**
BÖLÜM 1 GİRİŞ **1**
1.1. Konu 1
1.2. Amaç 2
1.3. Kapsam 3
BÖLÜM 2 KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**
BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM **9**
3.1. Yürüme Nedir? 9
3.2. İnsan Nasıl Yürür? 9
3.3. Yürüme Döngüsü 10
3.4. Yürüme Analizi 11
3.5. Altın Oran Algoritması 12
3.6. Altın Oran Algoritmasıyla Yürüme Periyodundaki Alt Fazların Bulunması 13
3.7. İki Ayaklı Yürüyen Robot Kinematiği 15
3.8. İki Ayaklı Yürüyen Robotlarda Yürüme Yöntemleri 17
3.9. Robotun Eklem Açılarının Hesaplanması İçin İleri Kinematik Yönteminin Kullanılması 17
3.10. Eklem Açılarının Hesaplanması için Ters Kinematik Yönteminin Kullanılması 18
3.11. Sıfır Moment Noktası 21
3.12. Video Görüntü Kaydedicisi 25
3.13. Video Görüntüsü Çözümleme Programı 25
3.14. Dynamixel MX-64T Servo Motorları 26

3.15. Robot Kontrol Kartı 28
3.16. OpenCM 485 Genişleme Kartı 29
3.17. Elektriksel Güç Ünitesi 31
3.18. ROBOTIS_OpenCM IDE Derleyicisi 31
BÖLÜM 4 İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOT İÇİN YÜRÜME DESENİ MODELLENMESİ VE DENEYLER 33
4.1. Katılımcıların Eklem Açılarının Bulunması 33
4.2. Eklem Açılarının Doğrusallaştırılması 36
4.3. Ters Kinematik Yöntemiyle Yürüme Deseni ve Eklem Açıların Üretimi. 37
4.3.1. Basma Fazı 37
4.3.1.1. İlk Değme Fazı 37
4.3.1.2. Yüklenme Fazı 47
4.3.1.3. Basma ortası 55
4.3.1.4. Basma Sonu Fazı(Çift Destek Fazı) 63
4.3.1.5. Salınım Öncesi Fazı 64
4.3.2. Salınım Fazı 65
4.3.2.1. Salınım Başlangıcı 65
4.3.2.2. Salınım Ortası 73
4.3.2.3. Salınım Sonu Fazı 75
4.4. Robotun Sağ Bacağının Bir Döngüsünün Modellenmesi. 76
4.5. Robotun Yana Eğilme Açısının Bulunması 77
4.6. İki Ayaklı Yürüyen Robotun Eklem Açılarının Grafiklerinin Oluşturulması 78
4.7. Yürüme Modellemesi Sonucu Elde Edilen Değerlerin İki Ayaklı Yürüyen Robota Uygulanıp Çalıştırılması. 81
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE TARTIŞMA 82
5.1. Sonuçlar 82
5.2. Tartışma 83
5.3. Gelecek Çalışmalar ve Öneriler 85
EKLER Ek-A İki Ayaklı Yürüyen Robotun Kodları 86

KAYNAKLAR 98
ÖZGEÇMİŞ 105
TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER 106

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

DoF :Serbestlik Derecesi(Degree of Freedom)

SMN : Sıfır Moment Noktası

ZMP : Zero Moment Point

CPG : Merkezi desen modellenmesi

Φ : Altın oran katsayısı (1.618)

L_1 : Robotun sağ dizi ile kalçası arasındaki uzunluk

L_2 : Robotun sağ dizi ile bileği arasındaki uzunluk

L_3 : Robotun sol dizi ile kalçası arasındaki uzunluk

L_4 : Robotun sol dizi ile bileği arasındaki uzunluk

L : Robotun bacak uzunluğu

F_1 : Robotun sağ ayak uzunluğu

F_2 : Robotun sol ayak uzunluğu

s : Robotun adım uzunluğu

h : Robotun belinin yerden yüksekliği

θ_1 : Robotun sağ bacak kalça açısı

θ_2 : Robotun sağ bacak diz açısı

θ_3 : Robotun sağ bacak bilek açısı

θ_4 : Robotun sol bacak kalça açısı

θ_5 : Robotun sol bacak diz açısı

θ_6 : Robotun sol bacak bilek açısı

α : İlk değme fazı ters kinematik hesabındaki üçgenin kalça tamamlama 1.açısı

β : İlk değme fazı ters kinematik hesabındaki üçgenin diz tamamlama açısı

γ : İlk değme fazı ters kinematik hesabındaki üçgenin bilek tamamlama 1.açısı

δ : İlk değme fazı ters kinematik hesabındaki üçgenin kalça tamamlama 2.açısı

ε : İlk değme fazı ters kinematik hesabındaki üçgenin bilek tamamlama 2.açısı

ζ : Yüklenme fazı DEF üçgenindeki DFE açısı

η : Yüklenme fazı DEF üçgenindeki DEF açısı

ι : Yüklenme fazı ters kinematik hesabındaki GHI üçgeninin dizdeki büyük açı

κ : Yüklenme fazı ters kinematik hesabındaki GHI üçgeninin ayak ucundaki açı

λ : Yüklenme fazı ters kinematik hesabındaki GHI üçgeninin diz tamamlama açısı

μ : Basma ortası fazı JKM üçgenindeki JKM açısı

ξ : Basma ortası fazı NQP üçgenindeki QNP açısı

ν : Basma ortası fazı NOP üçgenindeki NOP açısı

o : Basma ortası fazı NOP üçgenindeki NPO açısı

ρ : Basma ortası fazı NQP üçgenindeki NPQ açısı

ς : Salınım başlangıcı fazı TUV üçgenindeki TUV açısı

σ : Salınım başlangıcı fazı WXY üçgenindeki WXY açısı

υ : Salınım başlangıcı fazı WXY üçgenindeki WYX açısı

φ : Salınım başlangıcı fazı υ ile θ_3'ün toplamı olan açı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Yürüme döngüsü ve fazları [64]. 10
Şekil 3.2 Altın oran ile ikiye bölünmüş KL doğrusu. 12
Şekil 3.3 Bu çalışma için önerilen altın oran algoritması 14
Şekil 3.4 Bu çalışma için yapılan robotun eklem ve katı modellemesi. 15
Şekil 3.5 Montajı tamamlanmış iki ayaklı yürüyen robotun önden görünümü. 16
Şekil 3.6 Montajı tamamlanmış iki ayaklı yürüyen robotun yandan görünümü. 16
Şekil 3.7 İleri kinematik yönteminin gösterilmesi [14]. 18
Şekil 3.8 Ters kinematik yönteminin gösterilmesi. 19
Şekil 3.9 Ters kinematik yönteminin robota uygulanmasının gösterilmesi [14]. 20
Şekil 3.10 Sıfır moment noktasının orijinal gösterimi (SMN) [76]. 21
Şekil 3.11 İki ayaklı yürüyen robotta destek çokgeni [14]. 21
Şekil 3.12 CoG, SMN ve destek çokgeni [14]. 22
Şekil 3.13 Ayağa zeminden gelen tepki kuvvetleri [76]. 22
Şekil 3.14 iPhone 6 Plus mobil telefon. 25
Şekil 3.15 Tracker video görüntüsü çözümleme programı. 25
Şekil 3.16 Dynamixel MX-64T servo motoru [79]. 26
Şekil 3.17 Dynamixel MX-64T motorların TTL haberleşme için bağlanması [79]. 27
Şekil 3.18 OpenCM.9.04 kontrol kartı pinlerinin görevleri [80]. 28
Şekil 3.19 OpenCM 485 Genişleme kartı [81]. 30
Şekil 3.20 Gens Ace 5100 mAh 14.8 V 35C 4S1p Lipo Batarya. 31
Şekil 3.21 ROBOTIS_OpenCM derleyicisi. 32
Şekil 4.1 Katılımcılardan yürüme analizi için görüntü kaydı yapılması. 33
Şekil 4.2 Katılımcı görüntülerinden elde edilen yürüme döngüsünün çözümlenmesi. 34
Şekil 4.3 Rastgele seçilen bir katılımcının sağ kalça açı grafiği. 34
Şekil 4.4 Rastgele seçilen bir katılımcının sağ diz açı grafiği. 35
Şekil 4.5 Rastgele seçilen bir katılımcının sağ bilek açı grafiği. 35
Şekil 4.6 34 katılımcının basma, salınım ve çift destek fazları oranlarının dağılımı 35
Şekil 4.7 Katılımcının sağ kalça açı grafiğinin doğrusallaştırılması. 36
Şekil 4.8 Katılımcının sağ diz açı grafiğinin doğrusallaştırılması. 36
Şekil 4.9 Katılımcının sağ bilek açı grafiğinin doğrusallaştırılması. 37
Şekil 4.10 İlk değme fazı için ayakların yürüme desenine yerleştirilmesi. 38

Şekil 4.11 İlk değme fazı için gerilmiş sağ bacak deseninin üretilmesi. 39
Şekil 4.12 İlk değme fazı için sol bacağın deseninin üretilmesi. 39
Şekil 4.13 İlk değme fazında üretim yapılabilecek sağ ve sol bacak desenleri. 40
Şekil 4.14 İlk değme fazı için sağ bacağın eklem açılarının, bel yüksekliği ve 42
Şekil 4.15 Sol bacak açılarının bulunması için ters kinematik açılarının 42
Şekil 4.16 İlk değme fazı için ters kinematik yöntemiyle sol bacağın eklem 45
Şekil 4.17 İlk değme fazı için üretilen sağ ve sol bacak desenlerinden robotun SMN .. 46
Şekil 4.18 Yüklenme fazı için sağ bacağın öne eğilmesi desenlerinden ne kadar 47
Şekil 4.19 Ayağın tam teması fazı için sağ bacağın kabul edilmiş bir açı değeri kadar. 47
Şekil 4.20 Ayağın tam teması fazı için sağ bacağın öne eğilmesi desenlerinden ne kadar 48
Şekil 4.21 DEF üçgeninin oluşturulması. 49
Şekil 4.22 Yüklenme fazı için sağ bacağın öne eğilmesi deseninin ters kinematik 50
Şekil 4.23 Yüklenme fazı için sol bacağın kalçasının eklem açısının 0° kabul edilmesi. 51
Şekil 4.24 Sol bacağın eklem açılarının bulunması için üçgen oluşturulması. 52
Şekil 4.25 Yüklenme fazı için sol bacağın eklem açılarının bulunması. 54
Şekil 4.26 Sağ ve sol bacak desenlerinden robotun SMN şartının sağlayıp 54
Şekil 4.27 Basma ortası fazı için sağ bacak kalça ve diz açı değerlerinin atanması. 56
Şekil 4.28 Basma ortası fazı için robotun bel yüksekliğinin belirlenmesi. 57
Şekil 4.29 Basma ortası fazında sol kalça açısının 36° olarak belirlenmesi. 57
Şekil 4.30 Sol bacak için ters kinematik gösterimi. 58
Şekil 4.31 Basma ortası fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları. 62
Şekil 4.32 Basma ortası fazında olası döndürme moment noktaları 62
Şekil 4.33 Basma sonu fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları. 64
Şekil 4.34 Salınım öncesi fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları. 65
Şekil 4.35 Salınım başlangıcı fazı sol bacak kalça ve diz açı değerlerinin atanması. 66
Şekil 4.36 Salınım başlangıcı fazı için robotun bel yüksekliğinin belirlenmesi. 67
Şekil 4.37 Salınım başlangıcı fazında sol kalça açısının 25° olarak belirlenmesi. 68
Şekil 4.38 Sağ bacak için ters kinematik gösterimi. 68
Şekil 4.39 Salınım başlangıcı fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları. 72
Şekil 4.40 Salınım başlangıcı fazında olası döndürme moment noktaları 72

Şekil 4.41 Salınım ortası fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları. 74
Şekil 4.42 Salınım ortası fazında olası döndürme moment noktaları. 74
Şekil 4.43 Salınım sonu fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları. 76
Şekil 4.44 Sağ bacağın bir yürüme döngüsü için üretilmiş yürüme deseni. 76
Şekil 4.45 Robotun ön düzleminde moment hesabı 77
Şekil 4.46 Sağ kalça açı grafiği 78
Şekil 4.47 Sol kalça açı grafiği 79
Şekil 4.48 Sağ diz açı grafiği 79
Şekil 4.49 Sol diz açı grafiği 80
Şekil 4.50 Sağ bilek açı grafiği 80
Şekil 4.51 Sol bilek açı grafiği 81
Şekil 4.52 Yürüme modellemesi sonucu elde edilen değerlerin robota uygulanması. ... 81
Şekil 5.1 Yürüme analizi grafiklerinin karşılaştırılması. 83
Şekil 5.2 Yürüme döngüsündeki fazların oranlarının altın oran algoritması için Iosa ... 84
Şekil 5.3 Üretilen yürüme deseni modellemesi ile robotun yürüyüşünün karşılaştırılması. 85

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Dünyaca ünlü robotların teknik özelliklerinin karşılaştırılması. 7
Tablo 3.1 Dynamixel MX-64T servo motorun teknik özellikleri 27
Tablo 3.2 OpenCM.9.04 kontrol kartının teknik özellikleri 29
Tablo 3.3 OpenCM 485 - Genişleme kartının teknik özellikleri. 30
Tablo 3.4 Lipo bataryanın teknik özellikleri. 31

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Konu

Robotlar, istenilen görevleri yerine getirmek için, çok fonksiyonlu manipülatörden dizayn edilmiş, içinde elektrik, elektronik, bilgisayar, mikrodenetleyici, algılayıcılar ve mekanik aksamlar bulunan ve farklı yazılımlar ile programlanmış mekatronik sistemlerdir [1].

Özellikle son 30 yılda bilgisayar, elektronik ve makine teknolojileri ile mikrodenetleyicili cihaz kontrol tekniğindeki hızlı gelişmeler, robot teknolojisinin çok hızlı bir şekilde gelişmesine neden olmuştur. Robot teknolojisindeki bu hızlı değişim, endüstride, tarımda, sanayide, eğitimde ve tıp alanlarındaki insan işgücünün yerine geçmiştir. Gelişen robot teknolojiyle birlikte araştırmacılar ve bilim insanları, iki ayaklı yürüyen robotların da geliştirilmesine çok önem vermişlerdir. Dahası, çok ünlü teknoloji, elektronik ve savunma şirketleri bile iki ayaklı robotların geliştirilmesine katkı sağlayıp destek olmuşlar ve birbirleriyle bu alanda da rekabete girmişlerdir. Bu şirketlere, otomobil üreticilerinden Honda [2], Toyota [3], elektronikten Sony [4] ve savunma sektöründen Boston Dynamics [5] örnek verilebilir.

İki ayaklı yürüyen robotlar veya insansı (humanoid) robotlar dizayn edilirken doğadaki canlılardan ve iki ayak üzerinde yürüyen tek memeli olan insandan ilham alınmıştır [6]. Robot için yürüme şartı, aynı insan yürüme şartlarına benzer. Yani, bir yerden başka bir yere gitmek için en az bir ayağı yerde kalmalıdır. Bu nedenle, bir robot için iki ayak üzerinde dengede ve yere düşmeden yürümek çok zordur. Çünkü robot yürürken tek destek fazına geçtiği anda gerek üzerindeki manipülatörlerin hareketinden gerek dışardan gelecek bozucu kuvvetlerden dolayı yere düşmek isteyecektir. Ayrıca, iki ayaklı yürüyen robotun üzerindeki en az 12 adet DoF'un birbirleriyle bir harmoni içinde

çalışması da gerekmektedir. Çünkü doğadaki insan yürüyüşü, göze hoş gelen insan bacak ve kollarının ritmik hareketlerinden oluşmaktadır. Bu nedenle, iki ayaklı yürüyen robotlar için yürüme deseni modellenmesinde karmaşık matematik ve fizik kanunlarından yararlanılması gerekmektedir.

İşte bu teknolojik ve bilimsel gelişmeler sayesinde, doğadaki iki ayak üzerinde yürüyen insan yürüyüşünden esinlenerek geliştirilen iki ayaklı yürüyen robotların dinamiğinin araştırılması, yeni yürüme desenleri modellenmesi ve robota uygulanması bu Doktora Tezi'nin konusu olacaktır.

1.2. Amaç

Bu Doktora Tezi'nde, iki ayaklı yürüyen robotların dinamiğinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. İki ayaklı robotların yürüyüşleri insan yürüyüşüne benzemesi gerekmektedir. Ayrıca, insan yürüyüşündeki göze hoş gelen harmoniyi de sağlamalıdır. Böylece, birinci amacımız insanın yürüyüşünün dinamiğini çözümlemek olacaktır. İnsan yürüyüşlerini çözümlemek içine yürüme analizleri yapılacaktır. Yapılan yürüme analizlerinden elde edilen insana ait bacak eklem açıları değerlendirilip grafikleri oluşturulacaktır. Ayrıca, göze hoş gelen harmonik yürüme matematiksel olarak formülleştirilecektir. İkinci amacımız da yürüme analizlerinden elde edilen verilerin denenmesi, gerçek insan ölçülerindeki iki ayaklı yürüyen robotta yapılacaktır. Üçüncü amacımız ise, yeni tasarladığımız 12 DoF'a sahip ve eklemlerinde akıllı servo motorlar bulunan iki ayaklı yürüyen robotumuz için robot yürüme deseni oluşturmaktır. Robota yürüme deseni oluşturmak için ise robot yürüme deseni oluşturma algoritmalarından yararlanılacaktır. Dördüncü olarak, robot için üretilen yürüme deseni formülleri açık kaynak kodlu bir derleyici ile kodları üretilecek ve üzerinde mikrodenetleyici bulunan bir elektronik karta yüklenecektir. Beşinci ve son olarak da bir mikrodenetleyici ile kontrol edilen 12 DoF'a sahip robotumuzun dengede, insan gibi göze hoş gelen bir harmoni içinde, yürümesinin sağlanması amaçlanmış olup, ayrıca sonuçları deneysel ve gözle kontrol edilecektir.

1.3. Kapsam

Bu doktora tezinin konusunu oluşturan iki ayaklı yürüyen robot dinamiğinin deneysel ve teorik araştırılması kapsamının düzenlenmesi, 5 bölüm olarak hazırlanmıştır.

Bölüm 2'de iki ayaklı robotların tarihsel sürecindeki gelişmelerine, uygulamalarına ve teorisine yapılan katkılar ve bilimsel çalışmalar araştırılmıştır.

Bölüm 3'te, Doktora Tezi'nin konusunu oluşturan iki ayaklı robotun yapılması için, teorisi anlatılmış olup robotun dizaynında kullanılan malzemeler tanıtılmıştır.

Bölüm 4'te ise tasarımı yapılan robota programlanacak olan yürüme deseninin matematiksel modellemesi yapılmıştır.

Bölüm 5'te ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve iki ayaklı yürüyen robotun eklem açılarının grafikleri daha önce yürüme analizi yapılan çalışmalardaki grafiklerle karşılaştırılması yapılmıştır.

BÖLÜM 2

KAYNAK ARAŞTIRMASI

Robot biliminin temel kavramlarından olan ZMP (Zero Moment Point) yani SMN(Sıfır Moment Noktası), ilk defa 1969 yılında Vukobratovic ve arkadaşları tarafından tanıtıldı. Daha sonra kapsamlı olarak anlatılacak olan SMN kısaca, iki ayaklı robotun yere değdiği noktaya etkiyen tüm kuvvetlerin oluşturduğu momentlerin toplamının sıfır olma şartıdır. Böylece Vukobratovic ve arkadaşları, iki ayaklı robotun dengede kalabileceğini ilk defa matematiksel olarak modellemişlerdir [7].

Robot bilimine büyük katkılar sağlayan Waseda Üniversitesi'nde Kato'nun öncülüğünde 1966 yılından sonra robotik çalışmalar yoğun bir ivme kazanmıştır. Waseda Üniversitesi'nin yaptığı çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Robotların alt bacaklarının araştırma çalışmaları 1967 yılında Waseda Üniversitesi'nde Lower Limb Model: WL-1 ile başladı. Ancak, yürümeden ziyade alt bacaklarının hareketleri incelenmiştir [8-9].

WL-3, ilk iki ayaklı robot olup electro-hydraulic servo-actuator olarak WASEDA Üniversitesi tarafından 1969 yılında master-slave yöntemiyle kontrol edilecek şekilde yapılmıştır [8-9].

Waseda Üniversitesi'nden Ichiro Kato tarafından ilk insansı robot olan WABOT-1 1973 yılında yapılmıştır. WABOT-1'in nesneleri tanıması, konuşmaları anlayıp karşısındaki ile konuşabilmesi, iki elini kullanabilmesi ve iki bacağı üzerinde yürümesinden dolayı teknoloji ve bilim tarihinde ilk insansı robot unvanını almıştır [8-9].

WAP-1, WAP-2, WAP-3, WAP-5 WL-90R, WL-10,10R WL-10RD, WABIAN, WABIAN-RVII ve WABIAN-2LL robotları da aynı üniversite tarafından geliştirilmiştir [7, 9].

Ünlü otomotiv üreticisi Japon Honda şirketi 1986 yılından sonra iki ayaklı yürüyen robot çalışmalarına çok önem vermiştir. Asimo isimli robotunun yürüyüşündeki harmoni insan yürüyüşüne yaklaşmıştır [10].

Pasif dinamik yürüyüş kavramı, 1990 yılında ilk defa McGeer tarafından ileri sürüldü. Robotlar için insan yürüyüşü, McGeer tarafından tekerlek-sarkaç birleşimiyle formülleştirip yapay tekerleğe benzetilmiştir [11].

Yine Tad McGeer, pasif dinamik yürüyüş özelliğine sahip bacaklara diz bölümlerini ekleyerek hafif eğimli yamaçta yürümenin teorisi geliştirmiştir [12].

Arakawa ve arkadaşları tarafından 1996 yılında, genetik algoritma yöntemi kullanılarak enerji optimizasyonuna dayalı olarak off-line insan yürüme modellemesi yapılmıştır [13].

Hara ve arkadaşları tarafından 1998 yılında ilk defa, iki ayaklı yürüyen robot dinamiğindeki yanal düzlem bozulmalarını kontrol etmek için 3 boyutlu ters sarkaç yöntemi keşfedilmiştir [14].

2001 yılında Huang ve arkadaşları, insansı robot için ileri beslemeli dinamik desen üretimiyle sensörlü geri beslemeli yürüyüş modellemesini geliştirmişlerdir [15].

Kajita ve arkadaşları, 2001 yılında, 3D-LIPM yöntemini kullanarak robotun yürüme deseni modellemesi için basit bir uygulama yapmışlardır [16].

Capi ve arkadaşları, 2002 yılında robotun yürüme optimizasyonunu genetik algoritması ile yaparak yapay sinir ağlarıyla robota uygulamışlardır [17].

2002 yılında Kajita ve arkadaşları, iki ayaklı robotun 3 boyutlu çalışma uzayında gerçek zamanlı yürümesini üç boyutlu doğrusal ters sarkaç modeli (3D-LIPM) ile kontrol ettiler [18].

Kajita ve arkadaşları, 2003 yılında iki ayaklı robot yürüme deseni modellemesini ön izlemeli ZMP kullanarak gerçekleştirdiler [19].

Löffler ve arkadaşları, 2003 yılında Münih Üniversitesi'nde algılayıcılarla donatılmış dinamik yürüme özelliğine sahip insansı robot Johnnie'yi geliştirdiler [20-21].

Kudoh ve arkadaşları, 2003 yılında iki ayaklı yürüyen robot yürüyüşü modellemesi için C^2 algoritmasını önerdiler. Bu modelleme, ters sarkaç sisteminin geliştirilmiş versiyonudur [22].

Hun-ok Lim ve arkadaşları, iki ayaklı robotlar için gerilmiş diz algoritmasını 2007 yılında geliştirip robotlar için yürüme deseni modellemesi yapmışlardır [23].

2009 yılında Münih Teknik Üniversitesi'nde Lohmeier ve arkadaşları, Johnnie'den sonra insansı robot Lola'yı geliştirdiler. Lohmeier ve arkadaşları, Lola'yı insan gibi daha

hızlı yürümesini gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. Lola, geleneksel iki ayaklı robotlardan farklı olarak, bir bacağında 7 DoF'a sahiptir [24-25].

Boston Dynamics firması, Atlas ve Petman isimli iki ayaklı yürüyen robotları geliştirmiştir [5]. Petman, özellikle tehlikeli kimyasal çalışmalara müdahale etmek için yapılmıştır [26]. Atlas'ın denge dinamiği kontrolü çok iyi geliştirilmiştir. Dışarıdan yapılan bozucu etkileri başarılı bir şekilde telafi etmektedir.

Türkiye'de Erbatur ve arkadaşları tarafından 2011 yılında Sabancı Üniversitesi'nde 29 Dof'a sahip SURALP isimli insansı robot geliştirilmiştir [27].

Rokbani ve arkadaşları tarafından 2012 yılında iki ayaklı robotun yürüme deseni üretimi modellemesi, ters kinematik-parçacık sürüsü optimizasyonu yöntemiyle geliştirilmiştir [28].

İki ayaklı yürüyen robotun hareketlerinin simülasyonundaki hız kontrolü, bulanık mantık yöntemiyle Ankarali tarafından 2012 yılında yapılmıştır [29].

2012 yılında Hernández-Santos ve arkadaşları, iki ayaklı robota ayak parmakları görevini görecek şekilde bir servo motor ilave etmişlerdir. Bu ayak parmaklarının robotun yürümesine sağladığı avantajların benzetimini yapmışlardır [30].

An ve arkadaşları tarafından 2013 yılında, alçalan eğimli yüzeyde yürüyen iki ayaklı robotun yürüme deseni üretimi modellemesi yapılmıştır [31].

2013 yılında Wee ve arkadaşları, robotun ayaklarının altındaki kuvvet sensörlerinden geri besleme alarak robotun dengesini kontrol etmişlerdir [32].

Rong ve arkadaşları geleneksel robotların eklemlerinde kullanılan servo motorlar yerine hidrolik aktüatörler kullanarak robotun yürüme benzetimini 2013 yılında yapmışlardır [33].

2013 yılında Lapeyre ve arkadaşları tarafından Poppy isimli robotun bacakları üç boyutlu yazıcıyla üretilmiştir. Robotun bacağı üretilirken diğer robotlardan farklı olarak insan bacak anatomisinden etkilenilmiş ve kalça kemiğindeki açının benzetimi yapılarak robotun yürüme modellemesi oluşturulmuştur [34].

DARwIn-OP robotunun eklemleri için desen üretimi modellemesi, Kim tarafından online yöntemiyle gerçekleştirilmiştir [35].

He ve arkadaşları, 2014 yılında iki ayaklı yürüyen robot için gerçek zamanlı yürüme deseni modellemesini hibrit CPG-ZMP algoritmaları gerçekleştirdiler [36].

Schwienbacher, 2014 yılında mekatronik sistemlerin modellemesine özgü küçük kinematik döngülerle baş etmek için, iki ayaklı yürüyen robotlarda O(n)-algoritmasını kullanmıştır [37].

Omer ve arkadaşları ise 2014 yılında, iki ayaklı robotun yürüme hareketlerinin araştırılmasını daha düşük yerçekimi ivmesine göre yaptılar. Robotun dünya dışındaki yerlerde, örneğin ayda yürürken nasıl davranacağını araştırdılar [38].

Ayrıca Japon otomotiv üreticisi Honda firması, 1986 yılında itibaren insansı robot geliştirmeye devam etmiştir. Bu robotlar sırasıyla, E0, E1, E2, E3, E4, E5, E6, P1, P2,P3 ve Asimo modelleridir. Bunların en popüleri olan Asimo'nun yürüyüşündeki harmoni neredeyse insan yürüyüşüne yaklaşmıştır [2, 39-41].

Aşağıdaki tabloda ise dünyadaki en popüler insansı ve iki ayaklı robotların DoF, boy ve ağırlık karşılaştırmaları yapılmıştır.

Tablo 2.1 Dünyaca ünlü robotların teknik özelliklerinin karşılaştırılması.

Robot Adı	Grup ve Ülke	DoF	Bacak(DoF)	Boyu	Ağırlığı	Yazar
Wabian-2R	Uni. Waseda, Japan	41	6+1p	1,5	65	Ogura [42]
H6	Uni. Tokyo, Japan	35	7	1,3	55	Kuffner [43]
H7	Uni. Tokyo, Japan	30	7	1,5	57	Chestnutt [44], Nishiwaki [45]
P2	Honda, Japan	30	6	1,8	210	Hirai [39]
P3	Honda, Japan	30	6	1,6	118	Hirai [40]
Asimo	Honda, Japan	26	6	1,2	52	Sakagami [41]
Asimo (research)	Honda, Japan	34	6	1,3	54	Chestnutt [46]
HRP-2	AIST, Japan	30	6	1,539	58	Kaneko [47]
HRP-2L	AIST, Japan	12	6	1,4	58	Kaneko [48]
HRP-3	AIST, Japan	42	6	1,606	68	Kanehira [49] Kaneko [50]
HRP-4	AIST, Japan	34	6	1,514	39	Kaneko [51]

SDR-4X (QRIO)	Sony, Japan	38	6	0,6	6,5	Fujita [52]
Partner Robots	Toyota, Japan	31	6	1,4	40	Soya [53]
KHR-2	Kaist, Korea	41	6	1,2	56	Kim [54]
KHR-3 (HUBO)	Kaist, Korea	41	6	1,3	55	Park [55]
BHR-2	Uni. Beijing, China	32	6	1,6	63	Peng [56]
THBIP-I	Uni. Beijing, China	32	6	1,7	130	Zhao [57]
Johnnie	TU Munich, Germany	17	6	1,8	49	Loffler [58]
Lola	TU Munich, Germany	22	7	1,8	55	Lohmeier [59]
BARt-UH	Uni. Hanover, Germany	13	3	1,3	25	Albert [60]
Lisa	Uni. Hanover, Germany	12	6	1,3	38	Hofschulte [61]
BIP	INRIA, France	15	6	1,8	105	Bourgeot [62]
Rh-1	Uni. Madrid, Spain	21	6	1,4	40	Arbulu [63]

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

İki ayaklı yürüyen bir robotu insan gibi yürütülebilmek için ilk önce doğadaki insanın yürüme hareketinin çok iyi çözümlenmesi gerekir. Çünkü, insan yürüyüşünün iyice çözümlenmesiyle iki ayaklı yürüyen robotun yürüme kontrol algoritması ortaya çıkarılmış olur. Bu bağlamda ilk önce doğadaki insanın yürümesi araştırılmıştır. Elde edilen bilgilerle robotumuzda kullanılması gereken matematiksel ve fiziksel yöntemler belirlenmiştir. Daha sonra ise robotumuzu tasarlamak için gerekli olan elektrik, elektronik ve mekanik cihazlar ile birlikte kullanılacak bilgisayar programları tanıtılmıştır.

3.1. Yürüme Nedir?

Yürüme, kara memelilerinin bir yerden başka bir yere hareket etmesi eylemidir. Genel anlamda hareket etmek olarak ta ifade edilebilir. Ayrıca, yürüyüşün tarzı veya davranışı olarak da tanımlanır [64].

3.2. İnsan Nasıl Yürür?

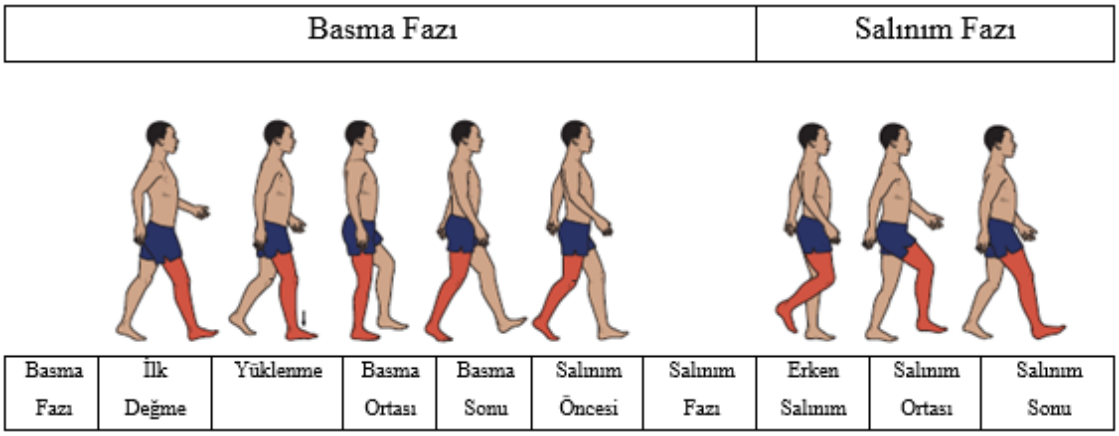
İnsan, diğer kara memelileri gibi bir yerden başka bir yere hareketini yürüme yöntemiyle sağlar. Bu nedenle; insanın $x - z$ ekseninde bir yerden bir yere gidebilmesi için, iki ayak üzerinde dik olarak dengede kalmak şartıyla ilerleyip yer değiştirmesine yürüme denir. Çünkü, sadece kara memelileri içindeki insan, iki ayak üzerinde yürüme yeteneğine sahiptir. İnsanlık tarihi boyunca kanıt olarak bulunmuş en eski insan iskeleti olan "Lucy"'nin yaklaşık 3 milyon yaşında olduğu ve dik durabildiği bilim insanlarınca tespit edilmiştir. Ayrıca, diğer kara memelilerinin yürümesinden farklı olarak, insanın bir yerden bir yere hareket ederken destek ve ilerlemek için iki bacağın birlikte kullanılmasıyla birlikte en az bir ayağı, her zaman yer ile temas halindedir [6, 65].

Ayrıca, insanın ağırlık merkezini ileriye doğru hareket ettirmesini sağlayan kol ve bacaklardaki eklemlerin tekrarlı, uyumlu ve değişen hareketlerin tamamına insanın normal yürüme hareketi denir [6].

3.3. Yürüme Döngüsü

Yürüme döngüsü, insanın yürümesi esnasında bir ayaktaki topuğun yere ilk değdiği andan itibaren aynı ayaktaki topuğun tekrar yere değmesi anına kadar bacak eklemlerindeki ritmik hareketlerin oluşması için geçen zamana denir [6]. Yürüme esnasında bu döngü, bir düzen içinde devamlı tekrarlanır. Şayet sağ bacağın yürüme döngüsünü dikkate alacaksak, ilk defa sağ bacağın topuğu yere değer ve döngü sağ bacağın topuğu tekrar yere değene kadar devam eder. Sol bacak ise her ne kadar sağ bacağın hareketlerinin aynısını yapsa da, yarım döngü faz farkı ile geriden gelir [66].

Bir bacağın yürüme döngüsü iki faza ayrılır. Bunlar, basma ve salınım fazlarıdır. Duruş ve salınım fazları, çeşitli yöntemlerle bir kez daha bölünmüştür. Ancak, bu alt bölünmelerin terminolojisi zamanla değiştirilmiştir. Bu nedenle farklı kaynaklarda önceki terminoloji ile karşılaşılabilir. Ancak, bu çalışmada Jacquelin Perry tarafından geliştirilen Şekil 3.1'deki Rancho Los Amigos (RLA) terminolojisi kullanılmıştır [64]



Şekil 3.1 Yürüme döngüsü ve fazları [64].

Bu fazların dağılımı;

1- İlk değme,

2- Yüklenme,

3- Basma ortası,

4- Basma sonu,

5- Salınım öncesi,

salınım fazı ise

6- Erken salınım,

7- Salınım ortası,

8- Salınım sonu olarak alt gruplara ayrılır.

İnsan yürüme döngüsünde zaman dağılımı ve her bir yürüme fazı sırasında gereken nispi süreler aşağıda gösterilmiştir.

Basma fazı, yürüme döngüsünün % 60'ını,

Salınma fazı, yürüme döngüsünün % 40'ını,

Çift destek fazı, yürüme döngüsünün % 11'ini oluşturur.

Yürüme hızının yüksek olması, salınım fazında geçen sürenin nispi artışını ifade eder. Bunun yanı sıra hızın az olması, basma fazında geçen sürenin nispi artışı anlamına gelir.

3.4. Yürüme Analizi

Yürüme analizi, tıp alanında insanlardaki yürüme hastalıklarının tanısında kullanılmaktadır. İlk önce Garrison (1929) tarafından yapılmıştır. Daha sonra Bresler & Frankel (1950) ve Steindler (1953) tarafından geliştirilmiş, Sutherland (2001,2002,2005) tarafından ise mükemmelleştirilmiştir [66].

İnsan gözü, gözü saniyenin 1/12'sinden (83 ms) daha küçük hareketleri göremez ve bunun için farklı yöntem ve teknolojik cihazlardan yararlanılır [67]. Bundan dolayı yürüme analizi esnasında gözlemler için;

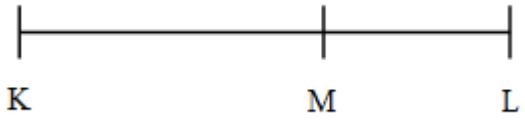
- Video kamera ile yapılmış kayıtların bilgisayarla çözümlenmesi,
- Kronofotografi,
- Kuvvet algılayıcı platformlar,
- Dinamik elektromyografi,
- Kinematik analiz,
- Kinetik analiz,
- Enerji ölçümleri yöntem ve teknolojik cihazlarından yararlanılır [68].

Bu Doktora Tezi'nde de, katılımcıların yürüme analizini yapmak ve katılımcıların görüntülerini elde etmek için mobil telefon video kamerası kullanılmış olup bu görüntülerdeki eklem açılarını çözümlemek içinde bilgisayar programı kullanılmıştır.

3.5. Altın Oran Algoritması

Bu çalışmadaki iki ayaklı yürüyen robotun yürüyüşünün göze hoş gelmesi, yani eklem hareketlerinin bir harmoni içinde hareket etmesi amaçlanmıştır. Ancak, eklem hareketlerinin ve harmoninin modellenebilmesi için bir matematiksel katsayı veya matematiksel oranın tespit edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla doğada, evrende, sanatsal yapılarda, matematikte, mimaride, müzikte göze ve kulağa hoş gelen ve harmoni içindeki her şeyde bir matematiksel oranın olduğu tespit edilmiştir. Bu oranın adı "Altın Oran" dır.

Altın Oran, ilk defa M.Ö 300 de Yunan Matematikçi Euclide tarafından "Elementler" adlı kitabında gösterilmiştir. Euclide Teoremine göre, şayet Şekil 3.2'deki gibi bir KL doğrusu, KM parçası, ML parçasından büyük olmak şartıyla M noktasından ikiye bölünürse KM ile ML arasındaki Φ oranı ortaya çıkar.



Şekil 3.2 Altın oran ile ikiye bölünmüş KL doğrusu.

$$\Phi = \frac{KL}{KM} = \frac{KM+ML}{KM} = 1 + \frac{ML}{KM} = 1 + \frac{1}{\frac{KM}{ML}} = 1 + \frac{1}{\Phi} \tag{3.1}$$

sonra, Φ ile ikinci dereceden bir eşitlik elde edilir,

$$\Phi = \frac{\Phi+1}{\Phi} \tag{3.2}$$

$$\Phi^2 - \Phi - 1 = 0. \tag{3.3}$$

Bu eşitliğin çözümü altın orandır.

$$\Phi = \frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{5}\right). \tag{3.4}$$

Böylece altın oran,

$\Phi = 1.6180339887498948482045868343656381177203091 80$ .... olarak bulunur.

Ancak, pratikte yaklaşık olarak $\Phi = 1.618$ veya $\Phi = 1.62$ kullanılır.

3.6. Altın Oran Algoritmasıyla Yürüme Periyodundaki Alt Fazların Bulunması

Yeni geliştirilen iki ayaklı yürüyen robotların yürüyüşleri gittikçe insan yürüyüşüne benzemeye başlamıştır. Ancak, iki ayaklı yürüyen robotların bir bacağında en az 6 DoF olmak üzere genellikle 12 adet eklem vardır. Bu eklemlerin insan yürüyüşündeki harmoniyi oluşturacak şekilde iki ayaklı yürüyen robota uygulanması çok zordur. Bu nedenle, araştırmacılar iki ayaklı yürüyen robotların hareketleri için bugüne kadar birçok yürüme deseni modelleme algoritmaları kullanmışlardır. Bunların en önemlileri, SMN, statik yürüme, dinamik yürüme, hibrit, ters sarkaç, genetik vb. algoritmalardır. Ancak, iki ayaklı yürüyen robotlarının yürüyüşleri insan yürüyüşündeki göze hoş gelen harmoniyi henüz sağlayamamıştır.

Doğada, sanatta ve mimaride göze hoş gelen fiziksel güzellikler incelendiğinde matematiksel olarak ifade edilen altın orandan geldiği bilinmektedir. Böylece, bu oranın insan yürüyüşünde de harmoni oluşturacağı hipotezi, ilk defa Iosa ve arkadaşları tarafından 2013 yılında önerilmiştir [69]. Bu teoriye göre, insan yürüyüş döngüsündeki basma ve salınım fazı arasında matematikte altın oran olarak ifade edilen Φ = 1.618 değeri vardır. Böylece Φ ile: yürüme döngüsü içindeki fazlar arasında birbirleriyle ilişkili olan matematiksel formüller yaratılır.

$$\Phi = \frac{basma\ fazı}{salınım\ fazı} = \frac{\text{yürüme döngüsü}}{basma\ fazı} \tag{3.5}$$

$$\frac{1}{\Phi} = \Phi - 1 = \frac{salınım\ fazı}{basma\ fazı} - 1 = \frac{\text{basma fazı} - \text{salınım fazı}}{salınım\ fazı} \tag{3.6}$$

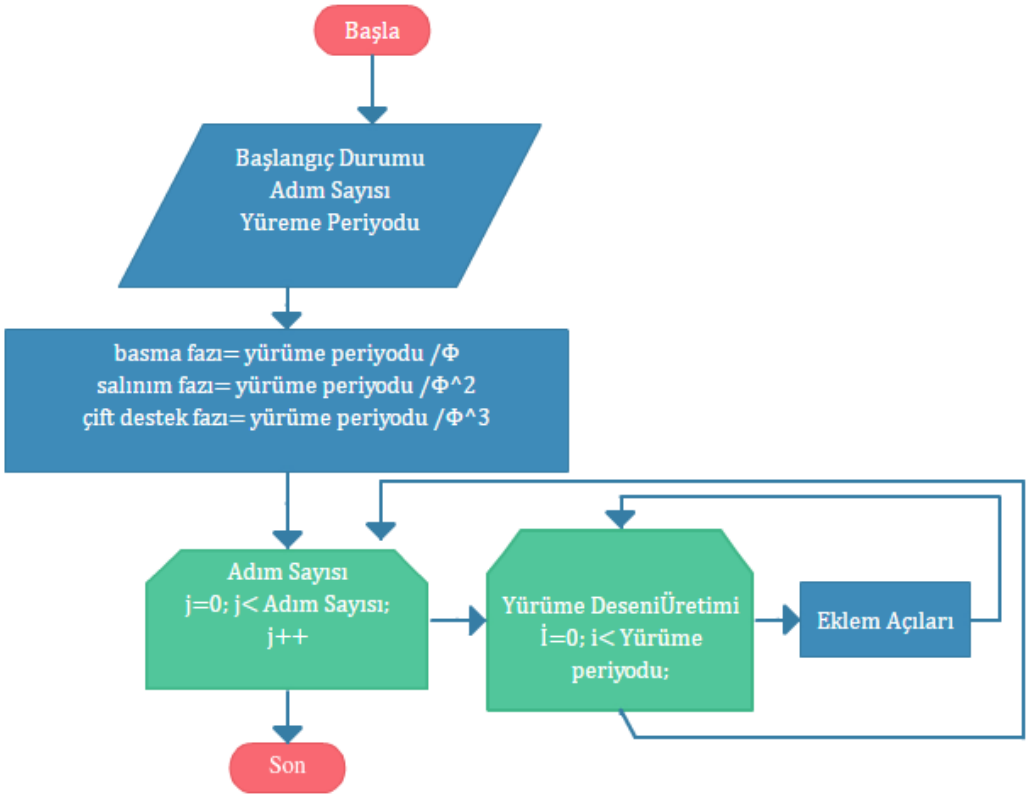
$$\Phi = \frac{basma\ fazı}{salınım\ fazı} = \frac{\text{yürüme döngüsü}}{basma\ fazı} = \frac{\text{salınım fazı}}{çift\ destek\ fazı} \tag{3.7}$$

$$basma\ fazı = \frac{yürüme\ döngüsü}{\Phi} \tag{3.8}$$

$$salınım\ fazı = \frac{yürüme\ döngüsü}{\Phi^2} \tag{3.9}$$

$$çift\ destek\ fazı = \frac{yürüme\ döngüsü}{\Phi^3} \tag{3.10}$$

İşte bu teoriye istinaden, bu çalışmadaki iki ayaklı yürüyen robotumuzun yürüme döngüsündeki basma, salınım ve çift destek fazları arasındaki oranları, Şekil 3.3'teki gibi altın oran algoritmasıyla belirlenmiştir.

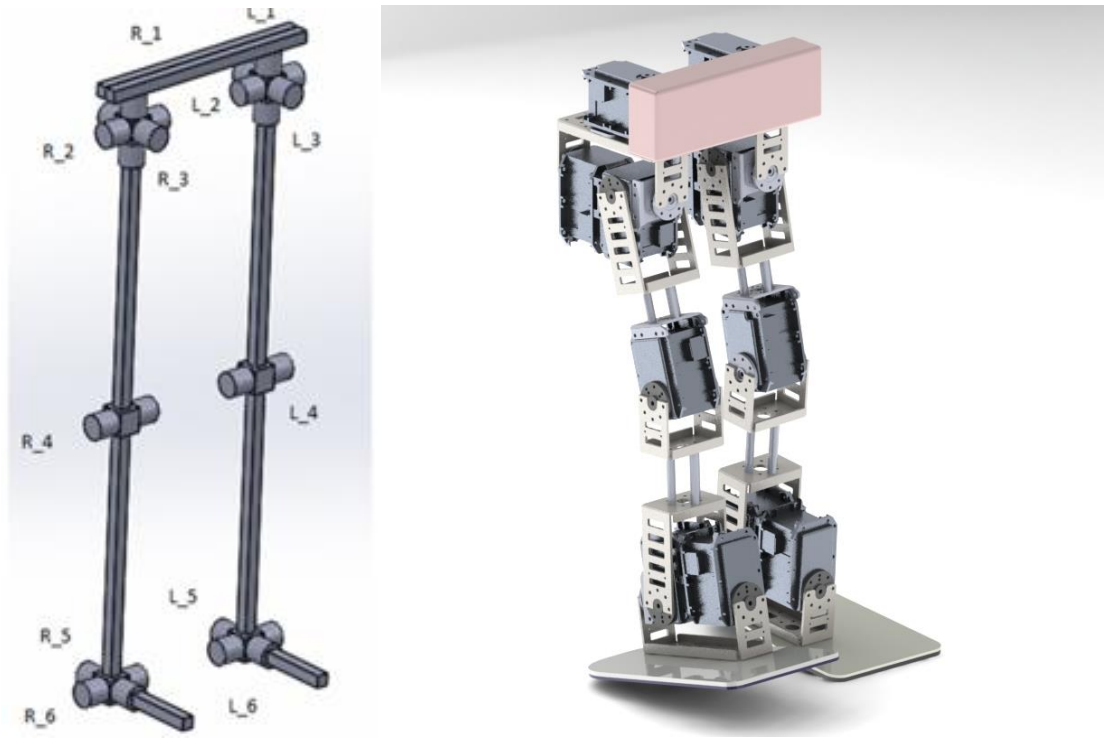


Şekil 3.3 Bu çalışma için önerilen altın oran algoritması

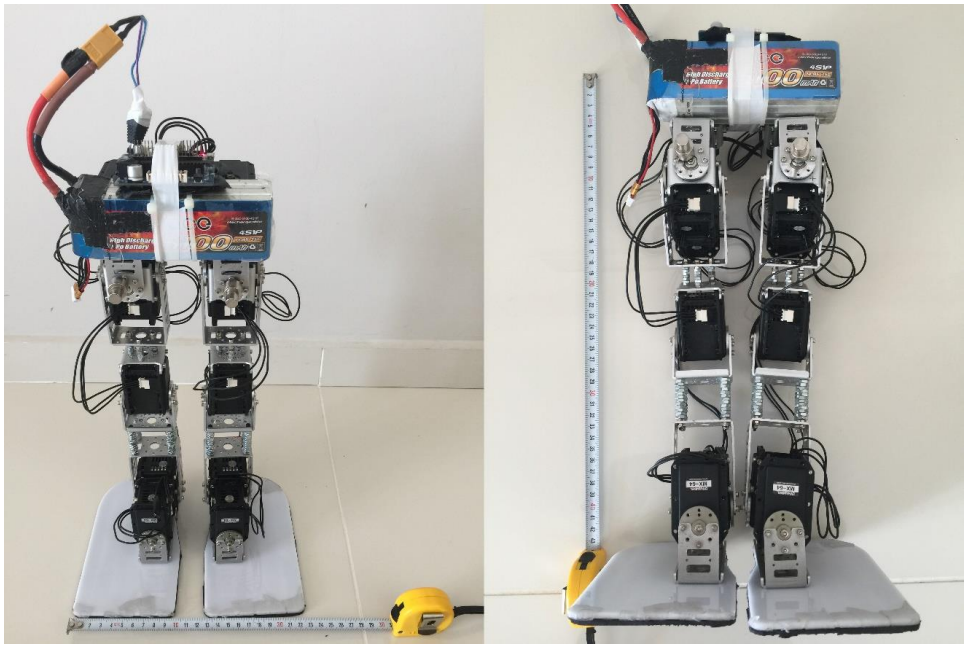
3.7. İki Ayaklı Yürüyen Robot Kinematiği

İki ayaklı bir robot, insan gibi yürüyebilmesi için en az 12 DoF'a sahip olmalıdır [70]. Hemen hemen dizayn edilmiş tüm iki ayaklı yürüyen robotların bir bacağında 6 DoF vardır. Bunlar, kalçada 3 DoF, dizde 1 DoF ve ayak bileğinde 2 DoF olarak bulunurlar [24].

Bu Doktora Tezi çalışması için yapılan iki ayaklı yürüyen robotun eklem ve katı modellemesi, Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bu benzetime göre, 12 DoF'a sahip iki ayaklı robot montajı yapılmıştır. Bir bacağında 6 DoF vardır. Bunlar, 3 DoF kalçada, 1 DoF dizde ve 2 DoF'ta bilektedir. Geliştirilen robotun yüksekliği 0,45 m, genişliği de 0,14 m'dir. Bataryasının ağırlığı, 0,51 kg olmakla beraber toplamda 3,06 kg'dır.



Şekil 3.4 Bu çalışma için yapılan robotun eklem ve katı modellemesi.



Şekil 3.5 Montajı tamamlanmış iki ayaklı yürüyen robotun önden görünümü.



Şekil 3.6 Montajı tamamlanmış iki ayaklı yürüyen robotun yandan görünümü.

3.8. İki Ayaklı Yürüyen Robotlarda Yürüme Yöntemleri

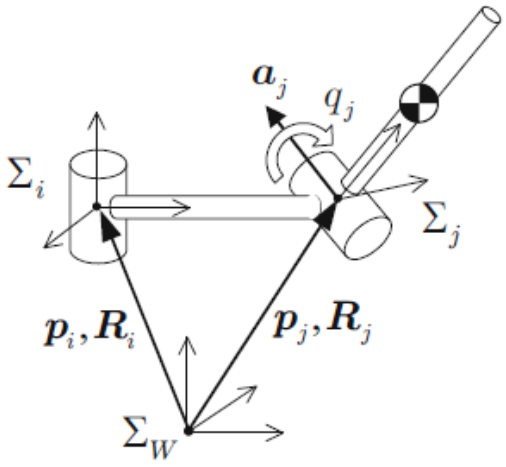
İki ayaklı robotlardaki yürüyüş dengesi, iki şekilde gruplandırılmıştır. Bunlar statik yürüme ve dinamik yürümedir.

Statik yürümenin en önemli özelliği, robot yürürken dengesini korumaktadır. Böylece, dışarıdan bozucu bir kuvvet uygulanmadıkça devrilmemektedir. Statik yürümenin en çok bilinen yöntemi, robotun ağırlık merkezi (CoM) daima robotun destek çokgeninin içinde kalmasına dayanmaktadır. Robotun dengede kalabilmesi için ağırlık merkezinin devamlı destek çokgeni içinde kalması gerektiğinden adım uzunluğuna sınırlama getirilmektedir. Bu nedenle, statik yürüme iki ayaklı yürüyen bir robot için en önemli dezavantajdır [14, 71-72]. Statik yürüme iki ayaklı robotlara kolay uygulanabilir ama robotun hızı yavaş olur.

İki ayaklı robotun dinamik yürümesinde ise robota dışarıdan bozucu bir kuvvet geldiğinde, robot dengesini devam ettirebilmesi için kendi eklem hareketlerinin dinamik özelliklerini kullanır. İki ayaklı robotlarda dinamik yürüme hareketinin kontrolü çok zordur. Dinamik yürümenin en önemli avantajı; robot daha yüksek hızla yürüyebilmektedir [73].

3.9. Robotun Eklem Açılarının Hesaplanması İçin İleri Kinematik Yönteminin Kullanılması

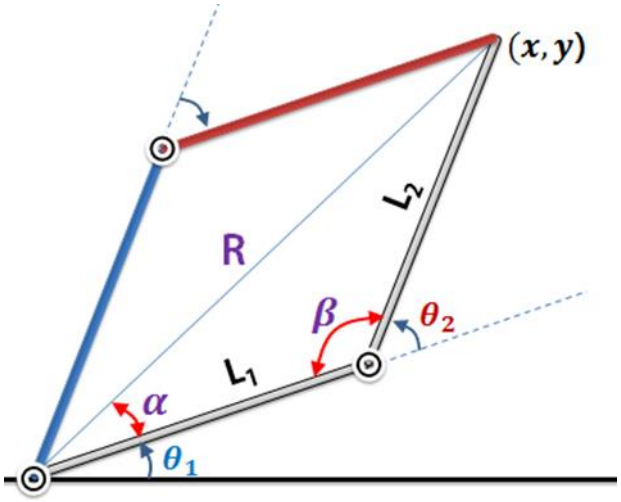
Bir robotun eklem açıları bilindiğinde veya açılar için değer verildiği zaman, robotun çalışma uzayındaki uç işlevcisinin konumu, açısı ve yönelimi ileri kinematik yöntemiyle bulunur [14].



Şekil 3.7 İleri kinematik yönteminin gösterilmesi [14].

3.10. Eklem Açılarının Hesaplanması için Ters Kinematik Yönteminin Kullanılması

Bir robotun çalışma uzayındaki kolunun veya ayağının, ana çerçeveye göre uç noktası, koordinatlarının değerleri biliniyorsa, sahip olduğu eklem açılarının hesaplanması yöntemine ters kinematik denir. Sahip olduğu eklemlerin yapısı nedeniyle doğrusal olmayan denklemler içerir. Bu nedenle, ileri kinematiğe göre çözümü daha zordur. Dönel eklemlerin sayısı ne kadar fazla olursa eklem açılarının değerlerini bulmak o kadar zorlaşır. Dahası, aynı koordinat değerine erişebilen robot bacağının ucu için çözüm kümesinde farklı eklem açıları matematiksel olarak bulunabilir. Sonuç olarak, matematiksel çözüm ile fiziksel çözüm arasındaki uyuşmazlık ters kinematik çözümlerindeki dezavantajların başında gelir.



Şekil 3.8 Ters kinematik yönteminin gösterilmesi.

Bu çalışmadaki ters kinematik hesaplamalarında kullanılacak Şekil 3.8'deki gibi geometrik çözüm yaklaşımı, robot bacağının uzaysal geometrisinin ayrıştırılarak çözülmesine dayalıdır. Doğrusal olmayan sonuçlar çıkmaması için robot bacağı sadeleştirilerek iki eklemli olarak çözümü varsayılacaktır [14, 74-75].

$$x_1 = L_1 cos(\theta_1) \tag{3.11}$$

$$z_1 = L_1 sin(\theta_1) \tag{3.12}$$

$$x_2 = x_1 + L_2 cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{3.13}$$

$$z_2 = z_2 + L_2 sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{3.14}$$

Cosinus Teoreminden;

$$C^2 = A^2 + B^2 - 2AB cos(\theta) \tag{3.15}$$

$$A = L_1 \tag{3.16}$$

$$B = L_2 \tag{3.17}$$

$$C = R = \sqrt{x^2 + z^2} \tag{3.18}$$

$$R^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2cos(\beta) \tag{3.19}$$

$$\beta = cos^{-1}\left(\frac{R^2 - L_1^2 - L_2^2}{-2L_1L_2}\right) \tag{3.20}$$

$$\theta_2 = 180 - \beta \tag{3.21}$$

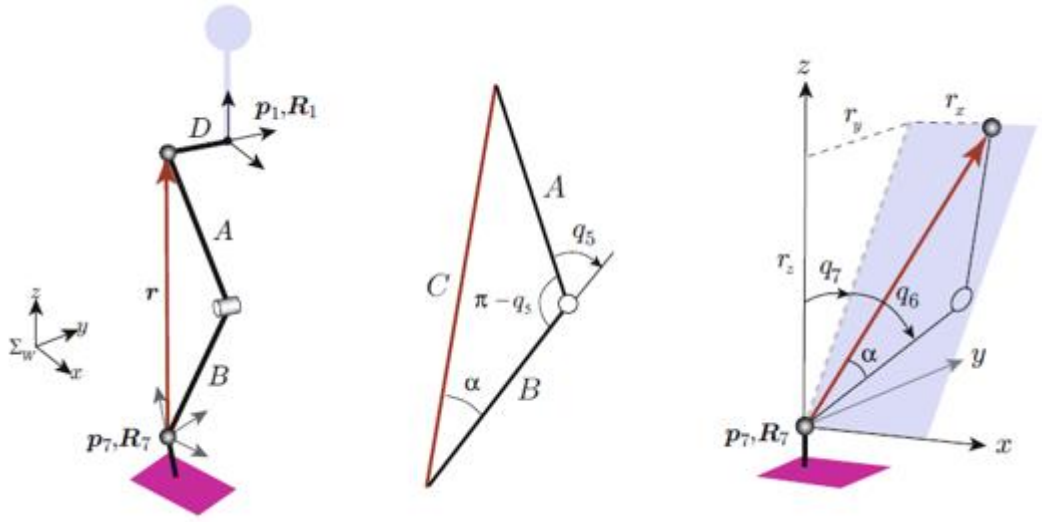
$$tan(\gamma) = \frac{z}{x} \tag{3.22}$$

$$\gamma = tan^{-1}\left(\frac{z}{x}\right) \tag{3.23}$$

$$sin(\alpha) = \frac{L_2 sin(\theta_2)}{R} \tag{3.24}$$

$$\alpha = sin^{-1}\left(\frac{L_2 sin(\theta_2)}{R}\right) \tag{3.25}$$

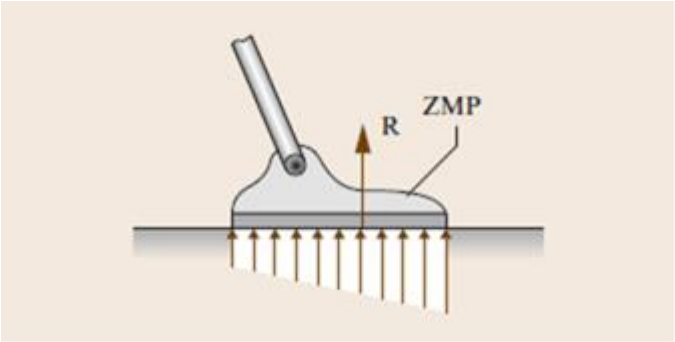
$$\theta_1 = \gamma - \alpha \tag{3.26}$$



Şekil 3.9 Ters kinematik yönteminin robota uygulanmasının gösterilmesi [14].

3.11. Sıfır Moment Noktası

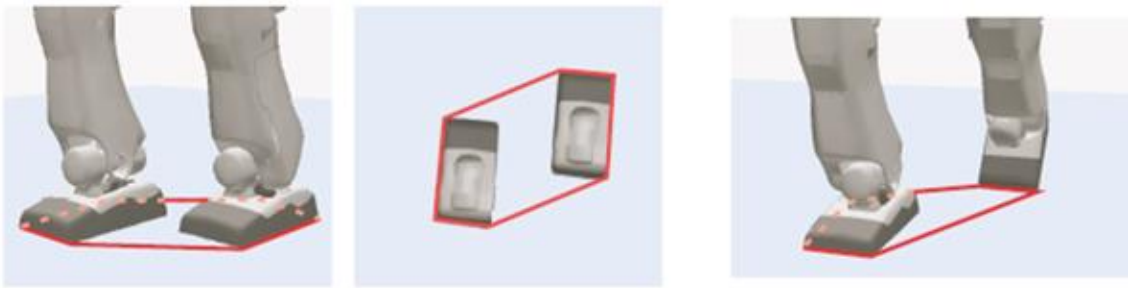
Sıfır - Moment - Noktası veya SMN kavramı, uluslararası bilimsel yazılarda ZMP veya Zero-Moment-Point olarak ifade edilmektedir. SMN kavramı, ilk defa Vukobratovic tarafından 1969 yılında insansı robotların kontrolünde kullanılmak için tanımlanmıştır [7].



Şekil 3.10 Sıfır moment noktasının orijinal gösterimi (SMN) [76].

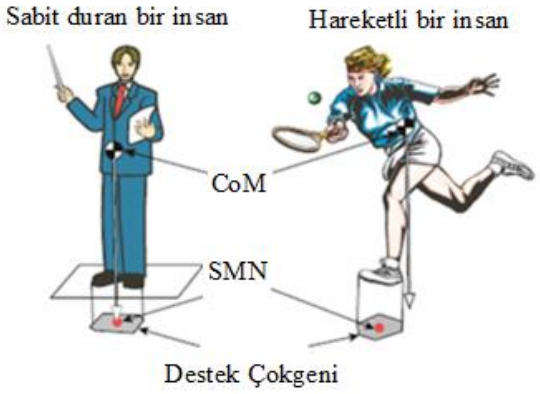
Şekil 3.10'de, bir ayağın altındaki kuvvet dağılım örneği verilmiştir. Ayağın altına etkiyen tüm kuvvetler aynı yönlü olduğu için ayak sınırları içindeki bir noktada olması koşuluyla, bu kuvvetler R bileşke kuvveti olarak sadeleştirilebilir. Böylece ayağa etkiyen bileşke kuvvet, R noktası sıfır-moment noktası veya SMN olarak gösterilir [76].

SMN ile ilgili diğer bir kavramda destek çokgenidir. Şekil 3.11 göz önüne alınırsa, robotun yere değdiği tüm noktaları da kapsayan bir esnek çokgen ile bir alan oluşturulur. Buna robotun destek çokgeni adı verilir. Matematiksel olarak destek çokgeni, dışbükey bir alan olarak tanımlanmıştır. Bu alan, en küçük dışbükeyin tüm temas noktalarını içerecek şekilde belirtilmiştir [76].

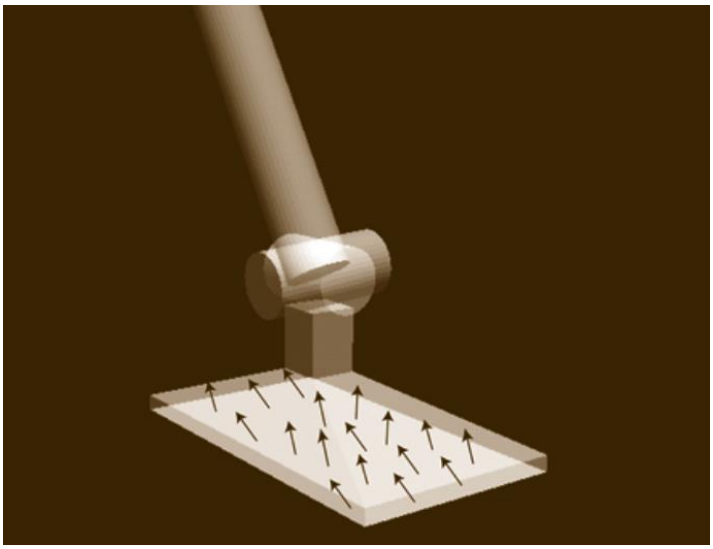


Şekil 3.11 İki ayaklı yürüyen robotta destek çokgeni [14].

Vukovratović, SMN'nin daima ayak sınırları içerisindeki bir nokta da kalması gerektiğini belirtmiştir. Bunu daha somut bir şekilde açıklamak için, Şekil 3.12'deki bir insan, zemin üzerinde dururken ağırlık merkezi (CoM) ile SMN ve destek çokgeni arasındaki ilişki dikkate alınmıştır. Aynı zamanda bu nokta, CoM'un yere doğru izdüşümü noktasıdır. Şekil 3.12'deki insan zemin üzerinde ayakta durduğu zaman SMN CoM'un yerdeki izdüşümü ile çakışır. Böyle bir durumda insan, CoM izdüşümü içindeyse dengesini koruyabilir. Diğer taraftan Şekil 3.12'deki gibi hareket ederse, CoM'un izdüşümü, destek poligonunun dışına çıkar. Ancak, SMN asla destek çokgeninin dışına çıkmaz [76].



Şekil 3.12 CoG, SMN ve destek çokgeni [14].



Şekil 3.13 Ayağa zeminden gelen tepki kuvvetleri [76].

SMN, ağırlık merkezi noktasına (CoP) zeminin verdiği tepki kuvvetleri olarak tanımlanır. Şekil 3.13'teki gibi üç boyut düzlemdeki zemindeki tepki kuvvetleri sonlu sayıdadır. Her temas noktası için;

$$p_i \ (i = 1, \ldots , N \ ) \tag{3.27}$$

birer kuvvet vektörü formu,

$$f_i := \left[f_{ix} f_{iy} f_{iz} \right]^T \tag{3.28}$$

olarak gösterilebilir. Burada, f_{ix}, f_{iy}, ve f_{iz}, zemine göre x, y, ve z koordinat sistemindeki sırayla kuvvet bileşenleridir. Böylece aşağıdaki gibi SMN hesaplanabilir.

$$p := \frac{\sum_{i=1}^{N} p_i f_{iz}}{\sum_{i=1}^{N} f_{iz}} \tag{3.29}$$

Bu formül, aşağıdaki gibi de yazılabilir:

$$p = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i p_i \tag{3.30}$$

$$\alpha_i := f_{iz} / f_z \tag{3.31}$$

$$f_z := \sum_{i=1}^{N} f_{iz} \tag{3.32}$$

Ancak, robot normal yürürken dengeyi sağlamak için tabanlarında ihtiyaç duyduğu kuvvetleri üretemez.

Bu nedenle yeniden düzenleme yapılabilir.

$$f_{iz} \geq 0 \quad (i = 1, \ldots , N) \tag{3.33}$$

$$\begin{cases} \alpha_j \geq 0 \quad (i = 1, \ \ldots , N) \\ \sum_{i=1}^{N} \alpha_i = 1 \end{cases} \tag{3.34}$$

Bu noktalar, (3.30) ve (3.34) formülleri ile değme noktasındaki dışbükey destek çokgenini sağlar. Böylece daima SMN daima destek çokgeninin içinde olduğu sonucuna varılabilir. Diğer bir deyişle, SMN, zemin üzerindeki tepki kuvvetinin tek taraflı kısıtlaması sonucu asla destek çokgeninden ayrılmaz.

Böylece SMN etrafındaki tork aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

$$\tau = \sum_{i=1}^{N}(p_i - p)\times f_i \tag{3.35}$$

Ayrıca bu eşitlik, vektör bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$$\tau_x = \sum_{i=1}^{N}(p_{iy} - p_y)\times f_{iz} - \sum_{i=1}^{N}(p_{iz} - p_z)\times f_{iy} \tag{3.36}$$

$$\tau_y = \sum_{i=1}^{N}(p_{iz} - p_z)\times f_{ix} - \sum_{i=1}^{N}(p_{ix} - p_x)\times f_{iz} \tag{3.37}$$

$$\tau_z = \sum_{i=1}^{N}(p_{ix} - p_x)\times f_{iy} - \sum_{i=1}^{N}(p_{iy} - p_y)\times f_{ix} \tag{3.38}$$

Burada p_{ix}, p_{iy}, ve p_{iz}, SMN bileşenleri olan p_i, yani p_x, p_y ve p_z pozisyon vektörlerinin bileşenleridir.

Zemin yatay olduğu zaman tüm i'ler için $p_{iz} = p_z$'dir. Böylece (3.36) ve (3.37) denklemleri, sıfır olur. Dolayısı ile,

$$\tau_x = \tau_y = 0 \tag{3.39}$$

elde edilir.

Bu nedenle p, SMN noktası olarak adlandırılır. Ama yine de sürtünme kuvvetinin genel durumlarda sıfırdan farklı dikey moment (3.38) yaratılmasına dikkat edilmelidir [76].

$$\tau_z \neq 0 \tag{3.40}$$

3.12. Video Görüntü Kaydedicisi

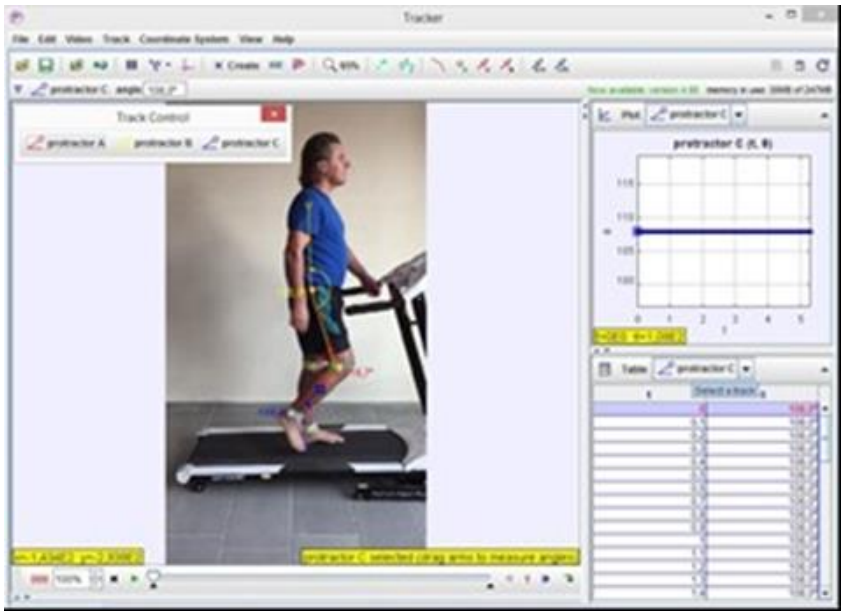
Bu çalışmadaki katılımcıların yürüme analizinde kullanılacak yürüme görüntüleri Apple firmasının ürettiği iPhone 6 Plus [77] mobil telefonun kamerasıyla kaydedildi. Şekil 3.14'teki telefon kamerasının 1080p HD (30 fps veya 60 fps) video kaydı yapma özelliği vardır.



Şekil 3.14 iPhone 6 Plus mobil telefon.

3.13. Video Görüntüsü Çözümleme Programı

Bu çalışmadaki katılımcıların video kaydediciyle elde edilen görüntülerinin eklem açılarının çözümlenmesi için Tracker (sürüm 4.95) video çözümleyicisi programı kullanıldı. Bu program, ücretsiz ve açık kaynak kodlu bir programdır [78].



Şekil 3.15 Tracker video görüntüsü çözümleme programı.

3.14. Dynamixel MX-64T Servo Motorları

Bu çalışmadaki iki ayaklı robotun eklem hareketlerini sağlamak için akıllı servo motorlar kullanıldı. Dynamixel MX-64T modeli servo motorları, Güney Koreli Robotis firması tarafından özellikle robotik ve otomasyon işlerinde kullanılmak amacıyla üretilmiştir.

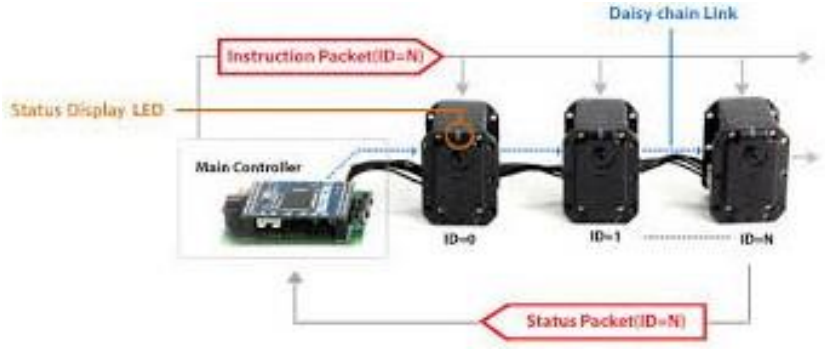
Dynamixel MX-64T servo motorlarının içinde DC motor, redüksiyon dişlisi ve kontrol kartı vardır. Böylece sürücü ve ağ bağlantısı için gerekli çıkışları/girişleri barındıran kompakt bir yapıya sahiptir. PID özelliği sayesinde geri besleme ile voltaj, konum, giriş voltajı, yük ve akım gibi parametreler üzerinden geri besleme sinyali oluşturabilir. Servo motorun pozisyon sinyali için kontaksız bir enkoder kullanılmıştır. Dynamixel MX-64T servo motorlarının içinde 32 bitlik 72 Mhz Cortex M3 (ST microelectronics) işlemci kartı bulunmaktadır. İçindeki bu elektronik kart sayesinde robotun ana kartında gelen bilgiler işlemci de değerlendirilir ve uygun hareket pozisyonu üretilir. Dynamixel MX-64T servo motorları ile 12bit (4096) yani 0.088 derece pozisyon çözünürlüğü ile 360 derecelik (ölü bölge olmadan) hareket ve konum kontrolü yapılabilmektedir [79].

Servo motorların gövdesi mühendislik plastiğinden, motor redüksiyon dişlileri ise sertleştirilmiş çelikten üretilmiştir. Ürün, bu yapısıyla kullanıldığı robot ve otomasyon uygulamalarında uzun ömür sunmaktadır.



Şekil 3.16 Dynamixel MX-64T servo motoru [79].

Dynamixel MX-64T servo motorları, TTL haberleşmeyi destekler. Bu sayede 255 adet servo motor seri olarak bağlanabilir.



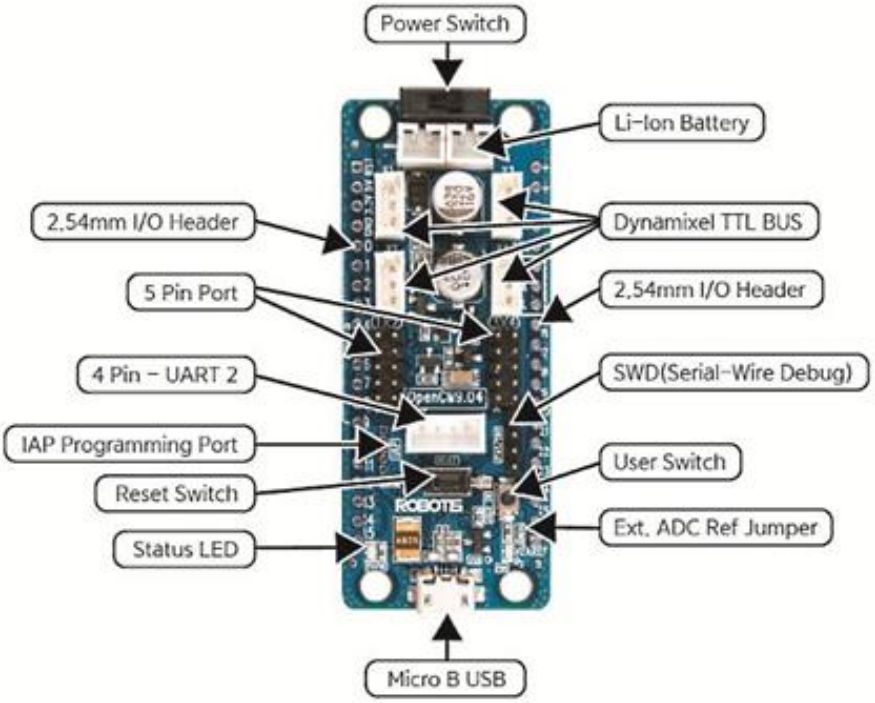
Şekil 3.17 Dynamixel MX-64T motorların TTL haberleşme için bağlanması [79].

Tablo 3.1 Dynamixel MX-64T servo motorun teknik özellikleri

Ürün		MX-64T		
Ağırlık		126g		
Boyut		40.2mm x 61.1mm x 41mm		
Dişli oranı		200:1		
Çalışma gerilimi (V)		11.1	12	14.8
	Sabit tork (N.m)	5.5	6	7.3
	Sabit akım (A)	3.9	4.1	5.2
	Yüksüz hız (RPM)	58	63	78
Motor		Maxon Motor		
Minimum kontrol açısı		0.088 x 4,096		
Çalışma aralığı		Aktüatör Modu : 360		
		Tekerlek Modu : sonsuz döngü		
Voltaj		10~14.8V (Tavsiye edilen: 12V)		
Çalışma sıcaklığı		-5 ~ 80 oC		
Komut sinyali		Dijital Paket		
Protokol		Half duplex Asynchronous Serial Communication (8bit,1stop,		
Link (physical)		TTL Bus (zincir bağlantı şekli -Daisy chain-)		
ID		254 ID (0~253)		
Baud hızı		8000bps ~ 4.5Mbps		
Feedback fonksiyonları		Position, Temperature, Load, Input Voltage, Current, etc.		
Materyal		Dış koruma: Mühendislik plastiği		
		Dişli: Ful Metal		
Pozisyon Sensörü		Enkoder		
Varsayılan		ID #1 – 57600bps		

3.15. Robot Kontrol Kartı

İki ayaklı robotun üzerindeki 12 adet eklemde akıllı Dynamixel servo motorlar kullanılmıştır. Dynamixel servo motorlarını bağlamak ve kontrol etmek için bir ana karta ihtiyaç vardır. Bu nedenle, bu çalışmada OpenCM.9.04 kontrol kartı kullanılmıştır. OpenCM.9.04 kontrol kartı Güney Koreli Robotis firması tarafından açık kaynak kodlu olarak geliştirilmiştir [80].



Şekil 3.18 OpenCM.9.04 kontrol kartı pinlerinin görevleri [80].

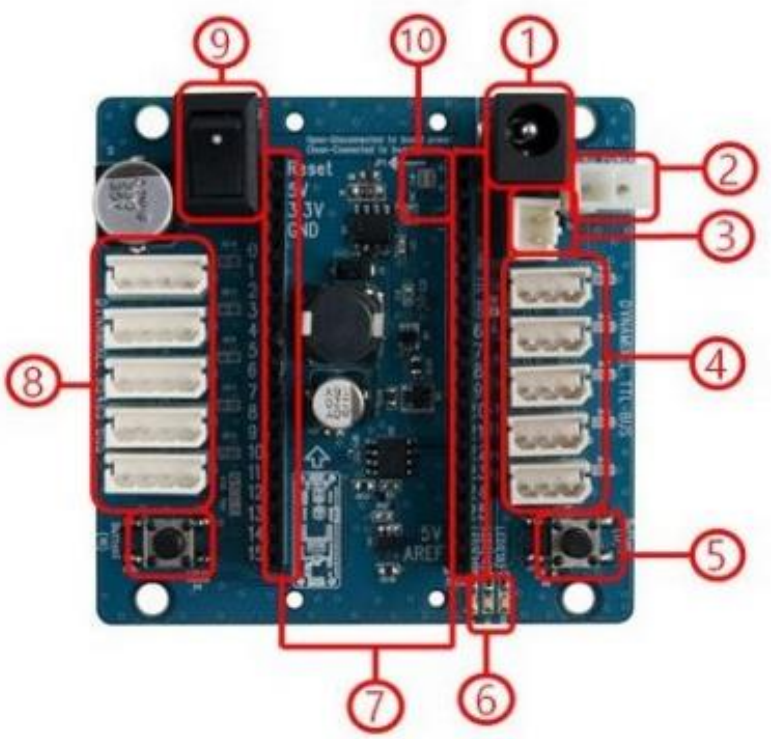
Kartın üzerinde, OpenCM9.04-A, ARM Cortex-M3 32bit CPU vardır. Tıpkı Arduino IDE gibi C/C++ dillerinde kolayca program yazmaya imkan sağlayan Processing ve Wiring dilleriyle ROBOTIS OpenCM, robot geliştirmeyi önemli ölçüde kolaylaştırmıştır. ROBOTIS OpenCM, Windows, Linux ve MacOS işletim sistemleri tarafından desteklenmektedir [80].

Tablo 3.2 OpenCM.9.04 kontrol kartının teknik özellikleri

CPU	STM32F103CB (ARM Cortex-M3)
Çalışma Voltajı	7V ~ 16V (USB 5V, DYNAMIXEL 12V)
Harici I/O	26
Timer	8
Analog In(ADC)	10 (12bit)
Flash	128 Kbytes
SRAM	20 Kbytes
Clock	72Mhz
USB	1 (2.0 Full Speed)
CAN	1
USART	3
SPI	2
I2C(TWI)	2
Debug	JTAG & SWD
TTL port (3Pin)	4 (Dynamixel & XL-Serilerinin kombinasyonu)
External Sensor(5 Pin)	4 (ROBOTIS Sensörler ile uyumlu)
Size	27 mm X 66.5 mm
Weight	13g

3.16. OpenCM 485 Genişleme Kartı

Open CM9.04 denetleyici kartını genişletmek için OpenCM 485 Genişleme Kartı kullanılır. OpenCM 485 Genişleme Kartı ile daha fazla RS485 ve TTL haberleşme sağlanır. SMPS ve Li-on batarya konnektörleri ile karta güç sağlanır. Diğer Dynamixel servo motorlara uyum sağlayacak şekilde geniş giriş voltaj aralığı sunar [81].



Şekil 3.19 OpenCM 485 Genişleme kartı [81].

Tablo 3.3 OpenCM 485 - Genişleme kartının teknik özellikleri.

1	**SMPS DC Adaptör**	Güç Kaynağı
2	**DXL Pro Power**	24V Girişi (Dynamixel Pro için)
3	**Li-Po batarya**	11.1V Li-Po batarya (LBS-10) konnektörü
4	**DYNAMIXEL TTL 3 PIN**	TTL Bağlantı portu
5	**Kullanıcı Butonu**	Kullanıcı tarafından programlanabilen buton
6	**Kullanıcı LED'i**	Kullanıcı tarafından programlanabilen LED
7	**I/O header**	Bağlantı bağlığı - OpenCM9.G4 (pitch=2.54mm)
3	**DYNAMIXEL 485 4 PIN**	RS-485 için bağlantı
9	**Power Switch(sviç)**	Kart ve Dynamixel ler için On/Off switch(sviç)
10	**JP1 Jumper**	OpenCM9.D4 giriş gerilimi

3.17. Elektriksel Güç Ünitesi

İki ayaklı yürüyen robotumuzun elektriksel güç ihtiyacı için bir adet Gens Ace 5100 mAh 14.8 V 35C 4S1p Lipo batarya kullanılmıştır.

Tablo 3.4 Lipo bataryanın teknik özellikleri.

Kapasite	5100 mAh
Voltaj	14.8V
Sürekli "C" Değeri	35C
Anlık "C" Değeri	70C
Ağırlık	551 Gram
Uzunluk	145 mm
Genişlik	47 mm
Yükseklik	35 mm
Balans Ucu	JST-XH

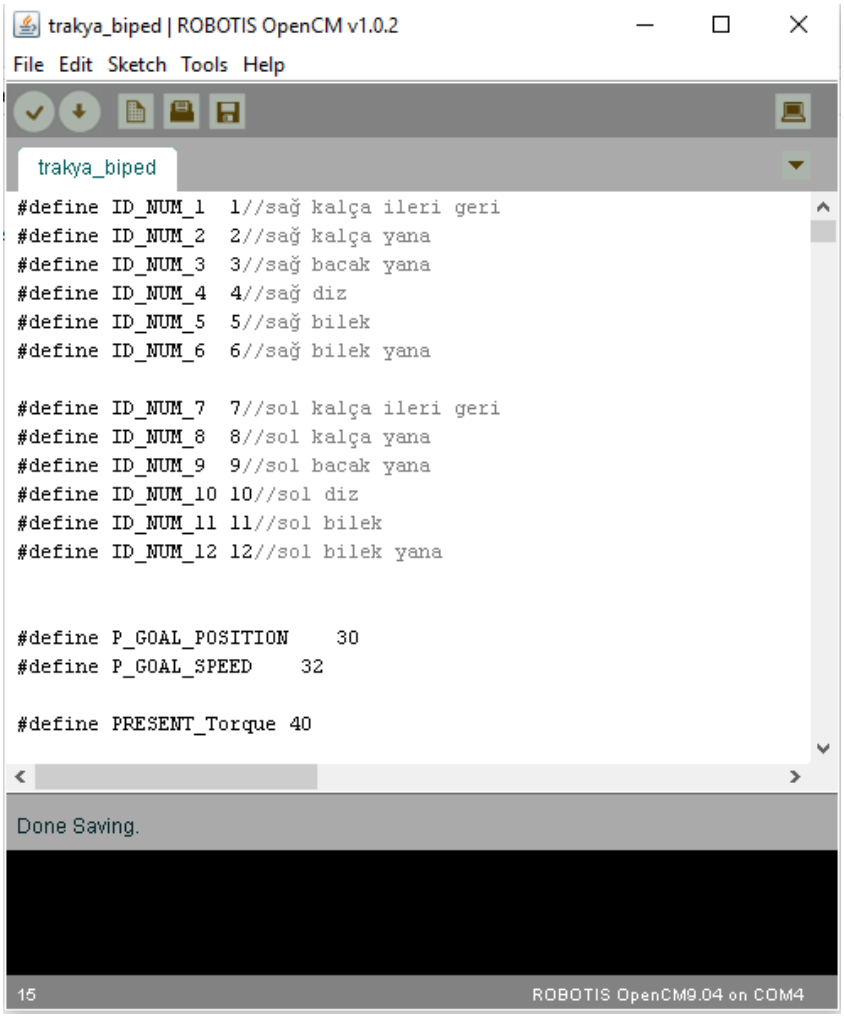


Şekil 3.20 Gens Ace 5100 mAh 14.8 V 35C 4S1p Lipo Batarya.

3.18. ROBOTIS_OpenCM IDE Derleyicisi

İki ayaklı yürüyen robotumuzun ana kartı olan OpenCM9.04'ü programlamak için ROBOTIS_OpenCM IDE derleyicisi kullanılmıştır. Bu derleyici, açık kaynak kodlu olup

Arduino IDE'ye benzemektedir. Bu çalışma için 1.0.2 versiyonu kullanılmıştır. Güney Koreli Robotis firmasının sitesinden ücretsiz indirilmiştir [82].



Şekil 3.21 ROBOTIS_OpenCM derleyicisi.

BÖLÜM 4

İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOT İÇİN YÜRÜME DESENİ MODELLENMESİ VE DENEYLER

İki ayaklı robotun insan gibi yürümesi için eklem hareketlerinin de bir harmoni içinde hareket etmesi gerekmektedir. Ancak eklemlerin bir döngüsünün içindeki basma, salınım ve çift faz durumlarının, doğru hesaplanmaması durumunda, iki ayaklı robot insan gibi yürüyemez. Yani, yürüyüşünün görünümü göze hoş gelmez. Dahası dengesizlik durumuna girerek devrilebilir. Bu nedenle, bu çalışmadaki iki ayaklı robotun eklem hareketlerini insana benzetebilmek ve tüm eklemlerinin bir harmoni içinde hareket etmesini sağlamak için insan yürüyüşünden esinlenerek insanın yürüme analizi gerçekleştirilmiştir.

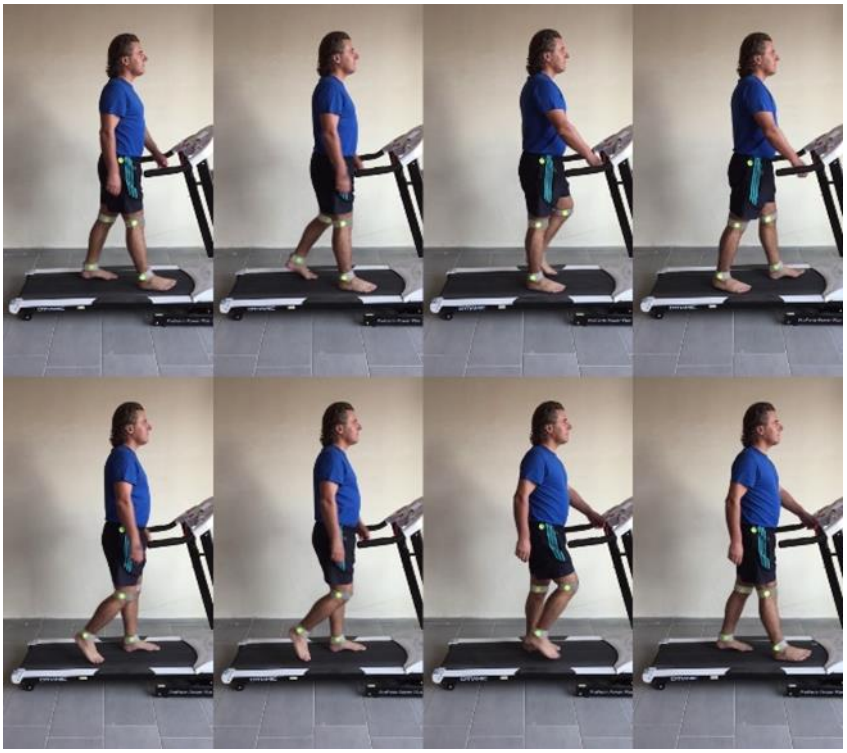
4.1. Katılımcıların Eklem Açılarının Bulunması

Bu çalışmada, yürüme analizi yapmak için yaşları 25 ile 45 arasında 21'i erkek, 13'ü bayan toplam 34 sağlıklı yetişkin katılımcı seçildi. Katılımcıların 2 km/h hızında çalıştırılan Dynamixel marka yürüme bandı üzerindeki yürüyüşlerinin görüntüleri, Iphone 6 Plus mobil cep telefonunun kamerasıyla kaydedildi. Ayrıca, bu katılımcıların hepsi gönüllü olup hiçbirine tıbbi ilaç verilmemiştir.



Şekil 4.1 Katılımcılardan yürüme analizi için görüntü kaydı yapılması.

Katılımcıların yürüme video kayıtları Şekil 4.1'deki gibi alındıktan sonra, bu video kayıtları, Tracker programı ile analiz edildi. Her framede katılımcının eklemlerinin açıları tespit edilip eklem açılarının değerleri bir tabloya işlendi. Bu tablodaki eklem açı değerlerinin Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5 teki grafikleri ile Şekil 4.6'daki gibi istatiksel analizi Excel programı ile yapıldı. Excel programında her bir eklem için açı tablosu oluşturuldu.



Şekil 4.2 Katılımcı görüntülerinden elde edilen yürüme döngüsünün çözümlenmesi.



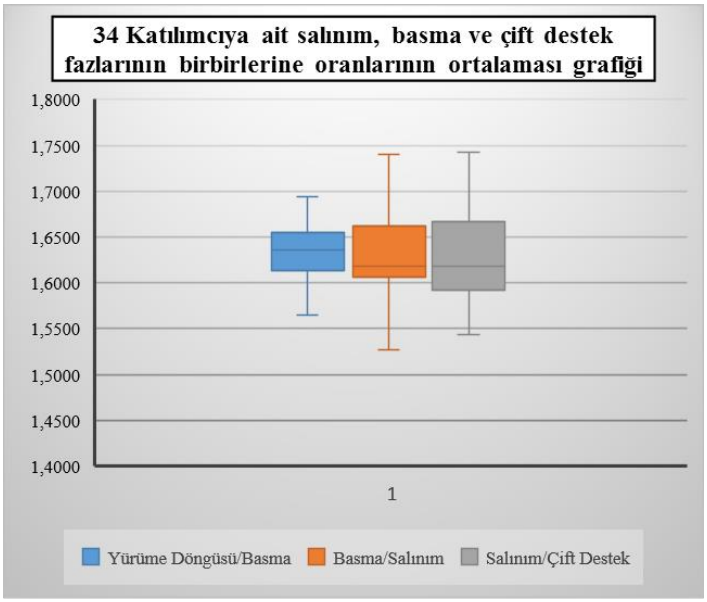
Şekil 4.3 Rastgele seçilen bir katılımcının sağ kalça açı grafiği.



Şekil 4.4 Rastgele seçilen bir katılımcının sağ diz açı grafiği.



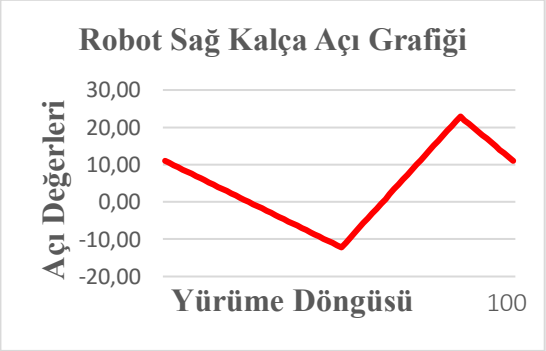
Şekil 4.5 Rastgele seçilen bir katılımcının sağ bilek açı grafiği.



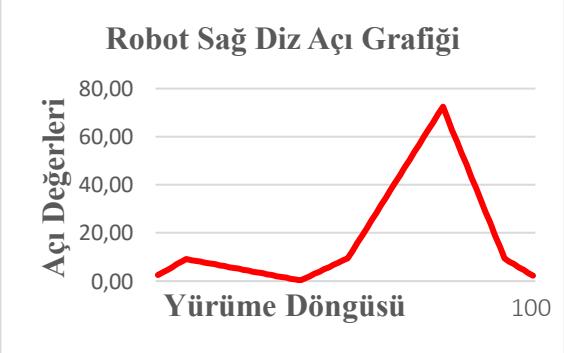
Şekil 4.6 34 katılımcının basma, salınım ve çift destek fazları oranlarının dağılımı

4.2. Eklem Açılarının Doğrusallaştırılması

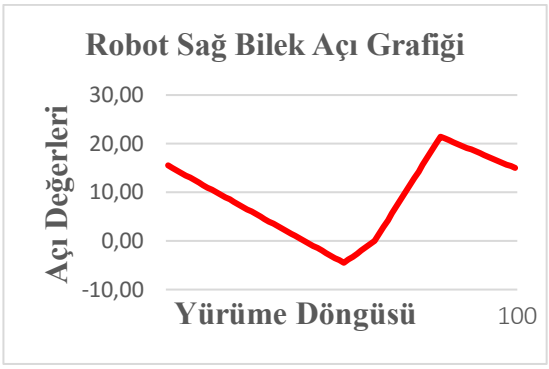
Kalça, diz ve bilek açılarının grafiğinin gösterilmesi için rastgele seçilen bir katılımcının eklem açıları incelendiğinde, doğrusal bir fonksiyon olmadığı ve yüksek dereceden bir fonksiyon olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal olmayan fonksiyon için mikrodenetleyiciye kod yazmak biraz zordur. Daha kolay kod yazabilmek için katılımcıya ait eklem açı değerleri grafiğinin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Böylece robotu kontrol etmek için hazırlanan yazılımda kolaylık sağlamak için açı grafikleri, Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'daki gibi doğrusallaştırılmıştır.



Şekil 4.7 Katılımcının sağ kalça açı grafiğinin doğrusallaştırılması.



Şekil 4.8 Katılımcının sağ diz açı grafiğinin doğrusallaştırılması.



Şekil 4.9 Katılımcının sağ bilek açı grafiğinin doğrusallaştırılması.

4.3. Ters Kinematik Yöntemiyle Yürüme Deseni ve Eklem Açıların Üretimi

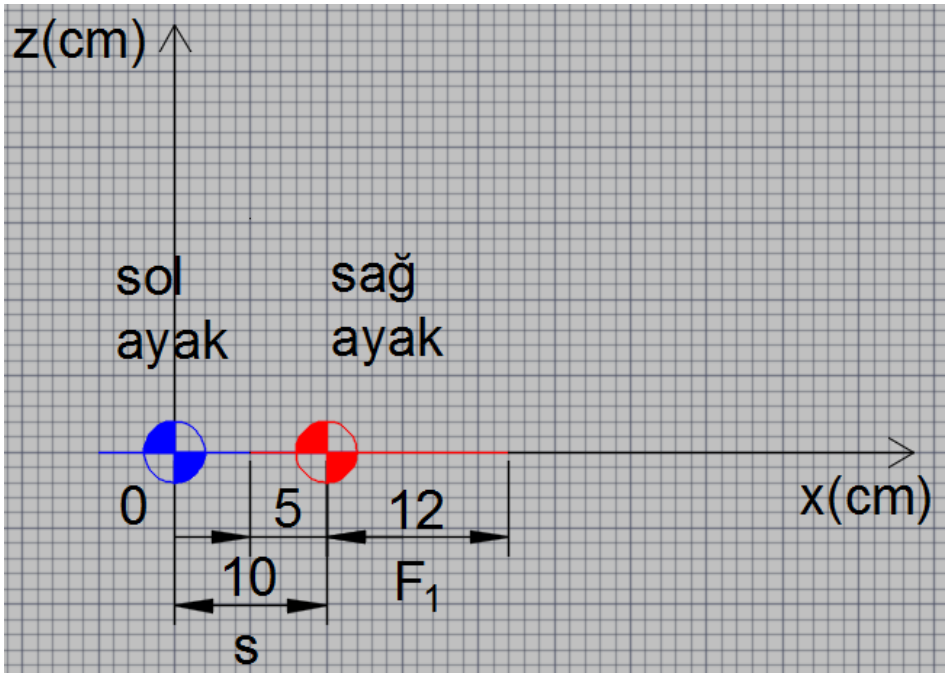
İki ayaklı robotumuzun dengede yürüyebilmesi için SMN şartlarının sağlanması gerekmektedir. Bunu sağlamak için de adım adım yürüme deseni ve eklem açıları üretilmiştir.

İlk önce, sağ ayağın ileriye adım attığı ve sağ bacaktaki sağ dizin gerilmiş olduğu kabul edilir. SMN Sol ayak içinde kalacak şekilde 1 cm aralıklarla 17 adet farklı desen üretilebilir. Sol ayaktan dik eksende 12 adet doğru yukarıya doğru çıkarılır. Sol ayak bileği yatay eksende sıfır (0) kabul edilir. Adım uzunluğu, yatay eksende sol ayak bileğinden sağ ayak bileğine kadar olan mesafedir. Bu doğrularla sağ dizi gerilmiş sağ bacak kesiştirilse robotun adımının bel yüksekliği tespit edilir. Yani, yatay eksende merkezinin koordinatları, $x = adım\ uzunluğu, y = 0$ ve $yarıçapı = bacak\ uzunluğu$ olan bir çember çizilerek $x = 0$ dan 1 cm iterasyon yaparak $ayak\ uzunluğu$ / 1cm sayısı kadar SMN sol ayak içinde kalacak şekilde desen üretilebilir.

4.3.1. Basma Fazı

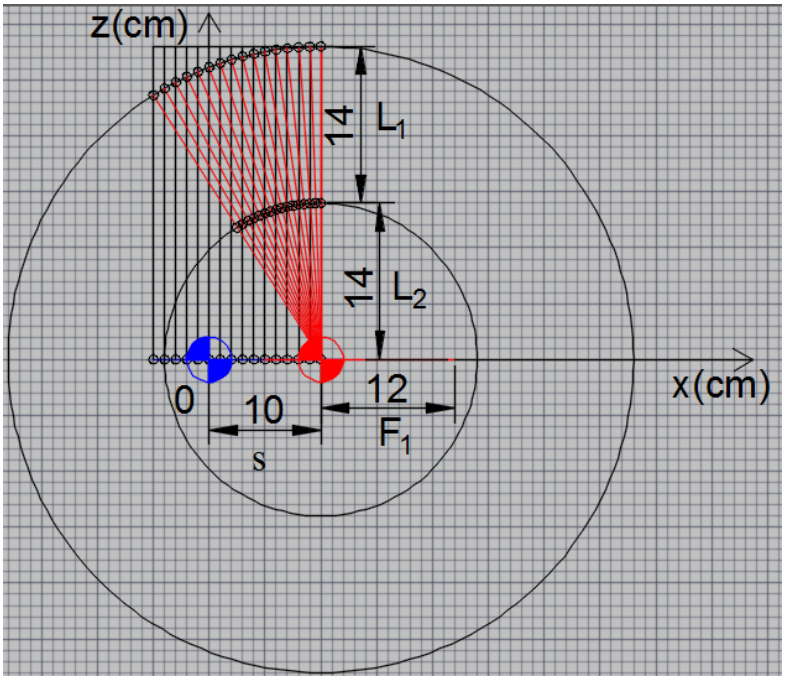
4.3.1.1. İlk Değme Fazı

Referans başlangıç noktası, x ve z ekseninde 0 noktası olarak kabul edilir ve sol ayak bileği bu noktaya yerleştirilir. Sağ ayak bileği, x ekseninde adım uzunluğu değeri kadar ötelenir ve Şekil 4.10'daki gibi x eksenine yerleştirilir.



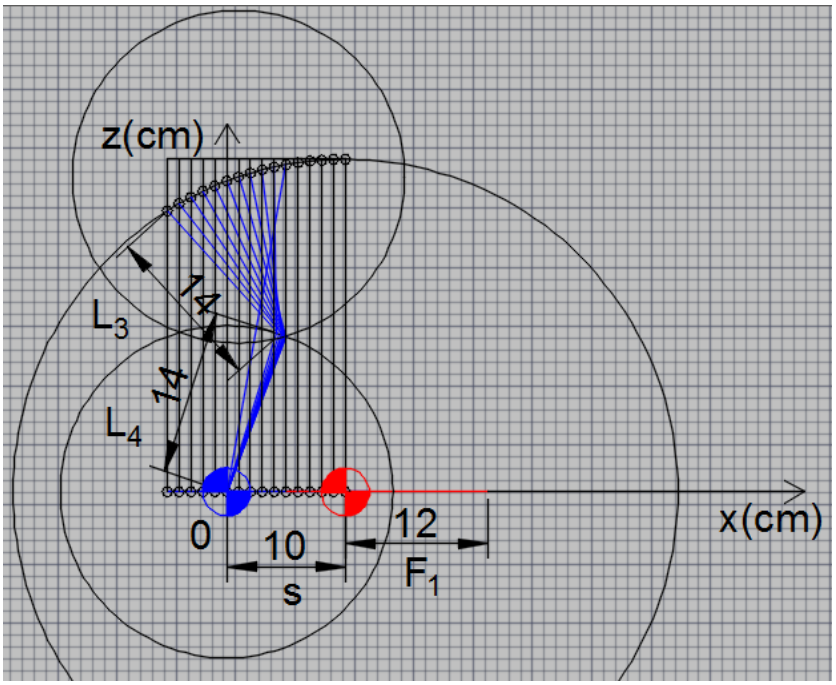
Şekil 4.10 İlk değme fazı için ayakların yürüme desenine yerleştirilmesi.

Sağ ayağın yere ilk teması anında sağ bacaktaki diz ekleminin gerilmiş pozisyonda olduğu kabul edilir. Böylece x ekseni üzerindeki sağ ayak bileği merkez kabul edilerek yarıçapı sağ bacak uzunluğuna eşit olan bir çember çizilir. Robot ileriye doğru devrilmemesi için SMN şartları sol ayak sınırları içinde kalması gerektiğinden dolayı, bu çemberin sol ayak uzunluğunun x değerine tekabül eden değerleri ile kesişerek z noktaları yani bel yüksekliği bulunur. Sağ bacağın tamamı bir serbestlik derecesine sahip robot manipülatörü kabul edilip ters kinematik yöntemiyle bu faz için robotun bel yüksekliğinin x ve z eksenindeki koordinatları Şekil 4.11'deki gibi bulunmuş olur.



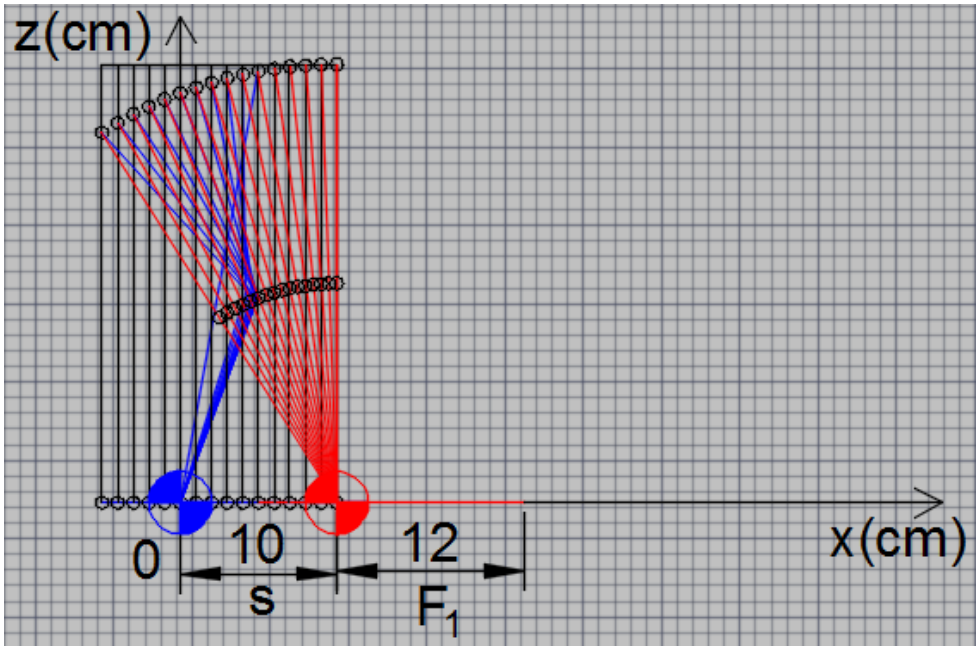
Şekil 4.11 İlk değme fazı için gerilmiş sağ bacak deseninin üretilmesi.

Bulunan bel yüksekliği koordinatlarından zemine ve 0 noktasına göre iki serbestlik dereceli ters kinematik yöntemiyle sol bacağın tüm eklem açıları bulunur. Böylece bu fazın bütün eklem açıları, Şekil 4.12'deki gibi bulunmuş olur.



Şekil 4.12 İlk değme fazı için sol bacağın deseninin üretilmesi.

Bu faz için sol ayak içinde kalacak şekilde SMN şartlarını sağlayıp sağlamadığı SMN algoritmasına göre kontrol edilir.



Şekil 4.13 İlk değme fazında üretim yapılabilecek sağ ve sol bacak desenleri.

$s = 10\ cm$ seçilmiştir.

$$(x - s)^2 + (z - 0)^2 = L^2 \tag{4.1}$$

$$(x - 10)^2 + (z - 0)^2 = 28^2 \tag{4.2}$$

Robotun bel kısmında 6 adet servo motor, lipo pil ve kontrol kartı vardır. Bu kısım ağır olduğu için bu bölgenin sol ayağın orta bölgelerine gelmesi robotun dengede kalmasına daha çok yardımcı olacaktır. Ayrıca Şekil 4.13'te de görüldüğü gibi $x = 8,9,10,11,12$ için yürüme deseni elde edilemez. Bu nedenle bu çalışmada;

$x = 4$ seçilmiştir.

$$(4 - 10)^2 + (z - 0)^2 = 28^2 \tag{4.3}$$

$$36 + z^2 = 784 \tag{4.4}$$

$$z^2 = 784 - 36 \tag{4.5}$$

$$z = 27{,}34958866235 \tag{4.6}$$

Robotun sağ bacağının kalçasının koordinatları sağ kalça_ $x = 4$ noktasında $h = 27{,}34958866235\ cm$ bulunur. Bu aynı zamanda robotun bel yüksekliğidir.

Sağ bacağın açıları da Şekil 4.14'teki gibi sağ diz gerilmiş durumda kabul edilerek trigonometrik yöntemler ile bulunur.

$$\theta_2 = 0^{\circ} \tag{4.7}$$

$$\theta_1 = tan^{-1}\left(\frac{s - sağ\ kalça_x}{h}\right) \tag{4.8}$$

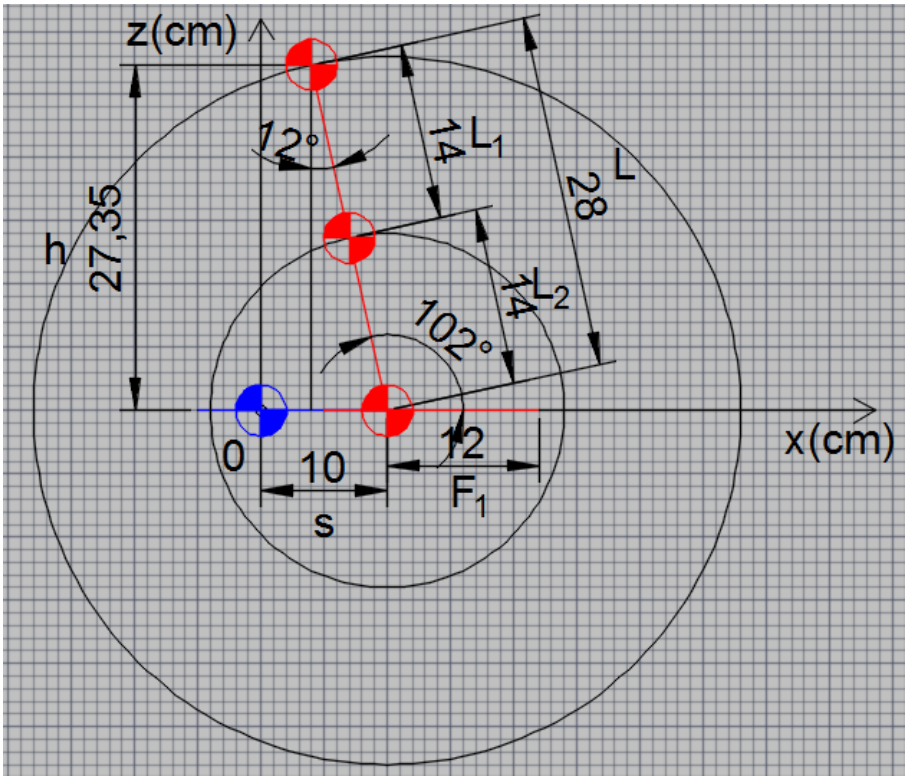
$$\theta_1 = tan^{-1}\left(\frac{10-4}{27{,}34958866235}\right) \tag{4.9}$$

$$\theta_1 = 12{,}37362511619^{\circ} \tag{4.10}$$

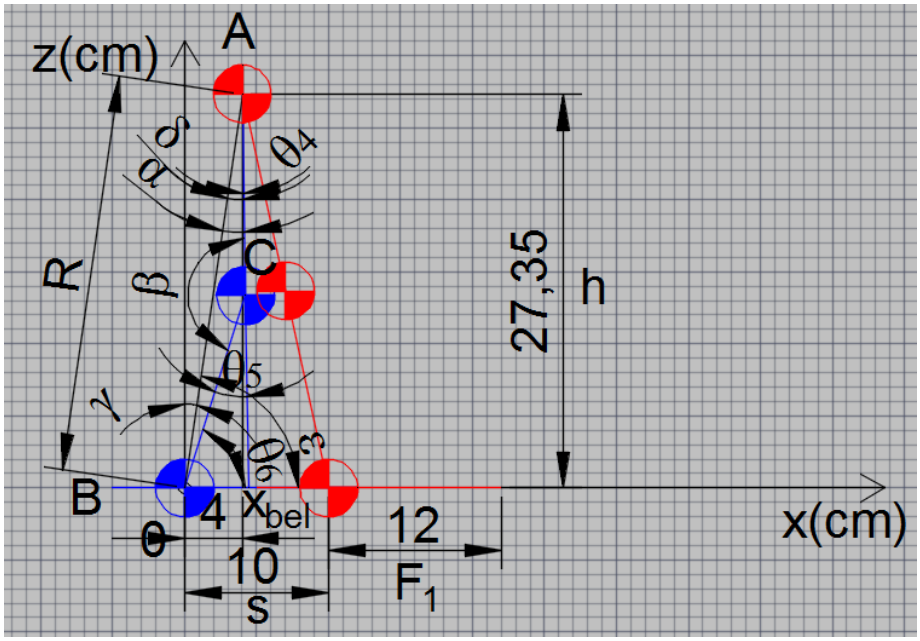
$$\theta_3 = 90^{\circ} + \theta_1 \tag{4.11}$$

$$\theta_3 = 90^{\circ} + 12{,}37362511619^{\circ} \tag{4.12}$$

$$\theta_3 = 102{,}37362511619^{\circ} \tag{4.13}$$



Şekil 4.14 İlk değme fazı için sağ bacağın eklem açılarının, bel yüksekliği ve koordinatlarının bulunması.



Şekil 4.15 Sol bacak açılarının bulunması için ters kinematik açılarının gösterilmesi

Şekil 4.15'teki ABx_{bel} üçgenindeki Pisagor teoreminden;

$$R = \sqrt{x^2 + z^2} \tag{4.14}$$

$$R = \sqrt{4^2 + 27{,}34958866235} \tag{4.15}$$

$$R = \sqrt{763{,}99999999974} \tag{4.16}$$

$$R = 27{,}64054992217\ cm \tag{4.17}$$

Şekil 4.15'teki ABC üçgenindeki Cosinus teoreminden;

$$L_4^2 = R^2 + L_3^2 - 2RL_3 cos(\alpha) \tag{4.18}$$

$$\alpha = cos^{-1}\left(\frac{L_4^2 - R^2 - L_3^2}{-2RL_3}\right) \tag{4.19}$$

$$\alpha = cos^{-1}\left(\frac{14^2 - 27{,}64054992217^2 - 14^2}{-2 \times 27{,}64054992217 \times 14}\right) \tag{4.20}$$

$$\alpha = 9{,}19059455706^{\circ} \tag{4.21}$$

$$\delta = tan^{-1}\left(\frac{x}{h}\right) \tag{4.22}$$

$$\delta = tan^{-1}\left(\frac{4}{27{,}34958866235}\right) \tag{4.23}$$

$$\delta = 8{,}32077125176^{\circ} \tag{4.24}$$

$$\theta_4 = \alpha - \delta \tag{4.25}$$

$$\theta_4 = 9{,}19059455706^{\circ} - 8{,}32077125176^{\circ} \tag{4.26}$$

$$\theta_4 = 0.8698233053^{\circ} \tag{4.27}$$

$$R^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2cos(\beta) \tag{4.28}$$

$$\beta = cos^{-1}\left(\frac{R^2 - L_1^2 - L_2^2}{-2L_1L_2}\right) \tag{4.29}$$

$$\beta = cos^{-1}\left(\frac{27{,}64054992217^{\,2} - 14^2 - 14^2}{-2*14*14}\right) \tag{4.30}$$

$$\beta = 161{,}61881088588^{\circ} \tag{4.31}$$

$$\theta_5 = 180^{\circ} - \beta \tag{4.32}$$

$$\theta_5 = 180^{\circ} - 155{,}25274976815^{\circ} \tag{4.33}$$

$$\theta_5 = 18{,}38118911412^{\circ} \tag{4.34}$$

$$L_3^2 = R^2 + L_4^2 - 2RL_4cos(\gamma) \tag{4.35}$$

$$\gamma = cos^{-1}\left(\frac{L_4^2 - R^2 - L_3^2}{-2RL_4}\right) \tag{4.36}$$

$$\gamma = cos^{-1}\left(\frac{14^2 - 27{,}64054992217^2 - 14^2}{-2\times 27{,}64054992217\times 14}\right) \tag{4.37}$$

$$\gamma = 9{,}19059455706^{\circ} \tag{4.38}$$

$$\varepsilon = tan^{-1}\left(\frac{h}{x}\right) \tag{4.39}$$

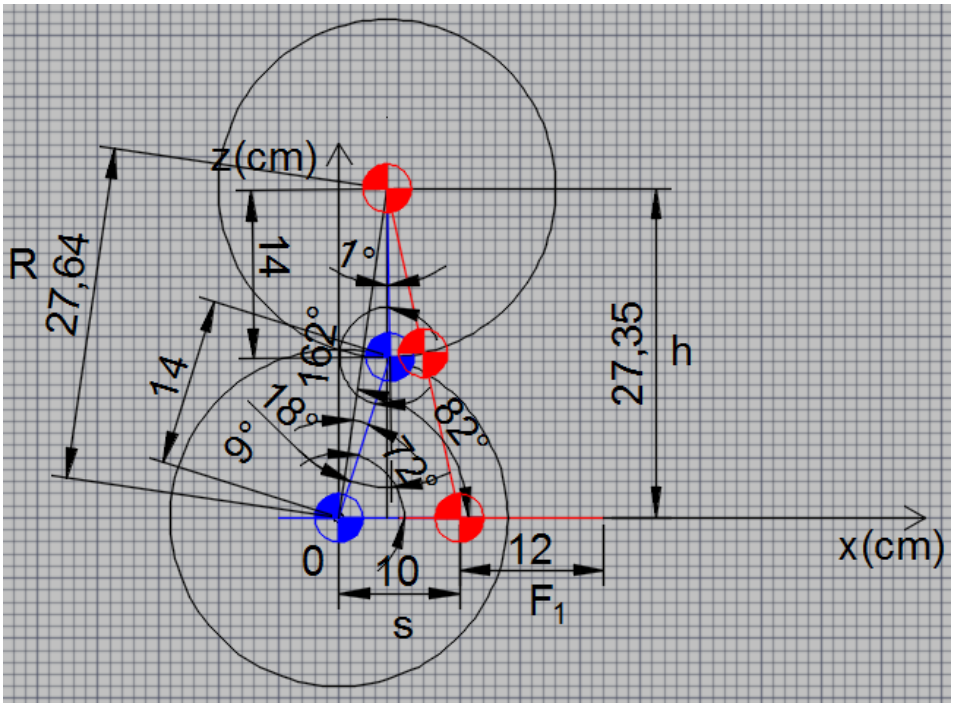
$$\varepsilon = tan^{-1}\left(\frac{27{,}34958866235}{4}\right) \tag{4.40}$$

$$\varepsilon = 81{,}67922874824^{\circ} \tag{4.41}$$

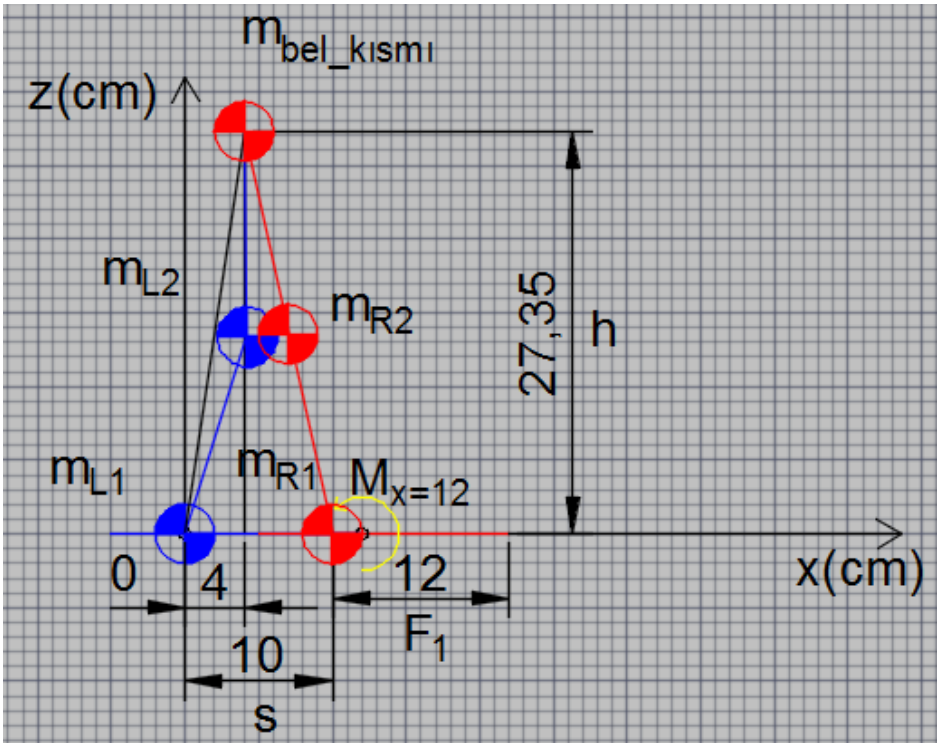
$$\theta_6 = \varepsilon - \gamma \tag{4.42}$$

$$\theta_6 = 81{,}67922874824^{\circ} - 9{,}19059455706^{\circ} \tag{4.43}$$

$$\theta_6 = 72.48863419118^{\circ} \tag{4.44}$$



Şekil 4.16 İlk değme fazı için ters kinematik yöntemiyle sol bacağın eklem açılarının, bel yüksekliğinin ve koordinatlarının bulunması



Şekil 4.17 İlk değme fazı için üretilen sağ ve sol bacak desenlerinden robotun SMN şartının sağlayıp sağlamadığının kontrolü.

Şekil 4.17'deki sol arka ayak ön ucuna göre, yani $x = 12$ noktasına göre moment hesaplanması;

$$M_{x=12} \geq 0 \tag{4.45}$$

$$m_{L_1} g x_{L_1} + m_{L_2} g x_{L_2} + m_{bel_kısmı} g x_{bel_kısmı} + m_{R_1} g x_{R_1} + m_{R_2} g x_{R_2} \geq 0 \tag{4.46}$$

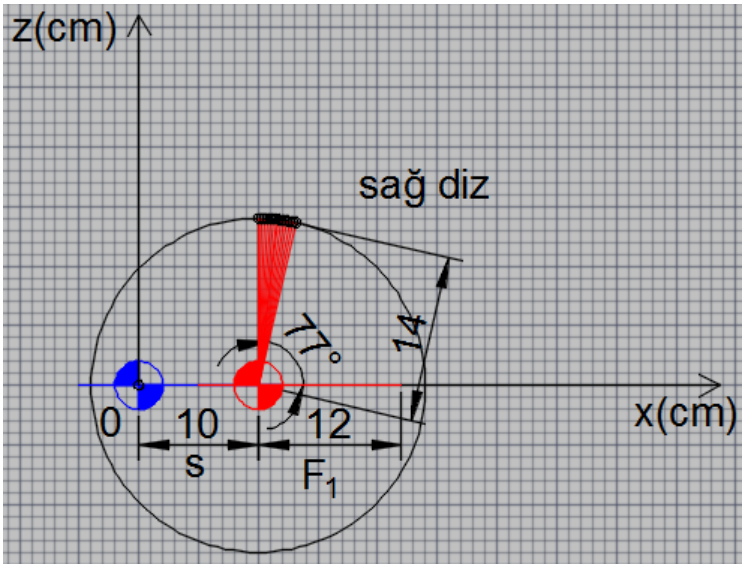
$$0{,}44 \times 9{,}81 \times 0{,}12 + 0{,}158 \times 9{,}81 \times (0{,}14 \times \cos 72{,}39822695494^{\circ}) + 1{,}61 \times 9{,}81 \times ((0{,}2764054992217 \times \cos(81{,}67922874824^{\circ}) + 0{,}44 \times 9{,}81 \times 0{,}02 + 0{,}158 \times 9{,}81 \times ((0{,}14 \times \cos 78^{\circ}) + 0{,}02) \geq 0 \tag{4.47}$$

$$1{,}37779567513 \geq 0 \tag{4.48}$$

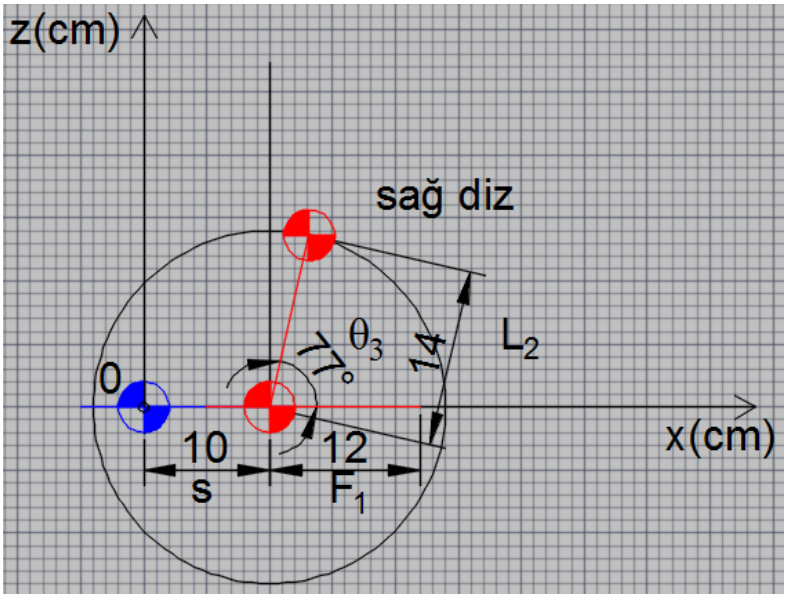
olduğu için uygundur.

4.3.1.2. Yüklenme Fazı

Robot ileriye doğru gitmesi için bir hamle yapması gerekmektedir. Bu nedenle, sağ bacak diz altı için Şekil 4.18'deki gibi ileriye doğru eğim verilir. Böylece robota ileriye doğru hareket yeteneği kazandırılmış olur. Bu fazdaki eklem açılarının hepsi, tercih edilen eğim açısının değeri baz alınarak bulunur.

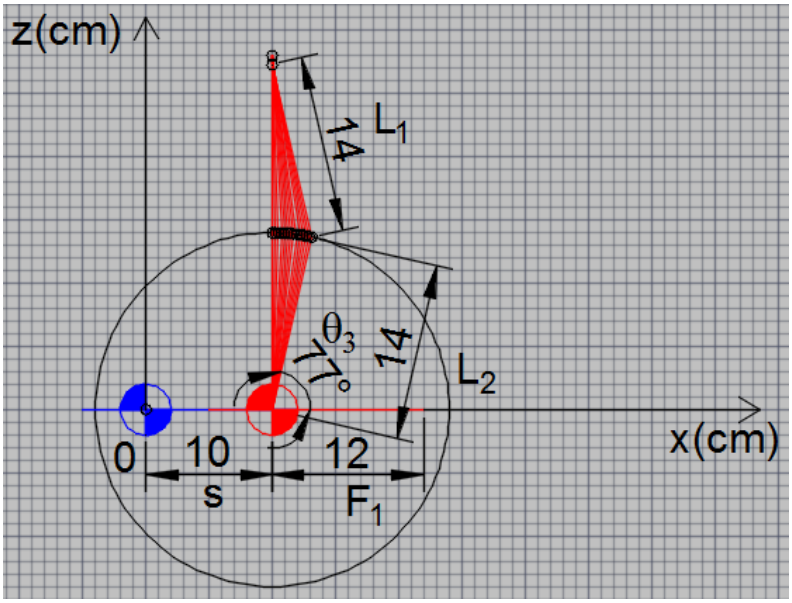


Şekil 4.18 Yüklenme fazı için sağ bacağın öne eğilmesi desenlerinden ne kadar üretilebileceğinin gösterilmesi.



Şekil 4.19 Ayağın tam teması fazı için sağ bacağın kabul edilmiş bir açı değeri kadar öne eğilmesi deseninin üretilmesi.

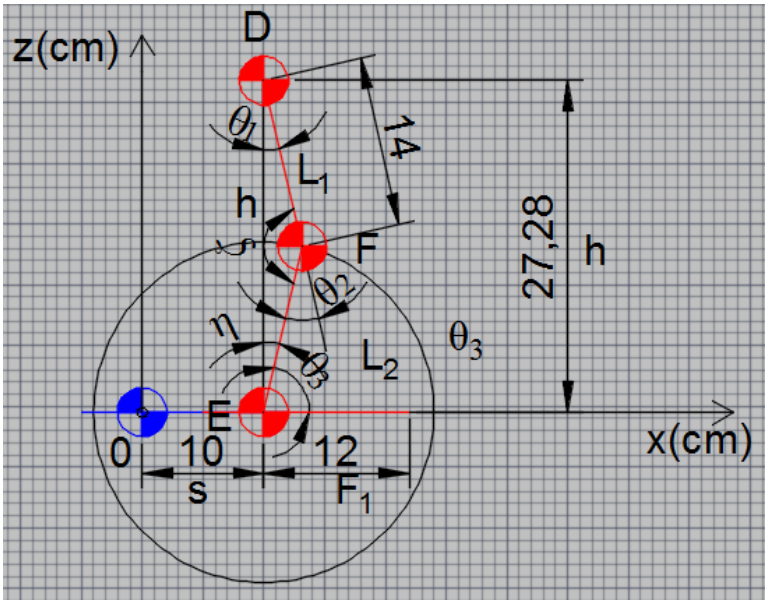
Şekil 4.20'deki sağ bacak diz üstü kısmının üst tarafı yani robotun bel kısmı, sağ bilekle aynı dikey eksene gelecek şekilde ters kinematik yöntemiyle hesaplanarak bulunur. Sağ bacak dizinin koordinatları, başlangıç noktası, hedef nokta koordinatları ise x ekseninde sabit kalmak şartıyla eğim açısına göre z eksenindeki değeri bulunur. Böylece bu adımda robotun belinin yerden yüksekliği ile sağ bacağın eklem açıları bulunmuş olur.



Şekil 4.20 Ayağın tam teması fazı için sağ bacağın öne eğilmesi desenlerinden ne kadar üretilebileceğinin gösterilmesi.

Bu yapılan çalışmada robotun sağ bacağının dizi, 26° derece ileriye eğildiği kabul edildi. Buradan sağ dizin koordinatları ve sağ bilek açısının değeri bulundu.

Sağ dizin koordinatlarından sağ bilek dikey eksenine geçen doğruyle kesişecek bir doğru çizilir. Bu doğru sağ bacağın diz üstü kısmıdır. Ayrıca sağ kalçanın ve robotun üst kısmının koordinatlarıdır. Bu koordinatlar Cosinus teoreminden bulunur. Ayrıca sağ diz ve sağ kalça açıları da bulunmuş olur.



Şekil 4.21 DEF üçgeninin oluşturulması.

Şekil 4.21'deki DEF üçgeninde;

$$\theta_2 = 26^\circ \tag{4.49}$$

$$\zeta = 180^\circ - \theta_2 \tag{4.50}$$

$$\zeta = 180^\circ - 26^\circ \tag{4.51}$$

$$\zeta = 154^\circ \tag{4.52}$$

Şekil 4.21'deki DEF üçgeni ikizkenar üçgeni olduğu için;

$$\theta_1 + \zeta + \eta = 180^\circ \tag{4.53}$$

$$\theta_1 + 154^\circ + \eta = 180^\circ \tag{4.54}$$

$$\theta_1 + 154^\circ + \eta = 180^\circ \tag{4.55}$$

$$\theta_1 + \eta = 26^\circ \tag{4.56}$$

$$\eta = 13^{\circ} \tag{4.57}$$

$$\theta_1 = 13^{\circ} \tag{4.58}$$

$$\theta_3 + \eta = 90^{\circ} \tag{4.59}$$

$$\theta_3 + 13^{\circ} = 90^{\circ} \tag{4.60}$$

$$\theta_3 = 77^{\circ} \tag{4.61}$$

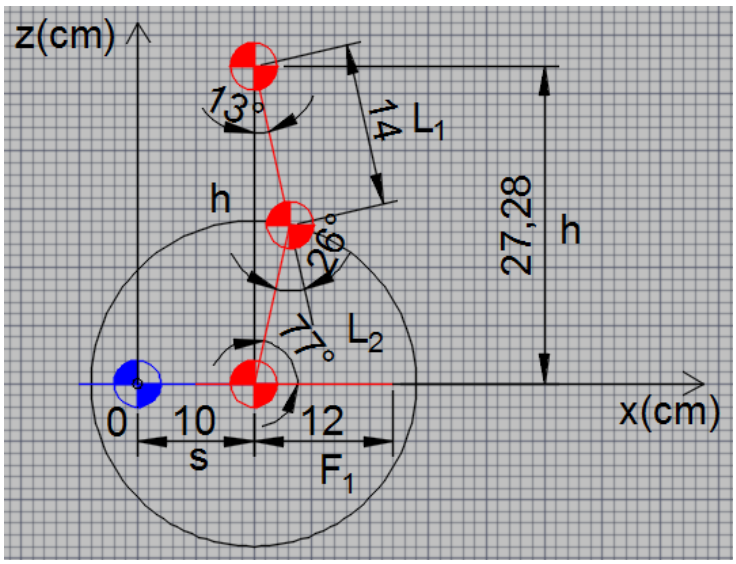
Şekil 4.21'deki DEF üçgeninde Cosinus teoreminden;

$$h^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2ABcos(180^{\circ} - \theta_2) \tag{4.62}$$

$$h^2 = 14^2 + 14^2 - 2 * 14 * 14 * cos(167^{\circ}) \tag{4.63}$$

$$h = 27{,}82001195894 \tag{4.64}$$

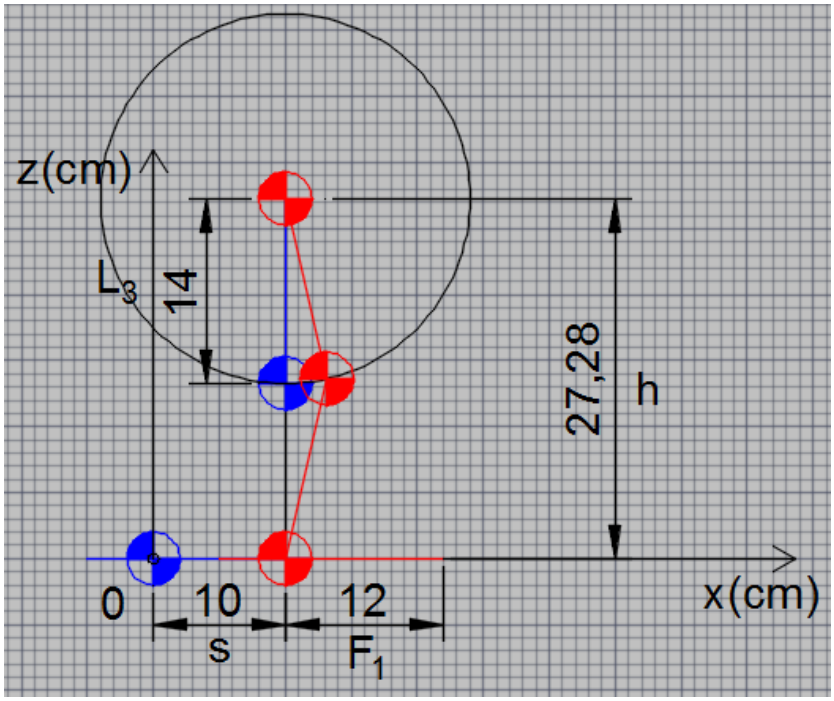
Burada h, aynı zamanda bel yüksekliğidir.



Şekil 4.22 Yüklenme fazı için sağ bacağın öne eğilmesi deseninin ters kinematik yöntemiyle üretilmesi.

Bu fazdaki, sağ bacağın eklem açıları koordinatları ve bel yüksekliği Şekil 4.22'deki gibi belirlendikten sonra sol bacak için Şekil 4.23'teki gibi belden aşağıya doğru adım adım çizim yapılır. İlk önce, belden x eksenine dik aşağı inilir ve sol dizin koordinatları belirlenir.

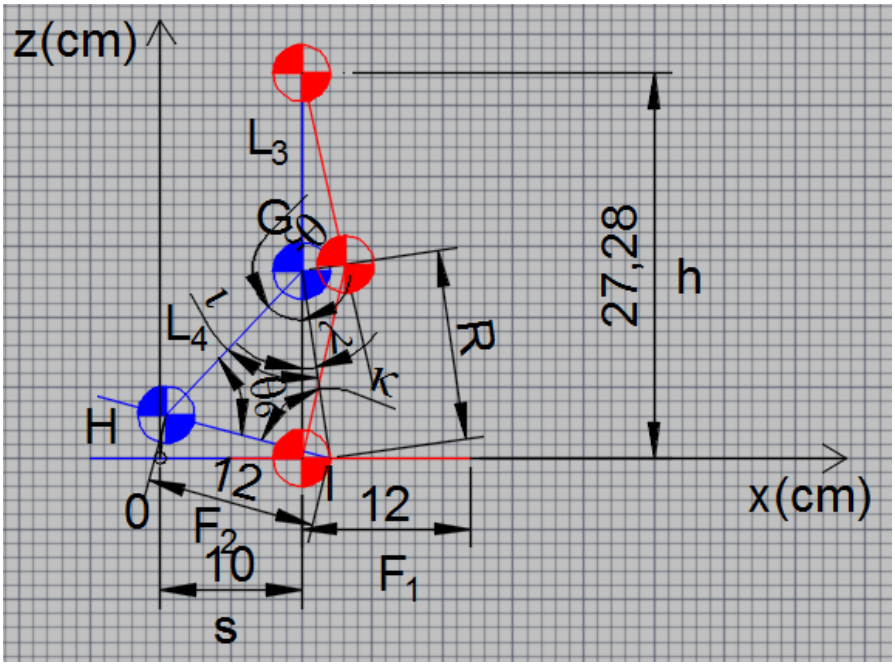
$\theta_4 = 0^\circ$ kabul edilir.



Şekil 4.23 Yüklenme fazı için sol bacağın kalçasının eklem açısının 0° kabul edilmesi.

Bu faz, sol ayağın yerden kalkması fazıdır. Sol ayağın ucu hedef koordinattır. Böylece sol dizin koordinatları başlangıç noktası kabul edilerek sol ayak ucunun koordinatları hedef koordinat noktası olarak seçilip iki serbestlik derecesine sahip robot manipülatörü ters kinematik yöntemiyle çözülerek bu fazdaki tüm eklem açıları bulunmuş olur.

Sol dizin koordinatları bilindiği için sol ayağın ucuna göre iki serbestlik derecesine sahip robot manipülatörünün eklem açıları ters kinematik yöntemiyle Şekil 4.24'teki gibi bulunur.



Şekil 4.24 Sol bacağın eklem açılarının bulunması için üçgen oluşturulması.

Şekil 4.24'teki GHI üçgeninde;

$$|GI| = R \tag{4.65}$$

$$R^2 = (2\times L_2\times \sin(77^\circ) - L_3)^2 + (F_2 - s)^2 \tag{4.66}$$

$$R^2 = (2\times 14\times \sin(77^\circ) - 14)^2 + (12 - 10)^2 \tag{4.67}$$

$$R = 13{,}13092286771\ cm \tag{4.68}$$

Şekil 4.24'teki GHI üçgeninde, Cosinus teoreminden;

$$|GH| = L_4 \tag{4.69}$$

$$|HI| = F_2 \tag{4.70}$$

$$R^2 = L_4^2 + F_2^2 - 2L_4F_2cos(\theta_6) \tag{4.71}$$

$$\theta_6 = cos^{-1}\left(\frac{R^2 - L_4^2 - F_2^2}{-2L_4F_2}\right) \quad (4.72)$$

$$\theta_6 = cos^{-1}\left(\frac{13{,}13092286771^{\,2} - 14^{\,2} - 12^{\,2}}{-2\times14\times12}\right) \quad (4.73)$$

$$\theta_6 = 60{,}08288830307^{\circ} \quad (4.74)$$

$$\iota = cos^{-1}\left(\frac{F_2^2 - R^2 - {L_4}^2}{-2\times R\times L_4}\right) \quad (4.75)$$

$$\iota = cos^{-1}\left(\frac{12^2 - 13{,}13092286771^{\,2} - 14^{\,2}}{-2\times13{,}13092286771\times14}\right) \quad (4.76)$$

$$\iota = 52{,}38198069466^{\circ} \quad (4.77)$$

$$\lambda = tan^{-1}\left(\frac{F_2 - s}{2\times L_2\times\sin(77^{\circ}) - L_3}\right) \quad (4.78)$$

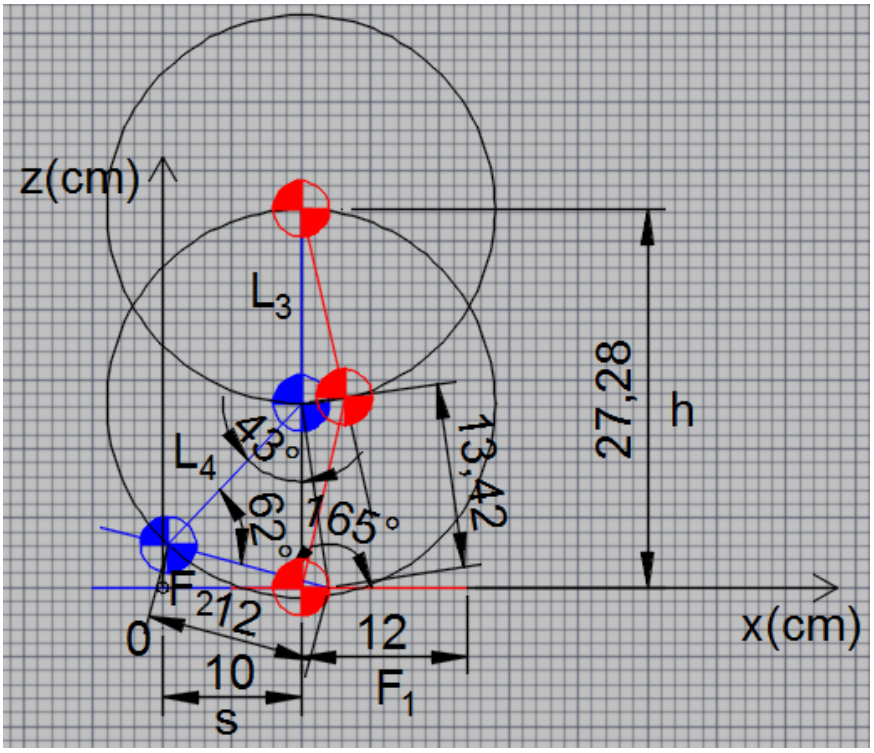
$$\lambda = tan^{-1}\left(\frac{12-10}{2\times14\times\sin(77^{\circ})-14}\right) \quad (4.79)$$

$$\lambda = 8{,}56301831385^{\circ} \quad (4.80)$$

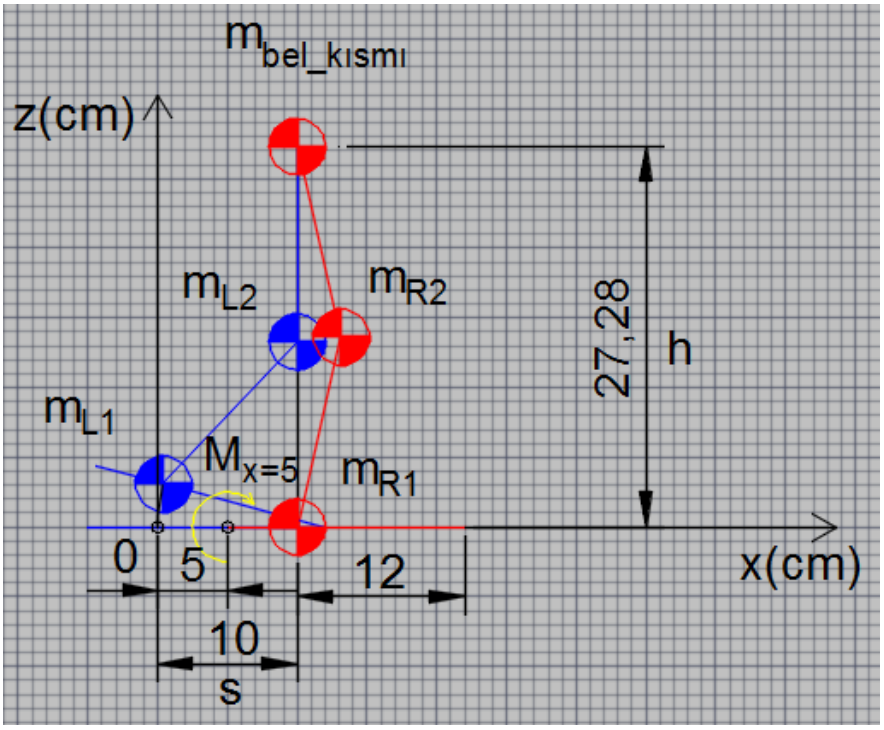
$$\theta_5 = \iota - \lambda \quad (4.81)$$

$$\theta_5 = 52{,}38198069466^{\circ} + 8{,}56301831385^{\circ} \quad (4.82)$$

$$\theta_5 = 43{,}81896238081^{\circ} \quad (4.83)$$



Şekil 4.25 Yüklenme fazı için sol bacağın eklem açılarının bulunması.



Şekil 4.26 Sağ ve sol bacak desenlerinden robotun SMN şartının sağlayıp sağlamadığının kontrolü

Bu fazdan sonra robotun sol ayağı salınıma geçecektir ve robot sağ ayak üzerinde kalacaktır. Ancak, sol ayak yerden kalkarken robot geriye doğru devrilmek isteyecektir. Bu nedenle robotun sağ ayağının arkasına göre moment hesabı yapılmalıdır. Şekil 4.26'daki gibi sağ ayak arka ucuna göre, yani $x = 5$ noktasına göre moment hesaplanması;

$$M_{x=5} \geq 0 \tag{4.84}$$

$$-m_{L_1} g x_{L_1} + m_{L_2} g x_{L_2} + m_{bel_kısmı} g x_{bel_kısmı} + m_{R_1} g x_{R_1} + m_{R_2} g x_{R_2} \geq 0 \tag{4.85}$$

$$-0{,}44 \times 9{,}81 \times (0{,}12 \times \cos 52^{\circ} + (0{,}13 - 0{,}12)) + 0{,}158 \times 9{,}81 \times (0{,}18 - 0{,}12) + 1{,}61 \times 9{,}81 \times (0{,}18 - 0{,}12) + 0{,}44 \times 9{,}81 \times (0{,}18 - 0{,}12) + 0{,}158 \times 9{,}81 \times 0{,}14 \times \cos 77^{\circ}) \geq 0 \tag{4.86}$$

$$0{,}98638560588 \geq 0 \tag{4.87}$$

olduğu için uygundur.

4.3.1.3. Basma ortası

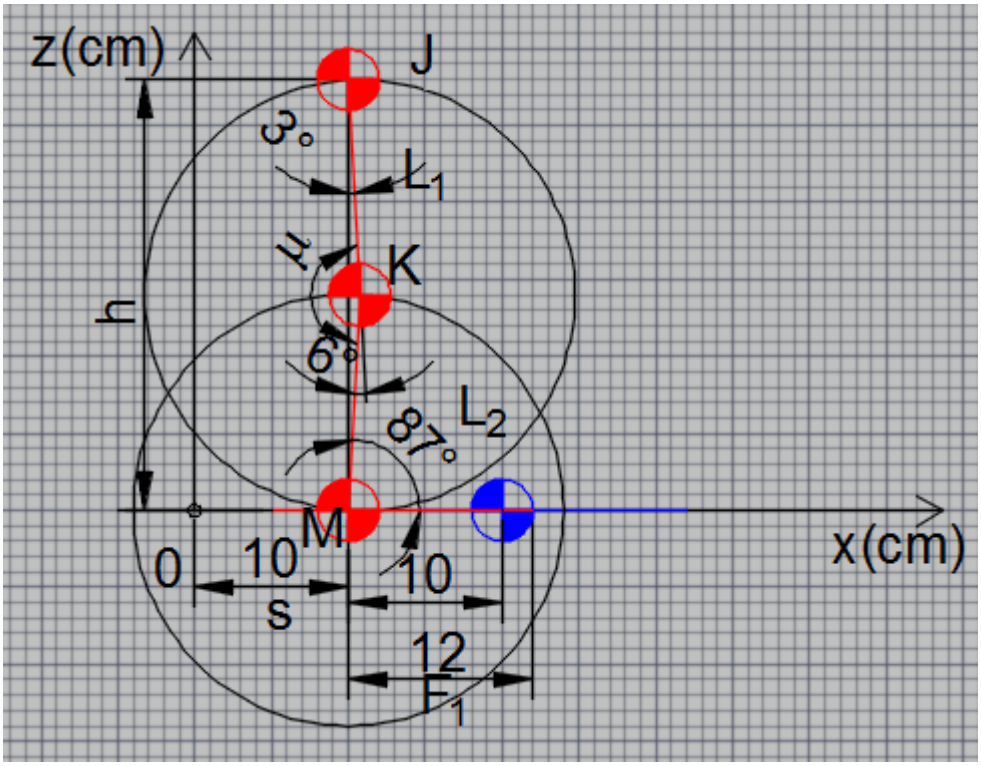
Basma orta fazında sadece sağ ayak yere basacak sol ayak ise salınımın ortasında olacaktır. Sol ayak salınım fazındayken yere sürtünmemelidir. Bu nedenle sol kalça ve sol dizin eklem açıları uygun pozisyonda olmalıdır.

İlk önce yere temas eden; sağ bacağın kalça, diz ve bilek açıları için aşağıdaki değerlerde olduğu, Şekil 4.27'deki gibi kabul edilir.

$$\theta_1 = 3^{\circ} \tag{4.88}$$

$$\theta_2 = 6^{\circ} \tag{4.89}$$

$$\theta_3 = 87^{\circ} \tag{4.90}$$



Şekil 4.27 Basma ortası fazı için sağ bacak kalça ve diz açı değerlerinin atanması.

Şekil 4.27'deki JKM üçgeninde Cosinus teoreminden bel yüksekliği bulunur.

$$\mu = 180^{\circ} - \theta_2 \tag{4.91}$$

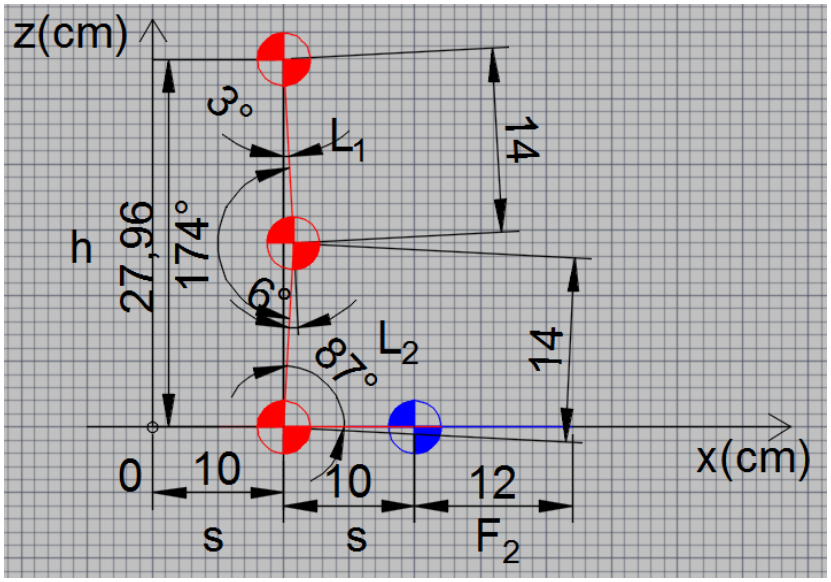
$$\mu = 174^{\circ} \tag{4.92}$$

$$h^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2cos(\mu) \tag{4.93}$$

$$h^2 = 14^2 + 14^2 - 2 * 14 * 14 * cos(174^{\circ}) \tag{4.94}$$

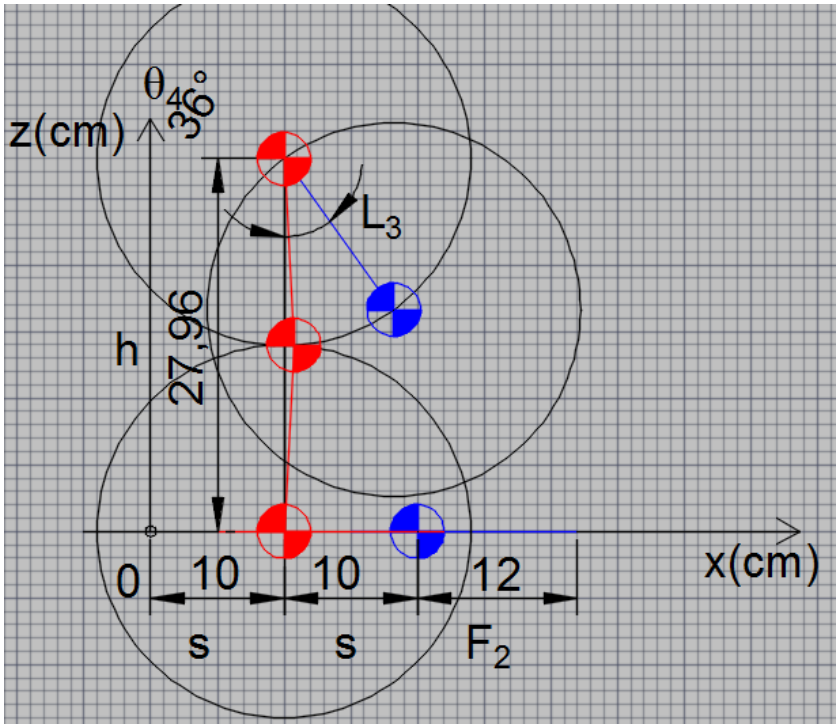
$$h = 27{,}96162697313\ cm \tag{4.95}$$

Böylece bu faz için robotun bel yüksekliği ve koordinatları da belirlenmiş olur

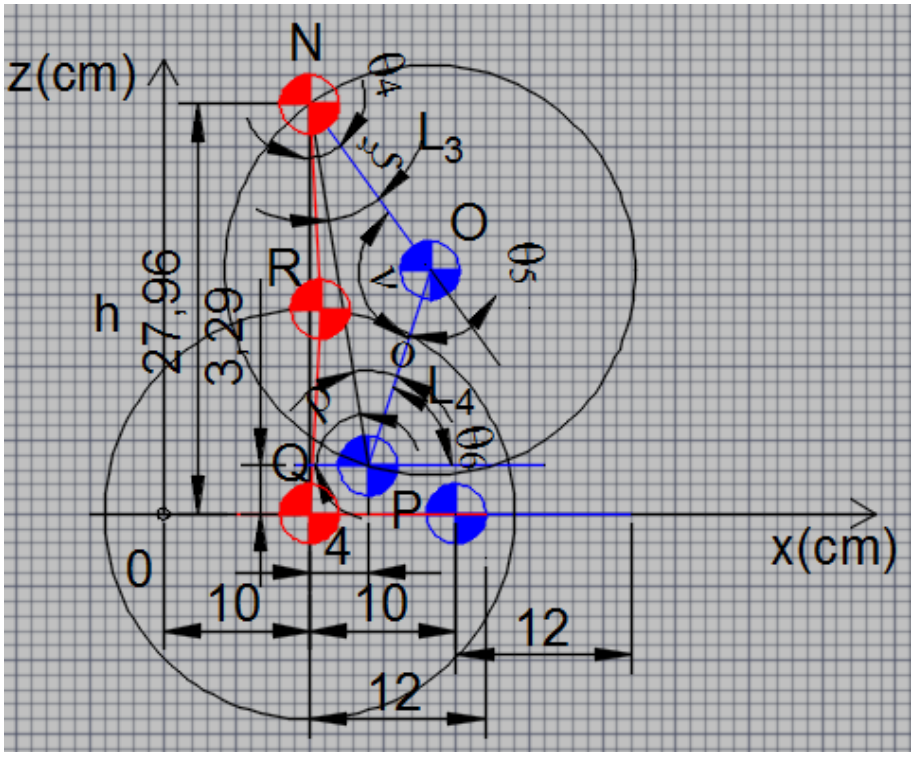


Şekil 4.28 Basma ortası fazı için robotun bel yüksekliğinin belirlenmesi.

Bel yüksekliği ve koordinatları belirlenmiş robotun ayağının yere sürtünmemesi için sol dizinin yerden daha da yükselmesi gerekir. Yani sol kalçanın 2. fazdaki değerinden daha fazla olması gerekir. Burada sol kalça açı değerinin $\theta_4 = 36^\circ$'ye gitmesi, Şekil 4.29'daki gibi hedeflenmiştir.



Şekil 4.29 Basma ortası fazında sol kalça açısının 36° olarak belirlenmesi.



Şekil 4.30 Sol bacak için ters kinematik gösterimi.

Sol kalça açısının $\theta_4 = 36^\circ$ olarak verilmesiyle ileri yön kinematiğiyle sol dizin koordinatları, Şekil 4.30'daki gibi bulunur.

$$\theta_4 = 36^\circ \tag{4.96}$$

$$x_{sol_diz} = s + L_3 \times \sin\theta_4 \tag{4.97}$$

$$x_{sol_diz} = s + 14 \times \sin 36^\circ \tag{4.98}$$

$$x_{sol_diz} = 18{,}22899353209 \tag{4.99}$$

$$z_{sol_diz} = h - L_3 \times \cos\theta_4 \tag{4.100}$$

$$z_{sol_diz} = 27{,}96162697313 - 14 \times \cos 36^\circ \tag{4.101}$$

$$z_{sol_diz} = 16{,}63538905188 \tag{4.102}$$

Sol dizin koordinatlarının bulunmasıyla merkezi bu nokta olan sol bacak diz altı ile bilek arasındaki uzunlukta bir çember çizilir. Bu çemberin merkezi, aynı zaman da sol dizin koordinatlarıdır. Sol kalça ve sol diz koordinatları belirlenen robotun sol ayağının sağ ayağın ortasından dik geçen ekseni hedefleyen bir sol bacağın diz altı tasarlanır. Bulunan çember fonksiyonunda $x_{sol_bilek} = 14$ yazılarak z_{sol_bilek} değeri ileri yön kinematiğiyle bulunur. Böylece sol dizin açısı ve sol bilek açıları belirlenmiş olur.

Şekil 4.30'daki merkezi sol diz olan çember denklemi;

$$\left(x - x_{sol_diz}\right)^2 + \left(z - z_{sol_diz}\right)^2 = L_4^2 \tag{4.103}$$

$$(x - 18{,}22899353209)^2 + (z - 16{,}63538905188)^2 = L_4^2 \tag{4.104}$$

Merkezi sol diz olan çember denkleminde $x = 14$ konulursa;

$$(14 - 18{,}22899353209)^2 + (z - 16{,}63538905188)^2 = 14^2 \tag{4.105}$$

$$(z - 16{,}63538905188)^2 = 196 - 17{,}88438629446 \tag{4.106}$$

$$(z - 16{,}63538905188)^2 = 178{,}11561370554 \tag{4.107}$$

$$z^2 - 2{\times}16{,}63538905188{\times}z + 16{,}63538905188^2 = 178{,}11561370554 \tag{4.108}$$

$$z^2 - 33.27077810376{\times}z + 98.62055520187 = 0 \tag{4.109}$$

İkinci dereceden denklem çözülüp kökleri bulunur;

$$z_{sol_diz_1} = 3{,}2893928842820586 \tag{4.110}$$

$$z_{sol_diz_2} = 29{,}981385219477943 \tag{4.111}$$

Bulunan köklerden $z_{sol_diz_2} = 29{,}981385219477943$, robotun çalışma uzayı dışına olduğu için geçersizdir. Böylece $z_{sol_diz_1} = 3{,}2893928842820586$ aynı zamanda robotun sol ayağının yerden yüksekliğini de ifade eder.

Şekil 4.30'daki NOP üçgeninde |NP|=R ise;

$$R^2 = \left(h - z_{sol_diz_1}\right)^2 + \left(x_{sol_bilek} - s\right)^2 \tag{4.112}$$

$$R^2 = (27{,}96162697313 - 3{,}2893928842820586)^2 + (14 - 10)^2 \tag{4.113}$$

$$R = 24{,}99438206747 \tag{4.114}$$

NOP üçgeninde Cosinus teoreminden θ_5'in bütünler açısı ν bulunur.

$$R^2 = L_3^2 + L_4^2 - 2L_3L_4cos(\nu) \tag{4.115}$$

$$\nu = cos^{-1}\left(\frac{R^2 - L_3^2 - L_4^2}{-2L_3L_4}\right) \tag{4.116}$$

$$\nu = cos^{-1}\left(\frac{24{,}99438206747^2 - 14^2 - 14^2}{-2 \times 14 \times 14}\right) \tag{4.117}$$

$$\nu = 126{,}41796727819^\circ \tag{4.118}$$

$$\theta_5 = 180^\circ - 126{,}41796727819^\circ \tag{4.119}$$

$$\theta_5 = 53{,}58203272181^\circ \tag{4.120}$$

Şekil 4.30'daki NQP üçgeninden;

$$\rho = tan^{-1}\left(\frac{h - z_{sol_diz_1}}{x_{sol_bilek} - s}\right) \tag{4.121}$$

$$\rho = tan^{-1}\left(\frac{27{,}96162697313 - 3{,}2893928842820586}{14 - 10}\right) \tag{4.122}$$

$$\rho = 80{,}79101636089^{\circ} \tag{4.123}$$

Şekil 4.30'daki NOP üçgeni ikizkenar üçgendir. Bundan dolayı;

$$\xi = o \tag{4.124}$$

$$\xi + o + \nu = 180^{\circ} \tag{4.125}$$

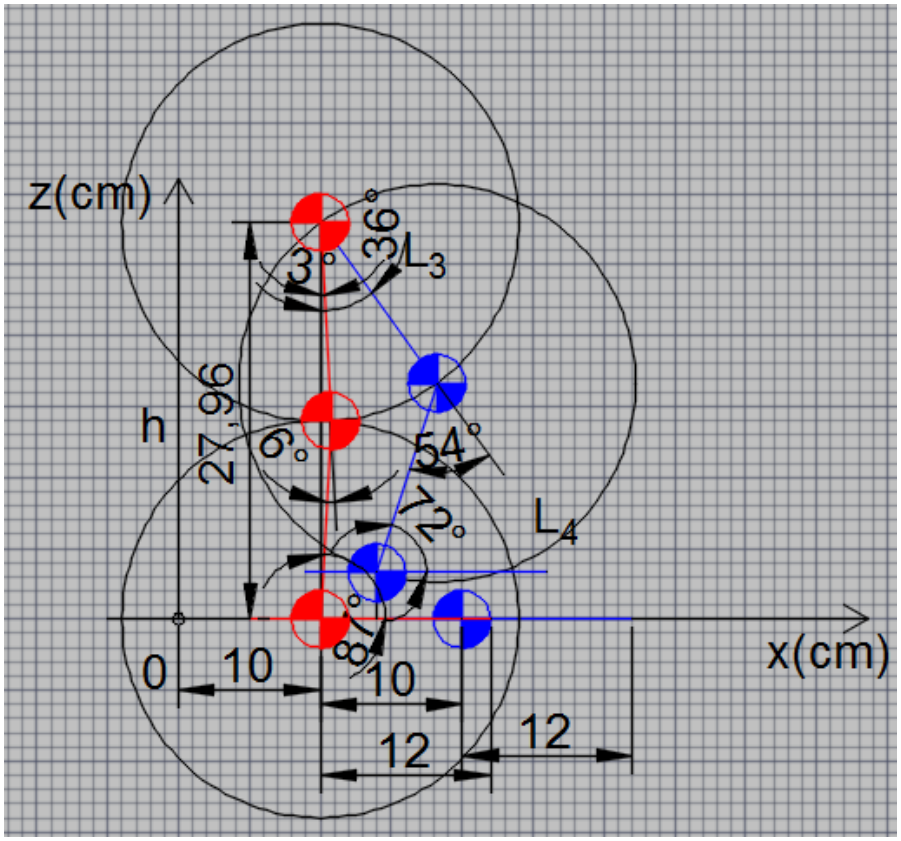
$$\xi + o + 126{,}41796727819^{\circ} = 180^{\circ} \tag{4.126}$$

$$o = 26{,}7910163609^{\circ} \tag{4.127}$$

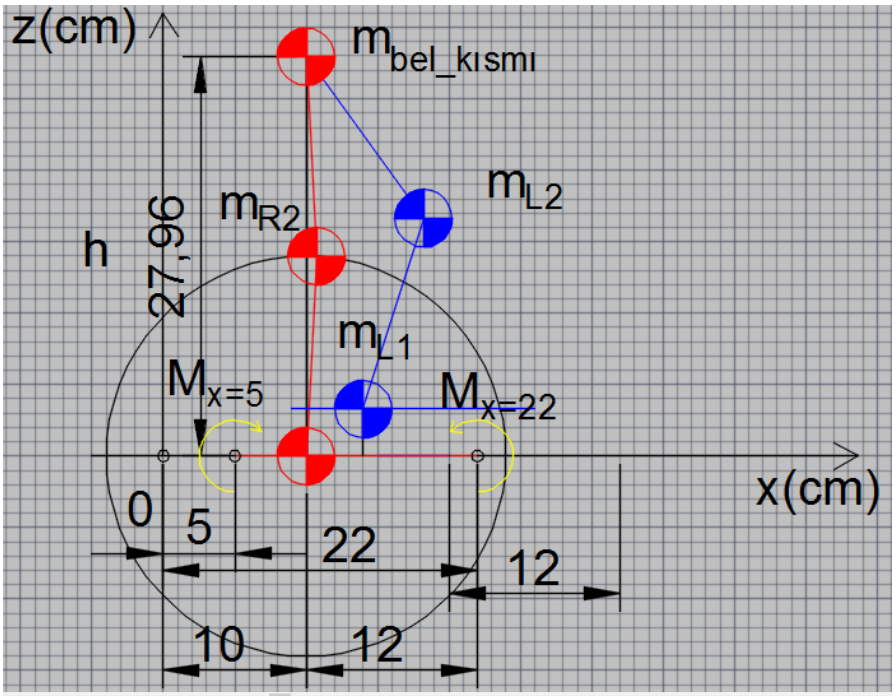
$$\rho + o + \theta_6 = 180^{\circ} \tag{4.128}$$

$$80{,}79101636089^{\circ} + 26{,}7910163609^{\circ} + \theta_6 = 180^{\circ} \tag{4.129}$$

$$\theta_6 = 72{,}4179672782^{\circ} \tag{4.130}$$



Şekil 4.31 Basma ortası fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları.



Şekil 4.32 Basma ortası fazında olası döndürme moment noktaları

Basma ortası fazında robotun sol ayağı, salınım ortasındadır. Robot sağ ayak üzerinde tek ayakta durmaktadır. Şekil 4.32'de görüldüğü gibi robotun düşmesi için olası döndürme moment noktaları, $x = 13$ ve $x = 30$'dur. Bu noktalar, tek ayak üzerinde kalan robotun sağ ayağının ön ve arka noktalarıdır. Ancak tüm ağırlık noktalarının oluşturacağı kuvvetlerin izdüşümü, robotun sağ ayağının çokgeni içinde kalmaktadır. Dolayısı ile yanal düzlemde herhangi bir döndürme momenti oluşmayacağından robot dengede kalacaktır.

4.3.1.4. Basma Sonu Fazı(Çift Destek Fazı)

Basma sonu fazında, sol ayak yere basacak, sağ ayakta basma fazında kalmaya devam edecektir. Böylece sol bacağın eklem açıları, birinci fazdaki sağ bacağın açılarının aynısı olacaktır. Benzer şekilde, sağ bacağın eklem açıları da sol bacağın eklem açılarının aynısı olacaktır. Dolayısı ile ilk fazda yapılan işlemler, x eksenin de bir adım uzunluğu kadar öteleme yapacak şekilde bu faz içinde tekrar düzenlenerek sağ ve sol bacak için tüm eklem açıları Şekil 4.33'teki gibi bulunur. Bu faz aynı zamanda çift destek fazıdır.

$$\theta_1 = 0.8698233053^{\circ} \tag{4.131}$$

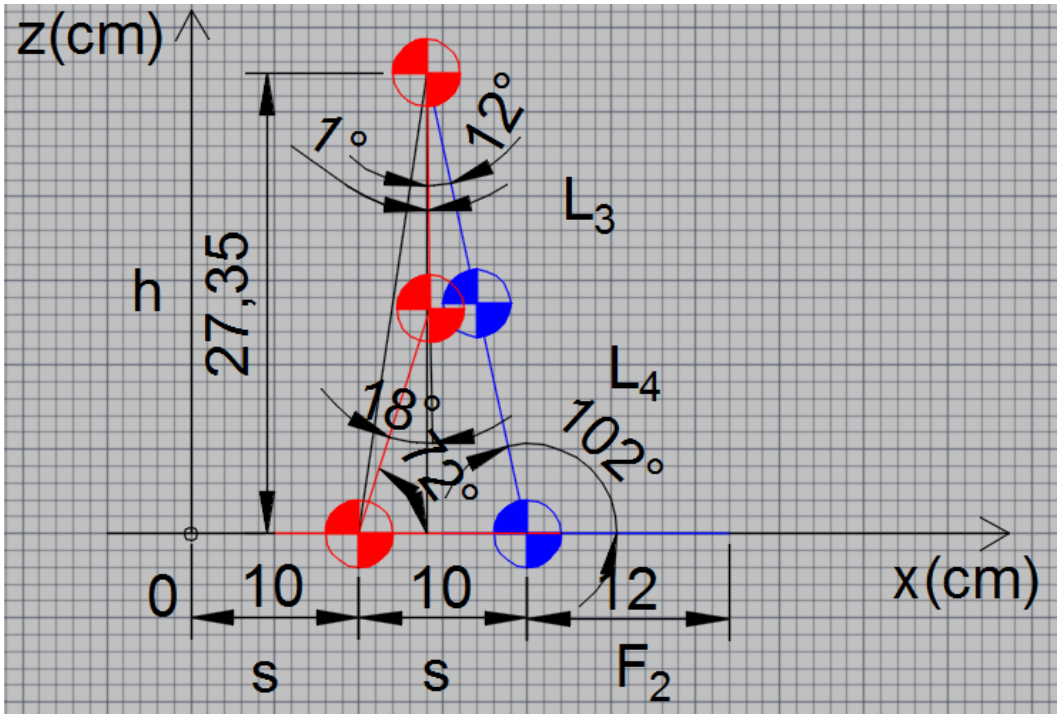
$$\theta_2 = 18{,}38118911412^{\circ} \tag{4.132}$$

$$\theta_3 = 72.48863419118^{\circ} \tag{4.133}$$

$$\theta_4 = 12{,}37362511619^{\circ} \tag{4.134}$$

$$\theta_5 = 0^{\circ} \tag{4.135}$$

$$\theta_6 = 102{,}37362511619^{\circ} \tag{4.136}$$



Şekil 4.33 Basma sonu fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları.

İlk değme fazındaki koşullar, basma sonu fazındaki koşullar içinde geçerli olduğundan SMN şartlarının sağlanıp sağlanmadığı koşulları bu faz içinde geçerli olup robot yanal düzlemde dengede olduğu kabul edilir.

4.3.1.5. Salınım Öncesi Fazı

Salınım öncesi fazında sağ bacak, salınıma başlamaya hazırlanmaktadır. Sol bacak, sağ bacağın salınıma geçmeden önceki pozisyonu için statik dengesini sağlama şartlarını yerine getirmek için ileriye doğru eğilecektir. Sol bacak için bir adım uzunluğu kadar x ekseninde sağa ötelenerek çizilir. Sağ bacağın eklem açılarının değerleri de ikinci fazdaki sol bacağın eklem açılarının değerleri olacaktır. Benzer şekilde, sol bacağın eklem açıları da sağ bacağın eklem açılarının aynısı Şekil 4.34'teki gibi olacaktır.

$$\theta_1 = 0^{\circ} \tag{4.137}$$

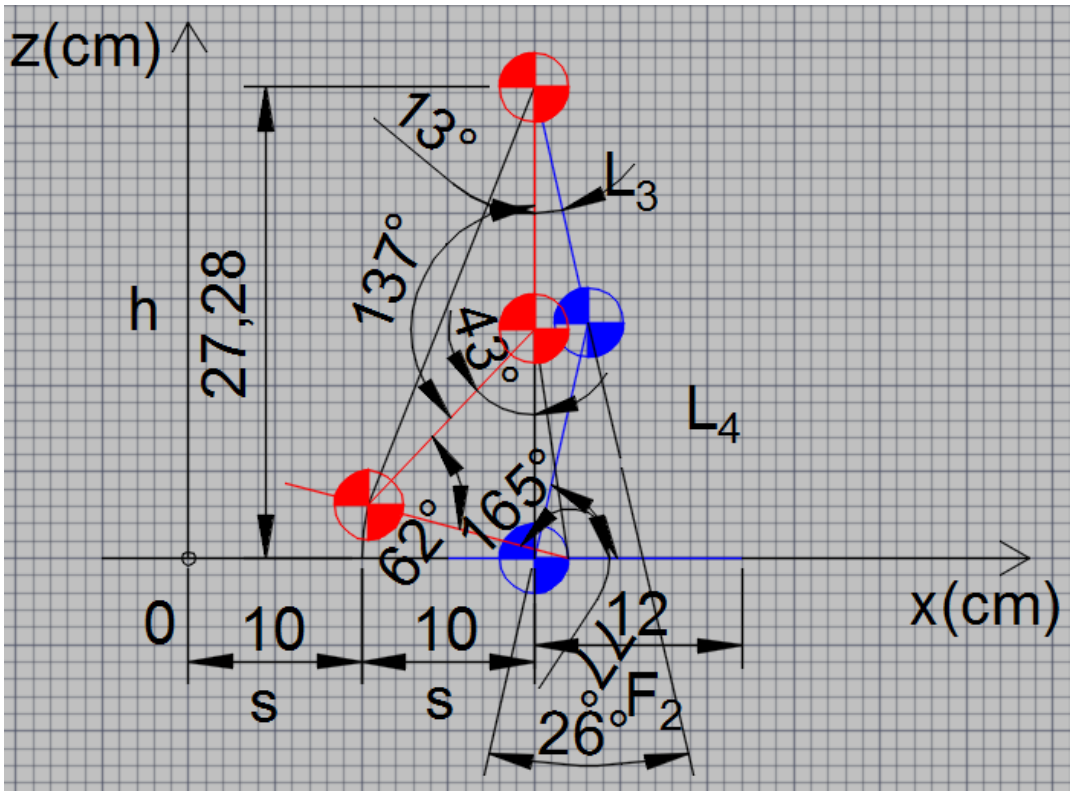
$$\theta_2 = 43{,}81896238081^{\circ} \tag{4.138}$$

$$\theta_3 = 60{,}08288830307^{\circ} \tag{4.139}$$

$$\theta_4 = 13^{\circ} \tag{4.140}$$

$$\theta_5 = 26^{\circ} \tag{4.141}$$

$$\theta_6 = 77^{\circ} \tag{4.142}$$



Şekil 4.34 Salınım öncesi fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları.

Yüklenme fazındaki koşullar, salınım öncesi fazındaki koşullar içinde geçerli olduğundan, SMN şartlarının sağlanıp sağlanmadığı koşulları bu faz içinde geçerli olup robot yanal düzlemde dengede olduğu kabul edilir.

4.3.2. Salınım Fazı

4.3.2.1. Salınım Başlangıcı

Salınım başlangıcı fazında sadece sol ayak yere basacak sağ ayak ise, salınıma başlayacaktır. Sağ ayak salınım fazına başladığından yerden temasını kesmelidir. Bu

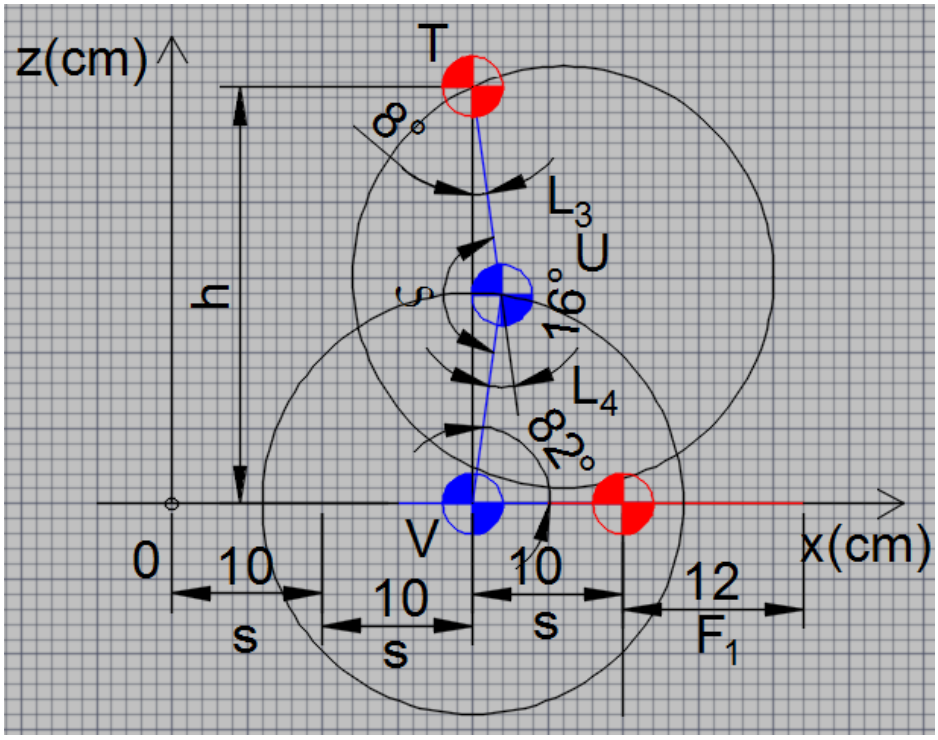
nedenle, sol kalça açısının değeri azalmalı ve sağ dizin eklem açıları ayak yere değmeyecek pozisyonda olmalıdır.

İlk önce yere temas eden sol bacağın kalça, diz ve bilek açıları için Şekil 4.35'teki gibi aşağıdaki değerlerde olduğu kabul edilir.

$$\theta_4 = 8^\circ \tag{4.143}$$

$$\theta_5 = 16^\circ \tag{4.144}$$

$$\theta_6 = 82^\circ \tag{4.145}$$



Şekil 4.35 Salınım başlangıcı fazı sol bacak kalça ve diz açı değerlerinin atanması.

Şekil 4.35'teki TUV üçgeninde Cosinus teoreminden bel yüksekliği bulunur.

$$\varsigma = 180^\circ - \theta_5 \tag{4.146}$$

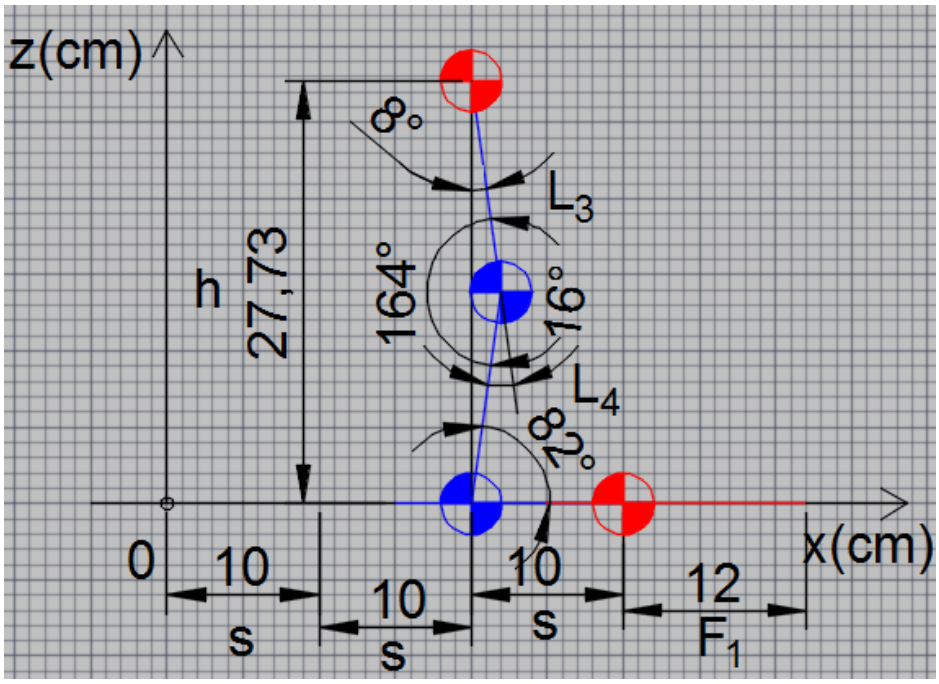
$$\varsigma = 164^\circ \tag{4.147}$$

$$h^2 = L_3^2 + L_4^2 - 2L_3L_4cos(\varsigma) \quad (4.148)$$

$$h^2 = 14^2 + 14^2 - 2 * 14 * 14 * cos(164^\circ) \quad (4.150)$$

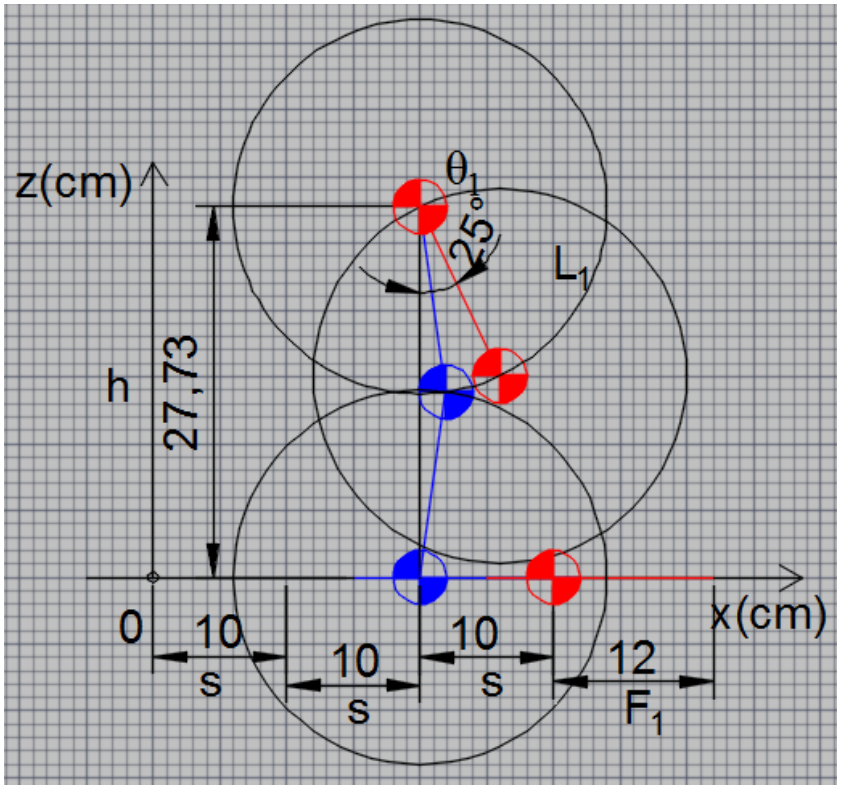
$$h = 27{,}72750592476\ cm \quad (4.151)$$

Böylece bu faz için Şekil 4.36'daki gibi robotun bel yüksekliği ve koordinatları da belirlenmiş olur

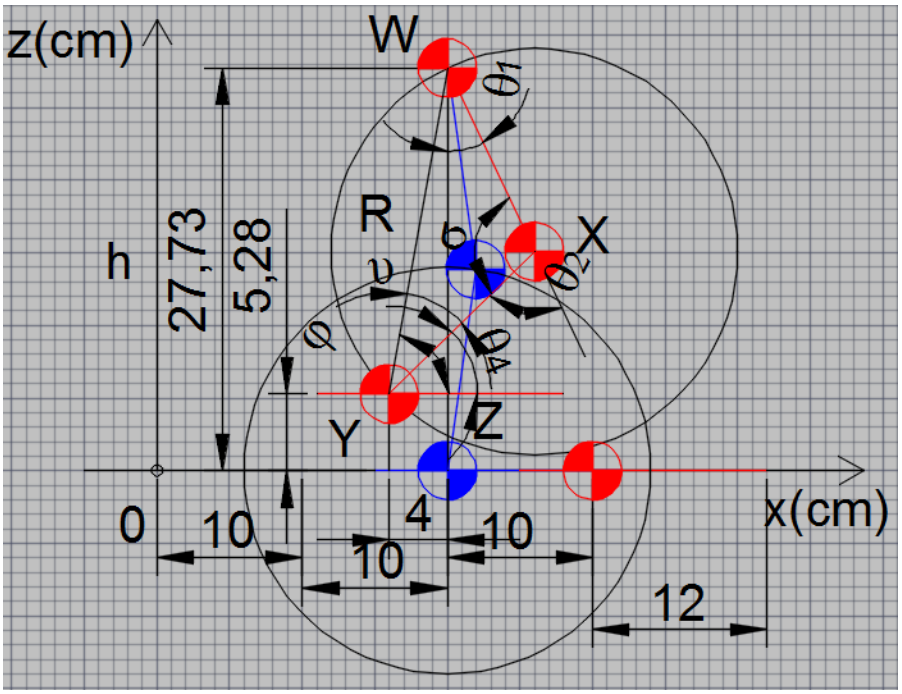


Şekil 4.36 Salınım başlangıcı fazı için robotun bel yüksekliğinin belirlenmesi.

Şekil 4.36'daki gibi bel yüksekliği ve koordinatları belirlenmiş robotun ayağının yere sürtünmemesi için sağ dizinin yerden daha da yükselmesi gerekir. Burada sağ kalça açı değerinin Şekil 4.37'deki gibi $\theta_1 = 25^\circ$'ye gitmesi uygun görülmüştür.



Şekil 4.37 Salınım başlangıcı fazında sol kalça açısının 25° olarak belirlenmesi.



Şekil 4.38 Sağ bacak için ters kinematik gösterimi.

Sağ kalça açısının $\theta_1 = 25^\circ$ olarak verilmesiyle ileri yön kinematiğiyle sağ dizin koordinatları, Şekil 4.38'deki gibi bulunur.

$$\theta_1 = 25^\circ \tag{4.152}$$

$$x_{sağ_diz} = 20 + L_1 \times \sin\theta_1 \tag{4.153}$$

$$x_{sağ_diz} = 20 + 14 \times \sin 25^\circ \tag{4.154}$$

$$x_{sağ_diz} = 25{,}91665566437 \tag{4.155}$$

$$z_{sağ_diz} = h - L_3 \times \cos\theta_4 \tag{4.156}$$

$$z_{sağ_diz} = 27{,}72750592476 - 14 \times \cos 25^\circ \tag{4.157}$$

$$z_{sağ_diz} = 15{,}03919690625 \tag{4.158}$$

Sağ dizin koordinatlarının bulunmasıyla merkezi bu nokta olan sağ bacak diz altı ile bilek arasındaki uzunlukta Şekil 4.38'deki gibi bir çember çizilir. Bu çemberin merkezi, aynı zaman da sağ dizin koordinatlarıdır. Sağ kalça ve sağ diz koordinatları belirlenen robotun sağ ayağının arkasından dik geçen ekseni hedefleyen bir sağ bacak diz altı tasarlanır. Bulunan çember fonksiyonunda $x_{sağ_bilek} = 16$ yazılarak $z_{sağ_bilek}$ değeri ileri yön kinematiğiyle bulunur. Böylece sağ dizin açısı ve sağ bilek açıları belirlenmiş olur.

Şekil 4.38'deki merkezi sağ diz olan çember denklemi;

$$\left(x - x_{sağ_diz}\right)^2 + \left(z - z_{sağ_diz}\right)^2 = L_4^2 \tag{4.159}$$

$$(x - 25{,}91665566437)^2 + (z - 15{,}03919690625)^2 = L_4^2 \tag{4.160}$$

Şekil 4.38'deki merkezi sağ diz olan çember denkleminde $x = 16$ konulursa;

$$(16 - 25{,}91665566437)^2 + (z - 15{,}03919690625)^2 = 14^2 \quad (4.161)$$

$$(z - 15{,}03919690625)^2 = 196 - 98{,}34005956568 \quad (4.162)$$

$$(z - 15{,}03919690625)^2 = 97{,}65994043432 \quad (4.163)$$

$$z^2 - 2{\times}15{,}03919690625{\times}z + 15{,}03919690625^2 = 97{,}65994043432 \quad (4.164)$$

$$z^2 - 30{,}0783938125{\times}z + 128{,}51750315064 = 0 \quad (4.165)$$

İkinci dereceden denklem çözülüp kökleri bulunur;

$$z_{sağ_diz_1} = 5{,}156892497139767 \quad (4.166)$$

$$z_{sağ_diz_2} = 24{,}92150131536023 \quad (4.167)$$

Bulunan köklerden $z_{sağ_diz_2} = 24{,}92150131536023$, robotun çalışma uzayı dışında olduğu için geçersizdir. Böylece, $z_{sağ_diz_1} = 5{,}156892497139767$, aynı zamanda robotun sol ayağının yerden yüksekliğini de ifade eder.

Şekil 4.38'deki WYZ üçgeninde |WY|=R ise;

$$R^2 = \left(h - z_{sağ_diz_1}\right)^2 + \left(x_{sağ_diz} - 2{\times}s\right)^2 \quad (4.168)$$

$$R^2 = (27{,}72750592476 - 5{,}156892497139767)^2 + (24 - 2{\times}10)^2 \quad (4.169)$$

$$R = 22{,}92231642961 \quad (4.170)$$

Şekil 4.38'deki WXY üçgeninde Cosinus teoreminden θ_2'in bütünler açısı σ bulunur.

$$R^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2cos(\sigma) \quad (4.171)$$

$$\sigma = cos^{-1}\left(\frac{R^2 - L_1^2 - L_2^2}{-2L_1L_2}\right) \quad (4.172)$$

$$\sigma = cos^{-1}\left(\frac{22{,}92231642961^2 - 14^2 - 14^2}{-2\times14\times14}\right) \quad (4.173)$$

$$\sigma = 109{,}90059175001^{\circ} \quad (4.174)$$

$$\theta_2 = 180^{\circ} - 109{,}90059175001^{\circ} \quad (4.175)$$

$$\theta_2 = 70{,}09940824999^{\circ} \quad (4.176)$$

Şekil 4.38'deki WYZ üçgeninden;

$$\varphi = tan^{-1}\left(\frac{h - z_{sağ_diz_1}}{2\times s - x_{sol_{bilek}}}\right) \quad (4.177)$$

$$\varphi = tan^{-1}\left(\frac{27{,}72750592476 - 5{,}156892497139767}{2\times10-16}\right) \quad (4.178)$$

$$\varphi = 79{,}95029587501^{\circ} \quad (4.179)$$

Şekil 4.38'deki WXY üçgeninde Cosinus teoreminden υ açısı bulunur.

$$L_1^2 = R^2 + L_2^2 - 2RL_2cos(\upsilon) \quad (4.180)$$

$$\upsilon = cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 - R^2 - L_2^2}{-2RL_2}\right) \quad (4.181)$$

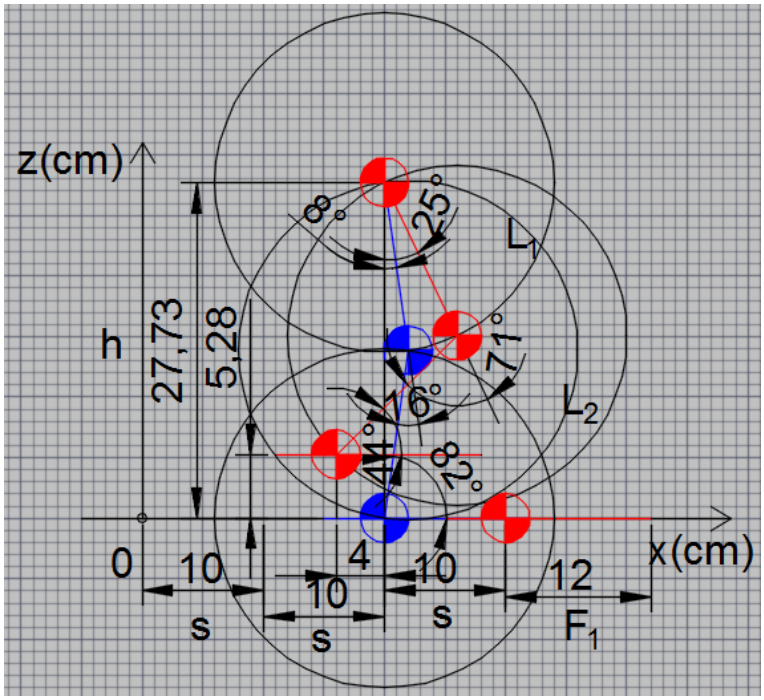
$$\upsilon = cos^{-1}\left(\frac{14^2 - 22{,}92231642961^2 - 14^2}{-2\times22{,}92231642961\times14}\right) \quad (4.182)$$

$$\upsilon = 35{,}049704125^{\circ} \quad (4.183)$$

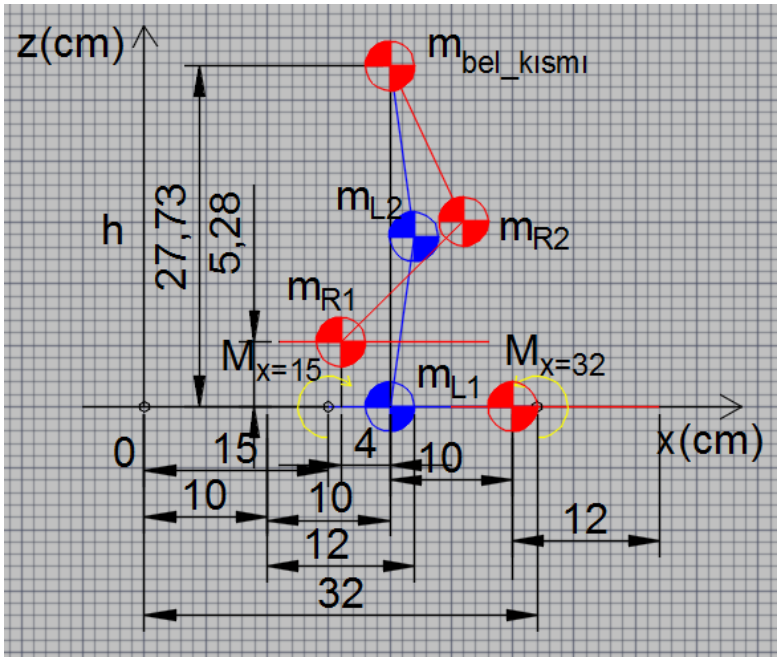
$$\theta_3 = \varphi - \upsilon \quad (4.184)$$

$$\theta_3 = 79{,}95029587501^{\circ} - 35{,}0497041251^{\circ} \tag{4.185}$$

$$\theta_3 = 44{,}90059174991^{\circ} \tag{4.186}$$



Şekil 4.39 Salınım başlangıcı fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları.



Şekil 4.40 Salınım başlangıcı fazında olası döndürme moment noktaları

Salınım başlangıcı fazında robotun sağ ayağı salınım başlangıcındadır. Robot sol ayak üzerinde tek ayakta durmaktadır. Şekil 4.40'da görüldüğü gibi robotun düşmesi için olası döndürme moment noktaları, $x = 31$ ve $x = 48$'dur. Bu noktalar, tek ayak üzerinde kalan robotun sol ayağının ön ve arka noktalarıdır. Ancak tüm ağırlık noktalarının oluşturacağı kuvvetlerin izdüşümü, robotun sol ayağının çokgeni içinde kalmaktadır. Dolayısı ile yanal düzlemde herhangi bir döndürme momenti oluşmayacağından robot dengede kalacaktır.

4.3.2.2. Salınım Ortası

Salınım ortası fazında sol bacak yere basarken, sağ bacak havada salınımın ortasındadır. Şekil 4.41'deki basma ortasındaki sağ bacağın eklem açıları sol bacağın değerlerini, sol bacağın eklem açıları da sağ bacağın eklem açıları değerlerini alır.

$$\theta_1 = 36^\circ \tag{4.187}$$

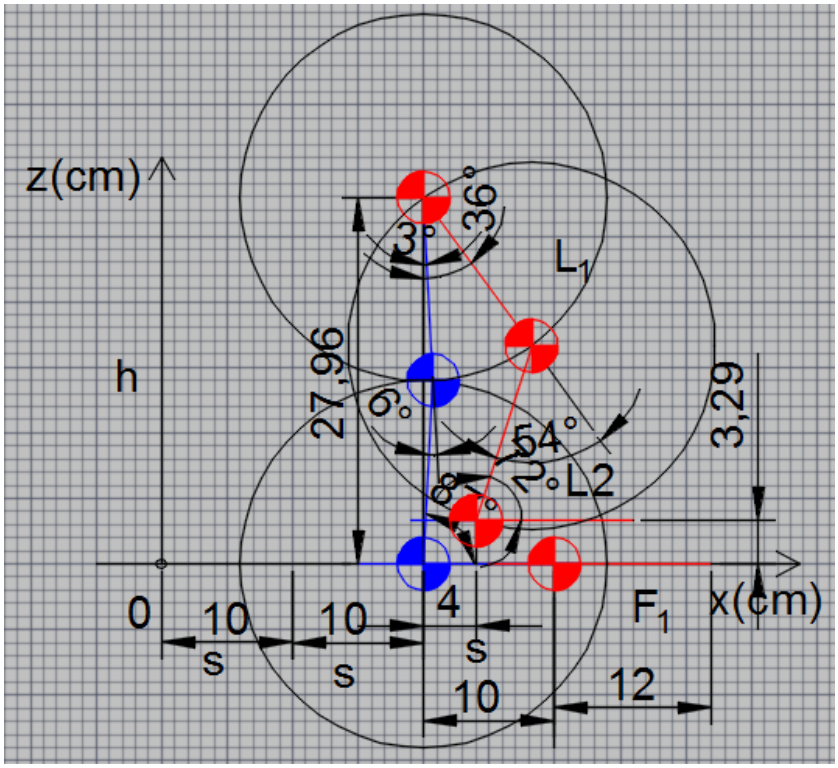
$$\theta_2 = 53{,}58203272181^\circ \tag{4.188}$$

$$\theta_3 = 72{,}4179672782^\circ \tag{4.189}$$

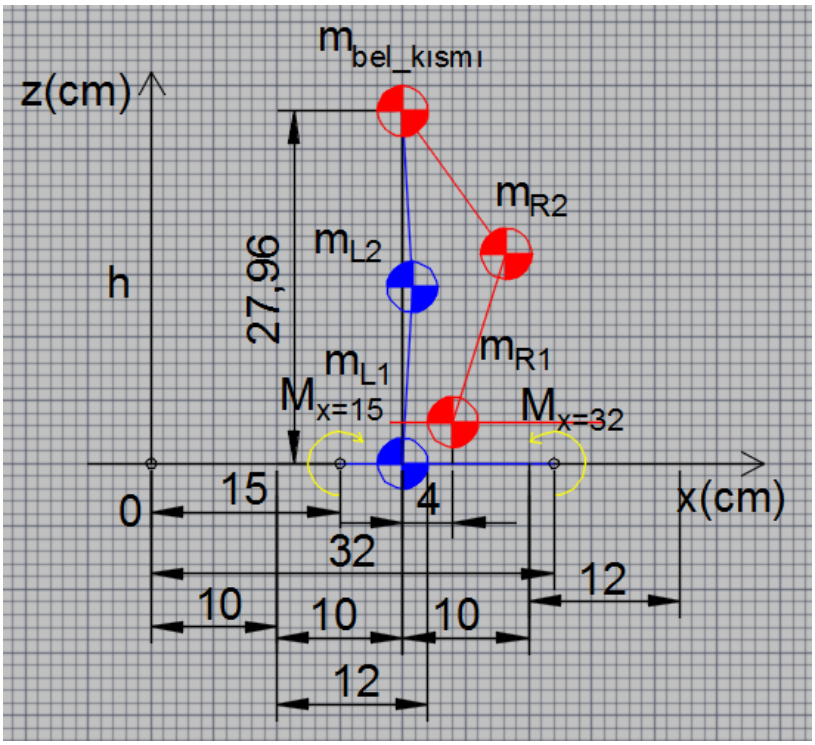
$$\theta_4 = 3^\circ \tag{4.190}$$

$$\theta_5 = 6^\circ \tag{4.191}$$

$$\theta_6 = 87^\circ \tag{4.192}$$



Şekil 4.41 Salınım ortası fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları.



Şekil 4.42 Salınım ortası fazında olası döndürme moment noktaları.

Salınım ortası fazında robotun sağ ayağı, salınım ortasındadır. Robot sol ayak üzerinde tek ayakta durmaktadır. Şekil 4.42'de görüldüğü gibi robotun düşmesi için olası döndürme moment noktaları $x = 15$ ve $x = 32$'dır. Bu noktalar, tek ayak üzerinde kalan robotun sol ayağının ön ve arka noktalarıdır. Ancak tüm ağırlık noktalarının oluşturacağı kuvvetlerin izdüşümü, robotun sol ayağının çokgeni içinde kalmaktadır. Dolayısı ile yanal düzlemde herhangi bir döndürme momenti oluşmayacağından robot dengede kalacaktır.

4.3.2.3. Salınım Sonu Fazı

Salınım sonu fazı ile sağ bacak için bir döngü tamamlanmış olur. Aynı zamanda sağ bacağın eklem açılarının değeri, birinci fazdaki ile aynı olur. Benzer şekilde sol bacağın eklem açıları da Şekil 4.43'teki gibi, ilk değme fazındaki değerlerle aynı olur.

$$\theta_1 = 12{,}37362511619^{\circ} \tag{4.193}$$

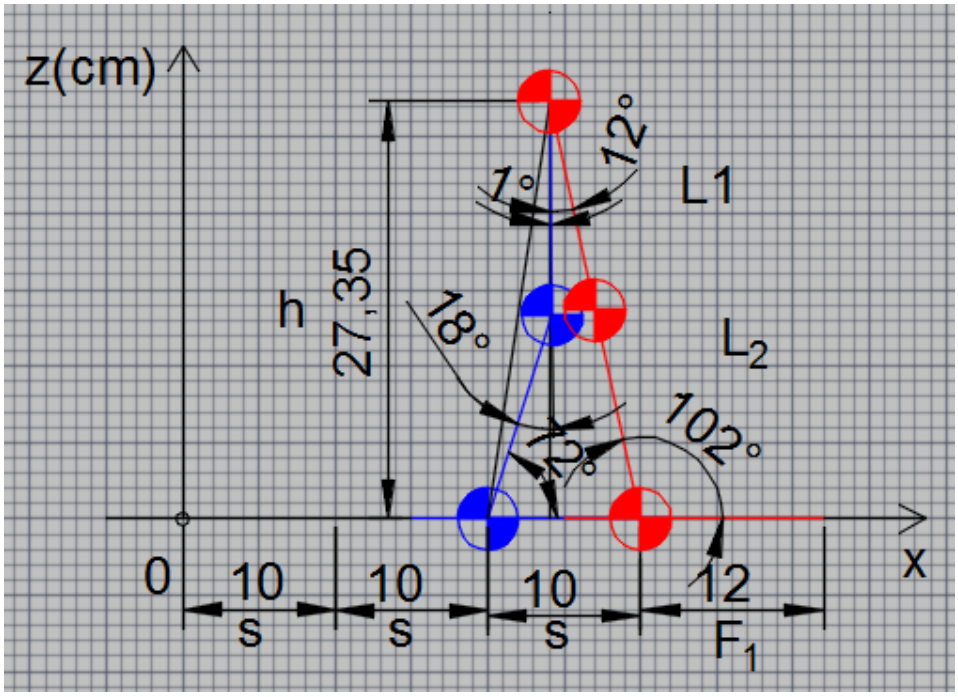
$$\theta_2 = 0^{\circ} \tag{4.194}$$

$$\theta_3 = 102{,}37362511619^{\circ} \tag{4.195}$$

$$\theta_4 = 0.8698233053^{\circ} \tag{4.196}$$

$$\theta_5 = 18{,}38118911412^{\circ} \tag{4.197}$$

$$\theta_6 = 72.48863419118^{\circ} \tag{4.198}$$

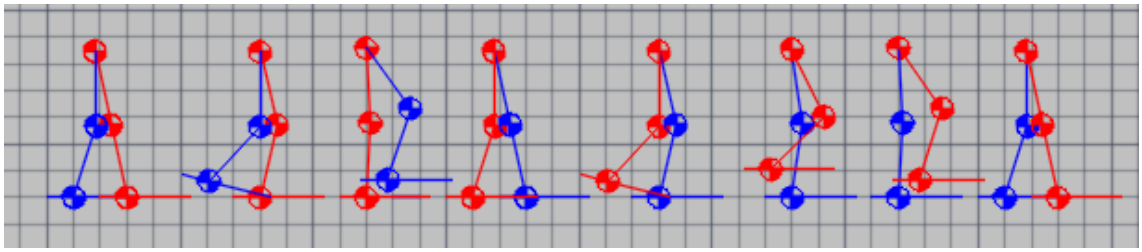


Şekil 4.43 Salınım sonu fazındaki sağ ve sol bacak eklem açıları.

İlk değme fazındaki koşullar, salınım sonu fazındaki koşullar içinde geçerli olduğundan SMN şartlarının sağlanıp sağlanmadığı koşulları bu faz içinde geçerli olup robot yanal düzlemde dengede olduğu kabul edilir.

4.4. Robotun Sağ Bacağının Bir Döngüsünün Modellenmesi.

İki ayaklı robotun sağ bacağı için üretilen yürüme deseni açıları, yanyana getirildiği zaman Şekil 4.44'teki gibi bir yürüme döngüsü için yürüme deseni modellemesi oluşturulmuş olur.

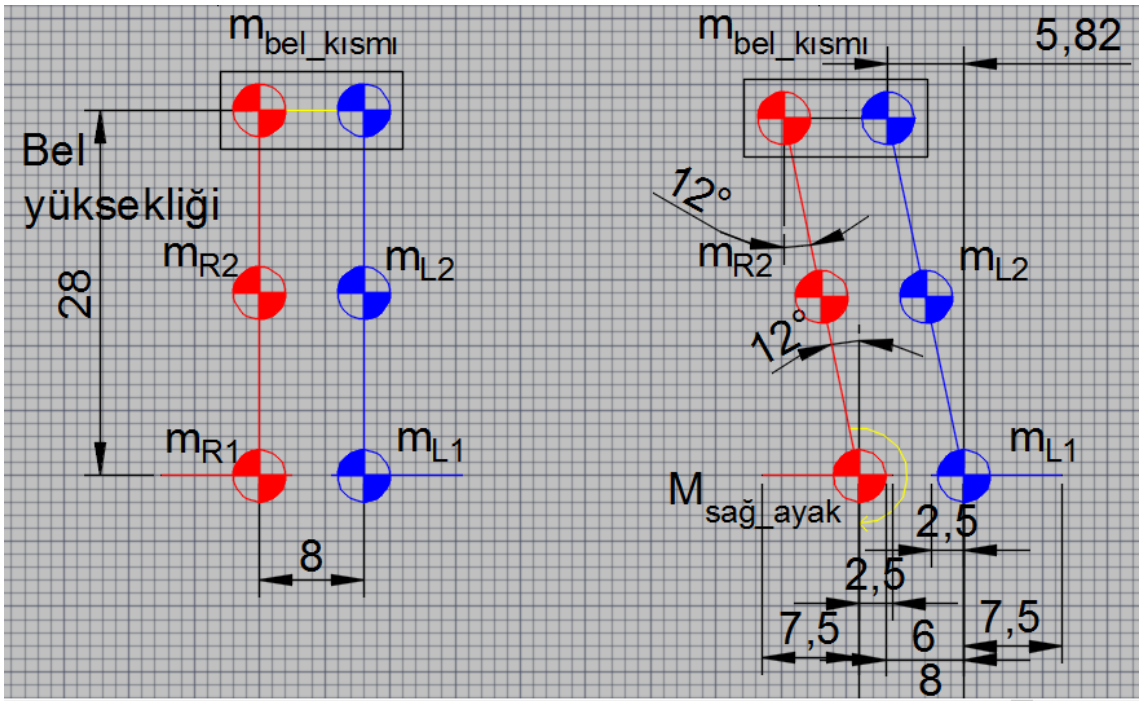


Şekil 4.44 Sağ bacağın bir yürüme döngüsü için üretilmiş yürüme deseni.

4.5. Robotun Yana Eğilme Açısının Bulunması

Robot tek ayak üzerinde kaldığı zaman havada olan ayak yönünde yana devrilmesini engellemenin yolu, aksi yönde yana eğim verilmesidir. Robotun tek ayak üzerinde yan tarafa devrilmemesi, basma fazındaki ayak bileğine uygulanan kuvvetlerin oluşturduğu momentlerin toplamının sıfıra eşit olmasıyla sağlanır.

Şekil 4.45'teki robota ön düzlemden baktığımızda, sağ ayak basma sol ayak ise salınım fazındadır. Robot tek ayak üzerinde olduğu için sol ayak tarafına doğru devrilmek isteyecektir. Bu nedenle robotun dengede kalması için sağ tarafa eğim verilmesi gerekmektedir. SMN şartının sağlanması için x cm sağa doğru eğildiği varsayılarak sağ ayağı döndürmek isteyen kuvvetlerin momentleri toplamı sıfıra eşitlenerek Şekil 4.45'teki gibi x değeri ve eğilme açısı bulunur.



Şekil 4.45 Robotun ön düzleminde moment hesabı

$$\sum M_{sağ_ayak} = 0 \tag{4.199}$$

$$m_{R_1} g x_{R_1} + m_{R_2} g x_{R_2} + m_{bel_kısmı} g x_{bel_kısmı} - m_{L_1} g x_{L_1} + m_{L_2} g x_{L_2} = 0 \tag{4.200}$$

$$0{,}44\times9{,}81\times0+0{,}158\times9{,}81\times(x)+1{,}61\times9{,}81\times(x)-0{,}44\times9{,}81\times0{,}08)-0{,}158\times 9{,}81\times(0{,}08-\ x)=0 \quad (4.201)$$

$$x=0{,}0248390446521\text{cm} \quad (4.202)$$

bulunur.

$$Robotun\ eğim\ açısı=tan^{-1}\left(\frac{x}{z}\right) \quad (4.203)$$

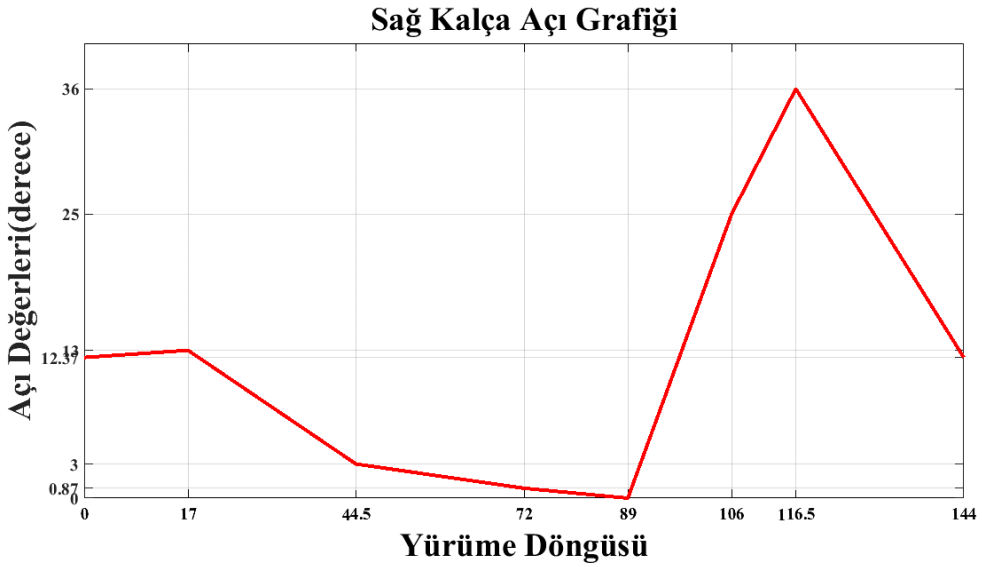
$$Robotun\ eğim\ açısı=tan^{-1}\left(\frac{z}{x}\right) \quad (4.204)$$

$$Robotun\ eğim\ açısı=11{,}69461550118^{\circ} \quad (4.205)$$

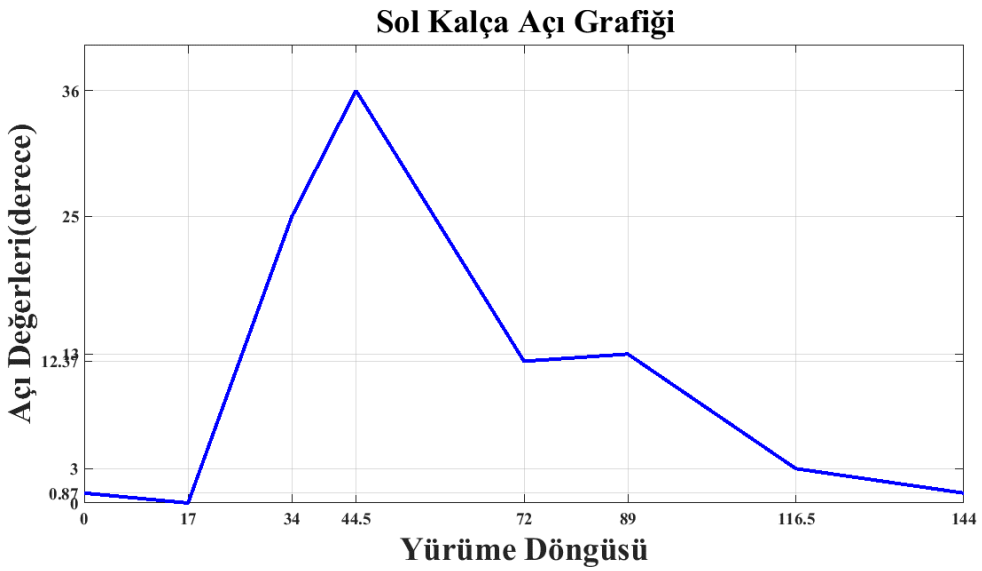
olarak bulunur.

4.6. İki Ayaklı Yürüyen Robotun Eklem Açılarının Grafiklerinin Oluşturulması

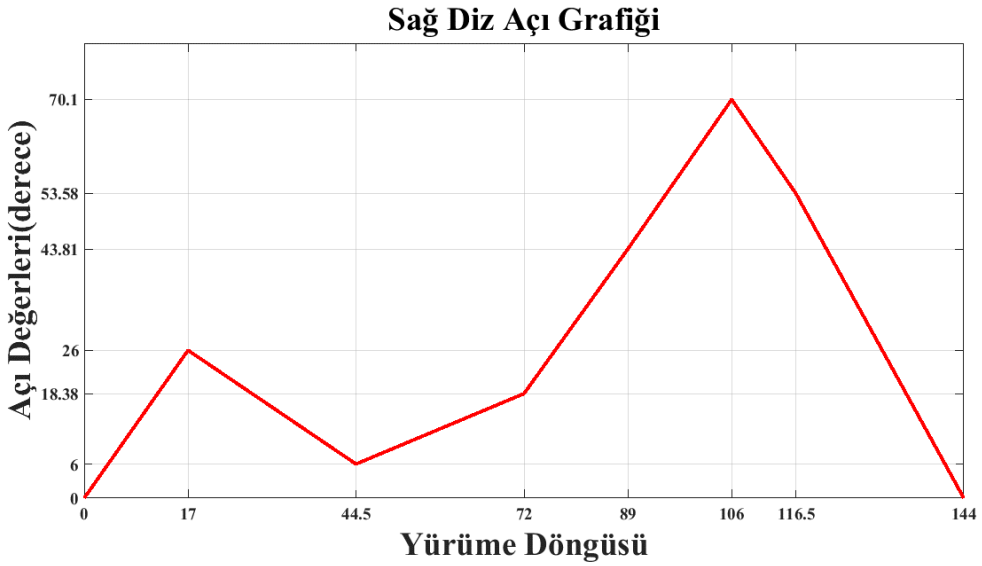
İleri ve ters kinematik yöntemiyle iki ayaklı yürüyen robotun SMN şartlarına göre oluşturulan yürüme modellemesinden elde edilen eklem açıları ile her ekleme ait açı grafikleri Şekil 4.46, 4.47, 4.48, 4.49, 4.50,ve 4.51'de oluşturulmuştur.



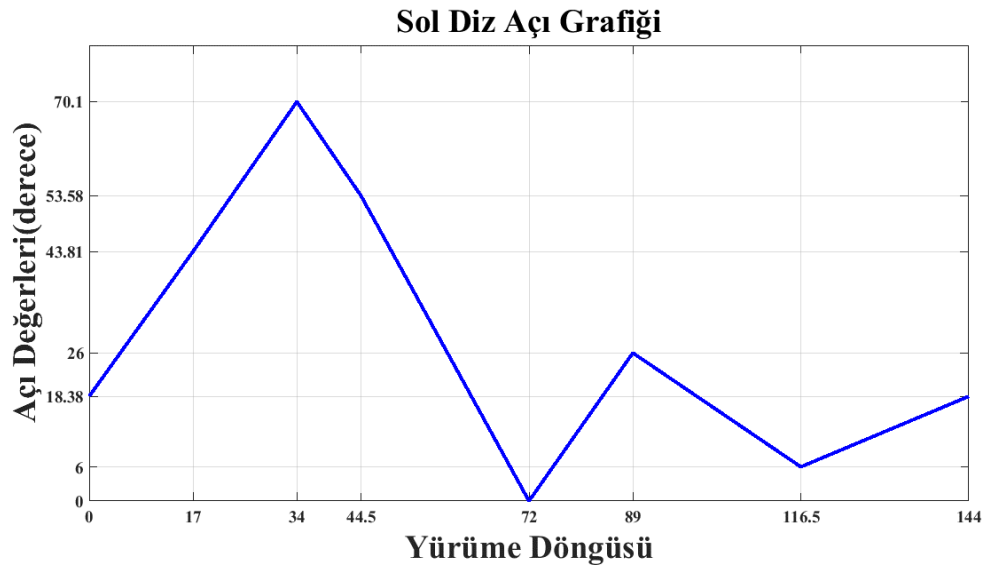
Şekil 4.46 Sağ kalça açı grafiği



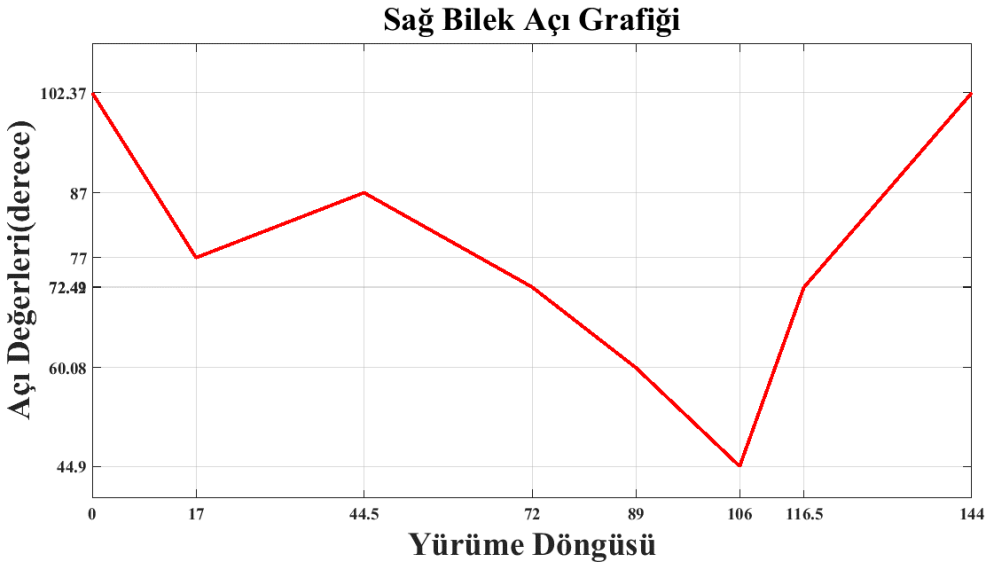
Şekil 4.47 Sol kalça açı grafiği



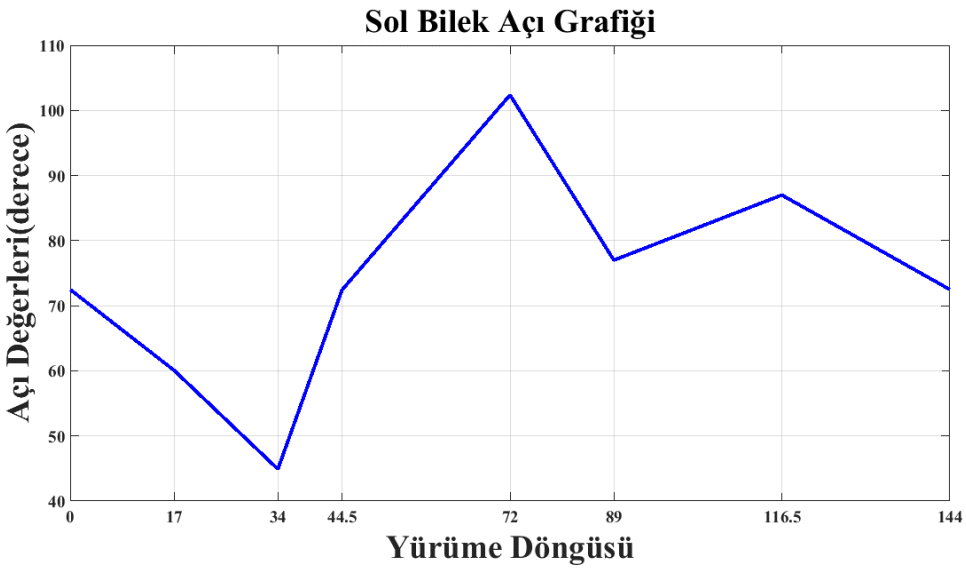
Şekil 4.48 Sağ diz açı grafiği



Şekil 4.49 Sol diz açı grafiği



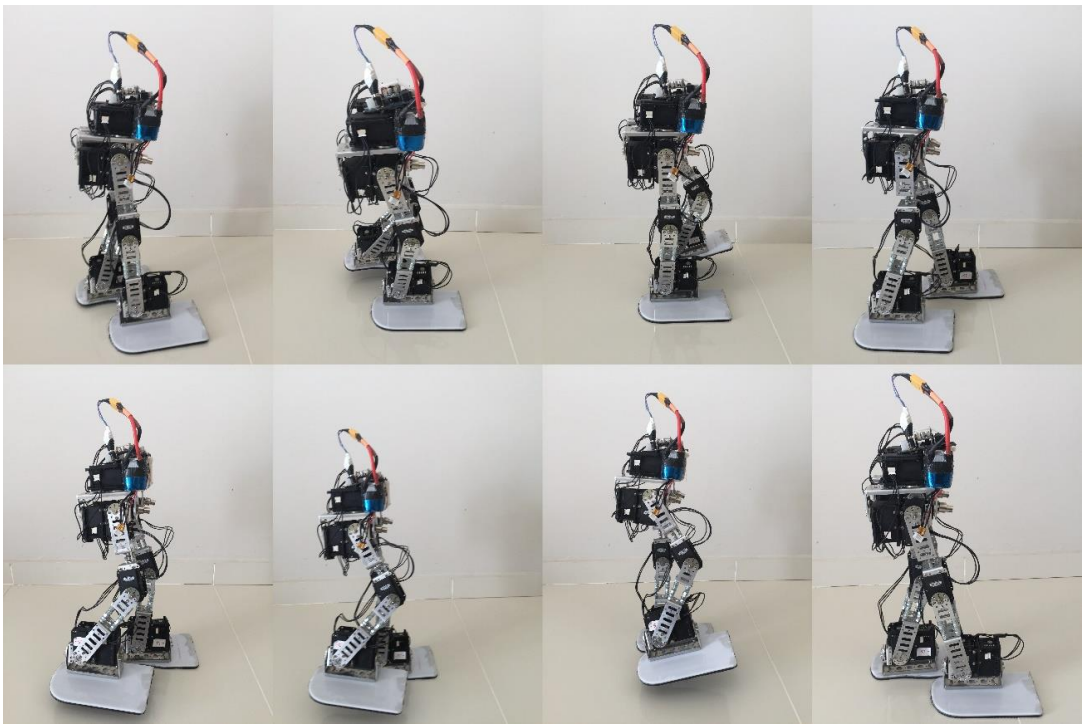
Şekil 4.50 Sağ bilek açı grafiği



Şekil 4.51 Sol bilek açı grafiği

4.7. Yürüme Modellemesi Sonucu Elde Edilen Değerlerin İki Ayaklı Yürüyen Robota Uygulanıp Çalıştırılması.

İleri ve ters kinematik yöntemiyle elde edilen eklem açıları robota uygulanıp robot Şekil 4.52'deki gibi çalıştırılmıştır.



Şekil 4.52 Yürüme modellemesi sonucu elde edilen değerlerin robota uygulanması.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Sonuçlar

Bu Doktora Tezi çalışması için tasarlanan iki ayaklı yürüyen robotun insan gibi düşmeden dengede yürüyebilmesinin teorik ve deneysel araştırılması için iki temel konu üzerinde çalışılmıştır.

Bu konulardan birincisi, insan yürüyüşündeki basma ve salınım fazlarındaki göze hoş gelen harmoninin matematiksel olarak modellenip iki ayaklı yürüyen robota uygulanmasıdır. Bunun için 34 katılımcının yürüme görüntüleri, video kaydediciyle alındıktan sonra bu katılımcıların eklem açılarının basma, salınım, tek destek ve çift destek fazlarındaki zaman değerleri, yürüme döngüsüne bölünmüştür. Yapılan bu istatiksel çalışma sonucunda ortaya çıkan değerler, doğadaki altın oran algoritmasındaki 1,618 değerine çok yakın bir değerde olduğu tespit edilmiştir. Bu sayısal değere ulaşmak için tüm katılımcıların $\frac{Yürüme\ Döngüsü}{Basma}$, $\frac{Basma}{Salınım}$, ve $\frac{Salınım}{Çift\ Destek}$ fazlarının birbirlerine oranlarının ortalamaları test yönteminden istatistiksel olarak yararlanılmıştır. Bulunan ortalama değerler, denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'te gösterilmiştir.

$$\frac{Yürüme\ Döngüsü}{Basma} = 1{,}6325 \cong 1{,}618 \tag{5.1}$$

$$\frac{Basma}{Salınım} = 1{,}6270 \cong 1{,}618 \tag{5.2}$$

$$\frac{Salınım}{Çift\ Destek} = 1{,}6323 \cong 1{,}618 \tag{5.3}$$

Böylece iki ayaklı yürüyen robotun yürüyüşünün insanlardaki gibi bir harmoni içinde yürümesini sağlayacak matematiksel modelleme yapılmıştır.

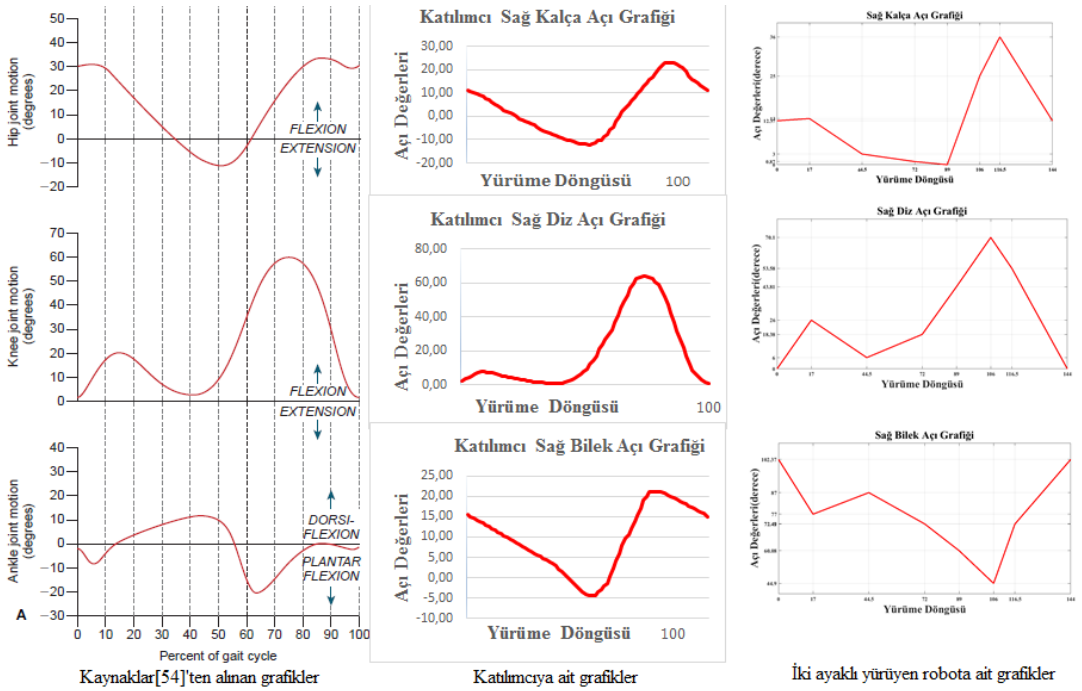
İkinci konu olarak, iki ayaklı yürüyen robotun 12 DoF'unda bulunan servo motorlarının hareket fonksiyonlarının bulunmasıdır. Bunun için de her faz için robotun

SMN şartlarını sağlayacak bir şekilde ileri ve ters kinematik yöntemleriyle kalça, diz ve bilek eklem açıları bulunmuştur. Bulunan bu eklem açılarının değerleri, gömülü yazılım ile programlanmış bir mikrodenetleyici vasıtasıyla servo motorlar kontrol edilmiştir. Yapılan ölçümlerde teorik olarak hesaplanan açı değerleri robota uygulandığında, eklem açılarının istenilen konuma gittiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, yürüme döngüsü doğadan esinlenerek altın oran algoritmasıyla matematiksel olarak modellenen ve SMN şartlarına göre ileri ve ters kinematik yöntemiyle eklem açılarının değerleri bulunan iki ayaklı robotumuz, tıpkı bir insan yürüyüşündeki tüm eklemlerindeki uyum içindeki harmoniksel hareketleri yaparak düşmeden dengede kalarak yürümesini gerçekleştirmiştir.

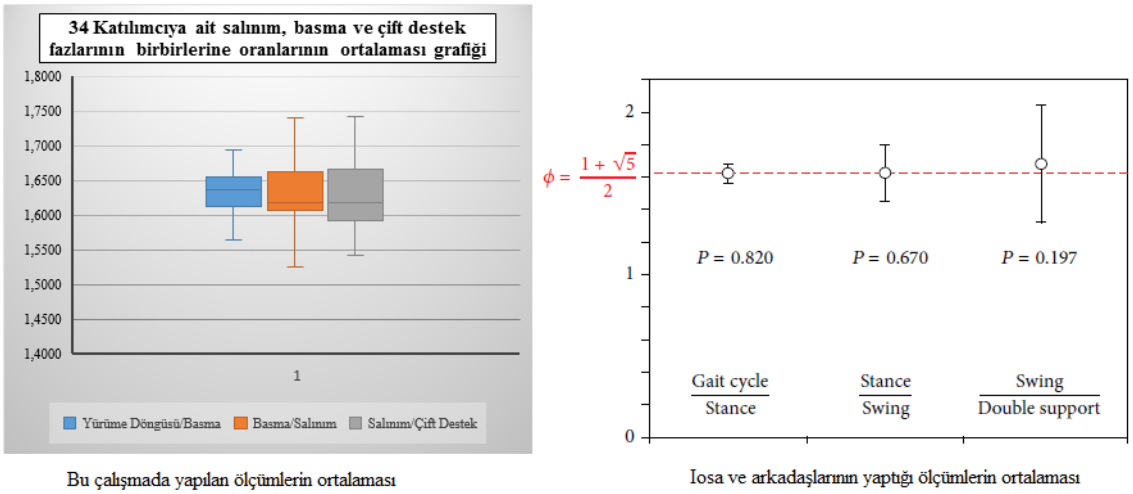
5.2. Tartışma

Yürüme analizi yapılan katılımcıların ve iki ayaklı yürüyen robotun yürüme deseni modellemesi sonucu elde edilen kalça, diz ve ayak bileği açı grafikleri, Şekil 5.1'deki sol taraftaki kaynaklar [64]'ten alınan grafiklerle karşılaştırılmıştır. Ortadaki grafikler, katılımcılara ait olup sağdakiler ise iki ayaklı yürüyen robota aittir. Sonuçta, kalça ve diz grafiklerindeki fonksiyonların birbirine çok benzediği, ayak bileğinin ise daha az benzediği görülmüştür.



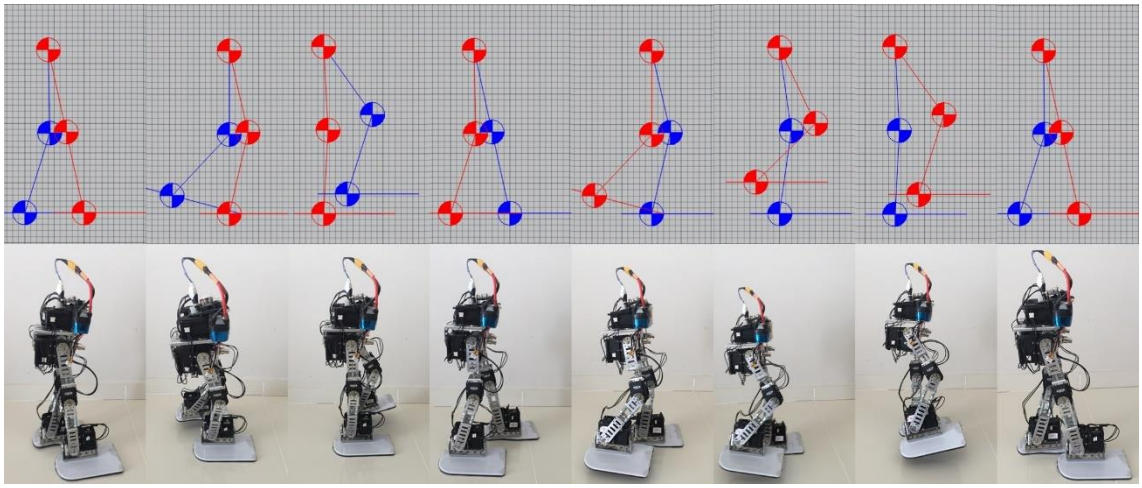
Şekil 5.1 Yürüme analizi grafiklerinin karşılaştırılması.

İnsan yürüyüşünün bir döngüsünün içinde 2 ana faz olmak üzere 8 faz vardır. Bu fazların değerleri bir döngü içinde doğru seçilmezse, iki ayaklı yürüyen robotun yürüyüşünde harmoni olmaz. Bu oranları doğru tespit etmek için altın oran algoritmasını kullanılmıştır. Böylece yürüme döngüsü içindeki fazlar, bir harmoni içinde değerlerini aldılar. Bizim ölçtüğümüz değerlerle bu altın oran algoritmasını öneren Iosa ve arkadaşlarının ölçümleri [69] Şekil 5.2'de gösterildiği gibi karşılaştırıldığında, insan yürüme döngüsündeki fazların oranlarının altın oran ile bağlantılı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.2 Yürüme döngüsündeki fazların oranlarının altın oran algoritması için Iosa ve arkadaşlarının ölçümleri [69] ile karşılaştırılması.

Ayrıca, SMN ve altın oran algoritmasına dayanarak, ileri ve ters kinematik yöntemiyle yürüme deseni modellemesi yapılmış ve modelleme ile eklem açıları bulunmuştur. İki ayaklı yürüyen robota bu açı değerlerinin uygulanması ile iki ayaklı yürüyen robotumuzun dengede düşmeden ve insan yürüyüşü gibi bir harmoni içinde Şekil 5.3'teki gibi yürüdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3 Üretilen yürüme deseni modellemesi ile robotun yürüyüşünün karşılaştırılması.

Ancak, yürüme deseni, statik yürüme algoritması ile yapıldığı için robotumuz insan gibi hızını istediği zaman arttıramamaktadır. Statik yürümeden dolayı, hızında ve adım uzunluğunda sınırlamaya gidilmiştir.

5.3. Gelecek Çalışmalar ve Öneriler

Bu Doktora Tezi çalışması için geliştirilen iki ayaklı yürüyen robotun ayaklarının altına kuvvet algılayıcıları ile birlikte bel kısmının üzerine ters sarkaç şeklinde bir dengeleyici montajı yapılması planlanmaktadır. Böylece robota dışarıdan gelecek bozucu kuvvetlerin algılayıcılarla algılanması sağlanacak ve ters sarkaç şeklindeki dengeleyici ile robotun dengede kalması sağlanacaktır.

Tüm bu denge kontrol yöntemlerine ek olarak ta robotun eklemlerinin ve güç ünitesinin hafifleştirilmesi için yeni araştırmalar yapılacaktır.

İleri aşamalarda ise, robotun hareket güzergahı üzerindeki engelleri tespit edebilecek algılayıcıların montajının ve uygulamasının yapılması da robotumuzun geliştirilmesi hedefleri arasında olacaktır.

EKLER

EK-A İKİ AYAKLI YÜRÜYEN ROBOTUN KODLARI

```
#define ID_NUM_1  1//sağ kalça
#define ID_NUM_2  2//sağ kalça yan
#define ID_NUM_3  3//sağ bacak yan
#define ID_NUM_4  4//sağ diz
#define ID_NUM_5  5//sağ bilek
#define ID_NUM_6  6//sağ bilek yan

#define ID_NUM_7  7//sol kalça
#define ID_NUM_8  8//sol kalça yan
#define ID_NUM_9  9//sol bacak yan
#define ID_NUM_10 10//sol diz
#define ID_NUM_11 11//sol bilek
#define ID_NUM_12 12//sol bilek yan

#define P_GOAL_POSITION    30
#define P_GOAL_SPEED       32
#define PRESENT_Torque     40

/********* Sync write data  **************
 * ID1, DATA1, DATA2..., ID2, DATA1, DATA2,...
 ******************************************
 */
 /* Serial device defines for dxl bus */
#define DXL_BUS_SERIAL1 1//Dynamixel on Serial1(USART1)<-OpenCM9.04
#define DXL_BUS_SERIAL2 2//Dynamixel on Serial2(USART2)<-LN101,BT210
```

```
#define DXL_BUS_SERIAL3 3//Dynamixel on Serial3(USART3)<-OpenCM 485EXP

Dynamixel Dxl(DXL_BUS_SERIAL3);
int R_kalca,R_kalca_yan,R_diz ,R_bilek,R_bilek_yan;
int L_kalca,L_kalca_yan,L_diz ,L_bilek,L_bilek_yan;
int R_bilek_x,L_bilek_x,R_bacak_yan, L_bacak_yan ;
float R_kalca_fonk,R_kalca_yan_fonk,R_diz_fonk,R_bilek_fonk,R_bilek_yan_fonk;
float L_kalca_fonk,L_kalca_yan_fonk,L_diz_fonk,L_bilek_fonk,L_bilek_yan_fonk;
int hiz=140;
float yan_aci=16;
float yan_aci_3=16;
float pitch_angle=8;
float roll_angle=34;
int i, j;
int Torque;

word SyncPage[36]={
  ID_NUM_7,L_kalca,hiz,//sol kalça
  ID_NUM_8,L_kalca_yan,hiz,
  ID_NUM_9,2006,hiz,
  ID_NUM_10,L_diz,hiz,//sol diz
  ID_NUM_11,L_bilek,hiz,//sol bilek
  ID_NUM_12,R_bilek_yan,hiz,

  ID_NUM_1,R_kalca,hiz,//sag kalça
  ID_NUM_2,R_kalca_yan,hiz,
  ID_NUM_3,2090,hiz,
  ID_NUM_4,R_diz,hiz,//sağ diz
  ID_NUM_5,R_bilek,hiz,//sağ bilek
```

```
  ID_NUM_6,L_bilek_yan,hiz};

void setup(){
   Dxl.begin(3);

    Dxl.setPosition(ID_NUM_1,2048,hiz);//sag kalca
    Dxl.setPosition(ID_NUM_2,2048,hiz);//sag kalca yan
    Dxl.setPosition(ID_NUM_3,2048,hiz);//sag yan
    Dxl.setPosition(ID_NUM_4,2048,hiz);//sag diz
    Dxl.setPosition(ID_NUM_5,2048,hiz);//sag bilek
    Dxl.setPosition(ID_NUM_6,2048,hiz);//sag bilek yan
    Dxl.setPosition(ID_NUM_7,2048,hiz);//sol kalca
    Dxl.setPosition(ID_NUM_8,2048,hiz);//sol kalça yan
    Dxl.setPosition(ID_NUM_9,2048,hiz);//sol yan
    Dxl.setPosition(ID_NUM_10,2048,hiz);//sol diz
    Dxl.setPosition(ID_NUM_11,2048,hiz);//sol bilek
    Dxl.setPosition(ID_NUM_12,2048,hiz);//sag bilek yan

    Dxl.maxTorque(ID_NUM_1,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_2,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_3,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_4,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_5,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_6,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_7,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_8,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_9,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_10,1023);
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_11,1023);
```

```
    Dxl.maxTorque(ID_NUM_12,1023);

    delay(3000);
  }

 void fonk()
{
for(int i=0; i<=144; i++)
    {
//-----------------------------------------------------------------
//sağ bacak yan fonksiyonu
    if (i>=0&&i<=92)    {R_bacak_yan=2080 ;}
    if (i>=92&&i<=125)   {R_bacak_yan=2080;}
    if (i>=125&&i<=144)   {R_bacak_yan=2080 ;}

//-----------------------------------------------------------------
    //1-sağ kalça fonksiyonu
   if (i>=0&&i<=20){R_kalca_fonk=0.05882352941*i+12;}
   if (i>20&&i<=34){R_kalca_fonk=-0.29411764706*i+18;}
   if (i>34&&i<=45){R_kalca_fonk=-0.45454545455*i+23.45454545455;}
   if (i>45&&i<=72){R_kalca_fonk=-0.0740740747*i+6.3333333333;}
   if (i>72&&i<=89){R_kalca_fonk=0.05882352941*i+5.23529411765;}
   if (i>89&&i<=106){R_kalca_fonk=1.47058823589*i-130.88235294118;}
   if (i>106&&i<=117){R_kalca_fonk=1*i-81;}
   if (i>117&&i<=144){R_kalca_fonk=-0.888888889*i+140;}

//-----------------------------------------------------------------
    //2-sağ kalça yan
   if(i>=0&&i<=17)
```

```
        {R_kalca_yan_fonk=((0-yan_aci)/(0-17))*i;
         R_kalca_yan=2048+R_kalca_yan_fonk*11.37;}
  if(i>17&&i<=55)
 {R_kalca_yan_fonk=0; R_kalca_yan=2048+R_kalca_yan_fonk*11.37;}
  if(i>55&&i<=72)
 {R_kalca_yan_fonk=0; R_kalca_yan=2048+R_kalca_yan_fonk*11.37;}
  if(i>72&&i<=89)
        {R_kalca_yan_fonk=((0-yan_aci_3)/(72-89))*(i-72);
        R_kalca_yan=2048-R_kalca_yan_fonk*11.37;}
  if(i>89&&i<=137)
 {R_kalca_yan_fonk=yan_aci_3; R_kalca_yan=2048-R_kalca_yan_fonk*11.37;}
  if(i>137&&i<=144)
 {R_kalca_yan_fonk=((yan_aci_3-0)/(137-144))*(i-137)+yan_aci_3;
  R_kalca_yan=2048-R_kalca_yan_fonk*11.37;}
//------------------------------------------------------------------------------------------  //3-
sağ diz fonksiyonu
   if (i>=0&&i<=20)   {R_diz_fonk=1.52941176471*i;}
   if (i>20&&i<=34)   {R_diz_fonk=-0.58823529412*i+36;}
   if (i>34&&i<=45)   {R_diz_fonk=-0.90909090909*i+46.90909090909;}
   if (i>45&&i<=72)   {R_diz_fonk=0.444444444444*i-14;}
   if (i>72&&i<=89)   {R_diz_fonk=1.47058823529*i-87.88235294118;}
   if (i>89&&i<=106)  {R_diz_fonk=1.64705882353*i-103.58823529412;}
   if (i>106&&i<=117) {R_diz_fonk=-1.5454545454*i+234.8181818181;}
   if (i>117&&i<=144) {R_diz_fonk=-2*i+288;}



//-------------------------------------------------------------------------------------------
///sağ bilek
  if (i>=0&&i<=72)
  {
```

```
 if ( (R_kalca_fonk>=0)&& (R_kalca_fonk>=R_diz_fonk))
{R_bilek=-(R_kalca_fonk-R_diz_fonk);R_bilek=2048+R_bilek*11.37;
 R_bilek_x=R_bilek;}
else if ( (R_kalca_fonk>=0)&& (R_kalca_fonk<=R_diz_fonk))
{R_bilek=(R_diz_fonk-R_kalca_fonk);R_bilek=2048+R_bilek*11.37;
 R_bilek_x=R_bilek;}
else if ( R_kalca_fonk<0)
{R_bilek=(abs(R_kalca_fonk)+R_diz_fonk);R_bilek=2048+R_bilek*11.37;
R_bilek_x=R_bilek;}
}
 if (i>72&&i<=95){R_bilek=R_bilek+(((4096/360)*10)/3);}
 if (i>95&&i<=144)
{
 if ( (R_kalca_fonk>=0)&& (R_kalca_fonk>=R_diz_fonk))
{R_bilek=-(R_kalca_fonk-R_diz_fonk);R_bilek=2048+R_bilek*11.37;}
else if ( (R_kalca_fonk>=0)&& (R_kalca_fonk<=R_diz_fonk))
{R_bilek=(R_diz_fonk-R_kalca_fonk);R_bilek=2048+R_bilek*11.37;}
 else if ( R_kalca_fonk<0)
 {R_bilek=(abs(R_kalca_fonk)-R_diz_fonk);R_bilek=2048+R_bilek*11.37;}
  }
//-------------------------------------------------------------------------------------------
 /////sağ bilek_yan
if (i>=0&&i<=17)
{R_bilek_yan_fonk=((0-yan_aci)/(0-17))*i;
 R_bilek_yan=2048-R_bilek_yan_fonk*11.37;}
 if (i>17&&i<=65)
{R_bilek_yan_fonk=yan_aci; R_bilek_yan=2048-R_bilek_yan_fonk*11.37;}
 if (i>65&&i<=72)
{R_bilek_yan_fonk=((yan_aci-0)/(55-72))*(i-55)+yan_aci;
```

```
    R_bilek_yan=2048-R_bilek_yan_fonk*11.37;}
    if (i>72&&i<=89)
   {R_bilek_yan_fonk=(((0-yan_aci_3)/(72-89))*(i-72));
    R_bilek_yan=2048+R_bilek_yan_fonk*11.37;}
   if (i>89&&i<=137)
   {R_bilek_yan_fonk=yan_aci_3; R_bilek_yan=2048+R_bilek_yan_fonk*11.37;}
    if (i>137&&i<=144)
   {R_bilek_yan_fonk=((yan_aci_3-0)/(127-144))*(i-127)+yan_aci_3;
    R_bilek_yan=2048+R_bilek_yan_fonk*11.37;}

    R_kalca=2048+R_kalca_fonk*11.37;
    R_diz=2048-R_diz_fonk*11.37;
//-----------------------------------------------------------------------------------------
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//-----------------------------------------------------------------------------------------
     //sol bacak yan fonksiyonu
    if (i>=0&&i<=20)    {L_bacak_yan=2016;}
    if (i>=20&&i<=60)   {L_bacak_yan=2016;}
    if (i>=60&&i<=144)   {L_bacak_yan=2016;}

//-----------------------------------------------------------------------------------------
     //sol kalça fonksiyonu
    if (i>=0&&i<=17)     {L_kalca_fonk=-0.05882352941*i+1;}
    if (i>17&&i<=34)    {L_kalca_fonk=1.47058823529*i-25;}
    if (i>34&&i<=45)    {L_kalca_fonk=1*i-9;}
    if (i>45&&i<=72)    {L_kalca_fonk=-0.6666666667*i+66;}
    if (i>72&&i<=93)    {L_kalca_fonk=0.05882352941*i+7.76470588235;}
    if (i>93&&i<=106)   {L_kalca_fonk=-0.29411764706*i+39.17647058824;}
    if (i>106&&i<=117)  {L_kalca_fonk=-0.45454545455*i+56.18181818189;}
    if (i>117&&i<=144)   {L_kalca_fonk=-0.0740740740*i+11.66666666666667;}
```

```
//-----------------------------------------------------------------------------------------
      ////sol kalça yan
    if (i>=0&&i<=17)
    {L_kalca_yan_fonk=((0-yan_aci_3)/(0-17))*i;
     L_kalca_yan=2048+L_kalca_yan_fonk*11.37;}
    if (i>17&&i<=65)
    L_kalca_yan_fonk=yan_aci_3;L_kalca_yan=2048+L_kalca_yan_fonk*11.37;}
    if (i>=65&&i<=72)
    {L_kalca_yan_fonk=((yan_aci_3-0)/(65-72))*(i-65)+yan_aci_3;
     L_kalca_yan=2048+L_kalca_yan_fonk*11.37;}
    if (i>=72&&i<=89)
    {L_kalca_yan_fonk=((0-yan_aci)/(72-89))*(i-72);
     L_kalca_yan=2048-L_kalca_yan_fonk*11.37;}
    if (i>=89&&i<=108)
   {L_kalca_yan_fonk=0;L_kalca_yan=2048-L_kalca_yan_fonk*11.37;}
    if (i>=108&&i<=144)
   {L_kalca_yan_fonk=0;L_kalca_yan=2048-L_kalca_yan_fonk*11.37;}
//-----------------------------------------------------------------------------------------
//sol diz fonksiyonu
    if (i>=0&&i<=17){L_diz_fonk=1.47058823529*i+18;}
    if (i>17&&i<=34){L_diz_fonk=1.64705882353*i+15;}
    if (i>34&&i<=45){L_diz_fonk=-1.54545454546*i+123.54545454546;}
    if (i>45&&i<=72){L_diz_fonk=-2*i+144;}
    if (i>72&&i<=93){L_diz_fonk=1.52941176471*i-110.11764705882;}
    if (i>93&&i<=106){L_diz_fonk=-0.5882359412*i+78.35294117647;}
    if (i>106&&i<=117){L_diz_fonk=-0.90909090909*i+112.36363636364;}
    if (i>117&&i<=144){L_diz_fonk=0.444444444444*i-46;}
//-----------------------------------------------------------------------------------------
//sol bilek
```

```
if (i==0)

if ( (L_kalca_fonk>=0)&& (L_kalca_fonk>L_diz_fonk))
{L_bilek=-(L_kalca_fonk-L_diz_fonk);
 L_bilek=2048+L_bilek*11.37;L_bilek_x=L_bilek;}
else if ( (L_kalca_fonk>=0)&& (L_kalca_fonk<L_diz_fonk))
{L_bilek=(L_diz_fonk-L_kalca_fonk);L_bilek=2048+L_bilek*11.37;
 L_bilek_x=L_bilek;}
else if ( L_kalca_fonk<0)
{L_bilek=(abs(L_kalca_fonk)+L_diz_fonk);L_bilek=2048+L_bilek*11.37;
 L_bilek_x=L_bilek;}
 }
if (i>=1&&i<=23){L_bilek=L_bilek+(((4096/360)*10)/5);}
if (i>23&&i<=144)
{
if      ( (L_kalca_fonk>=0)&&(L_kalca_fonk>L_diz_fonk))
{L_bilek=-(L_kalca_fonk-L_diz_fonk);L_bilek=2048+L_bilek*11.37;}
else if ( (L_kalca_fonk>=0)&&(L_kalca_fonk<L_diz_fonk))
{L_bilek=(L_diz_fonk-L_kalca_fonk);L_bilek=2048+L_bilek*11.37;}
else if ( L_kalca_fonk<0)
{L_bilek=(abs(L_kalca_fonk)+L_diz_fonk);L_bilek=2048+L_bilek*11.37;}
}
//-------------------------------------------------------------------------------------------
 ////sol bilek_yan
 if (i>=0&&i<=17)
{L_bilek_yan_fonk=((0-yan_aci_3)/(0-17))*i;
 L_bilek_yan=2048-        L_bilek_yan_fonk*11.37;}
 if (i>17&&i<=65)
 {L_bilek_yan_fonk=yan_aci_3;L_bilek_yan=2048-L_bilek_yan_fonk*11.37;}
```

```
    if (i>65&&i<=72)
   {L_bilek_yan_fonk=((yan_aci_3-0)/(55-72))*(i-55)+yan_aci_3;
    L_bilek_yan=2048-L_bilek_yan_fonk*11.37;}
    if (i>72&&i<=89)
   {L_bilek_yan_fonk=((0-yan_aci)/(72-89))*(i-72);
    L_bilek_yan=2048+L_bilek_yan_fonk*11.37;}
    if (i>89&&i<=137)
    {L_bilek_yan_fonk=yan_aci;L_bilek_yan=2048+L_bilek_yan_fonk*11.37;}
    if (i>137&&i<=144)
    {L_bilek_yan_fonk=((yan_aci-0)/(127-144))*(i-127)+yan_aci;
     L_bilek_yan=2048+L_bilek_yan_fonk*11.37;}

     L_kalca=2048-L_kalca_fonk*11.37;
     L_diz=2048-L_diz_fonk*11.37;
//-------------------------------------------------------------------------------------------
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//-------------------------------------------------------------------------------------------
  SyncPage[0]=ID_NUM_7;
  SyncPage[1]=L_kalca;
  SyncPage[2]=hiz;

  SyncPage[3]=ID_NUM_8;
  SyncPage[4]=L_kalca_yan;
  SyncPage[5]=hiz;

  SyncPage[6]=ID_NUM_9;
  SyncPage[7]= L_bacak_yan;
  SyncPage[8]=hiz;
```

```
SyncPage[9]= ID_NUM_10;
SyncPage[10]= L_diz;
SyncPage[11]= hiz;

SyncPage[12]=ID_NUM_11;
SyncPage[13]= L_bilek;
SyncPage[14]=hiz;

SyncPage[15]=ID_NUM_12;
SyncPage[16]=L_bilek_yan;
SyncPage[17]=hiz;

SyncPage[18]=ID_NUM_1;
SyncPage[19]=R_kalca;
SyncPage[20]= hiz;

SyncPage[21]=ID_NUM_2;
SyncPage[22]= R_kalca_yan;
SyncPage[23]= hiz;

SyncPage[24]=ID_NUM_3;
SyncPage[25]= R_bacak_yan;
SyncPage[26]= hiz;

SyncPage[27]=ID_NUM_4;
SyncPage[28]= R_diz;
SyncPage[29]=hiz;

SyncPage[30]= ID_NUM_5;
```

```
  SyncPage[31]= R_bilek;
  SyncPage[32]= hiz;

  SyncPage[33]= ID_NUM_6;
  SyncPage[34]=R_bilek_yan;
  SyncPage[35]= hiz;

  Dxl.syncWrite(30,2,SyncPage,36);

  delay(25);
  }
}

void loop()
    {
    fonk();
    }
```

KAYNAKLAR

[1] Gu, E.Y., ***A journey from robot to digital human: mathematical principles and applications with MATLAB programming***. Vol. 1. 2013: Springer Science & Business Media.

[2] Honda. ***HondaRobotics***. 2016 [cited 2016 15.03.2016]; Erişim yeri: http://world.honda.com/HondaRobotics/.

[3] Toyota. ***Partner Robot Family***. 2016 [cited 2016 15.03.2016]; Erişim yeri: http://www.toyota-global.com/innovation/partner_robot/family.html.

[4] Sony. ***Sony Robot***. 2016 [cited 2016 15.03.2016]; Erişim yeri: http://www.sony.net/SonyInfo/CorporateInfo/History/sonyhistory-j.html.

[5] BostonDynamics. ***BostonDynamics Robots***. 2016 [cited 2016 15.03.2016]; Erişim yeri: http://www.bostondynamics.com/index.html.

[6] ***Ortopedik Protez ve Ortez Yürüme Analizi - 1***. 2011: T.C.Milli Eğitim Bakanlığı.

[7] Vukobratovic, M. and D. Juricic, ***Contribution to the synthesis of biped gait***. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1969(1): p. 1-6.

[8] Takanishi. ***Previous Research***. 2016 [cited 2016 15.12.2016]; Erişim yeri: http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/wabian/previous_reserch/previous_research.htm.

[9] Lim, H.-o. and A. Takanishi, ***Biped walking robots created at Waseda University: WL and WABIAN family***. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007. 365(1850): p. 49-64.

[10] Hirose, M. and K. Ogawa, ***Honda humanoid robots development***. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007. 365(1850): p. 11-19.

[11] McGeer, T., ***Passive Dynamic Walking***. 1990.

[12] McGeer, T. ***Passive walking with knees***. in *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*. 1990. IEEE.

[13] Arakawa, T. and T. Fukuda. ***Natural motion trajectory generation of biped locomotion robot using genetic algorithm through energy optimization***. in *Systems, Man, and Cybernetics, 1996., IEEE International Conference on*. 1996. IEEE.

[14] Kajita, S., et al., ***Introduction to humanoid robotics***. Vol. 101. 2014: Springer.

[15] Huang, Q., Y. Nakamura, and T. Inamura. ***Humanoids walk with feedforward dynamic pattern and feedback sensory reflection***. in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*. 2001. IEEE.

[16] Kajita, S., et al. ***The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation***. in *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on*. 2001. IEEE.

[17] Capi, G., et al., ***A new gait optimization approach based on genetic algorithm for walking biped robots and a neural network implementation***. IPSJ Journal, 2002.

[18] Kajita, S., et al. ***A realtime pattern generator for biped walking***. in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*. 2002. IEEE.

[19] Kajita, S., et al. ***Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point***. in *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on*. 2003. IEEE.

[20] Pfeiffer, F., et al., ***Sensor and Contol Aspects of Biped Robot "JOHNNIE"***. International Journal of Humanoid Robotics, 2004. 1(03): p. 481-496.

[21] Lohmeier, S., et al. ***Computer system and control of biped" Johnnie"***. in *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*. 2004. IEEE.

[22] Kudoh, S. and T. Komura. ***C 2 continuous gait-pattern generation for biped robots***. in *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*. 2003. IEEE.

[23] Lim, H.-o., Y. Ogura, and A. Takanishi. ***Locomotion pattern generation and mechanisms of a new biped walking machine***. in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2008. The Royal Society.

[24] Lohmeier, S., et al., *Humanoid Robot LOLA—Research Platform for High-SpeedWalking*, in ***Motion and Vibration Control***. 2009, Springer. p. 221-230.

[25] Buschmann, T., S. Lohmeier, and H. Ulbrich, ***Humanoid robot lola: Design and walking control***. Journal of physiology-Paris, 2009. 103(3): p. 141-148.

[26] Nelson, G., et al., ***Petman: A humanoid robot for testing chemical protective clothing***. 日本ロボット学会誌, 2012. 30(4): p. 372-377.

[27] Erbatur, K., et al., ***Design and control of the humanoid robot SURALP***. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2011. 19(5): p. 725-731.

[28] Rokbani, N. and A.M. Alimi, ***IK-PSO, PSO inverse kinematics solver with application to biped gait generation***. arXiv preprint arXiv:1212.1798, 2012.

[29] Ankarali, A., ***Fuzzy Logic Velocity Control of a Biped Robot Locomotion and Simulation***. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012. 9.

[30] Hernández-Santos, C., et al., ***Kinematics and dynamics of a new 16 DOF humanoid biped robot with active toe joint***. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012. 9.

[31] An, K. and Q. Chen, ***A passive dynamic walking model based on knee-bend behaviour: stability and adaptability for walking down steep slopes***. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013. 10.

[32] Wee, T.-C., A. Astolfi, and X. Ming, ***The design and control of a bipedal robot with sensory feedback***. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013. 10.

[33] Rong, X., et al., ***Trajectory Planning and Motion Simulation for a Hydraulic Actuated Biped Robot***. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013. 5(10): p. 3004-3009.

[34] Lapeyre, M., P. Rouanet, and P.-Y. Oudeyer. ***The poppy humanoid robot: Leg design for biped locomotion***. in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013. IEEE.

[35] Kim, J.-W., ***Online joint trajectory generation of human-like biped walking***. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014. 11.

[36] He, B., et al., ***Real-time walking pattern generation for a biped robot with hybrid CPG-ZMP algorithm***. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014. 11.

[37] Schwienbacher, M., ***Efficient Algorithms for Biped Robots-Simulation, Collision Avoidance and Angular Momentum Tracking***. 2014, Technische Universität München.

[38] Omer, A., et al., ***Study of bipedal robot walking motion in low gravity: investigation and analysis***. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014. 11.

[39] Hirai, K., et al. ***The development of Honda humanoid robot***. in *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*. 1998. IEEE.

[40] Hirai, K., ***The Honda humanoid robot: development and future perspective***. Industrial Robot: An International Journal, 1999. 26(4): p. 260-266.

[41] Sakagami, Y., et al. ***The intelligent ASIMO: System overview and integration***. in *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*. 2002. IEEE.

[42] Ogura, Y., et al. ***Development of a new humanoid robot WABIAN-2***. in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.* 2006. IEEE.

[43] Kuffner, J., et al. ***Motion planning for humanoid robots under obstacle and dynamic balance constraints***. in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*. 2001. IEEE.

[44] Chestnutt, J., et al. ***Planning biped navigation strategies in complex environments***. in *IEEE Int. Conf. Hum. Rob., Munich, Germany*. 2003.

[45] Nishiwaki, K., et al., ***The experimental humanoid robot H7: a research platform for autonomous behaviour***. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007. 365(1850): p. 79-107.

[46] Chestnutt, J., et al. ***Footstep planning for the honda asimo humanoid***. in *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. 2005. IEEE.

[47] KANEKO, K., et al., ***Humanoid Robot HRP-2***. IEEE-RAS International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2004: p. 1083–1090.

[48] Kaneko, K., et al. ***Design of advanced leg module for humanoid robotics project of METI***. in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*. 2002. IEEE.

[49] Kanehira, N., et al., ***Development of Humanoid Robot, HRP-3P***. 2005, Kawada Technical Report.

[50] Kaneko, K., et al. ***Humanoid robot HRP-3***. in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2008. IEEE.

[51] Kaneko, K., et al. ***Humanoid robot hrp-4-humanoid robotics platform with lightweight and slim body***. in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2011. IEEE.

[52] Fujita, M., et al. ***A small humanoid robot sdr-4x for entertainment applications***. in *Advanced Intelligent Mechatronics, 2003. AIM 2003. Proceedings. 2003 IEEE/ASME International Conference on*. 2003. IEEE.

[53] Soya, T., ***Stage of Partner Robot Development in Toyota and Feasibility of Applications in the Medical Field***. Circulation Journal, 2006. 70(1): p. 20.

[54] Kim, J.-Y., et al. ***System design and dynamic walking of humanoid robot KHR-2***. in *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. 2005. IEEE.

[55] Park, I.-W., et al. ***Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST humanoid robot 3: HUBO)***. in *5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2005.* 2005. IEEE.

[56] Peng, Z., et al. ***Online Walking Pattern Generation and System Software of Humanoid BHR-2***. in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2006. IEEE.

[57] Zhao, M., et al. ***Control system design of THBIP-I humanoid robot***. in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*. 2002. IEEE.

[58] Löffler, K., M. Gienger, and F. Pfeiffer, ***Sensors and control concept of walking "Johnnie"***. The International Journal of Robotics Research, 2003. 22(3-4): p. 229-239.

[59] Lohmeier, S., et al. ***Modular joint design for performance enhanced humanoid robot LOLA***. in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.* 2006. IEEE.

[60] Albert, A. and W. Gerth. ***New path planning algorithms for higher gait stability of a bipedal robot***. in *Proceedings of the International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), Karlsruhe, Germany*. 2001.

[61] Hofschulte, J., M. Seebode, and W. Gerth, *Parallel manipulator hip joint for a bipedal robot*, in ***Climbing and Walking Robots***. 2005, Springer. p. 601-609.

[62] Bourgeot, J.-M., N. Cislo, and B. Espiau. ***Path-planning and tracking in a 3D complex environment for an anthropomorphic biped robot***. in *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*. 2002. IEEE.

[63] Arbulu, M. and C. Balaguer, ***Real-Time Gait Planning for the Humanoid Robot Rh-1 Using the Local Axis Gait Algorithm***. International Journal of Humanoid Robotics, 2009. 6(01): p. 71-91.

[64] Houglum, P.A. and D.B. Bertoti, ***Brunnstrom's clinical kinesiology***. 2011: FA Davis.

[65] Lovejoy, C.O., ***Evolution of human walking***. Sci Am, 1988. 259(5): p. 118-25.

[66] Whittle, M.W., ***Gait analysis: an introduction***. 2014: Butterworth-Heinemann.

[67] Yavuzer, G., ***Three-dimensional quantitative gait analysis***. Acta orthopaedica et traumatologica turcica, 2008. 43(2): p. 94-101.

[68] Şişli, H. ***Gait analysis***. 2016 [cited 2016 27.09.2015]; Erişim yeri: http://www.slideserve.com/roscoe/gait-analysis.

[69] Iosa, M., et al., ***The golden ratio of gait harmony: repetitive proportions of repetitive gait phases***. BioMed research international, 2013. 2013.

[70] Chevallereau, C., et al., ***Bipedal robots: Modeling, design and walking synthesis***. 2013: John Wiley & Sons.

[71] Wahde, M. and J. Pettersson. ***A brief review of bipedal robotics research***. in *Proceedings of the 8th UK Mechatronics Forum International Conference (Mechatronics 2002)*. 2002.

[72] Gökçe, B., ***Design and Implementation of a Biped Walking Algorithm for Nao Humanoids Robots***, in *Graduate Program in Computer Engineering*. 2009, Bogazici University.

[73] Yapıcı, K.O., ***14 Serbestlik Dereceli İki Ayaklı Bir Robotun Dinamik Yürüme Hareketinin Kontrolü***, in *Fen Bilimleri Enstitüsü*. 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[74] matlabinuse. ***Inverse Kinematics***. 2016 [cited 2016 15.12.2016]; Erişim yeri: http://www.matlabinuse.com/10818.

[75] Matlab. ***Modeling Inverse Kinematics in a Robotic Arm***. 2016 [cited 2016 15.12.2106]; Erişim yeri: https://www.mathworks.com/help/fuzzy/modeling-

inverse-kinematics-in-a-robotic-arm.html?searchHighlight=forward%20kinematics&s_tid=doc_srchtitle.

[76] Siciliano, B. and O. Khatib, ***Springer handbook of robotics***. 2008: Springer Science & Business Media.

[77] Apple. ***iPhone 6 Plus - Teknik Özellikler***. 2016 [cited 2016 15.12.2016]; Erişim yeri: https://support.apple.com/kb/SP706?locale=tr_TR&viewlocale=tr_TR.

[78] Tracker. ***Tracker Video Analysis and Modeling Tool***. 2016 [cited 2016 10.10.2016]; Erişim yeri: http://physlets.org/tracker/.

[79] Robotis. ***Dynamixel MX-64T***. 2016 [cited 2016 15.12.2016]; Erişim yeri: http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-64.htm.

[80] Robotis. ***OpenCM9.04***. 2016 [cited 2016 15.12.2016]; Erişim yeri: http://support.robotis.com/en/product/controller/opencm9.04.htm.

[81] Robotis. ***OpenCM 485 EXP***. 2016 [cited 2016 15.12.2016]; Erişim yeri: http://support.robotis.com/en/product/controller/opencm_485_exp.htm.

[82] Robotis. ***ROBOTIS_OpenCM IDE*** 2016 [cited 2016 15.12.2016]; Erişim yeri: http://support.robotis.com/en/software/robotis_opencm/robotis_opencm.htm.

ÖZGEÇMİŞ

Taşkın TEZ, 28.09.1972 tarihinde Kırklareli ili Lüleburgaz ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Lüleburgaz ilçesi Kırıkköy İlköğretim Okulunda tamamladı. 1989 yılında Lüleburgaz Lisesi Matematik bölümünden, 1995 yılında Yıldız Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Bitirme tezini "PID kontrol" üzerine yaptı. AEG-ETİ Trafo Fabrikası ve Baykal Mühendislikte staj yaptı.

Askerliğini Piyade.Teğmen olarak tamamladı. Sırasıyla; Tikveşli, Mebal Tekstil, Elimsan, Plaskap Ambalaj fabrikalarında, bakım, ARGE ve vardiya mühendisi olarak çalıştı. 1998 yılında girdiği TREDAŞ'ta, İşletme Bakım, Proje Tesis, Müşteriler Başmühendislikleri ve İşletme Müdürlüğü görevlerini yürüttü.

2011 yılında Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliğinde Yüksek Lisansını tamamladı. Yüksek Lisans Tezi'ni "Manyetik Askı Sisteminde Kullanılan Kontrol Algoritmalarının Deneysel ve Teorik Araştırılması" konusu üzerine yaptı.

2013 yılında Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi İşletme Bölümünden mezun oldu.

2012 yılından sonra Edirne İli Kamu Hastaneleri Birliği Genel Sekreterliğinde Bina Yönetimi ve Teknik Birim Sorumlusu olarak görev yapmaktadır.

Literatür takip seviyesinde İngilizce bilmektedir. Autocad, Solidworks, Proteus, CCS C, Arduino, Matlab, ROBOTIS_OpenCM, Processing ve Ofis programlarını kullanabilmektedir.

Robotlar, uçaklar, mikrodenetleyiciler ve tıp elektroniği ilgi alanları arasındadır.

Taşkın TEZ, evli, bir kız ve bir erkek çocuğu babasıdır.

TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

TEZ T., KUŞÇU H.: "IMPLEMENTATION FOR A BIPED ROBOT AND DETECTION OF HIP, KNEE AND ANKLE ANGLES IN WALKING STEP OF HUMAN USING A VIDEO CAMERA", Conference on Advances in Mechanical Engineering Istanbul 2016 – ICAME2016, Yildiz Technical University, pp:467-472, 11-13 May 2016, Istanbul, Turkey(Mayıs 2016)

TEZ T., KUŞÇU H.: "GENERATION OF GAIT PATTERN FOR A BIPED ROBOT BY USING THE GOLDEN RATIO ALGORITHM", International Scientific Conference UNITECH'16 Gabrovo, Proceedings Volume-III, pp:230-236, 18-19 November, Bulgaria, 2016

KUŞÇU H., TEZ T., "İki Ayaklı Yürüyen Robot Dinamiğinin Deneysel ve Teorik Araştırılması"(TÜBAP - 2014/05)