

## 얀센 메커니즘의 다리 보행 로봇 개발 및 최적화.

저자 1 김혁<sup>1</sup> · 2 문예철<sup>2</sup> †

한양대학교 융합기계공학과<sup>1</sup>, 한양대학교 기계공학부<sup>2</sup> 한양대학교융합기계공학과<sup>3</sup>

### Janssen mechanism leg walking robot development and optimization

Author 1 Hyuk Kim<sup>1</sup>, Author 2 Yea Chol Moon<sup>2†</sup>,

<sup>1</sup> Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

<sup>2</sup> Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ

#### ABSTRACT:

Develop a leg walking robot mechanisms with Janssen. Development item increases as the moving speed through the weight to set the leg to walk stably.

The material is used the metal material was later used to produce a plastic using a 3D printer developed a walking robot with stable and lightweight material

**Key Words:** 3D printer, Janssen, Lightweight, Optimization,

Received 0 xxxx 0000; received in revised form 0 xxxx 0000; accepted 0 xxxx 0000 [학회작성]

## 1. 서 론

기존 로봇의 주된 이동 방식은 바퀴 또는 무한계도를 이용하여 이동하였다. 그렇지만 바퀴를 이용한 이동 방식은 비평탄 지형, 무른 지형, 장애물이 있는 지형에서는 이동 속도가 크게 저하되거나 이동이 불가능한 상황이 발생 한다. 하지만 보행 로봇의 경우 이런 상황에서 이동이 가능한 구조를 가지고 있기 때문에 실제 적용을 목표로 개발이 수행 되고 있다.

육지에서 걷는 다관절 형태의 로봇(multi-legged robots) 다리에 대하여 많은 연구가 되어 왔다[6-10]. 하지만, 기존의 방법들은

각각의 다리에 서보 모터(servo motor)를 사용하고 있어서 많은 무게가 나가고 속도에서도 빠르지 않다. 따라서, 가벼운 다리를 여섯 개 이상 사용하여 몸체의 안전성을 높이고, 모터의 수는 가급적으로 줄이는 방법이 가장 좋을 것이다. 또한, 모터의 수를 줄여도 전, 후, 좌, 우 움직임이 쉽게 가능하여야 한다. 본 연구에서의 육지는 습지 혹은 모랫가와 같은 환경을 의미한다.

테오 얀센 메커니즘 기반의 보행 로봇을 만들기 위해서 기본 배경이 되는 게(crab) 로봇의 다리 길이와 구조, 그리고 움직임에 대한 설명, 마지막으로 보행 메커니즘을 분석하고자 한다.

## 2. 로봇의 구조 분석

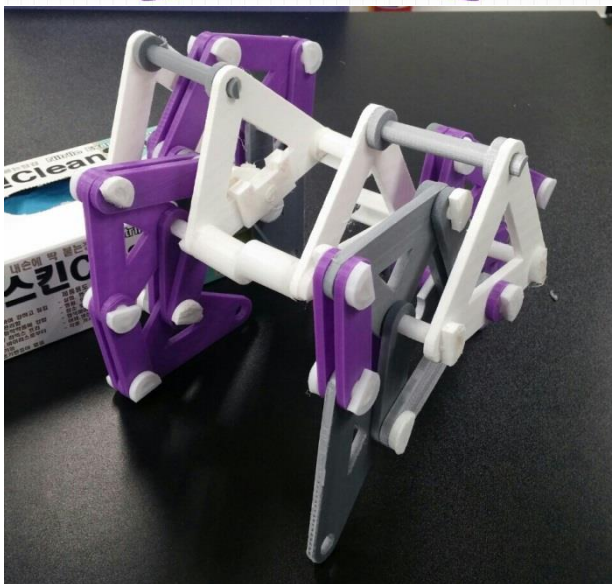
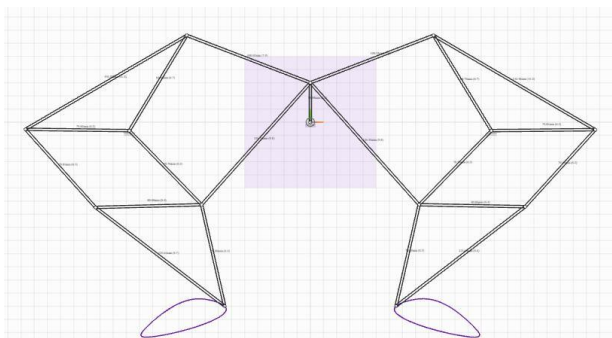
† Corresponding Author, myid1mm@hanyang.ac.kr

© 0000 Society of CAD/CAM Engineers [학회작성]

**2-1보행 로봇의 다리 움직임 분석**

게(crab) 로봇의 다리 움직임은 다음과 같다. 게 로봇은 베벨기어(bevel gear)가 달린 양측 DC 모터를 사용한다. 네개의 다리는 좌·우 부분으로 나뉘어지고 각각 하나의 모터로 동력이 전달된다. 하나의 양측 DC모터 구조는 좌·우 회전축 위상이 180° 차이가 있는 다리들의 결합으로 되어 있다. 4족(4 legs)로 이루어진 다리를 동시에 움직일 수 있다. 구조적으로는 모터의 양측 중에 한 축의 다리끝단(foot-point)이 지면에 닿아 있고, 또 다른 한 축의 다리는 지면에서 떠 있다. 이러한 형태의 기본적인 다리구조로 모터에 각 다리가 연결되어 4족을 갖춘다.

그림 1의 (a)는 게 로봇 다리 구조의 움직임을 시뮬레이션 하여 보여준 것으로 두꺼운 실선의 다리가 첫 번째 다리이며, 얇은 실선의 다리가 두 번째 다리이다. 아래의 그림에서 모터의 중심축에 연결된 절점(node)들과 두 개의 회전관절(pivot joint)에 의한 구조로 인해서 두 다리의 위상차를 확인 할 수 있다. 그림 1의 (b)에서 실제 로봇의 다리가 움직였을 때 각 다리의 위치를 보여주고 있다.



(a) M.sketch에서 다리의 위상  
(a) M.sketch of leg phases

(b) 로봇 모델

(b) Prototype of the robot model

그림 1. 시뮬레이션과 로봇 모델

Fig. 1. Simulation and robot model

원으로 표기된 곳, 첫 번째 다리의 좌측 원과 두 번째 다리의 우측 원은 게 로봇 다리를 움직이기 위한 회전 관절을 가리킨다. 앞서 설명 하였던 것과 같이 그림의 표시된 원의 위치를 보면 양측 회전축이 180° 위상 차이가 나는 것을 보여 준다.

화살표 모양은 로봇의 발끝(foot-point)을 가리키며, 우측 화살표 기준으로 첫 번째의 오른쪽 다리가 지면에 닿아 있게 된다. 두 번째 왼쪽 다리는 보행을 하고 있으므로 지면 위에 떠 있는 상태이다. 나머지 두 개 조로 이루어진 다리 또한 같은 보행 모습을 보여 준다.

게 로봇의 다리는 테오 얀센 메커니즘(Theo Janssen mechanism)의 다리 구조를 모방 하였고, 자연스러운 보행으로 몸체의 수평 상태를 유지한다[13]. 따라서, 바퀴형 이동로봇처럼 좌우 불균형 없이 자연스럽게 이동 할 수 있다. 이동할 때에는 양측 DC모터가 가진 장점으로 두 개의 모터에 의한 네 가지의 유형으로 정(clockwise), 정, 역(counter-clockwise), 역, 정, 역, 역으로 회전 한다. 또한, 작은 회전 반경으로 제자리에서 좌,우측 회전이 용이하다. 행동반경에서는 앞·뒤 구분이 없는 자유로운 움직임을 구사 한다.

**2-2보행 로봇의 다리의 소재**

현재 사용하는 모터는 과학상자 모터(No.100B)로 선정되었고 사용 전압은 4.5V,구동축 회전수는 250rpm 이다.

본 연구에 있어 연구 초기에 과학상자 부품을 이용한 로봇을 제작을 하였지만 저울을 통한 무게측정 결과 과학상자 제품을 이용한 로봇의 무게는 652g이었다.

과학상자 부품만을 이용한 로봇 제작시 로봇의 하중이 로봇의 보행속도를 저하시키는 영향을 주는 것으로 판단하고 소재의 경량화를 방법을 연구하였다.

보행 로봇의 이동속도를 증가시키는 방법중에 하나는 경량화인데 소재에 따른 무게가 많은 차이가 난다. 따라서 본 연구에 있어서 가벼운 소재를 선정 기준은 다음과 같다.

소재의 가공이 쉽다

합리적인 가격

이런 기준에 적합한 것이 플라스틱(PLA)이고 가공을 3D 프린터(maker bot replicator)를 이용하여 가공을 하였다.

3D 프린터를 이용한 로봇의 하중은 537g 으로 약 115g 정도의 경량화가 가능했다.



그림 2. 과학상자를 이용한 로봇 모델  
Fig. 2. Robot model using the scientific Box

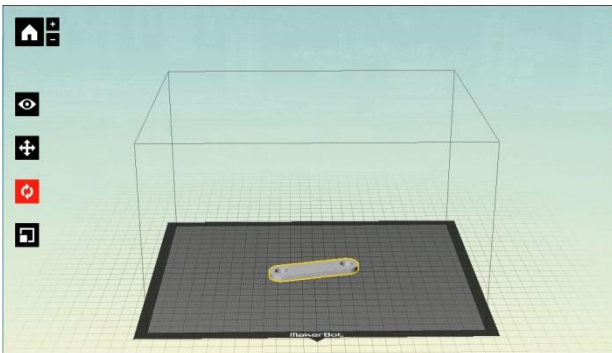


그림 2. 3D 프린터를 이용한 제작  
Fig. 2. Produced using 3D printers

## 1. 로봇 다리 구조의 기구학적인 분석

### 3.1 링크 길이 및 사이각 도출

게 로봇 다리의 기구학적인 분석을 하기 위해서 그림을 기준으로 수식과 함께 설명하려 한다. 그림 2는 게 로봇의 12개로 연결되어진 다리에 대한 구조적인 모습을 X, Y 직교좌표계의 기준으로 나타내었다. 게 로봇 모델을 설계할 때 주어진 12개 막대 길이는 다음 표 1과 같다. 그림 2의 직교좌표 면에서 주어진 링크 12 끝단의 C2\_3절점(node)이  $\theta_r$ 값만큼 좌측으로 이동하여 멈춰진 상태이다. 그림에서 C2\_3절점이 Y축과 동축(same axle) 일 때  $\theta_r$ 값은  $90^\circ$  이다. 여기서,  $\theta_r$ 값은 모터의 회전각이다.

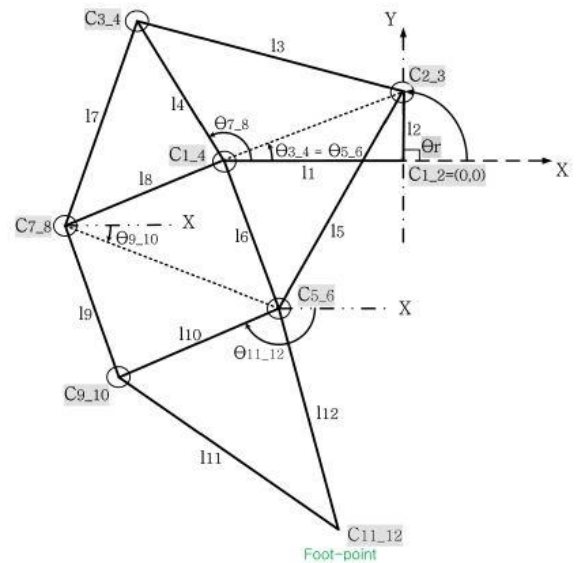


그림 3. 게 로봇 다리구조  
Fig. 3. Twelve-bar linkage structure of crab robot

Link Number	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$
Link	137	30	100	84	124	78.8
Length[mm]	105.4	80.2	78.8	73.4	76	131.6

게 로봇 다리 구조에서 각 마디 점에 해당하는 관절(joint)을 절점(node)이라 한다. 해석 순서에서 음영으로 표시된 절점은 두 원의 접선방향직에서 사용될 첫 번째 기준이 되는 원이다. 최종적으로 우리가 원하고자 하는 것은 게 로봇의 다리 끝단(foot-point)이 된다. 로봇의 다리 끝단 절점은 C11\_12라 한다. 제안한 다관절 보행 로봇인 게 로봇의 다리 구조는 양센 메커니즘(Jansen mechanism)과 4절링크이론(four-bar linkage mechanism)을 배경으로 한다[14]. 여기서, 링크(link)의 역할은 길이가 서로 다른 링크를 핀으로 연결한 것으로 주동절(회전 하는 12의 C2\_3 절점)의 운동에 따라 종동절(왕복 운동 13의 C3\_4 절점)이 일정한 운동을 하도록 꾸며진 장치이다. 이와 같이 3절부터 각 마디의 절점에 따라 4절, 5절 등으로 나뉘며 절의 수에 따라 몇 절 링크라 한다.

또한 4절 링크의 각 링크 길이에 따라 링크의 운동 특성이 틀려진다. 따라서, 고정된 두 절점의 초기 조건이 회전 또는 왕복 운동인지 그리고 운동 반경에 따라 특성이 조금씩 차이가 난다. 아래의 그림 3은 게 로봇에서 주동절과 종동절 부분의 위치를 쉽게 설명하기 위한 4절 링크 장치이다. 제안한 로봇에서는 진한 실선으로

그려진 11막대(bar)의 양 절점 C1\_4와 C1\_2는 특수 제작 핀(pin)으로 고정되어있다. 이와 같이 그림 2에서 4절 링크 장치에 13,15는 중동절 역할을 할 수 있도록 연결 되어 진다.

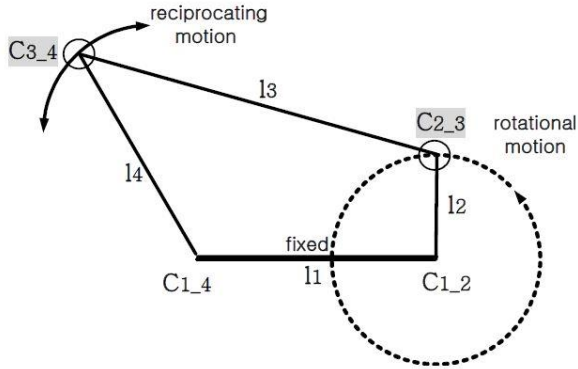


그림 4. 4절 링크  
Fig. 4. Four-bar linkage

연결된 절점(node)은 두 원의 접선방정식을 이용하여 구할 수 있다. 로봇 다리 끝단(foot-point) 위치를 알아내기 위해서 5개 X, Y 절점 좌표와 각 절점  $\theta_i$  값을 구한다. 여기서  $\theta_i$ 의 값은 식 (1)에서  $i$  값이다. 그림 2에서 찾아야 할 절점 각들은  $\theta_{3_4}$ ,  $\theta_{5_6}$ ,  $\theta_{7_8}$ ,  $\theta_{9_{10}}$ ,  $\theta_{11_{12}}$ 이다. 위의 해석 순서에 따라 번호를 부여 하여 표기한다.  
두 원간에 교점에 따른 로봇 관절  $\theta_i$  값과 위치를 구하기 위해서 다음 식을 사용한다.

$$\theta_i = \text{Atan2}(C_{2y} - C_{1y}, C_{2x} - C_{1x}) \quad (1)$$

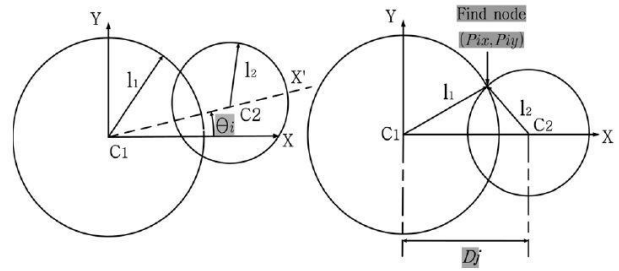
$i = 3,4,5,6,7,8,9,10,11,12$

식 (1)에서  $C_{1x}$ ,  $C_{1y}$ ,  $C_{2x}$ ,  $C_{2y}$ 는 표 2의 2번째, 3번째 열(column)에 해당한다. 그림 4의 (a)에서  $\theta_i$ 를 보여준다

$$\theta_i = \text{Atan2}(y, x) = \theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), (-\pi < \theta_i \leq \pi) \quad (2)$$

원의 반지름이 그림 2에서 막대(bar)의 길이( $l_1, \dots, l_{12}$ )로써, 게 로봇 다리 연결 구조를 이루고 있는 막대들이다. 그림 4의 (b)는 두 원의 중심점간 거리는  $D_j$ 이며, 거리를 구하기 위해서 두 원의 접선의 방정식을 이용한 것이 식 (3)이다. 여기서  $j$  값은 그림 4의 (b)에서 두 원의 중심점간 거리( $D_{1,2}$ )를 의미하며, 연고자 하는 변수  $i$  값은 앞에서 정의한 절점들이다.

$$D_j = \sqrt{(C_{2x} - C_{1x})^2 + (C_{2y} - C_{1y})^2}, j = 1,2, i \quad (3)$$



(a) 기준 X좌표와  $\theta$  값에 따른  $X'$   
(b) 두 원의 반지름과 찾을 관절점  
(a) X-coordinate of the two circles and X with  $\theta$   
(b) Radiuses of two horizontal circles  
그림 5. 두 원에 따른 C, X-Y 좌표계  
Fig. 5. C, X-Y coordinate system of two circles

식 (2)와 (3)은 로봇 다리의 절점을 구하기 위한, 두 개의 변수를 계산하는 식이다. 여기서,  $P_{ix}$ 와  $P_{iy}$ 는  $P_i(P_{ix}, P_{iy})$ 의 X-Y축 좌표이다.  $i$ 는 앞서 식 (1)에서 정의 하였다.

식 (4)는 두 원에서 절점을 찾기 위한 삼각함수 식이다. 수평한 두 원에서  $P_{iy}$ 는  $\pm$ 해(solution)가 2개이다.

$$P_{ix} = \frac{D_j^2 + l_1^2 - l_2^2}{2D_j}, \quad P_{iy} = \pm \sqrt{l_1^2 - (P_{ix})^2} \quad (4)$$

식 (4)에서는 그림 4(b)의 수평한 두 원에서 절점의 좌표를 찾았다. 이에 그림 4의 (a)에서 변화된  $\theta_i$  값에 따른 현재 위치의 각 절점 좌표값( $X_n, Y_n$ )을 구하기 위해서, 식(5)에서는 지금까지 구한 변수들을 이용하여  $C_n$ 에 대한 좌표( $X_n, Y_n$ )을 구한다.  $n$ 은 1-2,1-4,2-3  $i$ 에 대한 좌표점이다.

$$X_n = \cos\theta \times P_{ix} - \sin\theta \times P_{iy} + C_{1x} \quad (5)$$

$$Y_n = \sin\theta \times P_{ix} + \cos\theta \times P_{iy} + C_{1y}$$

$$n = 1,2,1,4,2,3, i$$

해석 순서에 따른 계산을 하기 위해서 각 절점의 좌표 식을 (6)으로 표현한다. 여기서,  $k$ 는 조건 값에 의한 행렬식의 반복이며, 각각의 찾을 절점을 식에 대입해서 푼다.

$$C_n = (X_n, Y_n)C_{1-2} = (X_{1-2}, Y_{1-2}) \quad (6)$$

$$C_{1-4} = (X_{1-4}, Y_{1-2})$$

$$C_{2-3} = (X_{2-3}, Y_{2-3})$$

$$C_{3-4} = (X_{3-4}, Y_{3-4})$$

$$C_{3+2k,4+2k} = (X_{3+4k,4+2k}, Y_{3+2k,4+2k}) \quad k = 1,2,3,4$$

.

.

.

$$C_{11-12} = (X_{11-12}, Y_{11-12})$$



다음은 게 로봇 다리 끝단을 찾기 위한 순차적인 과정의 예로 설명한다. 앞의 그림 2와 같이 정지된 상태에 초기 설정된 값을 기준으로 한다. C1\_2 절점은 X, Y직교 좌표면 중심점으로 베벨기어가 달린 모터 회전축 중심점이 된다. 여기서 C1\_2=(0, 0)이며, C1\_4는 고정된 링크(fixed link)의 절점이다. 그림 2에서 II막대와 같이 링크된 하나의 막대로 표현되어있다. II은 게 로봇의 몸체를 지지해주는 구조물로서 고정되어 있다. 기구적인 해석에서는 절점 X<sub>1,4</sub>와 Y<sub>1,4</sub>는 게 로봇 다리 구조에서 고정된 관절점으로, 좌표 면에서 2사분면에 위치해 있기에 식 (7)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} C_{1-4} &= (X_{1-4}, Y_{1-4}) \\ X_{1-4} &= -l_1 \sin\theta \\ Y_{1-4} &= l_1 \cos\theta \end{aligned} \quad (7)$$

C<sub>2,3</sub>은 게 로봇 다리 구조에 동력을 전달하는 절점이다. 로봇 구조에서 모터 혼(crank: l<sub>2</sub>)과 막대 구조들(l<sub>3</sub>, l<sub>5</sub>)이 연결된 곳이다. 아래의 식 (8)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} C_{2-3} &= (X_{2-3}, Y_{2-3}) \\ X_{2-3} &= l_2 \cos\theta \\ Y_{2-3} &= l_2 \sin\theta \end{aligned} \quad (8)$$

게 로봇 다리 끝단(foot-point)을 찾기 위해 아래와 같이 5개 절점위치를 구한다. 기본 적으로 구해야 할 절점의 위치는 위 식들로부터 구했다. 먼저 해석 순서로부터, C<sub>3,4</sub>를 구하기 위해서는 C<sub>1,4</sub>와 C<sub>2,3</sub> 두 원 교점을 찾았다. 그림 4의 (a)처럼 절점을 찾기 위한 기준 좌표 면에 X축과 두 원 간 위치한 X'축  $\theta_{3,4}$ 를 구한다. 앞에서의 식으로부터 대입하면 (9) 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \theta_{3-4} &= \text{Atan2}(C_{2-3y} - C_{1-4y}, C_{2-3x} - C_{1-4x}) \\ d_{3-4} &= \sqrt{(C_{2-3x} - C_{1-4x})^2 + (C_{2-3y} - C_{1-4y})^2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_{3-4x} &= \frac{d_{3-4}^2 + l_4^2 - l_3^2}{2d_{3-4}}, \quad P_{3-4y} = \pm \sqrt{l_4^2 - (P_{3-4x})^2} \\ X_{3-4} &= \cos\theta \times P_{3-4x} - \sin\theta \times P_{3-4y} + C_{1-4x} \\ Y_{3-4} &= \sin\theta \times P_{3-4x} + \cos\theta \times P_{3-4y} + C_{1-4y} \end{aligned}$$

해석 순서에 따른 2, 3, 4번 관절점도 표 1을 참고한다.

(6) 식의 k 조건 값에 의한 행렬식 대입으로 절점의 좌표를 찾는다. 식 (10)은 마지막 5번째 절점(foot-point C<sub>11,12</sub>)을 찾기 위한 식이다.

$$\theta_{11-12} = \text{Atan2}(C_{9-10y} - C_{5-6y}, C_{9-10x} - C_{5-6x}) \quad (10)$$

$$d_{11-12} = \sqrt{(C_{9-10x} - C_{5-6x})^2 + (C_{9-10y} - C_{5-6y})^2}$$

$$\begin{aligned} P_{11-12x} &= \frac{d_{11-12}^2 + l_{12}^2 - l_{11}^2}{2d_{11-12}} \\ P_{11-12y} &= \pm \sqrt{l_{12}^2 - (P_{11-12x})^2} \\ X_{11-12} &= \cos\theta \times P_{11-12x} - \sin\theta \times P_{11-12y} + C_{5-6x} \\ Y_{11-12} &= \sin\theta \times P_{11-12x} + \cos\theta \times P_{11-12y} + C_{5-6y} \end{aligned}$$

다리 끝단 좌표 점을 찾기 위해서, 그에 따른 하나의 예로서 C<sub>2,3</sub>의 회전축이 0° 일 때 각 절점  $\theta_i$ 는 표 3과 같다. 회전축이 0° 기준일 때 첫 시작점의 위치가 표 4와 같다. 표4의 C<sub>1,4</sub>는 고정된 지점으로 실제 게 로봇 다리의 링크길이와 동일하다.

표 1. 절점 C<sub>2,3</sub>의 회전하는 링크 축이 0° 기준일 때:  $\theta_i$  값

Table 1.  $\theta$  for each node when the link with C<sub>2,3</sub> is located at 0°

node	C <sub>3,4</sub>	C <sub>5,6</sub>	C <sub>7,8</sub>	C <sub>9,10</sub>	C <sub>11,12</sub>
$\theta_i$ [deg]	22.7°	22.7°	98.5°	-1.08°	182.7°

표 2. 절점 C<sub>2,3</sub>의 회전하는 링크축이 0° 기준일 때: X, Y

Table 2. Location of each node when the link with C<sub>2,3</sub> is located 0°

Node	C <sub>1,2</sub>	C <sub>1,4</sub>	C <sub>2,3</sub>	C <sub>3,4</sub>	C <sub>5,6</sub>	C <sub>7,8</sub>	C <sub>9,10</sub>	C <sub>11,12</sub>
(X,Y)	0	-90	28	-71	-71	-170	-151	-109
[mm]	0	0	0	80	80	21	-58	-219

그림 5는 두 원 접선의 방정식을 이용하여 각 절점을 구하기 위한 예를 보여준다. 또한,  $\theta_r$ 값이 0° ~ 360° 일 때 로봇 다리 끝단의 위치를 1° 도 단위로 증가 했을 때 발걸음의 궤적(trajjectory)으로 나타내었다.

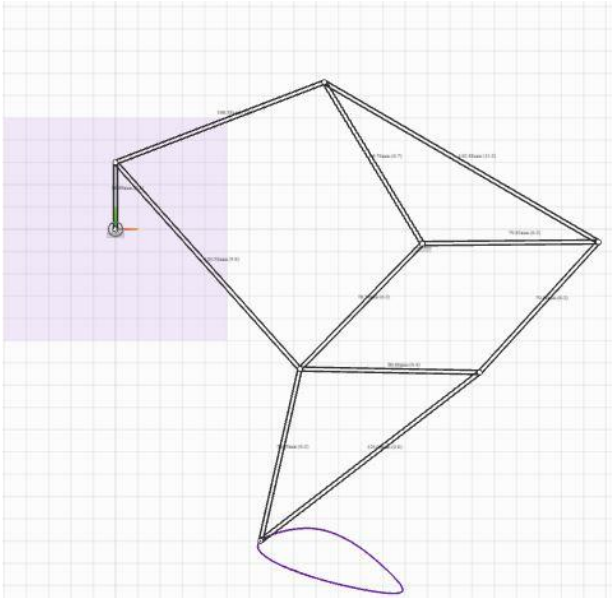


그림 6.  $\theta_r$  값이  $0^\circ \sim 360^\circ$  일 때 다리 끝단 위치  
 Fig. 6. Location of each node when  $\theta_r$  rotates from  $0^\circ$  to  $360^\circ$

#### 4. 결 론

본 논문에서는 4절 링크 이론과 양센 메커니즘을 기반으로 게 로봇 다리의 구조와 움직임에 대하여 기구학적인 분석 및 최적화를 진행 하였다. 실제 보행 로봇의 다리 길이에 대한 운동학적인 분석으로 모터가 회전 할 때 회전각만큼의 다리 위치와 로봇이 움직였을 때 행동할 수 있는 반경이 되는 절점들의 관절각을 알 수 있었다. 이러한 기구학적인 분석을 통해 최종적으로는 게 로봇의 다리 길이에 맞는 보행 궤적을 구할수 있고, 4족으로 이루어진 다리의 걸음걸이를 기반으로 한 로봇 제작에 이론적인 도움을 주었다. 또한 소재를 플라스틱으로 하고 고공을 3D 프린터로 진행하여 경량화 및 구조적 안정성을 향상하고 이동속도를 증가 시켰다. 제안된 다관절 보행 로봇은 지면, 습지, 모래와 같은 혼재 영역에서 모두 이동할 수 있으므로 많은 활용성이 예상된다. 제안된 다관절 보행 로봇은 자유자재로 해안가, 습지에서 동작하며 외부에 비전 정보를 제공하고, 외부에서 제어 가능하므로 제안된 로봇이 더 고성능화 된다면 탐색, 첩보, 감시, 특수재료 살포 등 다양한 용도로 다양한 장소에서 사용될 수 있다. 이를 위해서는 제안된 연구에서 보여주는 것처럼 게 로봇의 동작 방법과 보행

폭에 대한 해석이 필수적이다. 추후의 연구는 플라스틱 구조체의 위상 최적화를 통해 경량화를 진행하는 것이다..

#### 감사의글

제명	사사 문구	
	국문	영문
산설계교육·연구·산업체용최적설계프레임워크개발및활용	<p>본 논문은 2015 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014M3C1A6038793)</p>	<p>This research was supported by the EDISON Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT &amp; Future Planning(No. 2014M3C1A6038793)</p>

#### 참 고 문 헌

- [1] 박성호, 보행 로봇 공학의 이해, 평민사, 2008.
- [2] C.C Brown, J.P. Huisson, "Design and Simulation of a Legged Robot for Operation on Vertical Surfaces," 4th International Conference on Automation,

Robotics and Computer Vision, pp.1466-1470, 1996.

[3] S. Hirose, K. Yoneda, and H. Tsukagoshi, "TITAN

VII: Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope," IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, pp. 494-500, 1997.

[4] J. Zhang, J.Wang, "Gait Planning and Control of a Legged Robot for Trussed Wall-Climbing," 4th International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision, pp. 1490-1494, 1996.

[5] M. G. Bkeer, Introduction to Terrain Vehicle Systems, University of Michigan Press, 1969.

[6] U. Saranli, M. Buehler, and D.E. Koditschek, "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot," International Journal of Robotics Research, vol. 20, no. 7, pp. 616-631, 2001.

[7] J.E. Clark, and M. R. Cutkosky, "The Effect of Leg Specialization in a Biomimetic Hexapedal Running Robot," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 128, pp. 26-35, 2006.

[8] F. Delcomyn, and M. E. Nelson, "Architectures for a biomimetic hexapod robot," Robotics and Autonomous Systems, vol. 30, no. 1, pp. 5-15, 2000.

[9] M. Tarokh, and M. Lee, "Kinematics Modeling of Multi-legged Robots walking on Rough Terrain," Future Generation Communication and Networking Symposia, vol. 4, pp. 12-16, 2008.

[10] Y. Go, Yin Xiaolei, and A. Bowling, "Navigability of multi-legged robots," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 11, no. 1, pp. 1-8, 2006.

[11] 김선욱, 김연균, 정하민, 이세한, 황승국, 김동헌,

"안센키네틱스를 기반으로 한 보행 로봇 개발," 한국지능시스템학회 논문지, 제 20 권, 4 호, pp. 509-515, 2010.

[12] 김선욱, 김동헌

"4 절 링크 이론과 안센 메커니즘을 기반으로 한 보행 로봇의 운동학 해석,"

한국지능시스템학회 논문지, 제 21 권, 2 호, pp.159-164, 2011.

[12] T. Cristina, O. Erika, C. Marco, and D. R. Alessandro, "Analysis and Design of a 1-DOF Leg for Walking Machines," Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, pp. 183-188, 2006.

[13] <http://www.strandbeest.com/>

[14] S. Molian, Mechanism Design: An Introductory Text, Cambridge University Prss, 1982.