

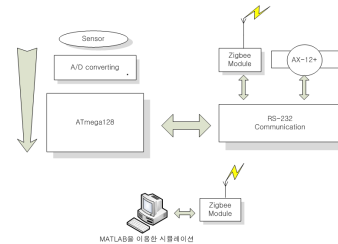
### 4족 보행 로봇의 모델링 및 시뮬레이션

정학상\*, 박상수\*, 최윤호\*, 박진배\*\*  
 경기대학교 전자공학과\*, 연세대학교 전기전자공학과\*\*

### Modeling and Simulation of Quadruped Walking Robot

Hak Sang Jung\*, Sang Su Park\*, Yoon Ho Choi\*, Jin Bae Park\*\*  
 Dept. of Electronic Eng. Kyonggi Univ.\*, Dept. of Electric and Electronic Eng. Yonsei Univ.\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 4족 보행 로봇의 제작을 위한 4족 보행 로봇 시뮬레이터를 구성한다. 우선 제작하고자 하는 4족 보행 로봇의 기구학 모델링은 순기구학 모델과 역기구학 모델을 유도하며 역기구학 모델은 기하학적 방법을 이용한다. 한편 구성된 시뮬레이터에서는 유도한 4족 보행 로봇의 모델을 이용한 보행 패턴 생성 등은 PC에서 연산하며 연산된 값은 4족 보행 로봇의 컨트롤러를 이용하여 각 모터에 전송 가능하며, 이때 PC와 제어기 사이의 통신은 지그비(Zigbee)를 이용한 무선 통신을 사용한다. 또한 모든 연산 과정 및 실제 시뮬레이터 구성은 MATLAB을 이용한다. 마지막으로, 기존 걸음새 패턴 생성 방법을 이용하여 구성된 4족 보행 로봇 시뮬레이터의 효율성을 검증하였다.



<그림 1> 전체 시스템 구성도

#### 1. 서 론

일반적으로 이동 로봇은 바퀴를 사용하는 휠(wheel) 기반 로봇과 다리를 사용하는 다족 로봇으로 크게 나눌 수 있다. 휠 기반 로봇의 경우 평지에서 이동 속도가 빠른 장점을 가지나 비평탄 지면이나 계단 및 장애물이 존재하는 경우 다족 로봇에 비해 이동 능력이 현저히 저하되는 단점을 가진다. 반면에 다족 로봇은 휠 기반 로봇에 비해 평지에서 이동 속도가 낮은 단점을 가지나 휠 기반 로봇에 비해 지형에 영향을 덜 받는다는 장점을 가진다. 현재 이와 같은 다족 로봇의 장점을 적극적으로 활용 가능한 다양한 형태의 다족 로봇에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 또한 다족 로봇의 경우, 인간이나 동물의 형태를 대상으로 2족, 4족, 6족 로봇 등에 관한 연구들이 현재 진행되고 있으며, 특히 보행의 안정성이 보장되는 4족 보행 로봇에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다. 한편, 4족 보행 로봇의 연구를 진행하기 위해서는 우선 4족 보행 로봇의 설계 후 충분한 모의 테스트 과정을 거친 후 제작해야 로봇의 신뢰도를 높일 수 있으며 제작 후 실제 적용 부분에서 발생할 수 있는 오류를 사전에 미리 알고 대처 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 4족 보행 로봇을 모델링한 후, 모델링한 결과를 이용 가능한 시뮬레이터를 구성한다. 이 때 시뮬레이터는 MATLAB 언어를 사용하여 구성하고 구성된 시뮬레이터는 실제의 4족 보행 로봇과의 통신도 가능하게 구성한다.

#### 2. 4족 보행 로봇의 시뮬레이터 구성

본 논문에서 시뮬레이션 대상의 4족 보행 로봇은 12 자유도(Degree of Freedom: DOF)를 가진다. 강아지나 고양이와 같은 4족의 형태를 가지며, 어깨 부분의 경우 강아지와 같이 2 자유도를 가지며 무릎은 1 자유도를 갖는다. 그리고 허벅지와 정강이 사이의 길이는 같게 하고 전후 및 좌우 보행이 가능하도록 설계한다. 한편 시뮬레이터 제작에 사용될 프로그램 언어는 Mathwork사의 MATLAB2008을 사용하며 시뮬레이션 과정에서는 각 링크(link)의 길이를 변수로 지정하여 실제 4족 로봇의 길이를 변경할 경우 수정이 가능하도록 한다. 한편 본 논문의 사용한 4족 로봇의 길이 제원은 <표 1>과 같다.

<표 1> 4족 로봇의 제원

	몸체	어깨	허벅지	정강이
길이(mm)	300	89	100	100

한편 실제 4족 로봇의 제어기는 PC의 시뮬레이터에서 연산된 값을 입력 받아 모터를 구동하게 하며 모터와 제어기 사이에는 TTL 통신을 이용하여 모터를 제어하게 된다. 또한 PC와 제어기 사이에는 지그비(Zigbee)를 이용한 무선 통신을 사용하며, 전체 시스템 구성은 <그림 1>과 같다.

#### 3. 4족 보행 로봇의 기구학적 모델링

본 장에서는 4족 보행 로봇 다리에 대한 기구적 해석 유도 과정에 대해 서술한다. 4족 보행 로봇이 동작하기 위해서는 다리의 동작을 수학적으로 계산하는 과정이 필요하며 또한 향후 걸음새 패턴 생성 및 4족 보행 로봇의 걸음새 안정화 방법을 연구하기 위해서도 반드시 필요한 과정이다.

##### 3.1 순기구학 모델<sup>[1]</sup>

4족 보행 로봇의 전체 기준 좌표계를 설정한 후 전체 기준 좌표계에 대한 회전 및 평행 이동을 이용하여 4족 보행 로봇의 기구학 해석 모델을 유도한다. 이 때 4족 보행 로봇은 기준 좌표계 공간상에 있다고 가정한다. 한편 4족 보행의 링크에 대해서는 평행 이동을 관절에 대해서는 회전 이동을 적용하여 4족 보행의 위치에 대한 좌표를 구함으로써 4족 보행 로봇의 기구학 모델을 유도한다. 본 논문에서 설계하고자 하는 4족 보행 로봇은 앞서 서술한 바와 같이 3 자유도를 가지고 있으며, 식 (1)~(3)과 같은 회전 및 평행 이동으로 이루어진다.

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & l_1 \times \cos \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & -l_1 \times \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & l_2 \times \cos \theta_2 \\ 0 & \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & l_2 \times \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & l_3 \times \cos \theta_3 \\ 0 & \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & l_3 \times \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $T_1$ 은 y축에 대한 회전 이동 및  $l_1$ 만큼 평행 이동을 나타내며,  $T_2, T_3$ 은 x축에 대한 회전 이동 및  $l_2, l_3$ 에 대한 평행 이동을 나타낸다. 한편, 각 링크에 대한 변환들이 곱해지면 각 링크에 최종 좌표 변환식은 식 (4)~(6)과 같이 주어진다.

$$X = l_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1 (l_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + l_3 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + l_2 \sin \theta_2) \quad (4)$$

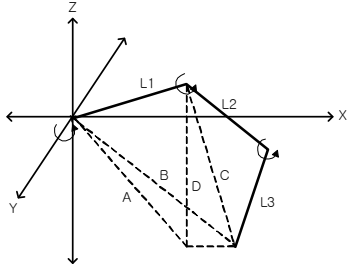
$$Y = l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 - l_3 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \quad (5)$$

$$Z = l_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \quad (6)$$

식 (4)~(6) 을 이용하여 각각의  $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 40^\circ, \theta_3 = 40^\circ$  을 주어졌을 때  $xyz$  좌표는 (47,63.89, -110.67)의 좌표를 갖게 된다.

### 3.2 역기구학 모델

3.1절에서 서술한 순기구학 모델만 가지고 4족 보행 로봇이 동작하기에는 충분하지 않다. 4족 보행 로봇이 실제로 동작하기 위해서는 앞서 구한 카테시안(Cartesian) 좌표를 가지고 관절각  $\theta$ 을 구해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 대수적 방법(algebraic method)과 기하학적 방법(geometric method)이 있으며, 본 논문에서는 기하학적 방법을 이용하여 <그림 2>와 같은 구조를 갖는 4족 로봇의 다리를 해석한다.



<그림 2> 역기구학 모델 유도를 위한 좌표계

<그림 2>로부터 식 (7)~(10)을 구할 수 있으며, 구하는 과정은 다음과 같다. 기준 좌표계의 원점으로부터  $xz$ -평면에 투영된 점까지의 거리를 A라 가정하면 A는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (7)$$

그리고 기준 좌표계의 원점에서 좌표까지의 거리를 B라 가정하면, B는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (8)$$

한편 기준 좌표계의 원점에서 좌표까지 거리를  $yz$ -평면에 투영시킨 거리를 C라 가정하면 C는 식 (9)와 같이 주어진다.

$$C = \sqrt{B^2 - l_1^2} \quad (9)$$

마지막으로 C를  $xz$ -평면에 투영시킨 거리를 D라 하면 D는 식 (10)과 같이 주어진다.

$$D = \sqrt{C^2 - y^2} \quad (10)$$

앞에서 정의한 D와 A의 성분을 이용하여  $\theta_1$ 을 구할 수 있다. D와 A 및  $l_1$ 의 성분으로 구성된 삼각형을 작도한 후  $l_1$ 과 A 사이의 사잇각을  $\theta_{1-1}$ 라 정의하면  $\theta_{1-1}$ 는 식 (11)과 같이 계산될 수 있다.

$$\theta_{1-1} = \cos^{-1} \frac{l_1^2 + A^2 - D^2}{2l_1A} \quad (11)$$

그리고  $x$ -축과  $xz$ -평면에 투영된 좌표와 이루는 각을  $\theta_{1-2}$ 로 정의하면,  $\theta_{1-2}$ 는 식 (12)와 같이 주어진다.

$$\theta_{1-2} = \tan^{-1} \frac{z}{x} \quad (12)$$

결과적으로  $\theta_1$ 은 식 (13)과 같이 구해진다.

$$\theta_1 = \theta_{1-2} - \theta_{1-1} \quad (13)$$

$\theta_2$  값의 유도 역시  $\theta_1$ 을 구하는 방법과 유사한 방법으로 유도할 수 있으며,  $\theta_2$ 의 경우에는  $l_2, l_3, C, D$ 를 이용하여 구하게 된다.  $l_2$ 와 C 사이의 사잇 각을  $\theta_{2-1}$ , C와 D 사잇 각을  $\theta_{2-2}$ 라 하면, 사잇 각  $\theta_{2-1}$ 와  $\theta_{2-2}$ 는 각기 식 (14), (15)와 같이 주어진다.

$$\theta_{2-1} = \cos^{-1} \frac{l_2^2 + C^2 - l_3^2}{2l_2C} \quad (14)$$

$$\theta_{2-2} = \tan^{-1} \frac{y}{D} \quad (15)$$

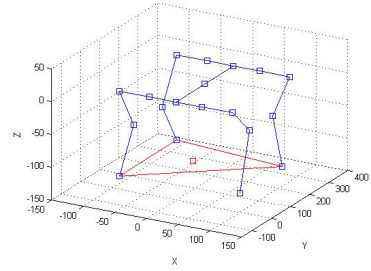
따라서  $\theta_2$  값은 식 (16)과 같이 주어지게 된다.

$$\theta_2 = \theta_{2-1} + \theta_{2-2} \quad (16)$$

한편,  $l_2$ 와  $l_3$ 의 사잇 각인  $\theta_3$ 는 식 (17)과 같이 유도된다.

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{l_2^2 + l_3^2 - C^2}{2l_2l_3} \quad (17)$$

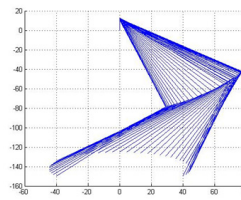
3.1절의 방법을 사용하여 구한 좌표 값을 식 (13), (16), (17)에 대입하여  $\theta$  값을 구하게 되면 3.1절에서 구한 결과와 같다는 것을 알 수 있으며, 본 절에서 유도한 수식은 사용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 뒷 식들을 이용하여 한 개의 다리를 모델링 할 수 있으며 모델링한 결과에서 평행 이동 및 회전 이동을 적용하여 전체 다리를 모델링 할 수 있으며 해석에 따른 결과는 <그림 3>과 같이 나타난다.



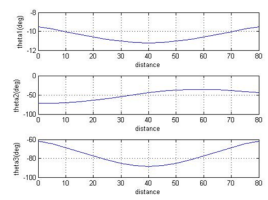
<그림 3> 4족 보행 로봇의 모델링 예

## 4. 시뮬레이션 및 결과

본 논문의 모의 실험에서는 3장에서 모델링한 결과를 이용하여 실제 적용이 가능한 4족 보행 로봇 시뮬레이터를 구성하였다. 시뮬레이터는 Math work사의 MATLAB2008을 사용하여 구현하였다. 또한 구성된 시뮬레이터의 효용성 검증을 위해 Sakakibara<sup>[5]</sup>등이 4족 보행 로봇의 걸음새 생성 방법을 적용하였다. 4족 보행 로봇의 1개 다리에 대해 시뮬레이션한 결과는 <그림 4>와 같으며, 이때 얻어진 각  $\theta$  값의 변화량은 <그림 5>와 같다.

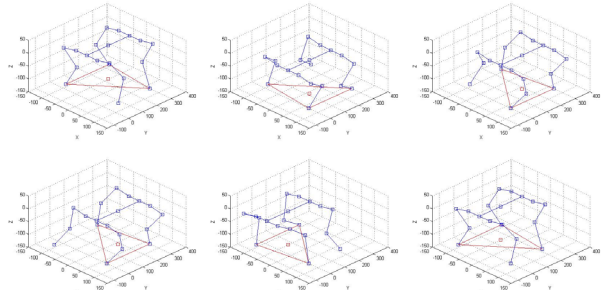


<그림 4> 시뮬레이션 결과



<그림 5>  $\theta$ 의 변화량

한편, 위의 보행 패턴을 적용하여 4족 보행 로봇의 동작을 시뮬레이션한 결과는 <그림 6>과 같다.



<그림 6> 4족 보행 로봇의 보행 시뮬레이션 결과

## 5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 MATLAB을 사용하여 4족 보행 로봇의 시뮬레이터를 구성하였다. 우선 4족 보행 로봇의 순기구학 모델과 기하학적 방법을 이용하여 역기구학 모델을 유도하였다. 한편 기준 걸음새 패턴 생성 방법을 유도한 4족 보행 로봇의 기구학적 모델을 적용하여 연산된 결과를 구성된 4족 보행 로봇시뮬레이터를 통해 구현함으로써 구성된 시뮬레이터의 효용성을 검증하였다. 향후 시뮬레이터에 동적 모델 등을 추가하고 제작 중인 4족 보행 로봇과 연계하여 4족 보행 로봇의 걸음새 생성, 장애물 회피 및 지능 제어기 설계 등과 같은 다양한 연구를 수행할 예정이다.

### [참고 문헌]

- [1] 정승, 로봇공학, 충남대학교 출판부, pp. 59~69, 2007.
- [2] 이수영, 홍예선, "4족 보행 로봇의 걸음새 안정화를 위한 물체 임피던스 제어", 대한전기학회 논문지, 제49권 5호 pp. 257~263, 2000.
- [3] G. Conto, D. Scaradozzi, and A. Suardi, "Design and Operation of a Quadrupedal Robot", Proc. of 11th Mediterranean Conf. on Control and Automation, pp. 1~6, 2003.
- [4] M. D. Berkemeier, and K. V. Desai, "Design of a Robot Leg with El-astic Energy Storage, Comparison to Biology, and Preliminary Experimental Result," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 213~218, 1996.
- [5] Y. Sakakibara, K. Kan, Y. Hosoda, M. Hattori, and M. Fujie, "Foot Trajectory for a Quadruped Walking Machine", Proc. of IROS'90, pp. 315~322, 1990.