

이족 로봇의 계단 보행에 관한 연구

오재준*, 박상수*, 최윤희*, 박진배**
 * 경기대학교 전자공학부, ** 연세대학교 전기전자공학과

A Study on Stairs Walking of a Biped Robot

Jae Joon Oh*, Sang Su Park*, Yoon Ho Choi*, Jin Bae Park**

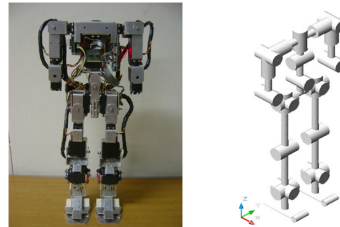
* School of Electronic Engineering, Kyonggi Univ. ** Dept. of Electric and Electronic Engineering, Yonsei Univ.

Abstract - This paper aims to generate the static walking pattern of a biped robot on stairs and to show the effectiveness of the proposed algorithm using its ankle and pelvis. Differently from the previous biped robots, our biped robot has the peculiar mechanism on its ankle and pelvis. By using this mechanism, we can reduce the load in the knee when a biped robot ascends the stairs. This means that a biped robot can climb up a higher step. The stairs walking trajectory that is separated into a ankle trajectory and a pelvis trajectory is generated by cubic spline interpolation. Finally, we confirm the feasibility of the proposed algorithm through the computer simulation and the real walking experiment.

되어있고 컴퓨터에서 동작 명령을 전송한다. 또한 외부 메모리 인터페이스를 통해 램(RAM) 영역에 프로그램을 다운로드 할 수 있다.

2.2 제작된 이족 로봇의 특징

<그림 2>는 본 논문에서 제작된 25 자유도(Degrees of Freedom: DOF)의 이족 로봇을 나타낸다. 발목과 골반에 x, y, z 축이 한 곳에 모여있고 허벅지와 정강이의 길이를 갖게 함으로써 제어의 편의성을 제공한다.



<그림 2> 제작된 이족 로봇과 3D 모델

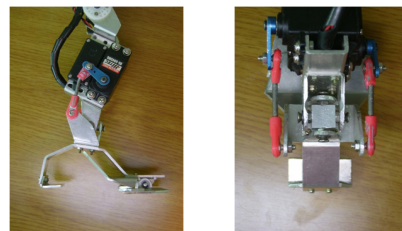
1. 서 론

이족 로봇은 인간 친화적 환경에서 높은 효율성을 갖는 로봇의 형태이며 공간적 제약성을 극복하고 비평탄 지면에서도 이동이 가능한 장점을 가지고 있다. 이러한 이족 로봇에 관한 연구는 크게 두 가지로 나누어져 있다. 첫째는 이족 보행 및 메커니즘(mechanism)에 관한 연구이고 두 번째는 비전, 음성인식 등 센서기반 인공지능 연구이다. 후자는 이족 로봇뿐 아니라 광범위한 분야에서 다양한 방식으로 접근되고 있고 전자는 상대적으로 적은 수의 연구 집단에서 연구가 이루어지고 있으면 이족 로봇을 인간답게 보이기 위한 핵심적인 기술 요소로 간주되고 있다.

2.2.1 발과 발목

이족 로봇의 발과 발목의 구조는 <그림 3>과 같다. 발목의 위치는 발의 중앙이 아닌 뒷꿈치 쪽에 위치함으로써 착지 동작 시 발목의 부하를 줄이고 지면과의 충격을 완화시켜 안정성에 기여한다. 발목의 구동 방식은 직접 구동 방식에서 벗어나 로드 엔드 베어링(rod-end bearing)을 사용하여 서보 모터를 종아리 부위로 올려 보행 시 발생하는 다리의 관성을 줄일 수 있게 하였다. 또한 십자축을 설계해 x, y 축을 한 곳에 모아 놓음으로써 제어의 편의성을 제공한다.

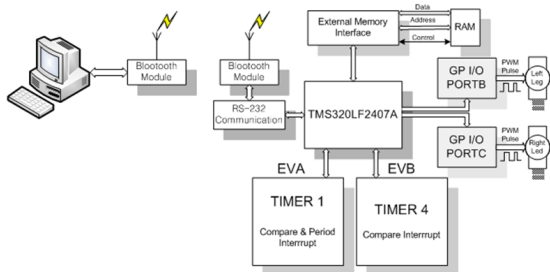
한편 이족 로봇의 보행에 대해 분류를 하면 정적 보행(static walking)과 동적 보행(dynamic walking)으로 나눌 수 있다. 정적 보행은 속도가 느린 보행으로 관성을 없애고 무게 중심을 항상 안정 영역 내에 있게 하는 보행으로 CoG(Center of Gravity) 궤적을 따른다[1]. 한편 동적 보행은 로봇의 질량과 관성을 고려하여 무게 중심의 위치가 안정 영역 내에서 벗어나 균형을 깨고 넘어지듯이 걷는 보행으로 ZMP(Zero Moment Point) 궤적을 따른다[2][3]. 본 논문에서는 이족 로봇의 보행 패턴 생성과 안정성 고리를 위해 정적 보행을 수행한다.



<그림 3> 이족 로봇의 발과 발목 구조

2. 이족 로봇의 기구학적 설계 및 구성

2.1 이족 로봇의 전체적인 시스템

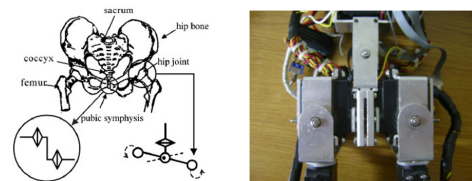


<그림 1> 이족 로봇의 전체 시스템

이족 로봇의 전체적인 시스템은 <그림 1>과 같다. 주제어기로는 TI사의 TMS3202407A DSP를 사용하고 Timer 1과 4를 사용하여 양쪽 다리의 12개의 서보 모터와 허리의 2개의 서보 모터를 제어한다. 주제어기와 컴퓨터는 RS-232 통신을 위한 블루투스 모듈(blueooth module)로 연결

2.2.2 골반

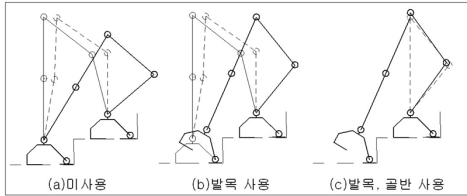
<그림 4>는 인간과 이족 로봇의 골반 구조를 나타낸다. 인간의 허리는 천골(sacrum)에 연결되고 있고, 대퇴골(femur)은 힙 조인트(hip joint)에 연결되고 있다. 그리고 미저골(coccyx)은 <그림 4>와 같이 유합(symphysis)되어 있다. 이러한 인간의 골반 구조를 이용하여 이족 로봇의 골반 구조를 설계하였다. 인간의 힙 조인트에 해당하는 부위에 두 다리가 연결되고 있고, 허리 관절은 인간의 천골에 해당하 부위에 연결되어 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 골반 구조를 사용하여 계단 보행을 수행한다.



<그림 4> 인간의 골반 구조와 비교

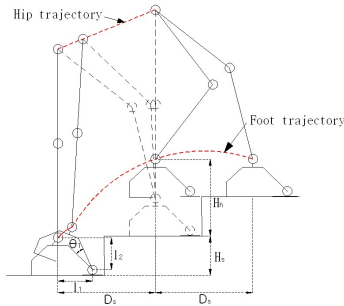
3. 발목과 골반을 사용한 이족 로봇의 정적 계단 보행 패턴

본 장에서는 발목과 골반을 사용하여 이족 로봇의 정적 계단 보행 패턴을 생성하는 방법에 대해 서술한다. <그림 5>는 계단 보행 시 발목과 골반을 사용에 대한 이점을 나타낸다. <그림 5>의 (a)는 발목과 골반을 사용하지 않는 계단 보행 시 두발 지지 상태에서 무게 중심을 앞발에 위치시키기 위해 이족 로봇이 취해야 하는 자세를 나타내는데, 무게 중심점이 앞발의 안정 영역에 있기 위해서는 무릎을 많이 굽혀 골반을 발목의 수직선상에 위치시켜야 하는 단점을 가진다. <그림 5>의 (b)와 같이 발목을 사용하면 무릎에 걸리는 부하를 줄이고 보다 안정적인 자세를 취할 수 있다. <그림 5>의 (c)는 본 논문에서 제안한 방법을 나타내며, 보다 높은 계단 보행시 골반을 추가적으로 사용함으로써 무릎의 부하를 효과적으로 줄일 수 있음을 보인다.



<그림 5> 계단 보행 시 발목과 골반 사용 비교

3.1 발목 궤적 생성



<그림 6> 발목과 골반 궤적

<그림 6>에서와 같이 측면(sagittal plane)에서의 발의 궤적은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_a = [x_a(t), z_a(t), \theta_a(t)]^T \quad (1)$$

여기서, $(x_a(t), z_a(t))$ 는 발목의 위치 좌표이고, $\theta_a(t)$ 는 발목의 각도이다.

한 걸음을 걷는데 필요한 시간을 T_s 라고 하면, k 번째 걸음의 시간은 kT_s 부터 $(k+1)T_s$ 까지이다. 발목 사용 시, 스윙(swing)하는 발이 지면에서 떨어질 때와 착지할 때의 발바닥의 각도를 각각 q_b , q_f 로 정한다. 또한 발이 지면과 떨어져있을 때는 발바닥이 지면과 평행하다고 가정하면 식 (2)와 같은 구속 조건을 얻을 수 있다.

$$\theta_a(t) = \begin{cases} q_b, & t = kT_s + T_d \\ -q_f = 0, & t = (k+1)T_s \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서, $kT_s + T_d$ 은 발목과 골반을 사용하여 무게 중심을 앞 발목의 수직선상에 위치시키는 시간이고, 계단 보행 시 q_f 는 0이다.

한쪽 다리만을 고려한다면 시간에 따른 x_a 좌표는 식 (3)과 같다.

$$x_a(t) = \begin{cases} kD_s & t = kT_s \\ kD_s + (l_1 \cos q_b + l_2 \sin q_b) & t = kT_s + T_d \\ (k+1)D_s & t = kT_s + T_h \\ (k+2)D_s & t = (k+1)T_s \end{cases} \quad (3)$$

여기서, D_s 는 보폭, l_1 은 발가락 관절부터 발목까지의 x 좌표 성분의 길이, l_2 는 발가락 관절부터 발목까지의 z 좌표 성분의 길이, $kT_s + T_h$ 는 다음 계단에 발을 올려놓기 위해 발을 들어 올리는 시간이다.

한편 z 축 발목 위치를 나타내기 위해선 계단의 높이와 발을 들어 올리는 최고점의 높이를 알고 있어야 한다. 한 계단의 높이를 H_s , 계단 위

에서 발을 들어 올리는 높이를 H_h 라고 한다면 $z_a(t)$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$z_a(t) = \begin{cases} l_2 & t = kT_s \\ l_2 + (l_1 \sin \theta + l_2 \cos \theta) & t = kT_s + T_d \\ H_s + H_h & t = kT_s + T_h \\ l_2 + 2H_s & t = (k+1)T_s \end{cases} \quad (4)$$

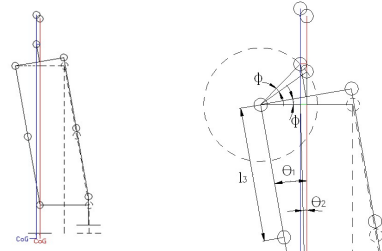
위와 같이 생성된 데이터 점들을 3차 스플라인 보간법을 이용하여 궤적을 생성한다.

3.2 골반 궤적 생성

인간과 같이, 골반을 사용한 보행 시 고려되어야 할 사항은 전체적인 이족 로봇의 높이 변화와 무게 중심의 이동, 발목각의 변화이다.

3.2.1 골반 사용에 따른 고려 사항

<그림 7>은 골반 사용에 따른 이족 로봇의 자세 변화를 나타낸다. 한 발 지지 상태(single support phase)에서 골반을 사용하면 높이 이득이 얻어지지만 무게 중심점이 이동하게 된다. 이때, 무게 중심은 발바닥 내에 있어서 이족 로봇이 넘어지진 않지만 외력에 의해 쉽게 불안정상 상태가 되므로 이를 발목각으로 보정해야 할 필요가 있다.



<그림 7> 골반 사용에 따른 이족 로봇의 자세 변화

3.2.2 골반 궤적 생성

골반 궤적은 <그림 6>에서와 같이 선형적인 1차 직선으로 나타낼 수 있다. 직선의 기울기는 계단의 높이와 같고 골반 궤적은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_h = [x_h(t), z_h(t)]^T \quad (5)$$

골반 궤적은 발목 궤적과 마찬가지로 시간에 따른 x , z 좌표로 나타내고, 각각 식 (6), (7)과 같다.

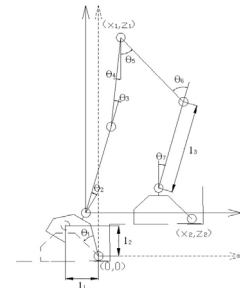
$$x_h(t) = \begin{cases} kD_s & t = kT_s \\ (k+2)D_s & t = (k+1)T_s \end{cases} \quad (6)$$

$$z_h(t) = \begin{cases} (k-1)H_s + (l_2 + 2l_3) & t = kT_s \\ (k+1)H_s + (l_2 + 2l_3) & t = (k+1)T_s \end{cases} \quad (7)$$

여기서, H_s 는 한 계단의 높이이고, l_3 는 정강이와 허벅지의 길이이다.

3.3 궤적 생성을 위한 이족 로봇의 관절 각도 계산

본 논문의 3.2절까지 논한 정적 계단 보행 패턴의 생성 방법을 이족 로봇에 적용시키기 위해서는 각 부분 구간별 관절 데이터를 구해야 한다. <그림 8>는 측면에서 바라본 이족 로봇의 각 관절 각도와 골반, 발끝의 위치 좌표를 나타낸다.



<그림 8> 이족 로봇의 기구학

<그림 8>에서 계산과 표기상의 편의를 위하여 기준 좌표계(reference frame)를 발목으로 대치시키면 이동한 프레임(frame) R 은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$R_{xyz} = Rot(y, \theta) \times P_{ankle} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ l_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $Rot(y, \theta)$ 는 y 축을 기준으로 한 회전 행렬(rotation matrix)이고, P_{ankle} 은 발목의 위치 좌표이다. 또한 프레임 R 을 기준으로 한 위치 좌표 ${}^R P_{xyz}$ 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$${}^R P_{xyz} = [{}^R x_i, {}^R y_i, {}^R z_i]^T = [x_i, y_i, z_i]^T - R_{xyz} \quad (y=0) \quad (9)$$

<그림 8>의 이족 로봇의 기구학을 이용하여, 각 관절 각도 θ_i 를 구할 수 있다.

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{{}^R x_1^2 + {}^R z_1^2 - 2l_3^2}{2l_3^2} \right) \quad (10)$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \tan^{-1}({}^R x_1 / {}^R z_1) + \cos^{-1} \left(\frac{l_3 \sin(\pi - \theta_3)}{\sqrt{{}^R x_1^2 + {}^R z_1^2}} \right) \quad (11)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1}({}^R x_1 / {}^R z_1) - \sin^{-1} \left(\frac{l_3 \sin(\pi - \theta_3)}{\sqrt{{}^R x_1^2 + {}^R z_1^2}} \right) \quad (12)$$

$$\theta_6 = \cos^{-1} \left(\frac{({}^R x_2 - {}^R x_1)^2 + ({}^R z_2 - {}^R z_1)^2 - 2l_3^2}{2l_3^2} \right) \quad (13)$$

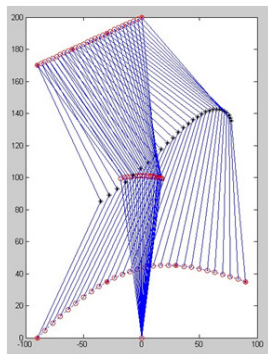
$$\theta_5 = \tan^{-1} \left(\frac{{}^R x_2 - {}^R x_1}{{}^R z_2 - {}^R z_1} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{l_3 \sin(\pi - \theta_6)}{\sqrt{({}^R x_2 - {}^R x_1)^2 + ({}^R z_2 - {}^R z_1)^2}} \right) \quad (14)$$

$$\theta_7 = \sin^{-1} \left(\frac{l_3 \sin(\pi - \theta_6)}{\sqrt{({}^R x_2 - {}^R x_1)^2 + ({}^R z_2 - {}^R z_1)^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{{}^R x_2 - {}^R x_1}{{}^R z_2 - {}^R z_1} \right) \quad (15)$$

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 모의 실험

본 논문의 모의 실험에서는 각 관절 각도와 위치 좌표를 이용하고 MATLAB을 사용하여 모의 실험을 하였다. 모의 실험은 실제 계단의 높이 18mm와 계단의 너비 110mm를 적용하였다. 또한 이족 로봇의 발목의 x 축 성분 l_1 은 56mm, 발목의 z 축 성분 l_2 는 46mm, 정강이와 허벅지의 길이 l_3 는 101mm이다. 계단의 너비가 110mm이므로 한 걸음의 보폭 D_s 는 110mm이며, 발을 들어 올리는 최대 높이 H_h 는 24mm이다. <그림 9>는 모의 실험을 통해 발목과 골반 궤적을 바탕으로 전체 궤적을 생성한 그림이다. 발목, 골반 궤적과 각 관절 데이터를 이용하여 무릎 궤적을 얻어 낼 수 있다.

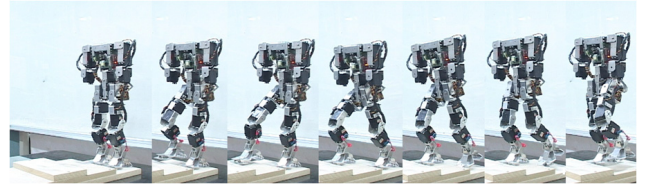


<그림 9> MATLAB을 이용한 모의 실험

4.2 보행 실험

4.2.1 골반과 발목을 사용한 계단 보행

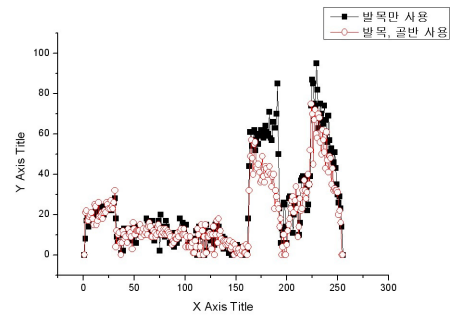
<그림 10>은 이족 로봇의 실제 보행 스틸 컷(still cut)이다. 이족 로봇의 보행은 주기적으로 반복되므로 한 주기의 보행만을 나타내었다.



<그림 10> 계단 보행 실험

4.2.2 무릎 부하 측정

무릎의 부하 측정 원리는 모터에 인가되는 PWM 신호를 구간별로 적분을 하여 평균치를 내면 무릎에 걸리는 부하의 상대적인 값을 알 수 있다. <그림 11>은 무릎 부하의 실측정치를 나타낸다.



<그림 11> 상대적인 부하 측정값

5. 결 론

본 논문에서는 인간과 유사한 기구학적인 구조를 이용하여 발목과 골반을 사용한 계단 보행 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션 및 실제 이족 로봇의 계단 보행 실험을 통해 제안한 알고리즘의 효용성을 검증하였다. 골반과 발목을 사용함으로써 계단 오르기 동작 시 무릎의 부하를 효과적으로 분산시킬 수 있었고, 인간과 유사한 보행 동작을 할 수 있었다. 또한 계단 보행 시 무릎에 부하가 집중되는 것을 고려한다면 더 높은 계단 보행의 가능성을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박상수, 김병수, 오재준, 최윤호, "이족 로봇의 저전력 보행 궤적 생성 및 구현에 관한 연구", 퍼지 및 지능 시스템 학회 논문지, vol. 16, no. 4, pp. 443-448, 2006.
- [2] Q. Huang, K. Yokoi, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot", IEEE Trans. Robotics & Automation, vol. 17, no. 3, pp. 234-239, 2001.
- [3] X. S. Lei, J. Pan, J. B. Su, "Humanoid Robot Locomotion", Proc. of the Fourth Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics, vol. 2, pp. 882-887, 2005.
- [4] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, H. Inoue, "Toe Joints that Enhance Bipedal and Fullbody Motion of Humanoid Robots", Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, vol. 3, pp. 3105-3110, 2002.
- [5] C. K. Ahn, M. C. Lee, S. J. Go, "Development of a Biped Robot with Toes to Improve Gait Pattern", Proc. of the 2003 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, vol. 2, pp. 729-734, 2003.