



## Obtaining the gait pattern joint angles of the bipedal walking robot by physical and mathematical methods

Taşkın Tez<sup>1\*</sup>, Hilmi Kuşçu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Machine Engineering, Institute of Science, Trakya University, 22030, Edirne, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Machine Engineering, Engineering Faculty, Trakya University, 22030, Edirne, Türkiye

### Highlights:

- Walking pattern using mathematical methods
- Robot gait design
- Legged locomotion

### Keywords:

- Bipedal robot
- Static walking
- Robot walking
- Robot gait analysis
- Gait pattern

### Article Info:

Research Article

Received: 11.02.2022

Accepted: 24.07.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1071916

### Correspondence:

Author: Taşkın Tez

e-mail:

taskintez@yahoo.com

phone: +90 542 416 6248

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, physical, mathematical, and geometric methods were used to produce the static walking patterns of the bipedal robot. For the static walking of the bipedal robot, a flat surface was used and zero moment point criteria were adhered to. The walking patterns produced were applied to the 12-jointed bipedal robot, and it was carried out to walk on a flat surface.

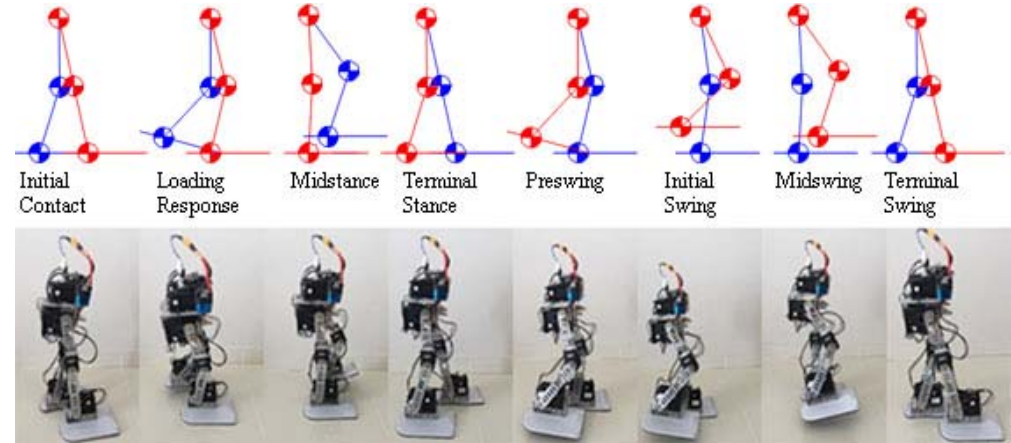


Figure A. Gait pattern of the right leg for a gait cycle and the biped robot gait pattern.

**Purpose:** The aim of this study is to obtain the static walking patterns of the bipedal robot, similar to a human gait, by physical, mathematical, and geometric methods and to realize the static walking of the bipedal robot.

**Theory and Methods:** In this study, firstly; Physics, mathematics, geometry, trigonometry, forward, and inverse kinematics methods were used to obtain the values of the joint angles required for the walking pattern of the bipedal robot. Then, the balance control of the bipedal robot was obtained according to the zero moment point method. Thus, the patterns of the joint angles required for the static walking of the bipedal robot were found. However, the gait patterns produced are only used for static walking. Therefore, the bipedal robot has to only walk on a flat surface, as shown in Figure A.

**Results:** In this study, no physical intervention was made on the bipedal robot and static walking of the bipedal robot without falling on a flat surface was performed.

**Conclusion:** When the theoretically calculated angle values are applied to the bipedal robot, it has been determined that the angles of the servo motors in the joints of the bipedal robot move to the desired position. However, since the walking pattern is made with the static walking algorithm, the bipedal robot cannot increase its speed whenever it wants like a human. Therefore, the speed and stride length of the bipedal robot has been limited due to static walking.



## İki ayaklı yürüyen robotun yürüme deseni eklem açılarının fiziksel ve matematiksel yöntemlerle elde edilmesi

Taşkın Tez<sup>1\*</sup>, Hilmi Kuşçu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, 22030, Edirne, Türkiye

<sup>2</sup>Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 22030, Edirne, Türkiye

### ÖNEÇİKANLAR

- Matematiksel yöntemlerle robot yürüyüş deseni
- Robot yürümesi tasarımı
- Ayaklı hareket analizi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.02.2022

Kabul: 24.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1071916

### Anahtar Kelimeler:

İki ayaklı robot,  
Statik yürüme,  
Robot yürüyüşü,  
Robot yürüme analizi,  
Yürüme döngüsü

### ÖZ

İki ayaklı robotların en önemli özelliği eklem sayılarının fazla olmasıdır. Bu nedenle robotun yürüme esnasında eklemlerinin koordineli şekilde hareket etmesi çok önemlidir. Bu makalede de iki ayaklı robotun yürüme deseninin elde edilmesi için statik yürüme yöntemi kullanılmış ve uygulama detayları ele alınmıştır. Ayrıca iki ayaklı robotun statik yürüme deseni oluşturulurken Rancho Los Amigos terminolojisi, sıfır moment noktası, ileri ve ters kinematik yöntemleri kullanılmıştır. Oluşturulan yürüme deseninin iki ayaklı robota uygulanması ile robotun yürümesi sağlanmış ve kamera ile yapılan video çekimlerinin analiz edilmesi ile Rancho Los Amigos terminolojisine göre karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmada oluşturulan statik yürüme deseni ile iki ayaklı robotun gerçek yürüme desenlerinin aynı olduğu tespit edilmiştir.

## Obtaining the gait pattern joint angles of the bipedal walking robot by physical and mathematical methods

### HIGHLIGHTS

- Robot walking pattern using mathematical methods
- Robot gait design
- Legged locomotion analysis

### Article Info

Research Article

Received: 11.02.2022

Accepted: 24.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1071916

### Keywords:

Bipedal robot,  
Static walking,  
Robot walking,  
Robot gait analysis,  
Gait cycle

### ABSTRACT

The most important feature of bipedal robots is the high number of joints. Therefore, it is very important that the robot's joints move in coordination during walking. In this study, static walking method was used to obtain the walking pattern of the bipedal robot and the application details were discussed. In addition, the Rancho Los Amigos terminology, zero moment point, and forward and reverse kinematics methods were used to create the static walking pattern of the bipedal robot. The walking of robot was performed by applying the created walking pattern to the bipedal robot. Video footage taken with the camera was analyzed and then compared according to the Rancho Los Amigos terminology. It has been determined that the static walking pattern created in the comparison and the actual walking pattern of the bipedal robot were the same.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*taskintez@yahoo.com, hilmi@trakya.edu.tr / Tel: +90 542 416 6248

## 1. Giriş (Introduction)

Robot bilimi ve uygulamaları; elektronik, bilgisayar, servo motorlar ve makine teknolojisindeki yeni gelişmeler ışığında son elli yılda büyük bir ivme kazanmıştır [1]. Robotik çalışmalarda artış ile birlikte, iki ayaklı robotların yürüyüşleri, gittikçe insanların yürüyüşlerine benzemeye başlamışlardır. Özellikle büyük otomotiv üreticileri ve ünlü bilişim firmaları, robotik çalışmalara destek vererek iki ayaklı robotların gelişmesinde büyük rol oynamışlardır [3-6].

Vukobratovic vd. yaptıkları araştırmaları iki ayaklı robotların dengede yürüme yöntemi olarak kabul edilen ZMP (Zero Moment Point) yani SMN'nin (Sıfır Moment Noktası) robot bilimi literatürüne girmesini sağlamışlardır. Böylece matematiksel yöntemlerle iki ayaklı robotun dengede kalabilme şartlarının modellenmesi yapılmıştır [7]. Waseda Üniversitesi tarafından 1969 yılında ilk iki ayaklı WL-3; 1973 yılında ilk insansı robot WABOT-1 üretilmiş; ardından sırasıyla WAP-1, WAP-2, WAP-3, WAP-5 WL-90R, WL-10,10R WL-10RD, WABIAN, WABIAN-RVII ve WABIAN-2LL robotları yapılmıştır [8]. Honda firması tarafından geliştirilen E0, E1, E2, E3, E4, E5, E6, P1, P2 ve P3 modellerinin yanı sıra Asimo'nun yürüyüşündeki harmoni insan yürüyüşüne benzemeye başlamıştır [2, 3, 9, 10]. McGeer, robotlarda daha az enerji tüketen pasif dinamik yürüyüş kavramını ileri sürmüştür [11, 12]. Jong vd. iki ayaklı robot için yer çekimi etkisine karşı ters sarkaç yöntemini kullanmışlardır [13]. Kajita vd. ise, iki ayaklı robotlardaki yürüme deseni üretiminde ters sarkaç sistemini üç boyutlu olarak önermişlerdir [14]. Yine, Kajita vd. iki ayaklı robot yürüme deseni modellemesini ön izlemeli ZMP kullanarak elde etmişlerdir [15]. Münih Üniversitesinde 2003 yılında insansı robot Johnnie ve 2009 yılında ise Lola geliştirilmiştir [16, 17, 18, 20]. Boston Dynamics firması tehlikeli işler için Petman'ın yanı sıra denge dinamiği ileri derecede olan ATLAS isimli iki ayaklı yürüyen robotları geliştirmiştir [6, 21]. Bu robot geliştirme çalışmalarına ilave olarak Türkiye'de ise; Sabancı Üniversitesinde 29 eklem sahip insansı robot SURALP [22], Dokuz Eylül Üniversitesinde iki ayaklı RUBI [23] ve İstanbul Teknik Üniversitesinde iki ayaklı I.T.U [1] yapılmıştır.

Doğadaki diğer canlılar ile karşılaştırıldığında iki ayak üzerinde yürüme, insanın en önemli özelliklerinden biridir [24]. İnsanlar, yer değiştirmeyi iki ayak üzerinde dengede kalarak yürüme yöntemiyle gerçekleştirirler [25]. Yürüme için yeryüzünde x-z ekseninde bir yerden başka bir yere hareket edilmesi gerekmektedir [26]. Arkeolojik kazılarda bulunmuş en eski insan iskeleti olan Lucy'nin de dik durabildiği bilimsel olarak tespit edilmiştir. İnsanlar diğer canlılardan farklı olarak x-z ekseninde ilerlemek için her ne kadar iki bacağı birlikte kullansa da, en az bir ayağının her zaman yer ile temas halinde olması gerekir [25, 27]. Kol ve bacaklardaki eklemlerin tekrarlı, uyumlu ve değişen hareketlerinin insanın ağırlık merkezini  $x - z$  ekseninde ilerletmesine insanın normal yürüme hareketi denir [25].

Bu çalışmanın amacı; insan yürüyüşüne benzeyen iki ayaklı robotun eklem açılarının desenlerinin fiziksel, matematiksel ve geometrik yöntemlerle elde edilip statik yürümesini gerçekleştirmektir. Bu nedenle ilk önce iki ayaklı robotun yürüme deseni için gerekli eklem açılarının değerleri fiziksel, matematiksel ve geometrik yöntemler ile elde edilerek yürüme deseninin modellenmesi yapılmıştır. Daha sonra elde edilen açıların değerleri iki ayaklı robota uygulanmıştır. Robotun yürüme analizi sonrası bulunan sonuçlar değerlendirilmiş ve grafiklerle karşılaştırılması yapılmıştır.

## 2. Materyal-Metot (Material-Method)

Bir robotun insan gibi yürüyebilmesi için en az 12 eklem sahip olması gerekmektedir [19]. Bilimsel olarak geliştirilen iki ayaklı

robotların bir bacağında genellikle 6 eklem vardır. Kalçada 3, dizde 1, ayak bileğinde ise 2 eklem bulunur [24]. Bu çalışmada materyal olarak Şekil 1'de gösterildiği gibi 12 adet servo motordan oluşan iki ayaklı robot kullanılmıştır. İki ayaklı robota kalçada 3, dizde 1, bilekte de 2 adet servo motor montajı yapılmıştır. İki ayaklı robotun yüksekliği 0,45 m ve genişliği de 0,14 m'dir. Bataryasının ağırlığı 0,51 kg olmakla beraber toplamda gövde ağırlığı 3,06 kg'dır.

İki ayaklı robotun eklemlerinde bulunan servo motorların bir harmoni içinde çalışarak insan gibi yürüyebilmesi için ilk önce insanın yürüyüşü araştırılmıştır. Bu nedenle iki ayaklı robotun statik yürüme deseni oluşturulurken Rancho Los Amigos terminolojisi kullanılmıştır. Ayrıca iki ayaklı robotun eklem açılarının desenlerindeki açıların bulunması için de sıfır moment noktası, ileri kinematik, ters kinematik, geometrik ve trigonometrik yöntemlerden yararlanılmıştır.



Şekil 1. İki ayaklı yürüyen robotun görünümü (View of the bipedal walking robot).

### 2.1. İnsanın Yürüme Döngüsü ve Fazları (Human Gait Cycle and Phases)

İnsanın bir ayak topuğunun yere ilk temasından bu topuğun tekrar yere dokunmasına kadar aynı bacak eklemlerindeki dizemli devinimlerin oluşması için geçen zamana yürüme döngüsü denir. Diğer bacağın yürüme döngüsü ise yarım döngü faz farkı ile geriden gelir [25, 28].

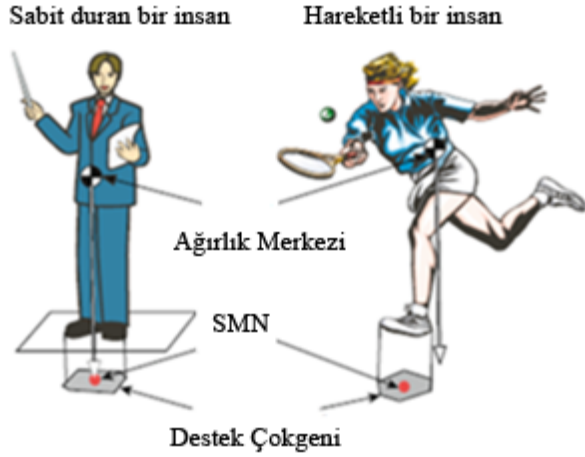
Bir bacağın yürüme döngüsü basma ve salınım fazlarından oluşur. Basma fazı: ilk değme, yüklenme, basma ortası, basma sonu, salınım öncesi olarak beş faza, salınım fazı da: erken salınım, salınım ortası, salınım sonu olarak üç faza ayrılır. Bu çalışmada, Jacquelin Perry tarafından geliştirilen Şekil 2'deki Rancho Los Amigos (RLA) terminolojisi kullanılmıştır [26].

### 2.2. Sıfır Moment Noktası (Zero Moment Point)

Bir insanın dengede kalabilmesi için sıfır moment noktası (SMN) daima ayak sınırları içerisindeki bir noktada kalmalıdır. SMN kısaca, Şekil 3'teki gibi iki ayaklı robotun veya insanın yere değdiği noktaya etki eden bütün kuvvetlerin oluşturduğu momentlerin toplamının sıfır olma şartıdır [29].



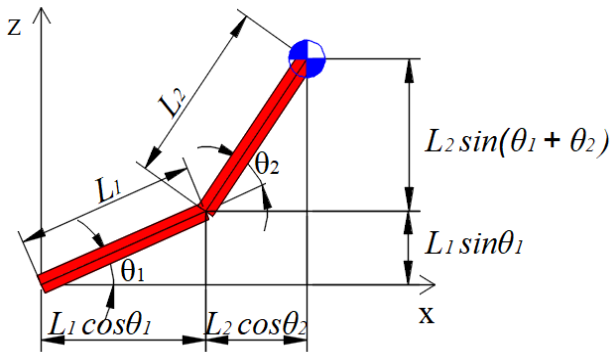
Şekil 2. Yürüme döngüsü ve fazları (Gait cycle and phases).



Şekil 3. Ağırlık Merkezi, SMN ve destek çokgeni (Center of Gravity (CoG), SMN and support polygon) [14].

### 2.3. İleri Kinematik Yöntemi (Forward Kinematics Method)

Eklem açıları bilinen bir robotun çalışma uzayındaki erişebileceği noktaların veya konumunun değerlerinin Şekil 4'teki gibi trigonometrik yöntemle bulunmasıdır [30].



Şekil 4. İleri kinematik yönteminin gösterilmesi (Demonstration of advanced kinematics method)

### 2.4. Ters Kinematik Yöntemi (Inverse Kinematics Method)

Şekil 5'teki gibi çalışma uzayındaki ana çerçeveye göre uç nokta koordinatları bilinen bir robotun eklem açılarının matematiksel olarak bulunması yöntemidir. İleri kinematiğe göre çözümü daha zordur. Matematiksel çözüm ile fiziksel çözüm arasında uyumsuzluklar olabilir. Ayrıca aynı koordinat değerine erişebilen robot bacağına ucu için çözüm kümesinde farklı eklem açıları da bulunabilir [30].

1634

### 2.5. Yürüme Deseni ve Eklem Açılarının Üretimi (Generation of Gait Pattern and Joint Angles)

İki ayaklı robotun SMN şartlarına bağlı kalarak dengede yürüyebilmesi için üretilecek eklem açıları için ilk önce sağ ayağın ileriye adım attığı ve sağ bacadaki sağ dizin gerilmiş olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmadaki robot için SMN sol ayak içinde kalacak şekilde 1 cm aralıklarla 17 adet farklı desen üretilmiştir. Bunun için sol ayak bileği sıfır (0) noktası kabul edilerek dikey ekseninde 12 adet doğru yukarıya doğru çizilmiştir. İki ayaklı robotun adım uzunluğu ise yatay ekseninde sol ayak bileğinden sağ ayak bileğine kadar olan mesafedir. Sol ayak bileğinden yukarı doğru çizilen doğrularla sağ dizi gerilmiş sağ bacak kesiştirildiğinde robotun adımının bel yüksekliği tespit edilmiştir. Böylece yatay ekseninde merkezinin koordinatları  $x = \text{adım uzunluğu}$ ,  $z = 0$  ve yarıçapı =  $\text{bacak uzunluğu}$  olan bir çember çizilerek  $x = 0$  dan 1 cm iterasyon yapılarak  $\text{ayak uzunluğu} / 1 \text{ cm}$  sayısı kadar ve SMN sol ayak içinde kalacak şekilde desen üretilmiştir.

#### 2.5.1. Basma fazı- ilk değme (Stance phase-initial contact)

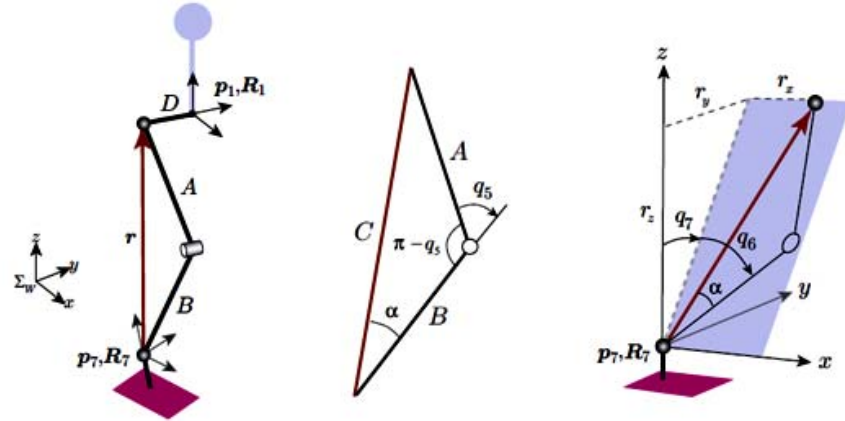
Sol ayak bileği,  $x$  ve  $z$  eksenlerinde 0 noktasına yerleştirilip referans başlangıç noktası olarak kabul edilmiştir. Sağ ayak bileği de  $x$  ekseninde  $s = 10 \text{ cm}$  adım uzunluğu değeri kadar ötelenmiş ve Şekil 6a'daki gibi  $x$  eksenine yerleştirilmiştir. Şekil 6b'deki gibi sağ ayağın yere ilk teması anında, sağ bacadaki diz eklemine gerilmiş pozisyonda olduğu kabul edilmiştir.  $x$  ekseninde bulunan sağ ayak bileği merkez kabul edilerek yarıçapı sağ bacak uzunluğuna eşit olan bir çember çizilmiştir. SMN şartları sol ayak sınırları içinde kalması ve robotun ileriye doğru devrilmemesi şartıyla çemberin sol ayak uzunluğunun  $x$  değerine tekabül eden değerleri ile kesişerek  $z$  noktaları yani bel yüksekliği bulunmuştur. Bir serbestlik derecesine sahip robot manipülatörüne benzeyen sağ bacak, ters kinematik yöntemiyle bel yüksekliğinin  $x$  ve  $z$  eksenindeki koordinatları Şekil 6b'deki gibi bulunmuştur.

Daha sonra ise Şekil 6b'deki bel yüksekliği koordinatlarından iki serbestlik dereceli ters kinematik yöntemiyle zemine ve 0 noktasına göre Şekil 7a'daki gibi bu faza ait eklem açıları elde edilmiştir.

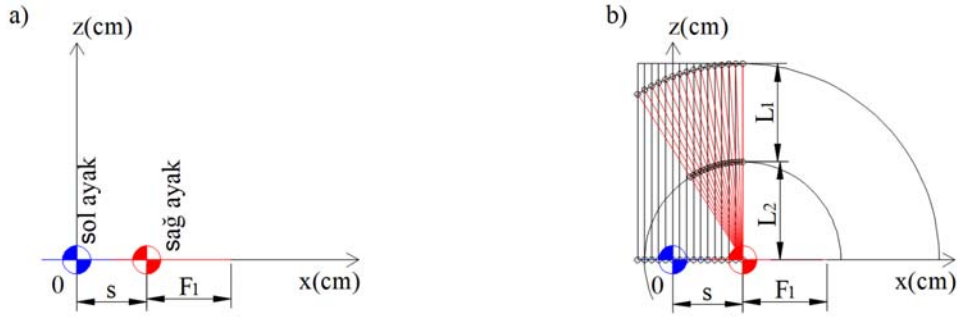
Robotun dengede kalması için ağırlığın yoğun olduğu bel kısmının sol ayağın orta bölgesine gelmesi gerektiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, sol ayağa göre SMN kontrolü yapıldığında Şekil 7b'de görüldüğü gibi  $x = 8,9,10,11,12$  noktaları için yürüme deseni elde edilemeyeceğine karar verilmiştir. Böylece bu çalışma için SMN şartlarına göre  $x = 4$  noktası seçilerek Eş. 1 çember denkleminde  $z = 27,35 \text{ cm}$  hesaplanmıştır.

$$(x - s)^2 + (z - 0)^2 = L^2 \quad (1)$$

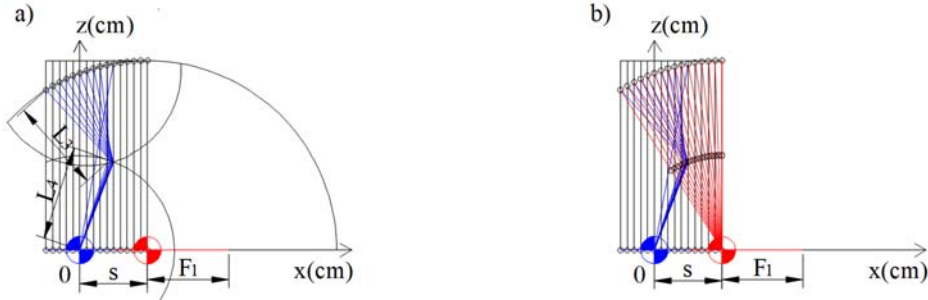
Aynı zamanda robotun sağ bacağının kalçasının koordinatları robotun bel yüksekliği olduğundan Sağ kalça\_  $x = 4$  noktasında  $z = h =$



Şekil 5. Ters kinematik yönteminin iki ayaklı yürüyen robota uygulanmasının gösterilmesi (Demonstration of the application of the inverse kinematics method to a bipedal walking robot) [30].



Şekil 6. a) Ayak uzunluğu baz alınıp ilk değme fazı için ayakların yürüme desenine yerleştirilmesi, b) İlk değme fazı için sağ bacak deseninin üretilmesi (a) Placing the feet in the walking pattern for the initial contact phase based on the foot length, (b) Generating the right leg pattern for the initial contact phase)



Şekil 7. a) İlk değme fazı için sol bacak deseninin üretilmesi, b) İlk değme fazı için olası sağ ve sol bacak desenleri (a) Generating the left leg pattern for the initial contact phase, (b) Possible right and left leg patterns for the initial contact phase).

27,35 cm olduğu tespit edilmiştir. Sağ bacağın açıları da Şekil 8a'daki gibi sağ dizin açısı  $\theta_2 = 0^\circ$  gerilmiş durumda kabul edilerek Eş. 2 ile sağ kalça açısı  $\theta_1 = 12,37^\circ$  ve Eş. 3 ile sağ bilek açısı  $\theta_3 = 102,37^\circ$  trigonometrik yöntemler ile bulunmuştur.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{s - \text{sağ kalça} \cdot x}{h} \right) \quad (2)$$

$$\theta_3 = 90^\circ + \theta_1 \quad (3)$$

Şekil 8b'deki robotun sol bacak açılarının bulunması için Şekil 8c'deki  $ABX_{bet}$  üçgenindeki Pisagor teoreminden Eş. 4 ile  $R = 27,64$  cm hesaplanmıştır.

$$R = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (4)$$

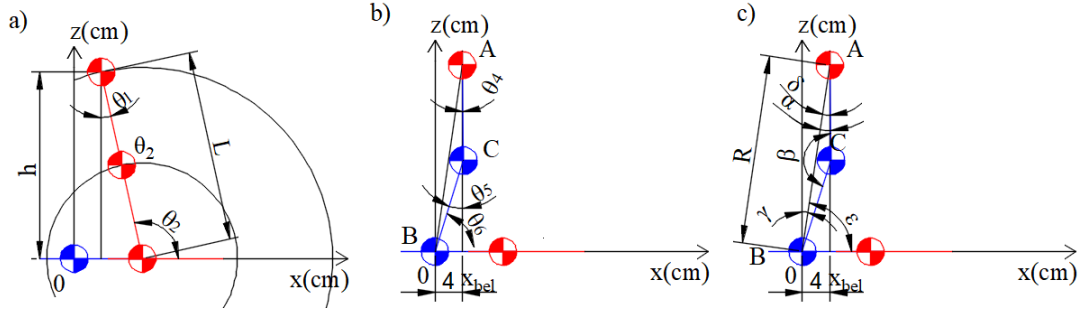
Şekil 8c'deki ABC üçgenindeki Kosinüs teoreminden ise Eş. 5 ile  $\alpha = 9,19^\circ$  ve Eş. 6 ile  $\delta = 8,32^\circ$  bulunmuştur.

$$L_4^2 = R^2 + L_3^2 - 2RL_3 \cos(\alpha) \quad (5)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{x}{h} \right) \quad (6)$$

Ayrıca sol bacak için sol kalça açısı Eş. 7 ile  $\theta_4 = 0,87^\circ$ , sol diz açısı için Eş. 8 ile  $\beta = 161,60^\circ$  ve Eş. 9 ile  $\theta_5 = 18,4^\circ$  elde edilmiştir. Yine sol bilek açısı için de Eş. 10 ile  $\gamma = 9,19^\circ$  ve Eş. 11 ile  $\varepsilon = 81,67^\circ$  bulunup Eş. 12 ile  $\theta_6 = 72,48^\circ$  hesaplanmıştır.

$$\theta_4 = \alpha - \delta \quad (7)$$



**Şekil 8.** a) İlk değme fazı için sağ bacağın eklem açılarının, bel yüksekliği ve koordinatlarının bulunması, b) Robotun sol bacak açılarının gösterilmesi, c) Sol bacak açılarının bulunması için ters kinematik açıların gösterilmesi  
(a) Finding the joint angles, waist height and coordinates of the right leg for the initial contact phase, b) Demonstration of the left leg angles of the robot, c) Demonstration of inverse kinematics angles to find left leg angles).

$$R^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2\cos(\beta) \quad (8)$$

$$\theta_5 = 180^\circ - \beta \quad (9)$$

$$L_3^2 = R^2 + L_4^2 - 2RL_4\cos(\gamma) \quad (10)$$

$$\varepsilon = \tan^{-1}\left(\frac{h}{x}\right) \quad (11)$$

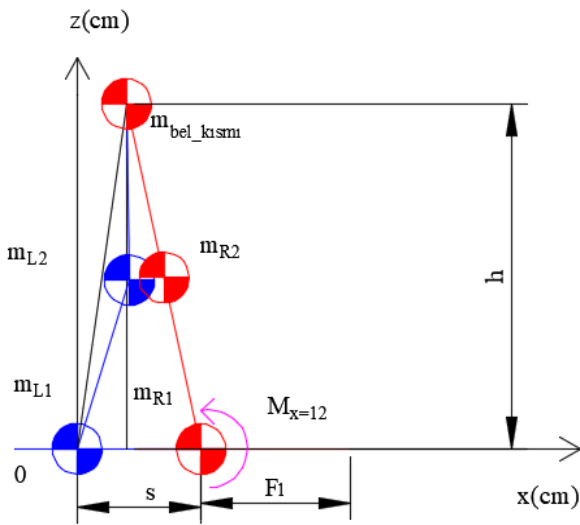
$$\theta_6 = \varepsilon - \gamma \quad (12)$$

Böylece ilk değme fazı için ters kinematik yöntemiyle sol bacağın eklem açıları, bel yüksekliği ve koordinatları elde edilmiştir.

İlk değme fazı için Şekil 9'daki gibi üretilen sağ ve sol bacak desenlerinden robotun SMN şartını sağlayıp sağlamadığının kontrolü sol arka ayak ön ucuna göre yani  $x = 12$  noktasına göre moment hesabı Eş. 13 ve Eş. 14 ile yapılmıştır. Bulunan sonuca göre  $1,37 \geq 0$  olduğundan uygun olduğuna karar verilmiştir.

$$M_{x=12} \geq 0 \quad (13)$$

$$m_{L1}gx_{L1} + m_{L2}gx_{L2} + m_{bel\_kismli}gx_{bel\_kismli} + m_{R1}gx_{R1} + m_{R2}gx_{R2} \geq 0 \quad (14)$$



**Şekil 9.** İlk değme fazı için üretilen sağ ve sol bacak desenlerinden robotun SMN şartının sağlayıp sağlamadığının kontrolü  
(Checking whether the robot meets the SMN requirement from the right and left leg patterns produced for the initial contact phase).

### 2.5.2. Basma fazı-yüklenme (Stance phase- loading response)

Şekil 10a'daki gibi sağ bacak diz altı için ileriye doğru eğim verilerek robotun ilerlemesi sağlanmıştır. Şekil 10b'deki gibi ileriye doğru verilen eğim açısına göre bu fazdaki eklem açılarının bulunması amaçlanmıştır.

Bu fazda robotun belinin yerden yüksekliği ile sağ bacağın eklem açıları, Şekil 11a'daki sağ bacak diz üstü kısmının üst tarafı yani robotun belinin yerden yüksekliği, sağ bilekle aynı dikey eksene gelecek şekilde ters kinematik yöntemiyle hesaplanarak bulunmuştur.

Şekil 11b'de sağ bacak açıları gösterilen robotun yüklenme fazı için robotun sağ bacağının dizi  $\theta_2 = 26^\circ$  ileriye eğildiği kabul edilerek sağ diz ve sağ bilek açıları Kosinüs teoremiyle hesaplanmıştır. İlk önce Şekil 11c'deki DEF üçgeninden Eş. 15'e göre  $\zeta = 154^\circ$  bulunmuştur.

$$\zeta = 180^\circ - \theta_2 \quad (15)$$

Daha sonra Şekil 11c'deki sağ bacakta DEF üçgeni ikizkenar üçgen olduğu için Eş. 16'ya göre  $\eta = 13^\circ$  ve sağ kalça açısı  $\theta_1 = 13^\circ$ , Eş. 17'ye göre de sağ bilek açısı  $\theta_3 = 77^\circ$  olarak elde edilmiştir.

$$\theta_1 + \zeta + \eta = 180^\circ \quad (16)$$

$$\theta_3 + \eta = 90^\circ \quad (17)$$

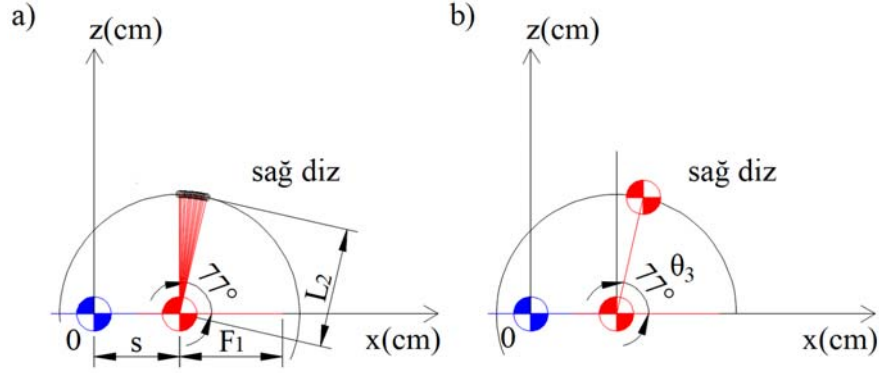
Yine Şekil 11c'deki sağ bacakta DEF üçgeninde Kosinüs teoreminden robotun bel yüksekliği Eş. 18 ile  $h = 27,82 \text{ cm}$  olarak hesaplanmıştır.

$$h^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2AB\cos(180^\circ - \theta_2) \quad (18)$$

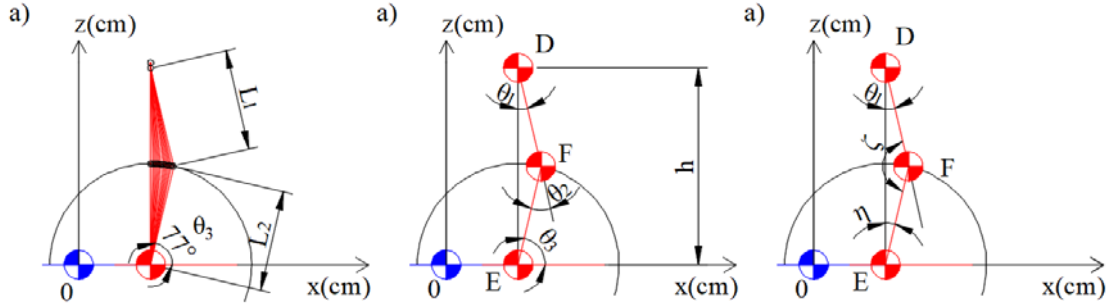
Sağ bacağın eklem açılarının koordinatları ve bel yüksekliği bulunduğundan sonra sol bacak için de Şekil 12'deki gibi belden  $x$  eksenine dikey aşağı inilerek sol dizin koordinatları belirlenmiş olup Şekil 12'deki sol kalça açısı  $\theta_4 = 0^\circ$  kabul edilmiştir.

Yüklenme fazında sol ayak yerden kalkmaya başlayacağından sol ayağın ucunun hedef koordinat olmasına karar verilmiştir. Bu nedenle sol dizin koordinatları başlangıç noktası kabul edilerek sol ayak ucunun koordinatları ters kinematik yöntemiyle çözülerek bu fazdaki eklem açıları Şekil 13a ve Şekil 13b'deki gibi elde edilmiştir. İlk önce Şekil 13b'deki GHI dik üçgeninde,  $|GI| = R$  olduğundan Pisagor teoreminden Eş. 19 ile  $R = 13,13 \text{ cm}$  olarak bulunmuştur.

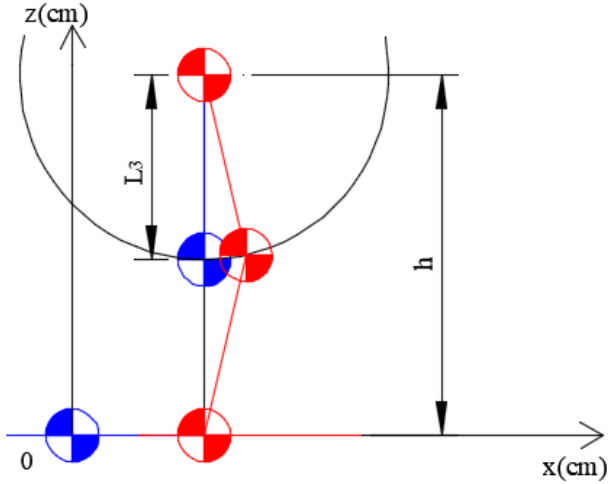
$$R^2 = ((2 \times L_2 \times \cos(13^\circ) - L_3)^2 + (F_2 - s)^2) \quad (19)$$



**Şekil 10.** a) Yükleme fazı için sağ bacağın öne eğilmesi desenlerinden ne kadar üretilebileceğinin gösterilmesi, b) Ayağın tam temas fazı için sağ bacağın kabul edilmiş bir açı değeri kadar öne eğilmesi deseninin üretilmesi  
(a) Demonstrating how much can be produced from right leg forward bending patterns for the loading response phase, b) Producing a pattern of bending the right leg forward by an accepted angle value for the full contact phase of foot.



**Şekil 11.** a) Ayağın tam temas fazı için sağ bacağın öne eğilmesi desenlerinden ne kadar üretilebileceğinin gösterilmesi, b) Robotun sağ bacak açılarının gösterilmesi, c) DEF üçgeninin oluşturulması  
(a) Demonstrating how much can be produced from right leg bend patterns for full contact phase of foot, b) Demonstration of the right leg angles of the robot, c) Creation of triangle DEF.



**Şekil 12.** Yükleme fazı için sol bacağın eklem açısının 0° kabul edilmesi  
(Accepting the joint angle of the left leg as 0° for the loading response phase).

Daha sonra Şekil 13b'deki GHI üçgeninde Kosinüs teoreminden;  $|GH| = L_4$  ve  $|HI| = F_2$  alınarak Eş. 20'ye göre sol bilek açısı  $\theta_6 = 60,08^\circ$  değeri elde edilmiştir.

$$R^2 = L_4^2 + F_2^2 - 2L_4F_2\cos(\theta_6) \quad (20)$$

Sol diz açısının değerinin bulunması içinde Eş. 21'den  $\iota = 52,38^\circ$  ve Eş. 22'den  $\lambda = 8,56^\circ$  açıları bulunarak Eş. 23'ten  $\theta_5 = 43,82^\circ$  değeri hesaplanmıştır.

$$\iota = \cos^{-1} \left( \frac{F_2^2 - R^2 - L_4^2}{-2 \times R \times L_4} \right) \quad (21)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{F_2 - s}{2 \times L_2 \times \sin(77^\circ) - L_3} \right) \quad (22)$$

$$\theta_5 = \iota - \lambda \quad (23)$$

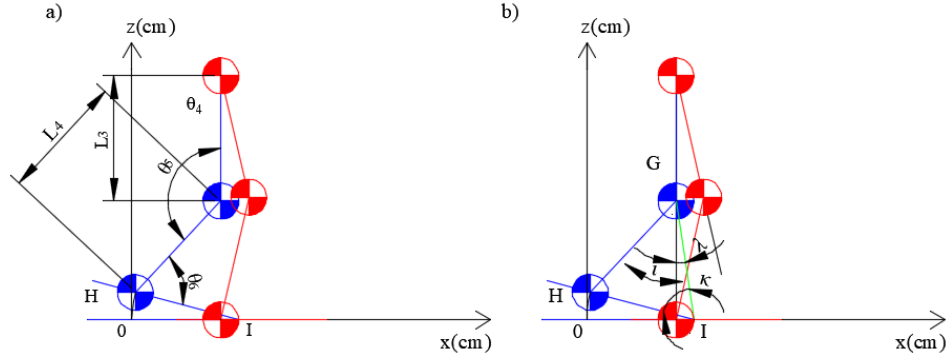
Bir sonraki fazda robot sağ ayak üzerinde kalıp sol ayağı ile salınma geçecektir. Bu nedenle sol ayak yerden kalkarken robotun geriye doğru devrilmemesi için Şekil 14'teki gibi sağ ayak arka ucu  $x = 5$  noktasına göre Eş. 24 ve Eş. 25 ile moment hesabı yapılmıştır. Bulunan sonuca göre  $0,98 \geq 0$  olduğundan robotun devrilmeyeceğine karar verilmiştir.

$$M_{x=5} \geq 0 \quad (24)$$

$$-m_{L_1}gx_{L_1} + m_{L_2}gx_{L_2} + m_{bel\_kısımi}gx_{bel\_kısımi} + m_{R_1}gx_{R_1} + m_{R_2}gx_{R_2} \geq 0 \quad (25)$$

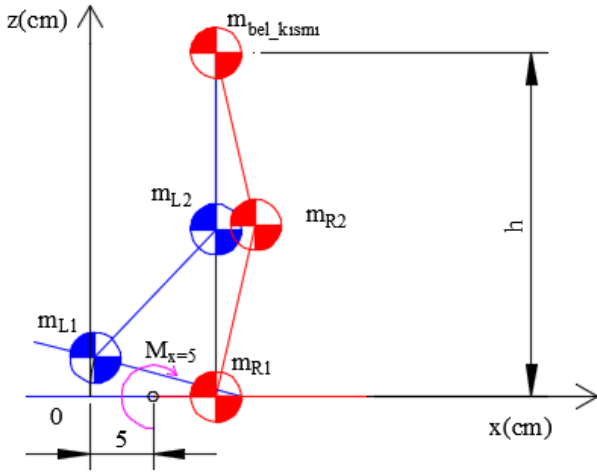
### 2.5.3. Basma fazı- basma ortası (Stance phase- midstance)

Basma ortası fazında sadece sağ ayak yere basmalı sol ayak ise salınımın ortasında olmalıdır. Ayrıca sol ayak yere sürtünmemelidir. Yani sol kalça ve sol dizin eklem açıları uygun pozisyonda olmalıdır.

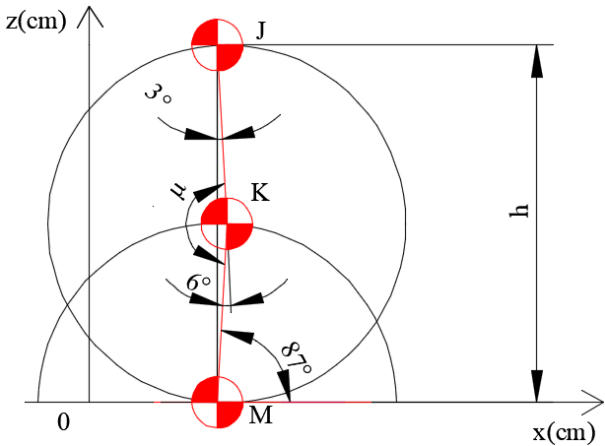


**Şekil 13.** a) Yükleme fazı için sol bacağın eklem açılarının bulunması, b) Yükleme fazı için sol bacağın eklem açılarının bulunması için üçgen oluşturulması Finding the joint angles of the left leg 1638 or the loading response phase, b) Creating a triangle to find the joint angles of the left leg 1638 or the loading response phase).

Bu nedenle yere temas eden sağ bacağın kalça  $\theta_1 = 3^\circ$ , diz  $\theta_2 = 6^\circ$  ve bilek açıları  $\theta_3 = 87^\circ$  değerlerinde olduğu Şekil 15'teki gibi kabul edilmiştir.



**Şekil 14.** Yükleme fazı için üretilen sağ ve sol bacak desenlerinden robotun SMN şartının sağlayıp sağlamadığının kontrolü (Checking whether the robot meets the SMN requirement from the right and left leg patterns produced for the loading response phase).



**Şekil 15.** Basma ortası fazı için sağ bacak kalça ve diz açı değerlerinin atanması (Assigning the right leg hip and knee angle values for the midstance phase).

Daha sonra da robotun bel yüksekliği  $h$ 'nin bulunması için Şekil 15'teki JKM üçgeninde Kosinüs teoremi uygulanarak Eş. 26'ya göre  $\mu = 174^\circ$  ve Eş. 27'ye göre  $h = 27,96 \text{ cm}$  hesaplanmıştır.

$$\mu = 180^\circ - \theta_2 \quad (26)$$

$$h^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2\cos(\mu) \quad (27)$$

Bel yüksekliği ve koordinatları belirlenmiş robotun ayağının yere sürünmemesi için sol dizinin yerden daha da yükselmesi gerekmektedir. Bunun için de burada sol kalça açısı  $\theta_4 = 36^\circ$ 'ye gitmesi Şekil 16a'daki gibi kabul edilmiş olup sol bacak açıları Şekil 16b'de gösterilmiştir.

Şekil 16c'deki sol kalça açısı  $\theta_4 = 36^\circ$ 'ye gideceğinden dolayı sol dizin koordinatları da ileri yön kinematiğiyle Eş. 28 ve Eş. 29 ile  $x_{sol\_diz} = 18,23$  ve  $z_{sol\_diz} = 16,64$  olarak bulunmuştur.

$$x_{sol\_diz} = s + L_3 \times \sin \theta_4 \quad (28)$$

$$z_{sol\_diz} = h - L_3 \times \cos \theta_4 \quad (29)$$

Daha sonra merkezi sol dizin koordinatları ve sol bacak diz ile sol bilek arasındaki uzunlukta olan bir çember, robotun sol bacağının diz altını tasarlamak için çizilmiştir. Böylece Şekil 16c'deki merkezi sol diz olan Eş. 30'daki çember fonksiyonunda  $x_{sol\_bilek} = 14$  yazılarak Eş. 31'deki ikinci dereceden denklem elde edilmiştir. İkinci derece denklemin kökleri de  $z_{sol\_bilek_1} = 3,29$ ,  $z_{sol\_bilek_2} = 29,99$  olarak bulunmuştur.

$$(x - x_{sol\_diz})^2 + (z - z_{sol\_diz})^2 = L_4^2 \quad (30)$$

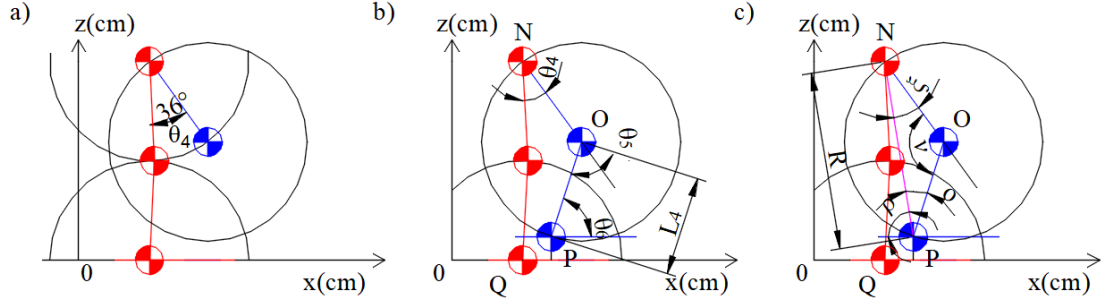
$$z^2 - 33,28 \times z + 98,7825 = 0 \quad (31)$$

Bulunan köklerden  $z_{sol\_bilek_2} = 29,99$  robotun çalışma uzayı dışında olduğu için geçersizdir. Dolayısı ile  $z_{sol\_bilek_1} = 3,29$  kökü robotun çalışma uzayı içinde kaldığından robotun sol bilek z koordinatının  $z_{sol\_bilek} = 3,29$  olduğuna karar verilmiştir. Bulunan  $z_{sol\_bilek}$  koordinatı aynı zamanda robotun sol ayağının yerden yüksekliğini de ifade etmektedir.

Robotun sol diz açısını bulmak için ise ilk önce Şekil 16c'deki NOP üçgeninde  $|NP|=R$  kabul edilerek Eş. 32'den  $R = 24,99 \text{ cm}$  bulunmuştur.

$$R^2 = (h - z_{sol\_bilek})^2 + (x_{sol\_bilek} - s)^2 \quad (32)$$





**Şekil 16.** a) Basma ortası fazında sol kalça açısının  $36^\circ$  olarak belirlenmesi, b) Robotun sol bacak açılarının gösterilmesi, c) Sol bacak için ters kinematik gösterimi (a) Determining the left hip angle as  $36^\circ$  in the midstance phase, b) Demonstration of the left leg angles of the robot c) Inverse kinematic demonstration for the left leg).

Daha sonra yine NOP üçgeninde Kosinüs teoreminden  $\theta_5$ 'in bütünler açısı Eş. 33'ten  $v = 126,38^\circ$  ve Eş. 34'ten sol diz açısı  $\theta_5 = 53,62^\circ$  elde edilmiştir.

$$R^2 = L_3^2 + L_4^2 - 2L_3L_4\cos(v) \quad (33)$$

$$\theta_5 = 180^\circ - v \quad (34)$$

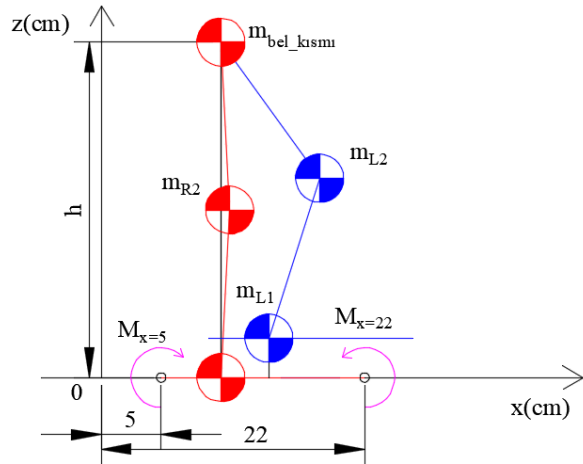
Bu fazdaki sol bilek açısını bulmak için de ilk önce Şekil 16c'deki NQP üçgeninden Eş. 35 ile  $\rho = 80,79^\circ$  bulunmuştur.

$$\rho = \tan^{-1}\left(\frac{h-z_{sol,diz_1}}{x_{sol,bilek}-s}\right) \quad (35)$$

Daha sonra da Şekil 16c'deki NOP ikizkenar üçgeninde Eş. 36 ile  $\xi = o = 26,81^\circ$  Eş. 37 ile de sol bilek açısı  $\theta_6 = 72,4^\circ$  elde edilmiştir.

$$\xi + o + v = 180^\circ \quad (36)$$

$$\rho + o + \theta_6 = 180^\circ \quad (37)$$



**Şekil 17.** Basma ortası fazında olası döndürme moment noktaları (Possible torque moment points in the midstance phase).

Basma ortası fazında robot sağ ayak üzerinde dururken robotun sol ayağı salınım ortasındadır. Şekil 17'de, robotun düşmesi için olası döndürme moment noktaları  $x = 5$  ve  $x = 22$ ' dir. 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 robotun dengede kalacağı tespit edilmiştir.

#### 2.5.4. Basma - basma sonu fazı (çift destek fazı) (Stance phase - terminal stance phase (double support phase))

Basma sonu fazında hem sol ayak hem de sağ ayak yere basmaktadır. Bundan dolayı sol bacağın eklem açıları ilk değme fazındaki sağ bacağın eklem açılarına değerlerine, sağ bacağın eklem açıları da ilk değme fazındaki sol bacağın eklem açılarına değerlerine ve SMN şartlarına sahip olacağına karar verilmiştir. Bu faz için bulunan eklem açıları Şekil 18a, Şekil 18b ve Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Basma sonu fazı için bulunan eklem açıları (Joint angles found for the terminal stance phase).

$\theta_1 = 0,87^\circ$	$\theta_2 = 18,4^\circ$	$\theta_3 = 72,48^\circ$
$\theta_4 = 12,37^\circ$	$\theta_5 = 0^\circ$	$\theta_6 = 102,37^\circ$

#### 2.5.5. Basma - salınım öncesi fazı (Stance phase - preswing phase)

Bu fazda sağ bacak salınıma başlayıp sol bacak ileriye doğru eğileceğinden sol bacak için bir adım uzunluğu kadar  $x$  ekseninde sağa ötelenerek çizim yapılmıştır. Şekil 19a, Şekil 19b ve Tablo 2'deki gibi yüklenme fazındaki sağ bacağın eklem açılarının değerleri de sol bacağın eklem açılarına değerlerine, sol bacağın eklem açıları da sağ bacağın eklem açılarına değerlerine ve SMN şartlarına sahip olacağına karar verilmiştir.

**Tablo 2.** Salınım öncesi fazı için bulunan eklem açıları (Joint angles found for the preswing phase).

$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_2 = 43,82^\circ$	$\theta_3 = 60,08^\circ$
$\theta_4 = 13^\circ$	$\theta_5 = 26^\circ$	$\theta_6 = 77^\circ$

#### 2.5.6. Salınım - salınım başlangıcı (Swing phase - initial swing)

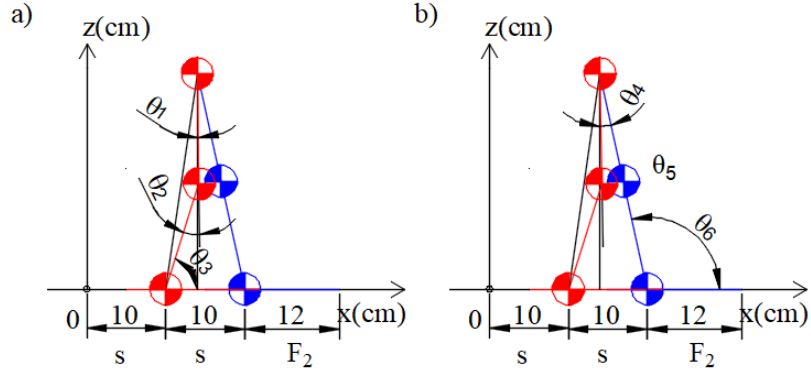
Bu fazda, sağ ayak salınıma başlayacak sol ayak ise yere basacaktır. Bundan dolayı sol kalçanın açı değeri azaltılıp sağ dizin açısının ise sağ ayağın yere değmeyeceği değerde olması sağlanmıştır. Bundan dolayı sol bacağın kalça, diz ve bilek açıları için Şekil 20'deki gibi  $\theta_4 = 8^\circ$ ,  $\theta_5 = 16^\circ$ ,  $\theta_6 = 82^\circ$  olduğu kabul edilmiştir.

Robotun sağ bacak eklem açılarını bulmak için de Şekil 20'deki TUV üçgeninde Kosinüs teoremi uygulanarak Eş. 38'den  $\zeta = 164^\circ$  ve Eş. 39'dan robotun bel yüksekliği  $h = 27,72$  cm hesaplanmıştır.

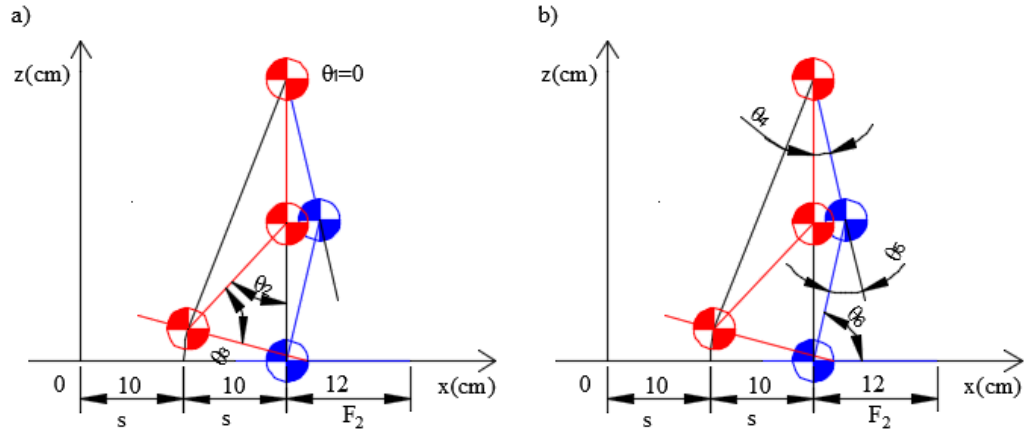
$$\zeta = 180^\circ - \theta_5 \quad (38)$$

$$h^2 = L_3^2 + L_4^2 - 2L_3L_4\cos(\zeta) \quad (39)$$

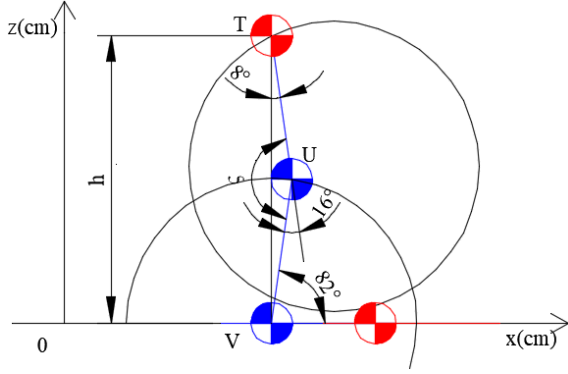
Bel yüksekliği belirlenmiş Şekil 21a'daki robotun ayağının yere sürtünmemesi için sağ dizinin yerden daha da yükselmesi gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 21b'deki gibi  $\theta_1 = 25^\circ$  varsayılp robotun ayağının yere sürtünmesi engellenmiştir.



Şekil 18. a) Basma sonu fazındaki sağ bacak eklem açıları, b) Basma sonu fazındaki sol bacak eklem açıları  
(a) Right leg joint angles in the terminal stance phase, b) Left leg joint angles in the terminal stance phase),



Şekil 19. a) Salınım öncesi fazındaki sağ bacak eklem açıları, b)Salınım öncesi fazındaki sol bacak eklem açıları  
(a) Right leg joint angles in the preswing phase b) Left leg joint angles in the preswing phase).



Şekil 20. Salınım başlangıcı fazı için sol bacak kalça ve diz açı değerlerinin atanması  
(Assigning left leg hip and knee angle values for the initial swing phase).

Daha sonra robotun sağ diz koordinatları Şekil 21c'deki gibi ileri yön kinematiğiyle Eş. 40 ile  $x_{sağ\_diz} = 25,91 \text{ cm}$  ve Eş. 41 ile de  $z_{sağ\_diz} = 15,03 \text{ cm}$  olarak elde edilmiştir.

$$x_{sağ\_diz} = 20 + L_1 \times \sin \theta_1 \quad (40)$$

$$z_{sağ\_diz} = h - L_3 \times \cos \theta_4 \quad (41)$$

Böylece merkezi sağ dizin koordinatlarında olan sağ bacak diz altı ile sağ bilek arasındaki uzunlukta Şekil 21c'deki gibi bir çember 1640

çizilmiştir. Merkezi sağ diz olan Eş. 42'ye  $x_{sağ\_bilek} = 16$  değeri verilerek Eş. 43'teki ikinci dereceden denklem elde edilmiştir.

$$(x - x_{sağ\_diz})^2 + (z - z_{sağ\_diz})^2 = L_4^2 \quad (42)$$

$$z^2 - 30,06 \times z + 128,1171 = 0 \quad (43)$$

Elde edilen ikinci dereceden Eş. 43 çözümlü  $z_{sağ\_bilek_1} = 5,14$ ,  $z_{sağ\_bilek_2} = 24,92$  kökleri bulunmuştur. Ancak robotun çalışma uzayı dışında kalan  $z_{sağ\_bilek_2} = 24,92$  kökü geçersiz sayılmıştır. Diğer kök  $z_{sağ\_bilek_1} = z_{sağ\_bilek} = 5,14$  ise aynı zamanda robotun sol bileğinin yerden yüksekliği olarak kabul edilmiştir.

Sağ diz açısını bulmak için Şekil 21c'deki WYZ üçgeninde  $|WY|=R$  olduğundan Eş. 44 ile önce  $R = 22,92$  olarak hesaplanmıştır.

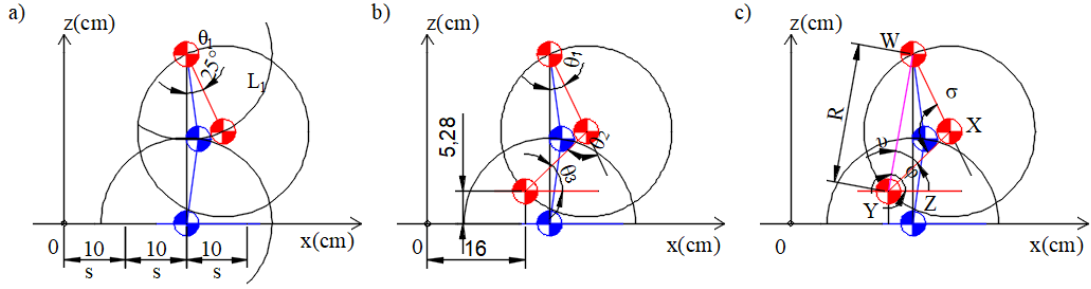
$$R^2 = (h - z_{sağ\_diz_1})^2 + (x_{sağ\_diz} - 2 \times s)^2 \quad (44)$$

$R$  bulunduktan sonra Şekil 21c'deki WXY üçgeninde Kosinüs teoreminden Eş. 45 ile  $\theta_2$ 'in bütünler açısı  $\sigma = 109,9^\circ$  ve Eş. 46 ile de sağ diz açısı  $\theta_2 = 70,09^\circ$  elde edilmiştir.

$$R^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(\sigma) \quad (45)$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \sigma \quad (46)$$

Sağ bilek açısını bulmak için de ilk önce Şekil 21c'deki WYZ üçgeninden Eş. 47 ile  $\varphi = 79,95^\circ$  bulunmuştur.



**Şekil 21.** a) Salınım başlangıcı fazında sol kalça açısının  $25^\circ$  olarak belirlenmesi, b) Robotun sağ bacak açılarının gösterilmesi, c) Sağ bacak için ters kinematik gösterimi (a) Determining the left hip angle as  $25^\circ$  in the initial swing phase, b) Demonstration of the right leg angles of the robot, c) Inverse kinematic demonstration for the right leg).

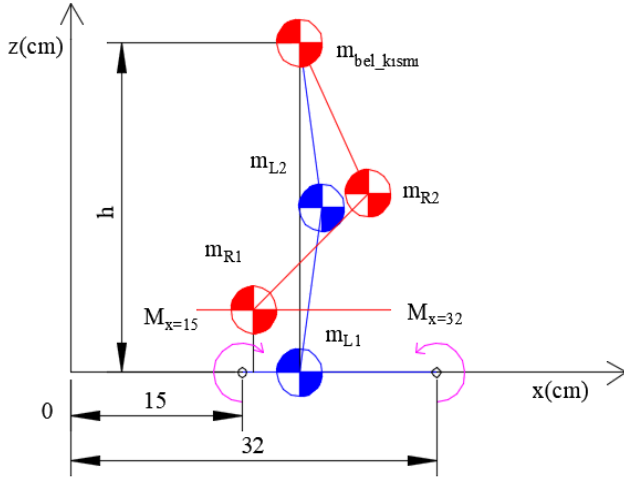
$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{h - z_{\text{sağ\_diz}_1}}{2 \times s - x_{\text{sol\_bilek}}} \right) \quad (47)$$

$\varphi$  açısı bulunduğundan sonra Şekil 21c'deki WXY üçgeninde Kosinüs teoreminden Eş. 48 ile  $v = 35,04^\circ$  ve Eş. 49 ile de sağ bilek açısı  $\theta_3 = 44,90^\circ$  olarak hesaplanmıştır.

$$L_1^2 = R^2 + L_2^2 - 2RL_2 \cos(v) \quad (48)$$

$$\theta_3 = \varphi - v \quad (49)$$

Böylece salınım başlangıcı fazındaki sağ ve sol bacak eklem açılarının hepsi elde edilmiştir.



**Şekil 22.** Salınım başlangıcı fazında olası döndürme moment noktaları (Possible torque moment points in the initial swing phase)

Bu fazda sol ayak üzerinde duran ve sağ ayağı salınım başlangıcında olan robotun Şekil 22'deki gibi düşmesi için olası döndürme moment noktaları  $x = 15$  ve  $x = 32$ 'dir. Bunlar tek ayak üzerinde kalan robotun sol ayağının ön ve arka noktalarıdır. Ağırlık noktalarının oluşturacağı kuvvetlerin izdüşümü ise robotun sol ayağının çokgeni içinde olduğu için herhangi bir döndürme momenti oluşturamayacağından bu fazda robotun dengede kalacağına karar verilmiştir.

### 2.5.7. Salınım - salınım ortası (Swing phase-midswing)

Sağ bacağın salınım ortasında sol bacağın ise yere bastığı bu fazda basma ortasındaki sağ bacağın eklem açıları sol bacağın değerlerini, sol bacağın eklem açıları da sağ bacağın eklem açıları değerlerini alması Şekil 23a, Şekil 23b ve Tablo 3'teki gibi kabul edilmiştir.

**Tablo 3.** Salınım ortası fazı için bulunan eklem açıları (Joint angles found for the midswing phase).

$\theta_1 = 36^\circ$	$\theta_2 = 53,58^\circ$	$\theta_3 = 72,42^\circ$
$\theta_4 = 3^\circ$	$\theta_5 = 6^\circ$	$\theta_6 = 87^\circ$

Tek ayak üzerindeki robotun düşmesi için olası döndürme moment noktaları ise Şekil 23c'deki gibi  $x = 15$  ve  $x = 32$  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 kalacağına karar verilmiştir.

### 2.5.8. Salınım - salınım sonu fazı (Swing phase-terminal swing phase)

Yürüme döngüsü tamamlanan bu fazda sağ ve sol bacağın eklem açılarının değerleri ve SMN şartları ilk değme fazıyla aynı olup elde edilen değerler Şekil 24a, Şekil 24b ve Tablo 4'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Salınım sonu fazı için bulunan eklem açıları (Joint angles found for the terminal swing phase).

$\theta_1 = 12,37^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_3 = 102,37^\circ$
$\theta_4 = 0,87^\circ$	$\theta_5 = 18,4^\circ$	$\theta_6 = 72,48^\circ$

### 2.6. Robotun sağ bacağının bir döngüsünün modellenmesi (Modeling a cycle of the robot's right leg).

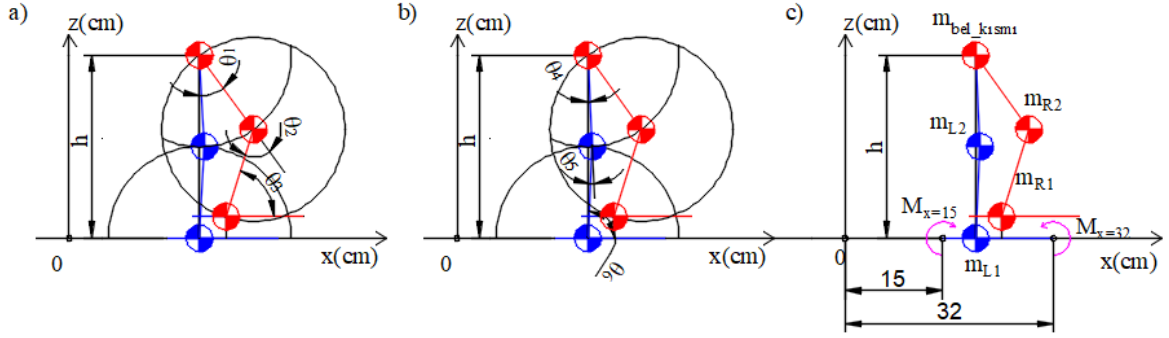
Sekiz alt fazdan oluşan iki ayaklı robotun sağ ve sol bacağı için üretilen yürüme deseni açıları, yan yana getirildiği zaman Şekil 25'teki gibi bir yürüme döngüsü deseni modellenmesi elde edilmiştir.

### 2.7. Robotun yana eğilme açısının bulunması (Finding the tilt angle of the robot to the side)

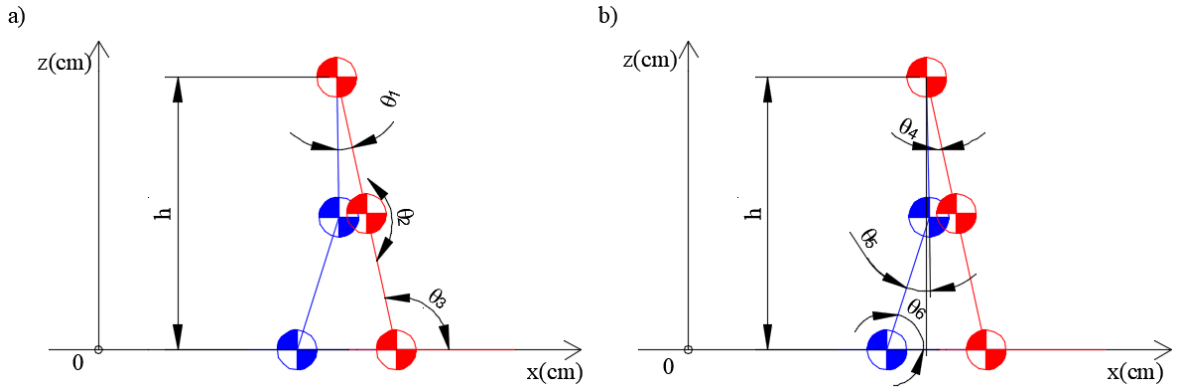
Basma fazındaki robotun yan tarafa düşmeden dengede kalmasının sağlanması için sağ ayak bileğine uygulanan kuvvetlerin oluşturduğu momentlerin toplamının sıfıra eşit olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için de sağ ayağı basarken, sol ayağı salınım fazında olan Şekil 26'daki robotun sağ ayak tarafına doğru devrilmesini engellemek için sağ tarafa eğim verilmiştir. Böylece sağ ayak bileğini döndürmek isteyen kuvvetlerin momentlerinin toplamı Eş. 50 ile sıfıra eşitlenerek  $x = 0,025$  cm değeri ve Eş. 51 ile Robotun eğim açısı =  $11,69^\circ$  bulunmuştur.

$$\sum M_{\text{sağ\_ayak}} = m_{R1} g x_{R1} + m_{R2} g x_{R2} + m_{\text{bel\_kısmı}} g x_{\text{bel\_kısmı}} - m_{L1} g x_{L1} + m_{L2} g x_{L2} = 0 \quad (50)$$

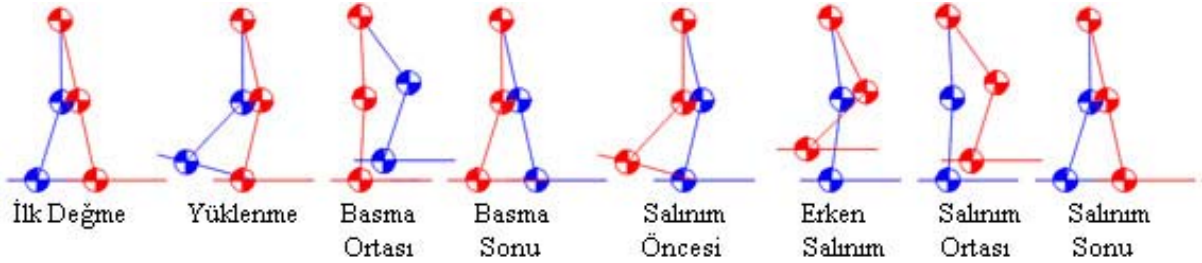
$$\text{Robotun eğim açısı} = \tan^{-1} \left( \frac{x}{z} \right) = 11,69461550118^\circ \quad (51)$$



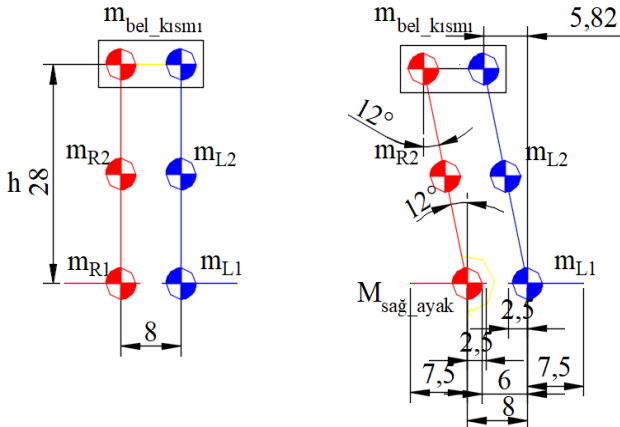
Şekil 23. a) Salınım ortası fazındaki sağ bacak eklem açıları, (b) Salınım ortası fazındaki sol bacak eklem açıları, (c) Salınım ortası fazında olası döndürme moment noktaları (a) Right leg joint angles in the midswing phase, (b) Left leg joint angles in the midswing phase, (c) Possible torque moment points in the midswing phase).



Şekil 24. a) Salınım sonu fazındaki sağ bacak eklem açıları, b) Salınım sonu fazındaki sol bacak eklem açıları (a) Right leg joint angles found in the terminal swing phase, (b) Left leg joint angles found in the terminal swing phase)



Şekil 25. Bir yürüme döngüsü için sağ bacağın yürüme deseni (Gait pattern of the right leg for a gait cycle)

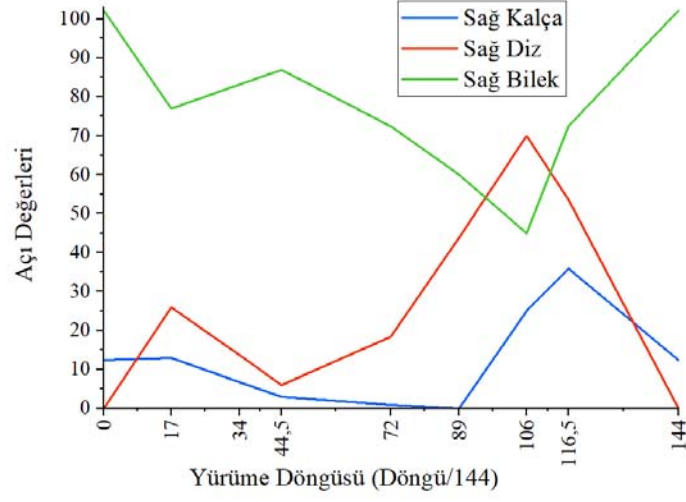


Şekil 26. Robotun ön düzleminde moment hesabı (Moment calculation in the front plane of the robot)

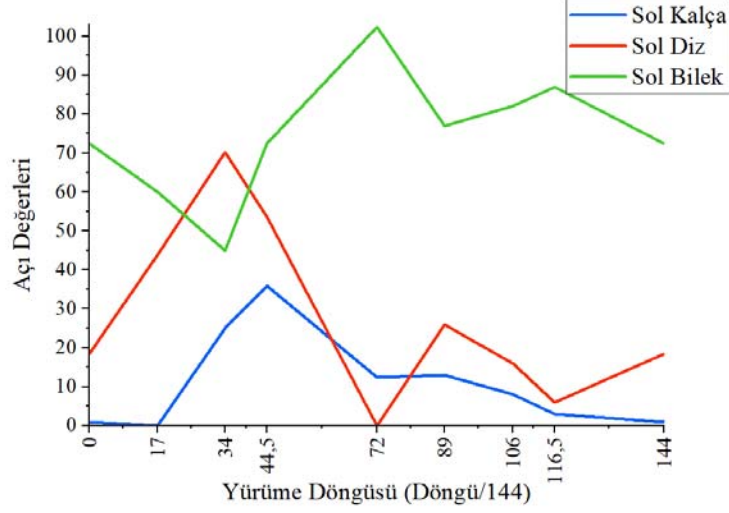
### 3. İki Ayaklı Yürüyen Robotun Eklem Açılarının Grafiklerinin Oluşturulması (Creating Graphics of Joint Angles of a Bipedal Robot)

İki ayaklı robotun eklem açıları Rancho Los Amigos terminolojisi, sıfır moment noktası, ileri kinematik, ters kinematik, geometrik ve trigonometrik yöntemlerden yararlanılarak elde edilip sağ bacağının eklem açıları Şekil 27'de ve sol bacağının eklem açıları Şekil 28'de gösterilmiştir.

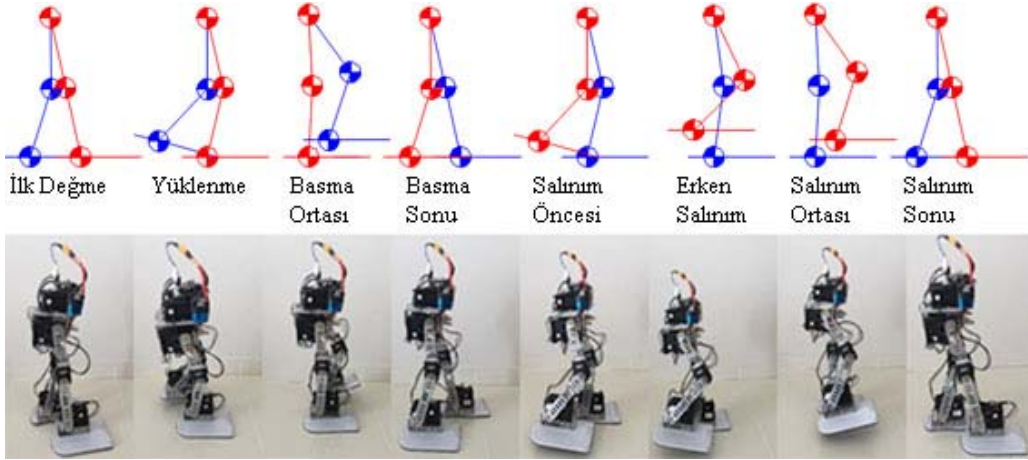
Şekil 27 ve Şekil 28'de yer alan grafiklerdeki eklem açıları ile Şekil 25'teki yürüme deseni oluşturulmuştur. Yürüme desenindeki hesaplanan açıların değerleri gömülü yazılıma aktarılmış olup bir mikrodenetleyici vasıtasıyla iki ayaklı robotun 12 eklemde bulunan servo motorları kontrol edilmiştir. Daha sonra iki ayaklı robotun video görüntüleri Rancho Los Amigos terminolojisine göre analiz edilerek Şekil 29'daki gibi yürüme deseninin her fazı için karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 27. İki ayaklı yürüyen robotun sağ bacağına eklem açılarının grafikleri (Graphs of the joint angles of the right leg of the bipedal walking robot).



Şekil 28. İki ayaklı yürüyen robotun sol bacağına eklem açılarının grafikleri (Graphs of the joint angles of the left leg of the bipedal walking robot).



Şekil 29. Üretilen yürüme deseni modellemesi ile robotun yürüyüşünün karşılaştırılması (Comparing the gait of the robot with the modeling of the gait pattern produced).

#### 4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Fiziksel ve matematiksel olarak modellenen ve SMN şartlarına göre ileri ve ters kinematik yöntemiyle eklem açılarının değerleri bulunan iki ayaklı robot, Rancho Los Amigos terminolojisiyle tüm eklemleri uyum içinde harmoniksel hareketleri yapıp düşmeden dengede kalarak yürütmesini gerçekleştirmiştir. Ancak yürüme deseni statik yürüme yöntemiyle yapıldığı için iki ayaklı robotun hızında ve adım uzunluğunda sınırlamaya gidilmiştir. Bu çalışmada daha çok iki bacaklı robotlardaki eklemlerin sayısının fazla olmasının ve eklemlerinin kontrolünün zorluğunu bertaraf edecek statik yürüme deseninin uygulama detayları irdelenmiş ve statik yürüme deseninin elde edilmesine odaklanılmıştır. Esasında Asimo [2, 3, 9, 10], Johnnie ve Lola [16-19] ve Atlas [6] gibi popüler robotların yürüme desenleri de benzerdir, ancak bu robotların esas farkları denge kontrol dinamiğine sahip olmalarıdır. Sonuç olarak statik yürüme her ne kadar literatürde en çok kullanılan bir yöntem olsa da bu çalışmanın iki ayaklı robotlar için yürüme deseni üretilmesinde eğitici bir uygulama özelliği olması amaçlanmıştır.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu robot projesi, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nce kabul edilen TÜBAP-2014/05 nolu proje tarafından desteklenmiştir.

#### Kaynaklar (References)

1. Bayraktaroğlu, Z.K., et al., Design and Development of the I.T.U. Biped Robot, Gazi University Journal of Science, 2018. GU J Sci, 31 (1), 251-271, 2018.
2. Shigem, S., Goswami, A., & Vadakkepat, P., ASIMO and humanoid robot research at Honda. Humanoid robotics: A reference, 55-90, 2018.
3. Hirose, M. and K. Ogawa, Honda humanoid robots development, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365 (1850), 11-19, 2007.
4. Yamamoto, T., Nishino, T., Kajima, H., Ohta, M., & Ikeda, K., Human support robot (HSR). In ACM SIGGRAPH 2018 emerging technologies, 1-2, 2018.
5. Nagasaka, K., Sony QRIO. Humanoid Robotics: A Reference, 187-200, 2019.
6. Nelson, G., Saunders, A., & Playter, R., The petman and atlas robots at boston dynamics. Humanoid Robotics: A Reference, 169, 186., 2019.
7. Vukobratovic, M. and D. Juricic, Contribution to the synthesis of biped gait, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1-6, 1969.
8. 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, 365 (1850), 49-64, 2007.
9. Hirai, K., et al. The development of Honda humanoid robot. in Robotics and Automation, Proceedings. 1998 IEEE International Conference on. 1998 IEEE, 1998.
10. Hirai, K., The Honda humanoid robot: development and future perspective. Industrial Robot: An International Journal, 26 (4), 260-266, 1999.
11. McGeer, T., Passive dynamic walking, Int. J. Robot. Res. 9 (2), 62–82, 1990.
12. McGeer, T. Passive walking with knees. in Robotics and Automation, Proceedings., 1990 IEEE International Conference on. 1990 IEEE, 1990.
13. Jong H.P. and Kyoung D.K., Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation Leuven, Belgium 1 May 1998.
14. 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.
15. 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.
16. Pfeiffer, F., et al., Sensor and Control Aspects of Biped Robot JOHNNIE, International Journal of Humanoid Robotics, 1 (03), 481-496, 2004.
17. 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.
18. Lohmeier, S., et al., Humanoid Robot LOLA—Research Platform for High-Speed Walking, in Motion and Vibration Control, Springer., 221-230, 2009
19. Buschmann, T., S. Lohmeier, and H. Ulbrich, Humanoid robot lola: Design and walking control, Journal of physiology-Paris, 103 (3), 141-148, 2009.
20. Sygulla, F., & Rixen, D., A force-control scheme for biped robots to walk over uneven terrain including partial footholds, International Journal of Advanced Robotic Systems, 17 (1), 1729881419897472, 2020.
21. Nelson, G., et al., Petman: A humanoid robot for testing chemical protective clothing, 30 (4), 372-377, 2012.
22. Erbatur, K., et al., Design and control of the humanoid robot SURALP, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 19 (5), 725-731, 2011.
23. Olcay, T., and Özkurt, A, Design and walking pattern generation of a biped robot, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 25, 761-769, 2017.
24. Hu, D., Xiong, C. H., & Sun, R., Working out the bipedal walking expenditure of energy based on foot morphology of different hominid genera: Implications for foot evolution, Journal of Theoretical Biology, 519, 110646, 2021,
25. Ortopedik Protez ve Ortez Yürüme Analizi - 1, T.C.Milli Eğitim Bakanlığı, 2011
26. Houghlum, P.A. and D.B. Bertoti, Brunstrom's clinical kinesiology, FA Davis., 543, 2011.
27. Lovejoy, C.O., Evolution of human walking. Sci Am, 259 (5), 118-25, 1988.
28. Whittle, M.W., Gait analysis: an introduction, Butterworth-Heinemann, 2014.
29. Siciliano, B. and O. Khatib, Springer handbook of robotics, Springer Science & Business Media, 372, Springer, 2008.
30. Kajita, S., et al., Introduction to humanoid robotics, 101, Springer, 2014.