

이족 보행 로봇을 위한 자동 모션 제너레이터 및 시뮬레이터

최형식*(한국해양대 기계공학과), 전창훈(한국해양대 기계공학과), 오주환(한국해양대 기계공학과)

Automatic Motion Generator and Simulator for Biped Walking Robots

H. S. Choi(Mecha. Eng. Dept. KMU), C. H. Jeon(Mechanical Eng. Dept., KMU)

J. H. Oh(Mechanical Eng. Dept., KMU)

ABSTRACT

For stable walking of various biped walking robots(BWR), we need to know the kinematics, dynamics and the Zero Moment of Point(ZMP) which are not easy to analyze analytically. In this reason, we developed a simulation program for BWRs composed of 4 degree-of-freedom upper-part body and 12 degree-of-freedom lower-part of the body. To operate the motion simulator for analyzing the kinematics and dynamics of BWES, inputs for the distance between legs, base angle, choice of walking type, gaits, and walking velocity are necessary. As a result, if stability condition is satisfied by the simulation, angle data for each actuator are generated automatically, and the data are transmitted to BWRS and then, they are actuated by the motion data. Finally, we validate the performance of the proposed motion simulator by applying it to a constructed small sized BWR.

Key Words : Biped walking robots(이족 보행 로봇), Motion simulator(동작 시뮬레이터), Automatic motion generator(자동 모션 제너레이터), Zero moment of point(안정점)

1. 서론

최근, 이족 보행 로봇에 대한 관심이 증대됨에 따라 여러 형태의 로봇들이 선보이고 있다. 이족 보행 로봇은 인간 생활에 보다 가까이 접근하여, 단순히 인간과 유사한 보행만이 아닌 인간의 주변 환경인 계단이나 문턱 같은 바퀴형 로봇이 이동하기 어려운 환경에서도 이동이 가능하기 때문에 인간 생활 환경에 적용이 용이한 장점이 있다.

그러나 아직도 인간과 같은 보행 동작을 구현하기에는 위험적, 경제적 또는 시간적인 어려움이 따르며 이를 해결하기 위해 이족보행 로봇의 관절부에 구동기를 장착하여 보행 동작을 분석하는 하드웨어적인 방법보다 PC 기반으로 한 3D 이족보행 로봇 시뮬레이터를 개발하고 이를 이용하는 방법들이 많이 제시되고 있다.

또한 소형으로 이족보행 로봇을 제작하여 보행 패턴이나 안정성을 실험하는 연구도 많이 병행이 되고 있다. 1998 년 호주의 Western 대학에서 개발하여 불규칙적인 지형을 보행하기 위한 실험 [1] 과 동적인 보행을 연구하기 위한 실험 [2], 2000 년 와세다 대학에서 개발된 시뮬레이터 Walk Master-2 를

이용하여 시뮬레이션 데이터를 적용한 WABIAN-R II [3] 등이 있다.

이러한 이족 보행 로봇은 기본적으로 이족 보행 자체에 불안정성을 내포하고 있어 시스템의 해석과 안정도 제어가 어렵고, 보행 중 균형 운동에 대한 수학적 모델을 정의하기 어려운 한계성이 존재한다. 또한 로봇이 완벽한 동작을 하기 위해서는 고성능의 액추에이터 및 로봇을 구성하는 부품들의 정밀한 가공이 필요하며 이는 제작 비용의 증가 및 제작 기간의 증가로 이어진다.

본 논문에서는 하체에 12 자유도와 상체 4 자유도를 갖는 이족 보행 로봇의 동작 시뮬레이터를 개발하였다. 액추에이터 간의 거리와 기본각을 입력으로 제공하고 전, 후방 및 측방과 회전 보행에 대한 선택과 보폭 및 보행 속도를 입력함으로써 기구학 및 동역학 해석과 안정점에 대한 시뮬레이션이 된다. 그 결과로 안정도가 판별되면, 자동으로 각 액추에이터의 각 데이터가 생성되며, 그 데이터는 실시간으로 로봇에 전송되고, 로봇은 그에 따른 동작 수행한다.

2. 이족 보행 로봇의 동역학 및 기구학 해석

2.1 순기구학 해석

로봇의 관절 변수가 주어졌을 때, 말단장치의 위치와 방향을 결정하기 위한 이족 보행 로봇 하체의 순기구학 방정식은 Fig. 1 과 같이 Denavit - Hartenberg (D-H) 규약에 의해 정의된 좌표계를 이용하여 유도한다. D-H 규약은 4 개의 기본 변환 행렬의 곱으로 각 관절의 동차 변환 행렬 A_i 로 표현하는 것이다.

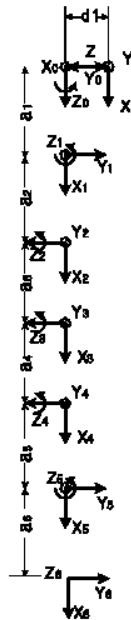


Fig. 1 D-H coordinate of Biped Walking Robot
Table1 Parameters of Link for the lower part of Biped Walking Robot

링크	a_i	α_i	d_i	\ominus_i
1	a_1	90°	$-d_1$	\ominus_1
2	a_2	90°	0	\ominus_2
3	a_3	0	0	\ominus_3
4	a_4	0	0	\ominus_4
5	a_5	-90°	0	\ominus_5
6	a_6	0	0	\ominus_6

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. Table 1 은 개발된 이족 보행 로봇 하체의 링크 매개변수를 나타낸다.

A 행렬들은 D-H 규약으로부터 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 C 는 cos, S 는 sin 을 나타낸다.

골반부의 yaw 축은 회전 보행시에만 종속 동작 하므로 따라서 $\theta_1 = 0$ 라는 가정을 하면 변환 행렬 T 행렬은 위의 행렬들에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$T_0^6 = A_1A_2A_3A_4A_5A_6 = \begin{bmatrix} C\theta_2C\theta_{34}C\theta_6 - S\theta_2S\theta_6 & -C\theta_2C\theta_{34}S\theta_6 - S\theta_2C\theta_6 & C\theta_2S\theta_{345} & P_x \\ S\theta_2C\theta_{34}C\theta_6 + C\theta_2S\theta_6 & -S\theta_2C\theta_{34}S\theta_6 + C\theta_2C\theta_6 & -S\theta_2S\theta_{345} & P_y \\ S\theta_{345}C\theta_6 & -S\theta_{345}S\theta_6 & C\theta_{45} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

*여기서 θ_6 는 $\theta_3 + \theta_4 + \theta_5$ 를 나타낸다.

위 식에서의 말단 장치의 위치 벡터 p 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_2(a_3C\theta_3 + a_4C\theta_{34} + C\theta_{346}(a_5 + a_6C\theta_6) + a_2) - S\theta_2a_6S\theta_6 + a_1 \\ S\theta_2(a_3C\theta_3 + a_4C\theta_{34} + C\theta_{346}(a_5 + a_6C\theta_6) + a_2) + C\theta_2a_6S\theta_6 \\ a_3S\theta_3 + a_4S\theta_{34} + S\theta_{346}(a_5 + a_6C\theta_6) - d_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2. 기하형태를 이용한 역기구학 해석

앞에서 개발된 이족 보행 로봇 하체의 말단 장치의 위치와 방향을 관절 변수로 나타내는 방법을 설명하였다. 이번에는 기하학적 해석으로 로봇 하체의 말단 장치의 위치와 방향에서 관절 변수를 역으로 찾아낸다.

관절 변수를 기하학적 해석으로 구하기 위해서는 이족 보행 로봇의 하체를 좌표 평면에서의 투영을 해야한다. Fig 2 는 관절 변수 θ_2, θ_6 를 구하기 위해 xz 평면으로 투영을 한 것을 나타낸다. Fig.2 는 관절 변수 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 를 구하기 위해 xy 평면으로 투영을 한 것을 나타낸다.

먼저, 말단 장치인 발바닥이 바닥면의 Z 축과 평

형하기 위해서 다음 식이 구속 조건이 된다.

$$\theta_2 + \theta_6 = 0 \quad (3)$$

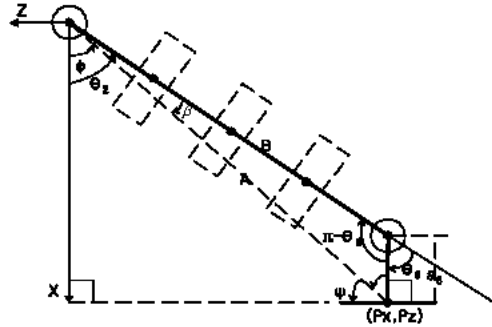


Fig. 2 XZ dimension projective figure

선분 A 의 길이와 ψ, ϕ 의 작은 피타고라스의 정리에 의해

$$A = \sqrt{(P_x - a_1)^2 + (P_z - d_1)^2}, \quad (4)$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{P_x - a_1}{P_z - d_1}\right) \quad (5)$$

$$\phi = 90^\circ - \psi \quad (6)$$

선분 a_6 와 A 와 그 끼인각을 알고 있으므로 제 2 코사인법칙에 의해 선분 B 와 β 는

$$B^2 = a_6^2 + A^2 - 2a_6A \cos(90^\circ - \psi) \quad (7)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 - a_6^2}{2AB}\right) \quad (8)$$

위 식으로부터 θ_2 는 다음과 같이 구한다.

$$\theta_2 = \beta + \phi = 90^\circ - \arctan\left(\frac{P_x - a_1}{P_z - d_1}\right) + \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 - a_6^2}{2AB}\right) \quad (9)$$

또한, 구속 조건으로부터 θ_6 은 다음과 같이 구한다.

$$\theta_6 = -\theta_2 = -\beta - \phi \quad (10)$$

말단 장치인 발바닥이 바닥면의 Y 축과 평행하기 위해서 다음 식이 구속 조건이 된다.

$$\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 = 0 \quad (11)$$

선분 C 의 길이는 피타고라스의 정리에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$C = \sqrt{P_y^2 + (P_x - a_1 - a_2 \cos \theta_2 - a_5 \cos \theta_2 - a_6)^2} \quad (12)$$

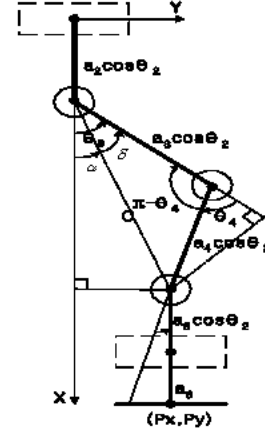


Fig. 3 XY dimension projective figure

α 의 작은 다음과 같이 구해진다.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P_x - a_1 - a_2 \cos \theta_2 - a_5 \cos \theta_2 - a_6}{P_y}\right) \quad (13)$$

선분 $a_4 \cos \theta_2$ 와 C, $a_3 \cos \theta_2$ 세변의 길이를 알고 있으므로 제 2 코사인법칙에 의해 각 $\delta, \theta_3, \theta_4$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\delta = \arccos\left(\frac{(a_3 \cos \theta_2)^2 + C^2 - (a_4 \cos \theta_2)^2}{2a_3 C \cos \theta_2}\right) \quad (14)$$

여기서 $\theta_3 = \alpha + \delta$

$$\theta_4 = \pi - \arccos\left(\frac{(a_3 \cos \theta_2)^2 - C^2 + (a_4 \cos \theta_2)^2}{2a_3 \cos \theta_2 a_4 \cos \theta_2}\right) \quad (15)$$

여기서 구한 θ_3 과 θ_4 그리고 구속조건으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_5 = \arccos\left(\frac{(a_3 \cos \theta_2)^2 - C^2 + (a_4 \cos \theta_2)^2}{2a_3 \cos \theta_2 a_4 \cos \theta_2}\right) - \alpha - \delta - \pi \quad (16)$$

3. 보행 및 동작 알고리즘

이족 보행 로봇은 근본적으로 불안정한 시스템이므로 안정도를 고려한 여러가지 보행 알고리즘에 대한 연구가 진행중이다. 본 논문에서는 각 다리가 6 자유도인 12 자유도 하체를 갖는 이족 보행 로봇의 역기구학 계산을 통해 얻어진 각 관절의 변위를 이용해 시뮬레이터 상에서 가속도를 구하고, 입력된 각 링크의 무게 및 위치 값을 이용하여 구한 동

역학의 무게중심인 안정점(ZMP)을 이용하여 로봇의 안정도를 판별한다. 또한 로봇의 안정적이고 원활한 보행을 위해 양 팔의 4자유도를 이용하였다.

보행 및 동작 알고리즘은 다양하게 고안될 수 있으나, 본 논문에서는 중심 이동과 안정도에 중점을 둔 보행 및 동작 알고리즘을 제안한다.

3.1 보행 및 동작의 안정도

보행 로봇의 안정도를 판단하는 중요한 기준으로 안정점이 있다. 안정점은 이족 보행 로봇의 안정도를 판단하는 중요한 기준이 된다. 로봇이 넘어지지 않기 위해서는 안정점 위치가 항상 로봇이 지면을 지지하는 면적의 내부에 있어야 한다. 또한 안정점의 위치가 지지면적의 중앙에 위치할수록 로봇이 안정하게 된다. 만약 안정점이 지지면적의 밖에 있게 되면 지지면적의 가장자리에는 모멘트가 존재하게 되어 로봇이 회전력을 받아 넘어지게 된다. 따라서 로봇의 안정점을 계산하거나 측정함으로써 로봇의 안정도를 판별할 수 있고, 이를 이용하여 로봇의 안정도를 개선하는데 활용할 수 있다.

Fig. 4는 안정점의 개념을 보여주고 있다. 로봇의 발바닥에 분포하는 지면으로부터 터의 반력은 임의의 점 D 에서 수직항력 N 과 모멘트 M 의 합력으로 대체될 수 있다. 여기서 안정점은 모멘트 M 이 0이 되는 점이다. 수직항력 N 은 중력방향이며, 모멘트 M 은 지면과 평행한 방향으로 작용한다.

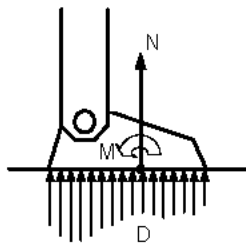


Fig. 4 Idea of ZMP

Fig. 5의 굵은 실선은 보행로봇의 직진 보행시 이상적인 로봇의 안정점 경로이며 이는 실제 인간의 보행에서의 안정점 경로와 유사한 형태를 가진다.[3] 가는 실선으로 그려진 사각형은 로봇의 발바닥에 해당하는 영역이고, 점선은 발바닥의 가장 자리를 연결한 지지 면적의 가장자리이다. 즉, 안정점이 이 지지 면적 내에 있으면서 양발 사이를 이동하면서 로봇이 앞으로 나아가게 된다. 이 때 안정점의 위치가 지지면적의 중앙에 가까울 경우 로봇이 안정하게 된다.

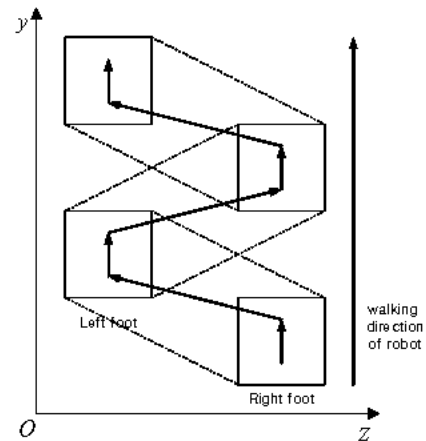


Fig. 5 Path of stability for biped robot

본 논문에서는 로봇의 안정적인 보행을 위해서 시뮬레이션 시 안정점을 벗어나는 동작 시 벗어나음을 알려주어 동작에 문제점이 존재함을 보인다.

다관절 시스템에서의 안정점의 위치는 달랑베르의 법칙 (D'Alembert's Principle)을 이용해 구할 수 있다.[3]

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

여기서 r_i 와 P 는 각각 링크 i 의 무게중심의 위치와 안정점의 위치이며 n 은 링크의 수이다. m_i 는 링크 i 의 질량, I_i 는 관성모멘트, α_i 는 각 가속도, ω_i 는 각속도이다. g 는 중력가속도이며 M_z 는 ZMP에서 모멘트의 성분이며 이 값은 무시된다. 안정점의 위치는 이 식을 P 의 성분인 x 와 y 에 대해 풀면 구할 수 있다. 이 식은 각 링크가 바닥에서의 모멘트에 영향을 준다는 사실을 보여준다. 여기서 질량 m_i 는 각 링크의 무게중심에 집중되어 있다고 가정하면 이 식은 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 안정점의 좌표는 다음의 식과 같이 주어진다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_i m_i(\ddot{z}_i - g)x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_i m_i(\ddot{z}_i - g)}, \quad (19)(20)$$

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

Fig 7 와 같이 양 다리의 발바닥 중심점을 기준으로 발바닥과 발목 roll 축 사이를 하나의 링크, 발목 roll 과 발목 pitch 사이를 하나의 링크, 발목 pitch 와 무릎 pitch 사이를 하나의 링크, 무릎 pitch 와 골반 pitch 사이를 하나의 링크, 골반 pitch 에서 골반 roll 축 사이를 하나의 링크, 골반 roll 축과 허리 중심까지를 하나의 링크, 팔을 하나의 링크로 계산하여 총 14 개의 무게중심 점의 가속도와 위치값을 계산하였으며 이 때의 중력가속도 $g=9.8m/s^2$ 적용하였다.

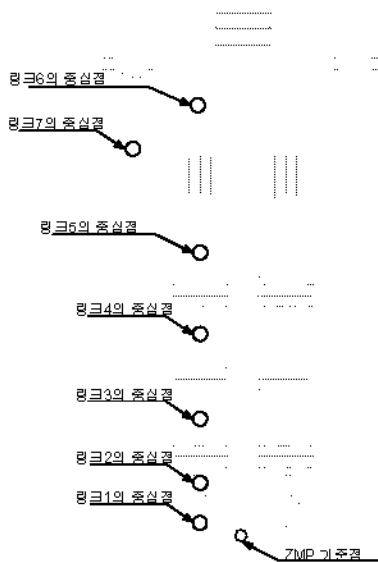


Fig. 7 The position of links by measured ZMP.

3.2 안정도 증가를 위한 가감속 궤적 보간 알고리즘

보행을 구현하기 위해서 로봇 발끝의 경로를 설정하고 이를 일정 시간마다 분할하여 각 시간에 따른 발목의 이동 경로를 만든다. 시간에 따른 발목의 위치마다 각 조인트의 각도를 역기구학을 이용해 찾아냄으로써 로봇의 보행 패턴을 생성할 수 있다. 만약 발을 들어올리는 순간과 지면에 접촉하는 순간에 가감속을 하지 않으면 앞으로 내딛는 발로 땅을 찰 수 있으므로 보행동작이 불안정해질 수 있다. 가감속 제어시의 발목의 경로는 발을 들어올리는 순간부터 최고점까지 가속하다 일정시간 정속하고 최고점까지 감속하며 최고점에서 발을 내릴 때까지 감속하다가 일정 시간 정속하고 다시 최저점까지 감속하는 모습으로 구성된다.

궤적의 형태를 여러 형태의 식으로 나타낼 수 있으나 여기서는 다음과 같은 궤적함수를 제안하였다.

가속시 시간에 따른 x 좌표와 y 좌표 사이의 관계식은 다음과 같다.

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

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

(21) (22)

여기서 y_f 는 궤적 최종 이동 거리, t_f 는 궤적 최종 이동 시간, V 는 주어진 속도.

위 식을 일정 시간간격으로 샘플링하여 발목의 궤적을 그리면 fig. 8 과 같이 나타난다.

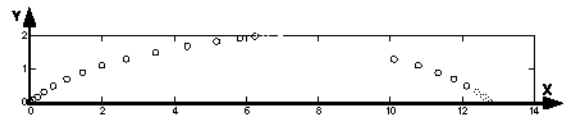


Fig. 8 The trace of ankle.

4. 시뮬레이터의 구성

이족보행 로봇을 위한 3D 시뮬레이터는 Fig. 9 과 같은 구조를 가지며 Windows 환경에서 동작하고 Microsoft Visual C++와 3D 그래픽을 구현하기 위해서 Silicon Graphics 사의 Open Graphics Library (OpenGL) [4] 를 이용한다. 이족보행 로봇의 3D 모델은 Actuator, 링크, 지면(Ground)등을 Rendering 하는 각각의 모듈들의 집합으로 구성된다.

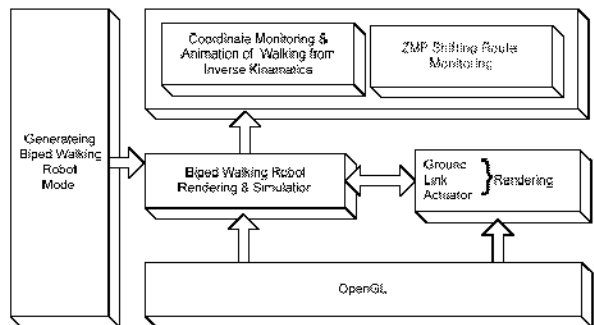


Fig. 9 The organization of 3D Simulator

4.1 시뮬레이터의 설계

이족보행 로봇을 위한 3D 시뮬레이터 화면의 구성은 Fig. 10 과 같이 입력 창과 Fig 11 과 같이 메인 창으로 구성된다. 입력창은 다음과 같은 기능을 가진다.

3D 로봇모델 생성 패널(Generate ROBOT Model)을 구성하며 로봇의 역학적인 해석과 3D Rendering 에 필요한 로봇의 Specification 인 각 액추에이터의 위치와 각 링크의 무게값을 입력 하고 로봇의 각진 후진 보행, 좌우 보행, 좌우 회전 보행 모션이 시뮬레이션 될 속도와 보폭을 입력한다.

특히사항으로는 시뮬레이터가 실행 중인 가운데에도 새로운 로봇 모델의 생성을 가능하게 한다.

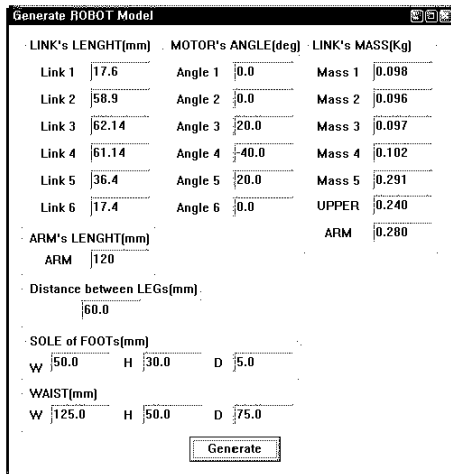


Fig. 10 GUI for input data of simulator

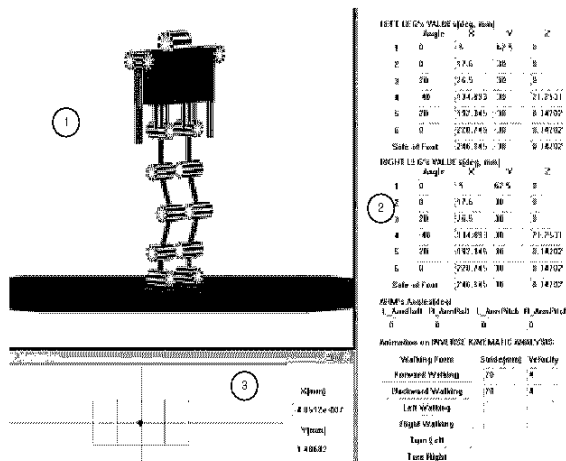


Fig. 11 The main GUI of Simulator

5. 결론

본 논문에서는 소형 이족 보행 로봇의 동작 생성 안정도의 평가, 그리고 궤적에 대한 로봇 시뮬레이션을 위해 OpenGL 라이브러리를 이용한 시뮬레이터를 개발하였다. 또한 생성된 데이터를 실험에 사용되는 로봇의 제어기에 전달하기 위한 데이터 값으로 변환하고 신호를 체계화하는 동작 제네레이터를 개발하였다. 입력된 실제 로봇의 각 액추에이터의 질량과 위치를 데이터 베이스화하고 이를 활용한 기구학 해석을 수행하여 동작에 필요한 시뮬레이션을 수행하였다.

안전한 보행을 위해 ZMP 분석을 하였으며 인간과 유사한 동작을 만들기 위해 전후진, 좌우, 좌우회전 보행이 가지는 단계와 주기를 결정하여 각 관절각의 궤적을 생성하였다.

참고문헌

1. 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.
2. Elliot Nicholls. Bipedal Dynamic Walking in Robotics. The University of Western Australia Department of Electrical and Electronic Engineering. October 26, 1998.
3. Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi. Waseda Biped Humanoid Robots Realizing Human-like Motion. Department of Mechanical Engineering School of Science and Engineering, Waseda University Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University. IEEE 2000.
4. K. Erbatur, A. Okazaki, K. Obiya, T. Takahashi, A. Kawamura, "A study on the zero moment point measurement for biped walking robots", International Workshop on Advanced Motion Control, pp.431-436, July 2002.