

이족보행로봇의 횡보행 경로생성을 위한 시뮬레이터 연구

최형식† · 전창훈* · 강진일**

(원고접수일 : 2008년 5월 8일, 원고수정일 : 2008년 8월 21일, 심사완료일 : 2008년 10월 25일)

Study on a Simulator for Generating Side Walking Path of the Biped Walking Robot

Hyeung-Sik Choi† · Chang-Hoon Jeon* and Jin-Il Kang**

Abstract : A research on a simulator for a side walking path of a 16 degree-of-freedom (d.o.f) biped walking robot(BWR) which is composed of 4 d.o.f upper-part body and 12 d.o.f lower-part of the body is presented. For generation of stable side walking motion, the kinematics, dynamics and the zero moment of point(ZMP) of the BWR were analyzed analytically and included in the simulator. To operate the motion simulator for stable side walking of the BWR, a graphic user interface program was developed which needs inputs for the side distance between legs, base joint angle, walking type, and walking velocity. The simulator was developed to generate joint angle data of legs for side walking, and the data are transmitted to the BWR for stable side walking. In the simulator, a new path function for smooth walking motion was proposed and applied to the simulator and actual motion of a BWR. Also for actual side walking, an algorithm for estimating backlashes of the actuating joint motors was proposed and included in the simulator. To validate the performance of the proposed motion simulator, the simulator was operated and its side walking data of the simulator were generated for a period of side walking.

Key words : Biped walking robot(이족보행 로봇), Side walking(횡보행), Motion simulator(모션 시뮬레이터), Motion generator(모션 제네레이터), Zero moment of point(ZMP)

1. 서 론

인간과 유사한 구조를 가지는 이족보행로봇에 대해 1960년대 후반 Vukobratovic^[1]이 모델링을 처음 제시한 이후 많은 이론적^{[2]-[5]} 혹은 실험적

^{[6]-[9]} 연구들이 수행되어 왔다. 이러한 이족보행로봇의 획기적인 모델은 1998년 일본의 혼다사에서 발표한 P3^[10]로 이는 인체의 크기와 흡사하며 실제 보행을 가능하게 하여 이족보행로봇의 발전에 큰 기여를 하였다.

† 교신저자(한국해양대학교 기계정보 공학부, E-mail:hchoi@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4969)

* 한국해양대학교 기계공학과 대학원

** 한국해양대학교 기계공학과 대학원

이족보행로봇의 보다 안정적이고 자연스런 궤적생성을 위해 ZMP(Zero Moment Point)가 Vukobratovic^[11]에 의해 처음 제안 되었고, 이후로 ZMP 안정성에 바탕을 둔 여러 가지 보행궤적생성 방법이 연구되었는데, 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째, Huang^[12], Takanishi^[13], Shin^[14]등이 제안한 방법으로 보행 궤적을 off-line에서 만들어 적용하는 방법이 있다. 이는 로봇이 보행하는 환경을 사전에 알고 있어야 하며, 변화하는 환경에 대처를 못하는 단점이 있다. 이런 단점을 보완하기 위해 Huang^[15]은 센서의 정보를 이용하여 생성된 궤적을 보정하는 방법을 제안하였다. 두 번째 방법은 매 순간마다 로봇의 동역학 식(dynamics equation)을 계산하여 궤적을 생성하는 방법을 Furusho가 제안하였다^[5].

아직도 이족보행로봇의 보행 구현에는 위협적, 경제적 또는 시간적인 어려움이 따라서 이를 해결하기 위해 PC 기반으로 한 3D 이족보행로봇 시뮬레이터를 개발하고 이를 이용하는 방법들이 많이 제시되고 있다. 대표적인 연구로써 1984년 일본의 와세다 대학에서 보행 패턴의 분석과 ZMP 개념을 도입하여 안정된 보행을 시뮬레이션하기 위한 Walk Master-2^[16], 1999년 미국의 MIT 대학에서 7개의 링크와 12 자유도로 이루어진 이족보행로봇이 평지에서의 동적인 보행 동작^[17]을 분석하기 위한 시뮬레이터^[18] 그리고 2003년 스위스의 Biologically Inspired Robotics 그룹에서 소니 사의 SDR-4X 로봇 모델을 기반으로 실제 환경과 유사하게 처리하기 위해 물리엔진을 이용하여 개발한 시뮬레이터^[19] 등이 있다.

또한 실제 환경을 PC 기반으로 한 가상의 공간을 구성하는 것 또한 많은 시간을 투자해야 하는 어려움이 따르므로 소형으로 이족보행로봇을 제작하여 보행 패턴이나 안정성을 실험하는 연구도 많이 병행이 되고 있다. 1998년 호주의 Western 대학에서 개발하여 불규칙적인 지형을 보행하기 위한 실험^[20]과 동적인 보행을 연구하기 위한 실험^[21], 2000년 와세다 대학에서 개발된 시뮬레이터 Walk Master-2 를 이용하여 시뮬레이션 데이터를 적용한 WABIAN-R II^[22] 등이 있다.

하지만, 현재까지 수행한 BWR의 시뮬레이터에 대한 연구들은 특정 형태의 다리구조에 대한 것이거나 기구학이나 동역학 식을 포함시키지 않은 단순 보행 데이터를 생성하는 것, 혹은 시뮬레이터에서 나온 데이터를 실험으로 검증하는 절차가 없는 연구들이었고, 특히 BWR의 횡보행에 대한 시뮬레이션을 수행한 것은 없었다.

본 연구에서는 현재까지 개발된 이족보행로봇의 보편적인 다리구조를 대상으로 기구학이나 동역학 식을 포함한 시뮬레이터를 구성하였다. 로봇의 다리에서 관절구동기 사이의 거리와 자세에 대한 관절의 회전각을 입력으로 제공하고 횡보행에 대한 다리 사이의 거리 및 속도 정보를 입력함으로써 기구학 및 동역학 해석과 ZMP를 그래픽으로 표현하는 시뮬레이터를 구성하였다. 횡보행시에 각 관절구동기의 모든 데이터가 자동으로 생성되며, 그 데이터는 실시간으로 로봇에 전송되고, 로봇은 그에 따른 동작 수행하는 시스템을 구성하였다.

2. 로봇의 동역학 및 기구학 해석

2.1 순기구학 해석

인간의 다리관절구조와 유사하여 일반적으로 많이 적용하는 Fig. 1과 같은 다리관절 구조를 갖는 로봇에 대하여 연구하였다. 로봇의 관절각변수가 주어졌을 때, 로봇 발의 위치와 방향을 결정하기 위한 이족보행로봇 다리의 순기구학 방정식은 Fig. 1과 같이 Denavit - Hartenberg(D-H) 규약에 따라 유도하였다^[23]. D-H 규약은 각 관절간의 상대 위치 및 회전 방향을 표현하는 동차변환 행렬로 표현한다. Table 1 은 이족보행로봇 하체의 관절구조와 링크 변수를 나타낸다.

Table 1 Link parameters for the leg of BWR

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	90°	$-d_1$	θ_1
2	a_2	90°	0	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3
4	a_4	0	0	θ_4
5	a_5	-90°	0	θ_5
6	a_6	0	0	θ_6

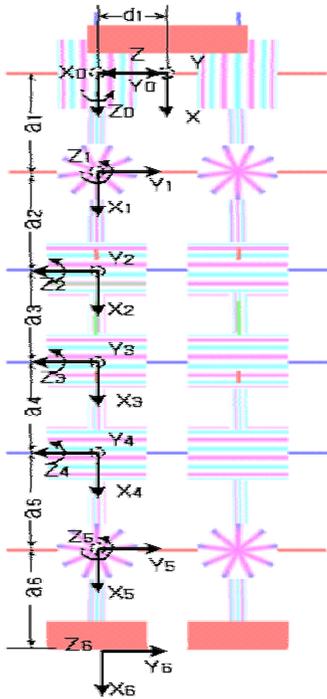


Fig. 1 Assignment of D-H coordinate for a BWR

여기서 a_i 는 각 관절의 링크 길이(length), α_i 는 비틀림(twist), d_i 는 오프셋(offset), θ_i 는 각도(angle)이다. 관절 사이의 관계를 표현하는 A_i 행렬들은 D-H규약으로부터 다음과 같이 구성된다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & a_1C\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta_1 & 0 & C\theta_1 & -a_1S\theta_1 - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & S\theta_2 & a_2C\theta_2 \\ S\theta_2 & 0 & -C\theta_2 & a_2S\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_3C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & a_4C\theta_4 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & a_4S\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & -S\theta_5 & a_5C\theta_5 \\ S\theta_5 & 0 & C\theta_5 & a_5S\theta_5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_6 = \begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & a_6C\theta_6 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & a_6S\theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 C는 cos, S는 sin을 나타낸다. 골반부의

yaw축은 회전 보행 때에만 동작하므로 전진보행 시에는 $\theta_1 = 0$ 라고 가정을 하면 원점과 발목의 관계를 나타내는 T_0^6 행렬은 위의 행렬들에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$T_0^6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} C\theta_2 C\theta_3 C\theta_4 - S\theta_2 S\theta_4 & -C\theta_2 C\theta_3 S\theta_4 - S\theta_2 C\theta_4 & C\theta_2 S\theta_3 & P_x \\ S\theta_2 C\theta_3 C\theta_4 + C\theta_2 S\theta_4 & -S\theta_2 C\theta_3 S\theta_4 + C\theta_2 C\theta_4 & -S\theta_2 S\theta_3 & P_y \\ S\theta_3 C\theta_4 & -S\theta_3 S\theta_4 & C\theta_3 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 θ_{345} 는 $\theta_3 + \theta_4 + \theta_5$ 를 나타낸다. 위 식에서의 말단 장치의 위치 벡터 p 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_2 \{ a_3 C\theta_3 + a_4 C\theta_4 + C\theta_{345} (a_5 + a_6 C\theta_6) + a_2 \} - S\theta_2 a_6 S\theta_6 + a_1 \\ S\theta_2 \{ a_3 C\theta_3 + a_4 C\theta_4 + C\theta_{345} (a_5 + a_6 C\theta_6) + a_2 \} + C\theta_2 a_6 S\theta_6 \\ a_3 S\theta_3 + a_4 S\theta_4 + S\theta_{345} (a_5 + a_6 C\theta_6) - d_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 자코비안을 이용한 역기구학 해석

이족보행로봇 하체의 말단 장치의 위치와 방향에서 관절 변수를 역으로 찾기 위하여 자코비안 행렬을 유도하고 관절각의 속도 방정식을 유도하였다. 식 (1)에서 정의된 이족보행로봇의 기구학 정의를 재 정의하면 다음과 같다.

$$T_0^6(\theta) = \begin{bmatrix} R_o^6(\theta) & d_o^6(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T$ 는 관절 변수의 벡터이다(단 여기서 $\theta_1 = 0$). 말단 장치의 좌표계로부터 기저 좌표계로의 변환을 나타내면 이족보행로봇의 동작에 따라 관절 변수 θ_i 와 말단 장치 위치 벡터 d_o^6 와 방향 R_o^6 는 시간의 함수가 된다. 다수의 링크로 연결되어 있는 이족보행로봇의 보행 시 각각의 링크는 각기 다른 선속도와 각속도를 가지며 말단 장치의 선속도와 각속도 기저 좌표계에 대한 관절 속도의 벡터 $\dot{\theta}(t)$ 와 연관된다.

$$S(\omega_0^6) = \dot{R}_0^6 (\dot{R}_0^6)^T \quad (4)$$

식 (4)에서 $S(\omega)$ 는 외대칭 행렬이며 이 식이 각속도 벡터 ω_0^6 를 정의한다.

$$v_0^6 = \dot{d}_0^6 \quad (5)$$

식 (5)는 말단 장치의 선속도를 나타낸다. 이때 식 (4)와 (5)에 의해 다음과 같은 관계를 구할 수 있다.

$$v_0^6 = J_v \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\omega_0^6 = J_\omega \dot{\theta} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 3×6 행렬인 J_v, J_ω 는 각각 선속도 자코비안 행렬과 각속도 자코비안 행렬이다. 또한 두 식은 다음의 행렬식으로 표현된다.

$$J_0^6 = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)에서 6×6 행렬 J_0^6 는 로봇의 자코비안 행렬이며 이들의 성분은 다음과 같이 구하였다.

$$J_1 = \begin{bmatrix} -[S\theta_2\{a_3C\theta_3+a_4C\theta_{34}+C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)+a_3\}+C\theta_2a_6S\theta_6] \\ C\theta_2\{a_3C\theta_3+a_4C\theta_{34}+C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)+a_3\}-S\theta_2a_6S\theta_6+a_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -[S\theta_2\{a_3C\theta_3+a_4C\theta_{34}+C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)+a_2\}+C\theta_2a_6S\theta_6] \\ C\theta_2\{a_3C\theta_3+a_4C\theta_{34}+C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)+a_2\}-S\theta_2a_6S\theta_6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} -C\theta_2\{a_3S\theta_3+a_4S\theta_{34}+S\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\} \\ -S\theta_2\{a_3S\theta_3+a_4S\theta_{34}+S\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\} \\ S\theta_2[S\theta_2\{a_3C\theta_3+a_4C\theta_{34}+C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\}+C\theta_2a_6S\theta_6] \\ +C\theta_2[C\theta_2\{a_3C\theta_3+a_4C\theta_{34}+C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\}-S\theta_2a_6S\theta_6] \\ S\theta_2 \\ -C\theta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} -C\theta_2\{a_4S\theta_{34}+S\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\} \\ -S\theta_2\{a_4S\theta_{34}+S\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\} \\ S\theta_2[S\theta_2\{a_4C\theta_{34}+C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\}+C\theta_2a_6S\theta_6] \\ +C\theta_2[C\theta_2\{a_4C\theta_{34}+C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\}-S\theta_2a_6S\theta_6] \\ S\theta_2 \\ -C\theta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$J_5 = \begin{bmatrix} -C\theta_2S\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6) \\ -S\theta_2S\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6) \\ S\theta_2[S\theta_2\{C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\}+C\theta_2a_6S\theta_6] \\ +C\theta_2[C\theta_2\{C\theta_{345}(a_5+a_6C\theta_6)\}-S\theta_2a_6S\theta_6] \\ S\theta_2 \\ -C\theta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$J_6 = \begin{bmatrix} -a_6\{S\theta_2C\theta_6(S^2\theta_{345}+C^2\theta_{345})+C\theta_{345}C\theta_2S\theta_6\} \\ a_6\{C\theta_2C\theta_6(S^2\theta_{345}+C^2\theta_{345})-C\theta_{345}S\theta_2S\theta_6\} \\ a_6S\theta_{345}\left(-C\theta_2(S\theta_2C\theta_{345}C\theta_6+C\theta_2S\theta_6)\right) \\ +S\theta_2(C\theta_2C\theta_{345}C\theta_6-S\theta_2S\theta_6) \\ -C\theta_2S\theta_{345} \\ -S\theta_2S\theta_{345} \\ C\theta_{345} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 θ_{34} 는 $\theta_3+\theta_4$, θ_{345} 는 $\theta_3+\theta_4+\theta_5$ 를 나타낸다. 식 (6)과 (7)에서 관절 속도와 말단 장치의 속도를 자코비안 행렬로 정의했다. 이를 역으로 정의하면 이족 보행 로봇의 역속도 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\theta} = J_v^{-1} v_0^6 \quad (15)$$

$$\dot{\theta} = J_\omega^{-1} \omega_0^6 \quad (16)$$

식 (15)와 (16)을 만족하기 위해서는 $\det J_0^6 \neq 0$ 이어야 한다. 또한 자코비안 행렬의 역을 구하기 위한 필요충분조건은 $\dot{\theta} \in R^6$ 일 때 첨가 행렬 $[J_0^6 | \dot{\theta}]$ 의 계수가 자코비안 행렬 J_0^6 의 계수가 같아질 경우이다.

3. 보행 및 동작 알고리즘

이족보행로봇은 구조적으로 불안정한 시스템이므로 안정도를 고려한 보행 알고리즘이 중요하다. 본 논문에서는 각 다리가 6자유도인 12자유도 하

체를 갖는 이족보행로봇의 역기구학 계산을 통해 얻어진 각 관절의 변위를 이용해 시뮬레이터 상에서 가속도를 구하고, 입력된 각 링크의 무게 및 위치 값을 이용하여 구한 동역학의 무게중심인 ZMP을 이용하여 로봇의 안정도를 판별한다^[24]. 보행 및 동작 알고리즘은 다양하게 고안될 수 있으나, 본 논문에서는 중심 이동과 안정도에 중점을 둔 횡보행 및 동작 알고리즘에 대하여 연구하였다.

3.1 보행 및 동작의 안정도

ZMP는 이족보행로봇의 안정도를 판단하는 중요한 기준이 된다. 로봇이 넘어지지 않기 위해서 ZMP는 1각지지구간에서는 지면을 지지하는 발바닥 면적의 내부에 있어야 하고, 2각지지구간에서는 지면과 접촉한 양 발바닥을 연결한 대각선 위에 있어야 한다. 또한 ZMP의 위치가 지지면적의 중앙에 위치할수록 로봇이 안정하게 된다. 이를 이용하여 로봇을 안정하게 보행하는데 이용할 수 있다. 본 논문에서는 로봇의 동역학식을 구하기 위해 다음의 달랑베르 법칙(D’Alambert’s Principle)을 이용하였다.

$$\sum_i (m_i(r_i - p) \times (-\ddot{r}_i + g) - I_i \alpha_i - \omega_i \times I \omega_i) = (0, 0, M_z)^T \quad (17)$$

여기서 r_i 와 P 는 각각 링크 i 의 무게중심의 위치와 ZMP의 위치이다. m_i 는 링크 i 의 질량, I_i 는 moment of inertia, α_i 는 angular acceleration, ω_i 는 angular velocity이다. g 는 중력이며 M_z 는 ZMP에서 모멘트의 성분이며 이 값은 무시된다. ZMP의 위치는 이 식을 P 의 성분인 x 와 y 에 대해 풀면 구할 수 있다. 여기서 질량 m_i 는 각 링크의 무게중심에 집중되어 있다고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_i m_i(r_i - p) \times (\ddot{r}_i + g) = (0, 0, M_z)^T \quad (18)$$

이 식을 정리하면 ZMP의 좌표는 다음과 같이 주어진다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i - g) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i - g)}, \quad (19)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i - g) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i - g)} \quad (20)$$

Fig. 2와 같이 양 다리의 발바닥 중심점을 기준으로 각 관절을 연결하는 링크의 중간점을 무게 중심점으로 가정하였다.

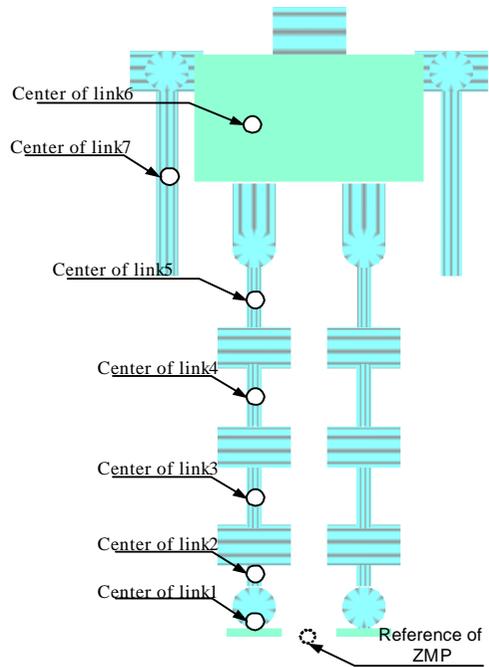


Fig. 2 The position of links by measured ZMP

3.2 안정한 가감속 궤적 알고리즘

보행 동작 중에 발을 들어 올리는 순간과 발이 지면에 접촉하는 순간에 가감속을 하지 않으면 앞으로 내딛는 발이 지면과의 갑작스런 접촉으로 보행동작이 불안정해질 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 발을 드는 순간 가속하다 일정시간 정속하고 발을 내릴 때까지 감속하는 보행 궤적의 한 형태로 본 연구에서는 식 (21)과 같은 새로운 경로 함수를 제안하였다.

$$x(t) = \exp(t) - 1, \quad 0 \leq t \leq t_f$$

$$y(t) = \begin{cases} \frac{V}{2b}t^2, & 0 \leq t \leq t_b \\ \frac{y_f - V \times t_f}{2} + V \times t, & t_b < t \leq t_f - t_b \\ y_f \frac{V \times t_f^2}{2b} + \frac{V}{t_b} \times t_f \times t - \frac{V \times t^2}{2b}, & t_f - t_b < t \leq t_f \end{cases} \quad (21)$$

여기서 y_f 는 경로의 최종 이동 거리, t_f 는 경로 최종 이동 시간, V 는 원하는 속도이다. 식(21)을 일정 시간간격으로 샘플링 하여 관절각의 경로를 그리면 Fig. 3과 같이 표현된다.

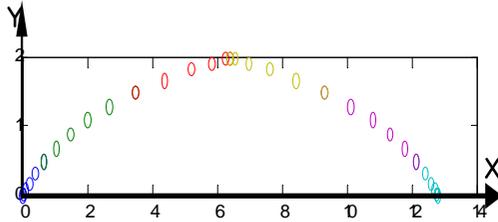


Fig. 3 Path of joint angle

3.3 좌우 보행 단계 계획

좌우보행은 중심 이동 후 보폭만큼 발을 내딛기 위해 골반의 roll축을 같은 각으로 벌리면 보폭의 절반 위치에 원점 좌표가 오게 되어 다음 단계에 안정적인 중심이동을 할 수 있다. 이를 이용하여 좌우보행에 대한 단계를 계획하였다.

좌우보행에 대한 보행 단계계획은 1 사이클당 1 보행이며 Fig. 4와 같이 중심 이동의 경로와 발바닥의 경로를 중심으로 표현한다.

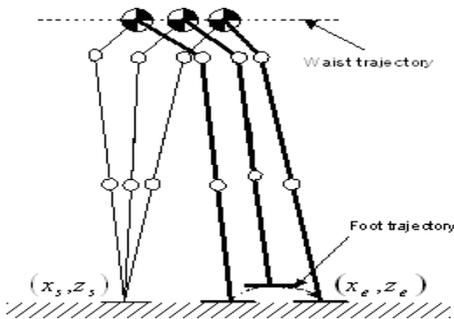


Fig. 4 Path of the joints for side walking

로봇의 좌우보행을 구현하기 위해 다음의 5 단계를 만들었다.

단계1(HOME) : 보행을 시작하기 위한 초기 상태로 무릎을 약간 굽힌 상태

단계2(LL_SUPPORT) : 보행을 시작하기 위해 무게중심을 오른쪽 발 위로 중심 이동을 하는 동작

단계3(LL_SWING) : 보행을 위해 왼쪽 발을 들어 보폭의 절반만큼 왼쪽으로 이동하는 동작

단계4(LL_STEP) : 보폭의 절반만큼 이동하며 발을 입력된 보폭만큼 내밀어 착지하는 동작

단계5(R_L_SUPPORT) : 왼쪽 발이 내밀어진 다음 오른쪽 발을 왼쪽으로 이동시키기 위한 동작으로 무게 중심을 왼쪽 발로 옮기는 동작

4. 보행 시뮬레이터

4.1 시뮬레이터의 구성

이족보행로봇을 위한 3D 시뮬레이터는 Fig. 5와 같은 구조로 구성하였고 Windows 환경에서 동작하고 Microsoft Visual C++와 3D 그래픽을 구현하기 위해서 Open Graphics Library (OpenGL)를 이용하였다^[25]. 로봇의 3D 모델은 Actuator, 링크, 지면(Ground)등을 Rendering하는 모듈들의 집합으로 구성하였다.

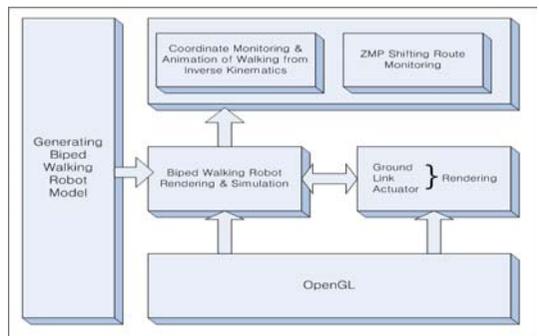


Fig. 5 The organization of 3D simulator

3D 시뮬레이터용 GUI 화면의 구성은 입력 창과 Fig. 6과 같이 main 창으로 구성된다. 입력 창은 3D 로봇모델 생성 패널을 구성하며 로봇의 기구학

및 동역학 해석과 3D Rendering에 필요한 로봇의 관절구동기의 위치와 각 링크의 무게 값을 입력하고 로봇의 좌·우 보행 모션의 시뮬레이션하기 위한 보행 속도와 보폭을 입력한다.

main 창은 Fig. 6과 같이 구성되며 각 부분의 기능은 다음과 같다.

- ① : 시리얼 통신을 위하여 환경설정(통신 속도, 통신포트) 부분.
- ② : 로봇이 상체까지 구현되어 있을 경우 구동기 데이터를 상, 하체 구분하여 전송하는 부분.
- ③ : 구동기 데이터를 직접 편집할 수 있는 부분.
- ④ : 보행이나 튜닝 등의 연속 동작에 대한 데이터를 시뮬레이터로부터 생성하여 전송하는 부분.
- ⑤ : 구동기의 속도를 조절하는 부분.
- ⑥ : 24개의 구동기 이상의 제어용 여분 입력부.
- ⑦ : 실제 로봇의 구동기 위치에 따라 직접 편집하는 Interface 부분.

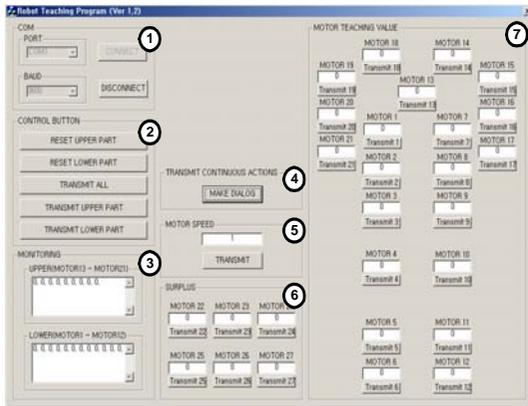


Fig. 6 Main part of motion generator

4.2 백래쉬 보정

이족보행로봇의 특성상 중심 이동 후 보행 동작을 행한다. 제작된 이족보행로봇의 기구적 또는 역추에이터의 특성에 의한 백래쉬로 인하여 로봇의 궤적 추종에 오차가 발생한다. 중심 이동 후 다리를 들었을 시 발생하는 백래쉬를 보정하여 시뮬레이션에서 생성된 데이터를 실제 로봇동작에 적용하여야 한다.

Fig. 7과 같이 중심을 왼쪽으로 이동하고 다리를 들었을 경우 양 다리의 골반 피치 각은 골반 관절 이하 부분의 하중과 역추에이터 내부의 백래쉬로 인해 안으로 모이게 된다. 이를 측정하여 추정하는 보정 계수 식을 유도하였다.

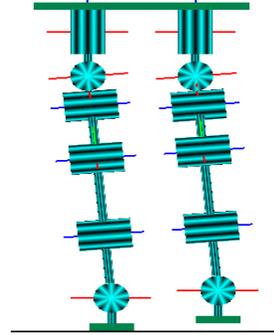


Fig. 7 Backlash of joints when one leg is lifted

오른 다리의 롤 각 보정 계수 c 는

$$c = \frac{a}{b} \tag{22}$$

여기서 b 는 Fig. 7의 오른다리의 초기 골반 roll의 입력 각이고 a 는 오른다리의 골반 roll부분의 각을 지면과 평행하도록 더 입력한 각이다.

왼 다리의 롤 각 보정 계수 f 는

$$f = \frac{d}{e} \tag{23}$$

여기서 d 는 왼다리의 초기 골반 roll의 입력 각이고 e 는 왼다리의 골반 roll부분의 각을 지면과 평행하도록 더 입력한 각이다. 본 연구에서는 각 다리의 보정계수를 시뮬레이터에서 제어 입력 시에 반영하도록 적용하였다.

4.3 로봇의 보행 시뮬레이션

본 연구에서 시뮬레이터에 사용된 로봇의 모델은 Fig. 8과 같은 다리 12자유도와 상체4자유도를 갖는 소형 이족보행로봇이다. 로봇의 중량은 2.1(kg)이고, 전체 높이는 25(cm)이다. 또한 두

발 사이의 거리는 6(cm)이고, 각 관절사이의 거리는 Table 3에 표시하였다. 개발한 시뮬레이터의 성능검증을 위하여 횡보행의 시뮬레이션을 하고 그 결과를 나타내었다. 횡보행의 5가지 동작순서는 Fig. 9와 같다. Fig. 9의 다섯 가지의 동작은 Fig. 10 (a)부터 (e)까지를 나타낸다. 좌면의 각 단계별 동작에 따라 생성된 시뮬레이터의 화면은 Fig. 10과 같고 화면의 우면은 우보행 시의 좌우 다리 및 팔 관절의 각도와 다리 사이의 간격을 표시하고 좌면에는 이때의 로봇 형태를 나타내고 있다. 이의 하단에는 ZMP의 상태를 그림으로 나타내도록 구성하였다. 행한 시뮬레이션에 따라 발생한 양 다리의 관절각 데이터는 Fig. 11과 같이 보기 쉽게 그림으로 표현하였다. 여기서 실선은 우측 다리의 관절각에 대한 데이터이고 점선은 좌측 다리의 관절각에 대한 것들이다. 시뮬레이션은 한 주기의 횡보행에 대한 것으로 x축은 시간을 나타내며 단위는 10^{-2} (s)로 한 걸음에 1.2(s)가 걸리도록 시뮬레이션 하였다. 여기서 구한 데이터는 실제 로봇으로 보내어지고 이에 따라 이족로봇이 보행하도록 시스템을 구성하였다.



Fig. 8 Actual model of the simulator

Table 3 Properties of the robot

	Leg					
	Foot (roll)	Ankle (pitch)	Knee (pitch)	Pelvis (pitch)	Pelvis (roll)	Pelvis (yaw)
Link	1	2	3	4	5	6
Length	1.8cm	5.9cm	6.2cm	6.1cm	3.6cm	1.7cm
Motor	RC servo (11.2kg · cm)					
voltage	7.2V					

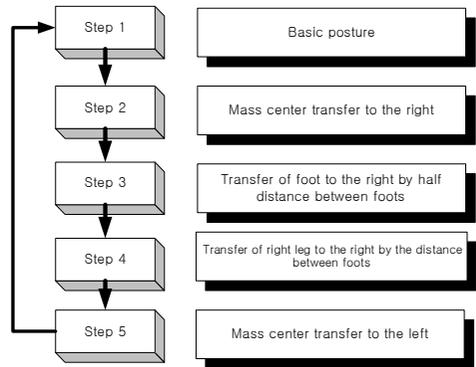
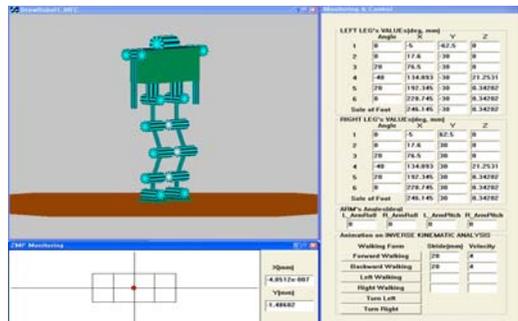
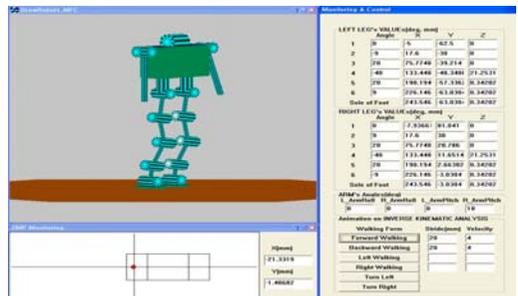


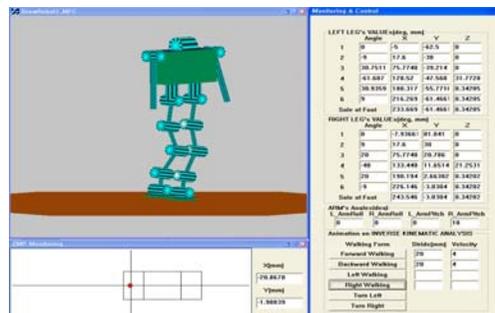
Fig. 9 Steps of the side walking motion



(a) Step 1 of side walking

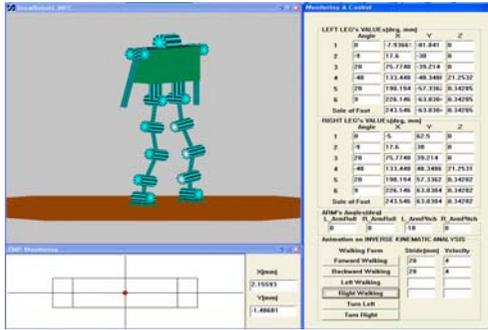


(b) Step 2 of side walking

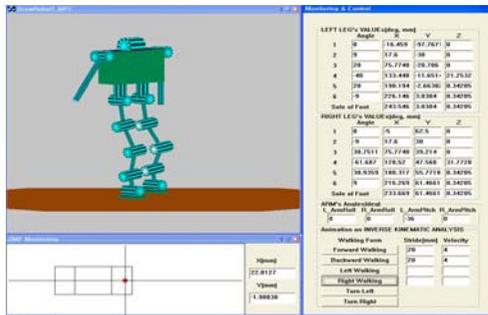


(c) Step 3 of side walking

Fig. 10 Stages of right side walking

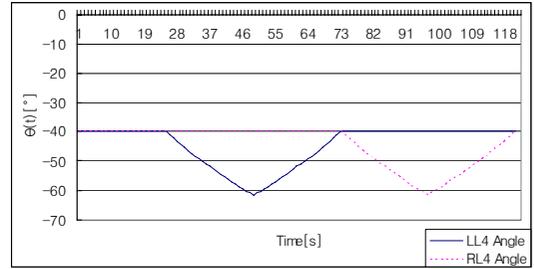


(d) Step 4 of side walking

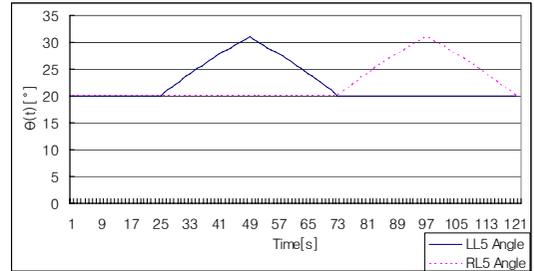


(e) Step 5 of side walking

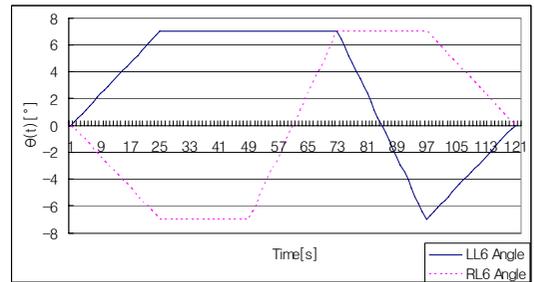
Fig. 10 To be continued



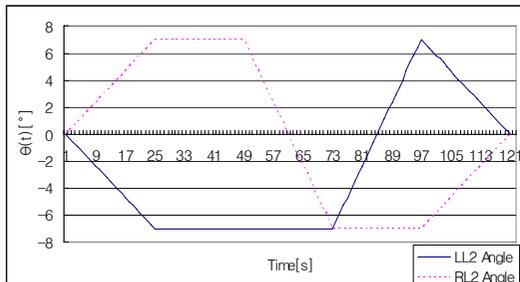
(c) Trajectory of knee joint for pitch motion



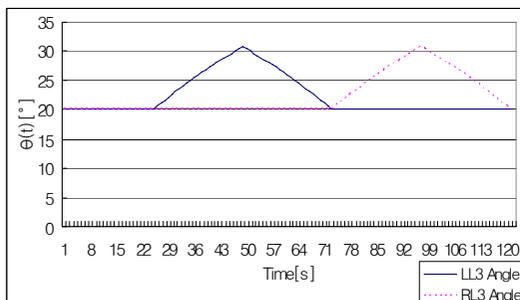
(d) Trajectory of ankle joint for pitch motion



(e) Trajectory of ankle joint for roll motion



(a) Trajectory of pelvic joint for roll motion



(b) Trajectory of pelvic joint for pitch motion

Fig. 11 Generated joint angle data from simulator

Fig. 11 To be continued

5. 결 론

본 논문에서는 인간의 다리구조와 유사한 12자유도의 다리를 갖는 이족보행로봇의 횡보행 동작 시뮬레이터를 개발하였다. 이를 위하여 로봇의 기구학 및 동역학 해석과 이를 바탕으로 한 ZMP 해석을 수행하였다. 또한, 인간과 유사한 동작을 만들기 위해 횡보행이 가지는 단계와 주기를 결정하고 안정한 보행을 위하여 새로운 관절각의 궤적을 제안하였다.

기구학, 동역학, 새로운 안정한 보행 경로 알고리즘 및 ZMP 안정도를 포함하는 보행 관절각 생

성을 위해 OpenGL 라이브러리를 이용한 시뮬레이터를 개발하였고 여기에 실제 횡보행 시에 발생하는 관절각의 보정계수를 고안하여 적용하였다. 우보행시 로봇의 관절 궤적의 데이터들을 생성하고 ZMP를 표현하는 개발 시뮬레이터의 시뮬레이션 데이터를 실제 제작한 로봇에 적용하여 로봇이 성공적으로 보행함을 확인하였다. 이때 횡보행 시에 발생하는 관절각의 보정계수를 실험을 통해 구하여 적용하여 보다 안정한 보행을 수행함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] M. Vukobratovic, A. A. Frank, and D. Juricic. *On the Stability of Biped Locomotion*. Proc. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME-17, No.1, pp. 25-36, 1970.
- [2] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, I. Kato. *The Realization of Dynamic Walking by The Biped Walking Robot WL-10RD*. Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 3, No. 4, pp.325-336, 1985.
- [3] F. Gubina, H. Hemami., R. B. McGhee. *On the Dynamic Stability of Biped Locomotion*. IEEE trans. on Biomd. Engineering, Vol. BME-21, pp.102-108, 1974.
- [4] T. T. lee and J. Liao. *Trajectory Planning and Control of α -link Biped Robot*. IEEE Robotics and Automation, pp. 820-823, 1988.
- [5] J. Furusho, A. Sano. *Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped*. Int. J. Robot. Res., Vol.9, No.2, pp.83-98, 1990.
- [6] S. H. Lim and J. G. Kim. *Biped Locomotion with Mechanical Compliance*. Korea Robotics and Automation Workshop Conference, pp.21-25, 1992.
- [7] Kawamura S. et al. *Realization of Biped Locomotion by Motion Pattern Learning*. Journal of Robot Society of Japan Vol.3, No.3, pp.177-180, 1985.
- [8] K.Ohnishi, M.Shibata & T.Murakami. *Motion Control for Advanced Mechatronics*. IEEE.ASME Trans. On Mechatronics, Vol.1, No.1, pp. 56-67, 1996
- [9] C. L. Shih. *Analysis of the Dynamics of a Biped Robot with Seven Degrees of Freedom*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3008-3013, 1996.
- [10] Hirai, K., et al. 1998. *The development of Honda humanoid robot*. Proceedings of ICRA 2:1321-1326.
- [11] M. Vukobratovic and D. Juricic, "Contribution to the Synthesis of Biped Gait," IEEE trans. on Bio-Medical Engineering, Vol. BME-16, No. 1, pp. 1-6, 1969.
- [12] Qiang Huang, et al, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," IEEE trans. on Robotics and Automation, Vol. 17, No.3 pp. 280-289, 2001.
- [13] A. Takanishi, et al., "The Realization of Dynamic Walking Robot WL-10RD," Proc. Int. Conf. Advanced Robotics, pp. 459-466, 1985.
- [14] C.L. Shin, et al., "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single-Support Phase," Proc. of ICRA, pp. 1646-1652, 1990.
- [15] Qiang Huang, et al, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," IEEE trans. on Robotics and Automation,

- Vol. 17, No.3 pp. 280-289, 2001.
- [16] Ichiro Kato. *Development of Waseda Robot*. Humanoid Robotics Institute, Waseda University, 2000.
- [17] J. Pratt and G. Pratt. *Exploiting natural dynamics in the control of a planar bipedal walking robot*. Proceedings of the Thirty-Sixth Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, pp. 739-748, 1998.
- [18] Pratt, Jerry, Pratt, Gill 1999. *Exploiting Natural Dynamics in the Control of a 3D Bipedal Walking Simulation*. Proceedings of the International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR99), Portsmouth, UK, September 1999.
- [19] Stéphane Mojon. *Realization of a Physic Simulation for a Biped Robot*. Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), School of Computer and Communication Sciences, 27th of June 2003.
- [20] Joon Ng. *An Anthropomorphic Bipedal Robot*. Centre for Intelligent Information Processing Systems Department of Electrical/Electronic Engineering. The University of Western Australia. Final Year Project Report 1998.
- [21] Elliot Nicholls. *Bipedal Dynamic Walking in Robotics*. The University of Western Australia Department of Electrical and Electronic Engineering. October 26, 1998.
- [22] Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi. *Waseda Biped Humanoid Robots Realizing Human-like Motion*. Waseda University Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University. IEEE 2000.
- [23] M.W. Spong, M. Vidyasagar, John Wiley & Sons, "Robot Dynamics and Control," 1989.
- [24] K. Erbaturo, A. Okazaki, K. Obiya, T. Takahashi, A. Kawamura, "A study on the zero moment point measurement for biped walking robots", Int. Workshop on Advanced Motion Control, pp.431-436, July 2002.
- [25] Richard S. Wright JR, and Michael Sweet. *OpenGL Superbible*, The Waite Group, 1996.

저 자 소 개



최형식(崔炯植)

1986년 미국 University of South Carolina 기계공학과에서 석사, North Carolina State University 기계 및 항공공학과 박사로 협조로봇의 제어, 보행로봇 개발, 수중 운동체 시스템 연구 및 공장자동화에 대한 연구를 수행



전창훈(全昌勳)

1980년생, 2002 한국해양대학교 기계시스템공학과 졸업(학사), 2004 동 대학원 기계공학과 졸업(석사), 다사로봇2004.8~2007.5, 아이레보 2007.5~2007.11, 2007.12~현재 로보라이프 대표



강진일(姜眞一)

1982년생, 2008년 한국해양대학교 기계시스템공학과 졸업(학사), 2008. 3~현재 동대학원 기계공학과 재학(석사)