

## 4절 링크 이론과 얀센 메커니즘을 기반으로 한 보행 로봇의 운동학 해석

### Kinematic Analysis of a Legged Walking Robot Based on Four-bar Linkage and Jansen Mechanism

김선욱\* · 김동현\*\*\*

Sun-Wook Kim\* and Dong Hun Kim\*\*\*

\* 경남대학교 대학원 첨단공학과

\*\* 경남대학교 전기공학과

#### 요 약

본 연구에서는 4절 링크 이론(four-bar linkage mechanism)과 얀센 메커니즘(Jansen mechanism)을 기반으로 다관절 보행 로봇(multi-legged walking robot)인 게(crab) 로봇을 제작하고, 게 로봇의 움직임에 대하여 기구학적인 해석을 제시한다. 제작된 게 로봇은 영상 획득을 위하여 카메라를 장착하였고, 장애물 회피를 위하여 3조의 초음파 센서를 가지고 있다. 또한 RF통신으로 외부에 영상 정보를 전달하며, Blue-tooth 통신 모듈을 장착하여 외부로부터 부여된 임무를 수행할 수 있다. 게 로봇의 설계와 제작을 하기 위해서 필요로 하는, 로봇 다리의 움직임을 알기 위해서는 관절 변수와 다리 끝단의 위치 및 자세와의 관계를 얻어야 한다. 따라서, 제안된 기구학적 해석은 로봇의 설계와 제작에 있어서 많은 도움을 주며 중요한 과정이다.

**키워드** : 다관절 보행 로봇, 생물체 모방 로봇, 메커니즘 분석, 테오얀센

#### Abstract

In this study, a crab robot is implemented in H/W based on four-bar linkage mechanism and Jansen mechanism, and its kinematics is analysed. A vision camera is attached to the mechanism, which makes the proposed robot a kind of biologically inspired robot for image acquisition. Three ultrasonic sensors are adopted for obstacle avoidance. In addition, the biologically inspired robot can achieve the mission appointed by a programmer outside, based on RF and Blue-tooth communication module. For the design and implementation of a crab robot, it is need to get joint variable, a foot point, and their relation. Thus, the proposed kinematic analysis is very important process for the design and implementation of legged robots.

**Key Words** : Multi-legged walking robot, Biologically inspired robot, Mechanism analysis, Theo Jansen

## 1. 서 론

보행 로봇에 대한 연구는 기존 이동 로봇의 주요 이동 방식으로 사용된 바퀴나 무한궤도(caterpillar)가 아닌 다리 기구를 사용함으로써 생물체에 근접한 기계를 만들고자 하는 지적 호기심으로부터 시작 되었다[1]. 다리 기구를 이용한 보행 방식이 비평탄 지형(irregular terrain)이나 무른 지형(soft terrain), 장애물(obstacle)이 있는 지형에서는 바퀴나 무한궤도를 이용한 이동 방식에 비해 유용하기 때문에 기초 연구 수준을 벗어나 실제 적용을 목표로 한 보행 로봇의 개발이 수행 되었다[2-4]. 이와 같이, 불규칙한 지표면(irregular surface)은 기존의 구동 시스템으로는 접근할 수

없지만 척추동물(vertebrate)과 같은 생물체들은 이러한 환경에서 자유롭게 삶을 영위 하고 있다. 불규칙한 지반(irregular ground) 위에서 척추동물들은 선천적으로 타고 난 환경 적응 능력으로 민첩하게 움직일 수 있으므로 빠른 속도를 가지며, 운동 중 각각의 다리가 최소 시간에 선택된 최적의 점에 착지하므로 우수한 에너지 효율을 나타낸다[5]. 지금까지 육지에서 걷는 다관절 형태의 로봇(multi-legged robots) 다리에 대하여 많은 연구가 있어 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 수를 줄여도 전, 후, 좌, 우 움직임이 쉽게 가능하여야 한다. 본 연구에서의 육지는 습지 혹은 모랫가와 같은 환경을 의미한다.

첫 번째 연구에서 위와 같은 모든 조건들을 만족시키는 몸체 구동부를 만들었다. 생물체의 생물학적 이동방법을 모방하여 그에 적합한 수의 관절을 결정하고, 또한 대상 로봇

접수일자 : 2010년 10월 16일

완료일자 : 2011년 4월 10일

본 연구는 2010학년도 경남대학교 학술연구 장려금 지원으로 이루어졌음.

+ 교신저자

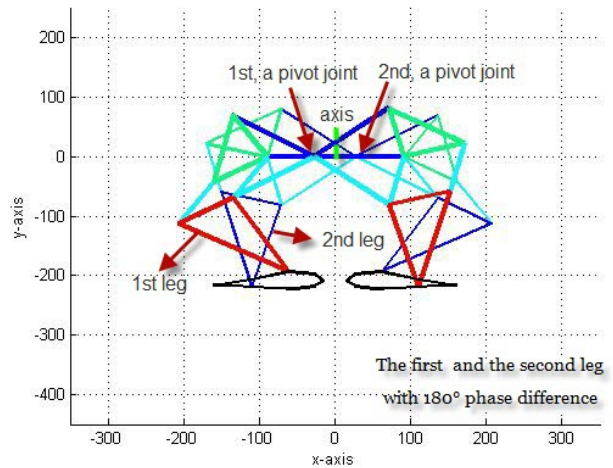
의 효율적인 보행을 위하여 다리 길이에 대한 해석을 한다. 결정되는 다리 길이의 상대 비율에 따라 로봇의 다리 길이를 결정한다. 그리고 생물체모방 로봇 몸체를 땅에서 지탱하고, 자율적으로 움직일 수 있도록 하는 것이다. 두 번째 단계로는 동물들이 가지는 감각기관인 눈과 귀를 센서로 모방하여 행동을 위한 수단으로 사용하는 것이다. 다음과 같이, 장착된 센서들을 이용하여 주변 환경을 파악하고 센서 정보의 융합을 통하여 적합한 행동을 선택하고 이를 실제 행동으로 옮기는 것이다. 두 번째 연구 내용은 대상 로봇인 생물체 로봇을 RF(Radio Frequency) 혹은 Blue-tooth 통신을 이용한 리모트 컨트롤(remote-control) 제어 형태의 비자율형(non-autonomous) 로봇으로 구현 하였다[11]. 전체적인 로봇의 동작은 외부에서, 생물체 로봇에 장착된 카메라로 외부 환경을 보면서 생물체 로봇을 움직이게 하는 구조이다.

다리 구조를 가진 보행 로봇의 연구에서 최근에는 다관절 형태의 2족 로봇(biped-robot)과 기타 여러 형태의 로봇에 대한 많은 연구가 있어 왔다. 다관절 2족 보행 머신(machine)에 대한 설계, 그리고 기구학적인 분석을 연구한 내용을 보면 이전 연구된 내용과 현재에 새로운 형태의 다리에 대한 기구학 분석과 보행 방법을 통해 보행 머신을 두 가지의 프로토타입(prototype)으로 만들었다. 또한, 일반적인 보행법과 타조의 걸음걸이를 모방한 보행법을 분석한 예를 볼 수 있다[12]. 이처럼 다리 기구의 운동학적인 분석을 바탕으로 보행 머신을 만들었다. 하지만, 테오 얀센(Theo Jansen) 기반의 보행 로봇에 대해서 제안된 방법으로 만들어진 예는 없었다. 지금까지 시각적인 형태와 예술성을 바탕으로 한 모델로만 연구되어 왔다. 센서와 카메라 등을 탑재하여 오랜 시간 동안 잘 걸을 수 있는 보행 로봇 형태의 설계와 디자인은 없었다. 본 논문에서는 테오 얀센 기반의 보행 로봇을 만들기 위해서 기본 배경이 되는 게(crab) 로봇의 다리 길이와 구조, 그리고 움직임에 대한 설명, 마지막으로 보행 메커니즘을 분석하고자 한다.

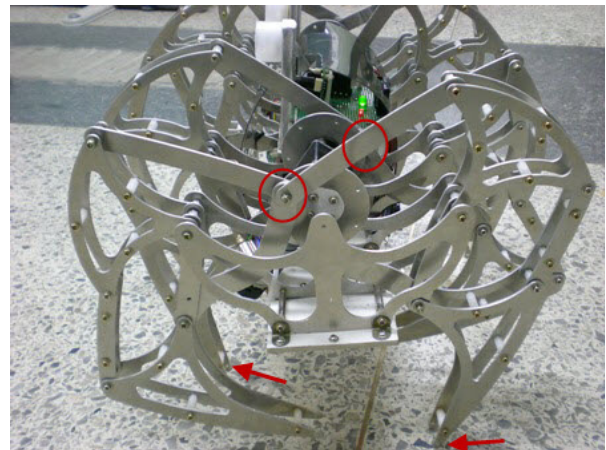
## 2. 문제 설정: 보행 로봇의 다리 움직임

게(crab) 로봇의 다리 움직임은 다음과 같다. 게 로봇은 베벨기어(bevel gear)가 달린 양축DC모터(dual-axis DC motor)를 사용한다. 양쪽 다리는 하나의 모터로 회전한다. 하나의 양축 DC모터 구조는 좌·우 회전축 위상이 180° 차이가 있는 다리들의 결합으로 되어 있다. 따라서, 양축 DC모터 두 개를 사용하면 4조(set)로 이루어진 다리를 동시에 움직일 수 있다. 구조적으로는 모터의 양축 중에 한 축의 다리 끝단(foot-point)이 지면에 닿아 있고, 또 다른 한 축의 다리는 지면에서 떠 있다. 이러한 형태의 기본적인 다리 구조로 모터에 각 다리가 연결되어 4조를 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 중심축(axis)에 연결된 절점(node)들과 두 개의 회전관절(pivot joint)에 의한 구조로 인해서 두 다리의 위상차(phase difference)를 확인 할 수 있다. 그림 1의 (b)에서 실제 로봇의 다리가 움직였을 때 각 다리의 위치를 보여 주고 있다.



(a) 시뮬레이션에서 두 다리의 위상  
(a) The simulation of two 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 양쪽 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.

일반적인 2족 로봇(biped-robot) 보행의 경우 좌·우로 흔들린 부자연스러운 몸체의 움직임을 보여 준다. 이와 다르게, 게 로봇의 다리는 테오 얀센 메커니즘(Theo Jansen mechanism)의 다리 구조를 모방 하였고, 자연스러운 보행으로 몸체의 수평 상태를 유지한다[13]. 따라서, 바퀴형 이동로봇처럼 좌우 불균형 없이 자연스럽게 이동 할 수 있다. 또한, 게 로봇의 다리 구조는 보행 로봇이 걸을 때에 제한된 행동으로 인한 문제점들 중에 카메라를 장착 했을 때 화면으로부터 받는 영상 정보를 흔들림 없이 안정적으로 받아 볼 수 있다.

이동할 때에는 양축 DC모터가 가진 장점으로 두 개의

모터에 의한 네 가지의 유형으로 정(clockwise)·정, 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.

### 3. 로봇 다리 구조의 기구학적인 분석

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  $l_2$  끝단의  $C_{2,3}$ 절점(node)이  $\theta_r$ 만큼 좌측으로 이동하여 멈춰진 상태이다. 그림에서  $C_{2,3}$ 절점이 Y축과 동측(same axle) 일 때  $\theta_r$ 값은  $90^\circ$ 이다. 여기서,  $\theta_r$ 값은 모터의 회전각이다.

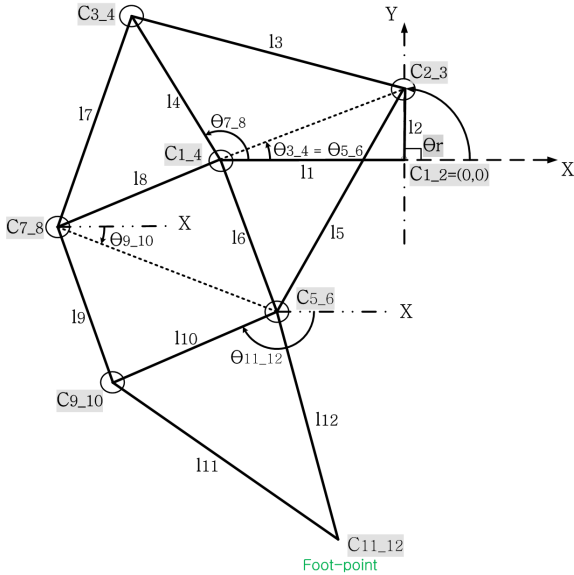


그림 2. 게 로봇 다리  $l_2$  링크 구조  
Fig. 2. Twelve-bar linkage structure of a crab robot

표 1. 실제 게 로봇의 다리 길이

Table 1. Link lengths of robot

link number	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$
	$l_7$	$l_8$	$l_9$	$l_{10}$	$l_{11}$	$l_{12}$
link length[mm]	90	28	128	83	128	83
	115	83	83	83	166	144

기구학적인 분석을 하기 위한 해석순서는 다음과 같다.  $C_{1,2}$ 와  $C_{1,4}$ ,  $C_{2,3}$ 은 절점(node)이 위치한 좌표 면에 따라 구한다.

- ①  $C_{3,4}$ 는 로봇의 절점  $C_{1,4}$ 와  $C_{2,3}$ 으로부터 구한다.
- ②  $C_{7,8}$ 은 로봇의 절점  $C_{1,4}$ 와  $C_{3,4}$ 로부터 구한다.
- ③  $C_{5,6}$ 은 로봇의 절점  $C_{1,4}$ 와  $C_{2,3}$ 으로부터 구한다.
- ④  $C_{9,10}$ 은 로봇의 절점  $C_{7,8}$ 과  $C_{5,6}$ 으로부터 구한다.
- ⑤  $C_{11,12}$ 는 로봇의 절점  $C_{5,6}$ 과  $C_{9,10}$ 으로부터 구한다.

게 로봇 다리 구조에서 각 마디 점에 해당하는 관절(joint)을 절점(node)이라 한다. 해석 순서에서 음영으로 표시된 절점은 두 원의 접선방정식에서 사용될 첫 번째 기준이 되는 원이다. 최종적으로 우리가 원하고자 하는 것은 게 로봇의 다리 끝단(foot-point)이 된다. 로봇의 다리 끝단 절점은  $C_{11,12}$ 라 한다.

제한한 다관절 보행 로봇인 게 로봇의 다리 구조는 안센 메커니즘(Jansen mechanism)과 4절 링크 이론(four-bar linkage mechanism)을 배경으로 한다[14]. 여기서, 링크(link)의 역할은 길이가 서로 다른 링크를 핀으로 연결한 것으로 주동절(회전 하는  $l_2$ 의  $C_{2,3}$  절점)의 운동에 따라 종동절(왕복 운동  $l_3$ 의  $C_{3,4}$  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. 제한한 로봇에서는 진한 실선으로 그려진  $l_1$ 막대(bar)의 양 절점  $C_{1,4}$ 와  $C_{1,2}$ 는 너트와 볼트(nuts and bolts)로 고정되어 있다. 이와 같이 그림 2에서 4절 링크 장치에  $l_3$ ,  $l_5$ 는 종동절 역할을 할 수 있도록 연결 되어 진다.

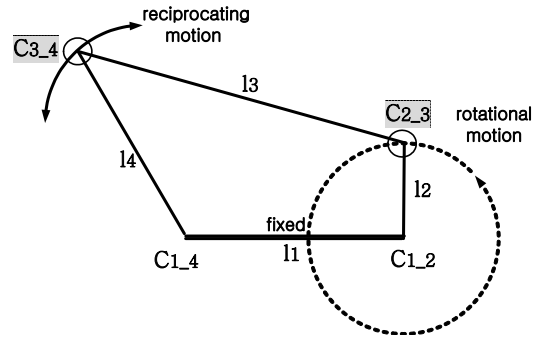


그림 3. 4절 링크  
Fig. 3. Four-bar linkage

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  $i$ 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.

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

$$i = 3_4, 5_6, 7_8, 9_{10}, 11_{12} \quad (1)$$

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.

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

표 2는 연결된 로봇 다리의 각 절점들을 두 원의 교점으로부터 구하기 위해,  $C_1$ (the first circle)첫 번째 원과  $C_2$ (the second circle)두 번째 원 중심점(x, y)의 원점으로

부터 반지름을 표로 나타냈다.

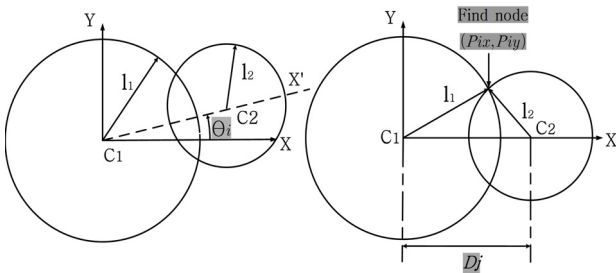
표 2. 두 원들의 중심점(로봇 관절점)과 반지름(로봇 링크 길이)

Table 2. Pivot point of two circles and radius

Find nodes	$C_1$ ( $C_{1x}, C_{1y}$ )	$C_2$ ( $C_{2x}, C_{2y}$ )	l1 radius of circle	l2 radius of circle
① $C_{3,4}$	$C_{1,4}$	$C_{2,3}$	$l_4$	$l_3$
② $C_{7,8}$	$C_{1,4}$	$C_{3,4}$	$l_8$	$l_7$
③ $C_{5,6}$	$C_{1,4}$	$C_{2,3}$	$l_6$	$l_5$
④ $C_{9,10}$	$C_{7,8}$	$C_{5,6}$	$l_9$	$l_{10}$
⑤ $C_{11,12}$	$C_{5,6}$	$C_{9,10}$	$l_{12}$	$l_{11}$

위의 표에서는 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. 식 (3)에서  $C_{1x}, C_{1y}, C_{2x}, C_{2y}$ 는 표 2의 2번째, 3번째 열(column)에 해당한다.

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



(a) 기준 X좌표와  $\theta_i$  값에 따른 X'  
(b) 두 원의 반지름과 찾을 관절점

(a) X-coordinate of the two circles and X' with  $\theta_i$   
(b) Radiuses of two horizontal circles

그림 4. 두 원에 따른 C, X-Y 좌표계

Fig. 4. 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)에서  $l_1, l_2$ 는 표 2의 4번째, 5번째 열(column)에 해당한다. 식 (4)는 두 원에서 절점을 찾기 위한 삼각함수 공식이다. 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 좌표점

이다.

$$\begin{aligned} X_n &= \cos\theta \times P_{ix} - \sin\theta \times P_{iy} + C_{1x} \\ Y_n &= \sin\theta \times P_{ix} + \cos\theta \times P_{iy} + C_{1y} \end{aligned} \quad (5)$$

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

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

$$\begin{aligned} C_n &= (X_n, Y_n) \quad C_{1,2} = (X_{1,2}, Y_{1,2}) \\ C_{1,4} &= (X_{1,4}, Y_{1,4}) \\ C_{2,3} &= (X_{2,3}, Y_{2,3}) \\ C_{3,4} &= (X_{3,4}, Y_{3,4}) \end{aligned} \quad (6)$$

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

.

.

.

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

다음은 게 로봇 다리 끝단을 찾기 위한 순차적인 과정의 예로 설명한다. 앞의 그림 2와 같이 정지된 상태에 초기 설정된 값을 기준으로 한다.  $C_{1,2}$  절점은 X, Y직교 좌표면 중심점으로 베벨기어가 달린 모터 회전축 중심점이 된다. 여기서  $C_{1,2} = (0, 0)$ 이며,  $C_{1,4}$ 는 고정된 링크(fixed link)의 절점이다. 그림 2에서  $l_1$ 막대와 같이 링크된 하나의 막대로 표현되어있다.  $l_1$ 은 게 로봇의 몸체를 지지해주는 구조물로서 고정되어 있다. 기구적인 해석에서는 절점  $X_{1,4}$ 와  $Y_{1,4}$ 는 게 로봇 다리 구조에서 고정된 관절점으로, 좌표 면에서 2사분면에 위치해 있기에 식 (7)로 나타낸다.

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

$C_{2,3}$ 은 게 로봇 다리 구조에 동력을 전달하는 절점이다. 로봇 구조에서 모터 혼(crank:  $l_2$ )과 막대 구조들( $l_3, l_5$ )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. 기본적으로 구해야 할 절점의 위치는 위 식들로부터 구했다. 먼저 해석 순서로부터,  $C_{3,4}$ 를 구하기 위해서는  $C_{1,4}$ 와  $C_{2,3}$  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 식으로 부터 대입하면 (9) 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \theta_{3,4} &= \text{Atan2}(C_{2,3y} - C_{1,4y}, C_{2,3x} - C_{1,4x}) \\ d_{3,4} &= \sqrt{(C_{2,3x} - C_{1,4x})^2 + (C_{2,3y} - C_{1,4y})^2} \\ P_{3,4x} &= \frac{d_{3,4}^2 + l_4^2 - l_3^2}{2d_{3,4}}, \quad P_{3,4y} = \pm \sqrt{l_4^2 - (P_{3,4x})^2} \\ X_{3,4} &= \cos\theta \times P_{3,4x} - \sin\theta \times P_{3,4y} + C_{1,4x} \\ Y_{3,4} &= \sin\theta \times P_{3,4x} + \cos\theta \times P_{3,4y} + C_{1,4y} \end{aligned} \quad (9)$$



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.

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

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

$$P_{11,12x} = \frac{d_{11,12}^2 + l_{12}^2 - l_{11}^2}{2d_{11,12}}, P_{11,12y} = \pm \sqrt{l_{12}^2 - (P_{11,12x})^2}$$

$$X_{11,12} = \cos\theta \times P_{11,12x} - \sin\theta \times P_{11,12y} + C_{5,6x}$$

$$Y_{11,12} = \sin\theta \times P_{11,12x} + \cos\theta \times P_{11,12y} + C_{5,6y} \quad (10)$$

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. 표 4의 C<sub>1,4</sub>는 고정된 지점으로 실제 게 로봇 다리의 링크길이와 동일하다.

표 3. 절점 C<sub>2,3</sub>의 회전하는 링크축이 0°기준일 때:  $\theta_i$  값  
Table 3.  $\theta_i$  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]	0°	0°	76.93°	-46.15°	164.63°

표 4. 절점 C<sub>2,3</sub>의 회전하는 링크축이 0°기준일 때: X, Y  
Table 4. 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.

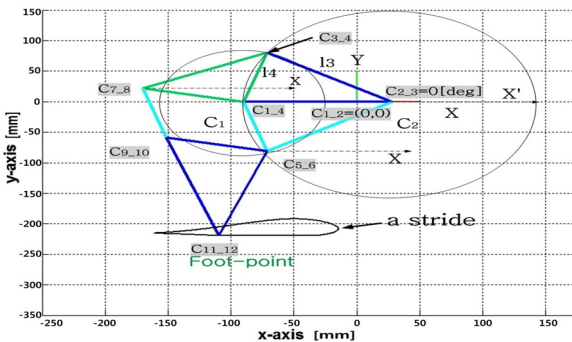


그림 5.  $\theta_r$ 값이 0°~360° 일 때 다리 끝단 위치  
Fig. 5. Location of each node when  $\theta_r$  rotates from 0° to 360°

그림 6은 C<sub>11,12</sub>다리 끝단(foot-point)이  $\theta_r$ 값의 변화에 따른 X<sub>11,12</sub>좌표 위치가 360°돌아서 다시 제자리에 왔을 때

보폭 값을 보여준다. 그림 7은  $\theta_r$ 값의 변화에 따른 Y<sub>11,12</sub>좌표 위치 값이 360°돌아서 다시 제자리에 왔을 때 보행 높이이다.

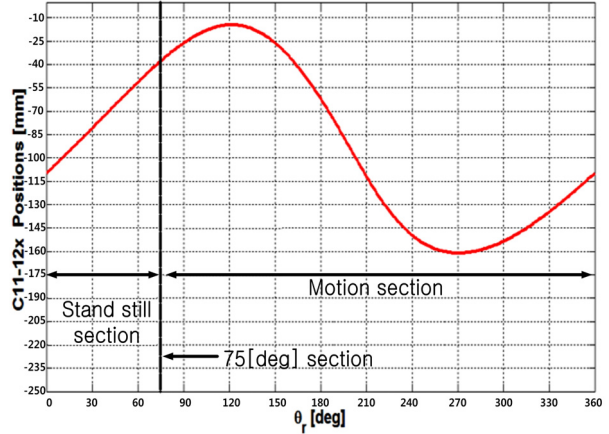


그림 6. C<sub>11,12</sub>(foot-point)다리 끝단 X<sub>11,12</sub> 값의 변화  
Fig. 6. X<sub>11,12</sub> variance of C<sub>11,12</sub> foot-point

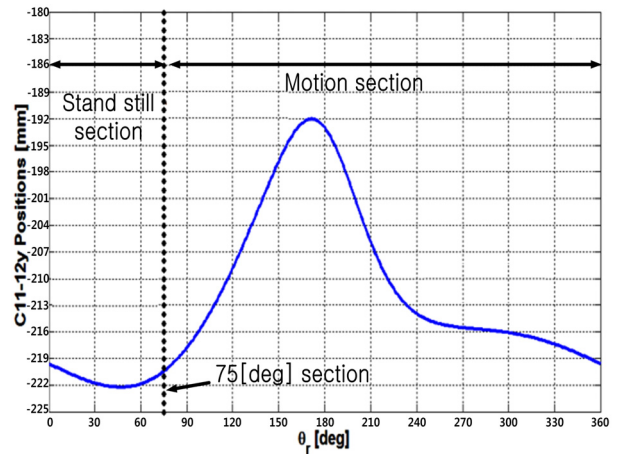


그림 7. C<sub>11,12</sub>(foot-point)다리 끝단 Y<sub>11,12</sub> 값의 변화  
Fig. 7. Y<sub>11,12</sub> variance of C<sub>11,12</sub> foot-point

## 4. 결론

본 논문에서는 4절 링크 이론과 안센 메커니즘을 기반으로 게 로봇 다리의 구조와 움직임에 대하여 기구학적인 분석을 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 구할 수 있고, 4조로 이루어진 다리의 걸음걸이를 기반으로 한 로봇 제작에 이론적인 도움을 주었다. 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 제안된 게 로봇의 보행 폭 해석을 기반으로 최적의 게 로봇 다리 길이를 설계 하는 것이다.

### 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.

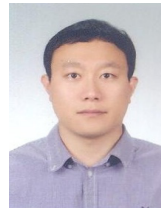
[11] 김선욱, 김연균, 정하민, 이세한, 황승국, 김동현, "안센키네틱스를 기반으로 한 보행 로봇 개발," *한국지능시스템학회 논문지*, 제20권, 4호, pp. 509-515, 2010.

[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.

### 저 자 소 개



**김선욱(Sun-Wook Kim)**

2010년 : 경남대학교 전기공학과(공학사)  
2010년~현재 : 동 대학원 첨단공학과 석사 과정

관심분야 : 지능제어, 생물체 모방로봇&지능로봇

**김동현(Dong Hun Kim)**

한국지능시스템학회 논문지, 제20권 4호 참조

Phone : 055-249-2629

E-mail : dhkim@kyungnam.ac.kr