

이족 보행 로봇을 위한 3 차원 모의 실험기의 개발

Development of 3D Simulator for Biped Robot

°김민수*, 이보희*, 김진걸*

*인하대학교 자동화공학과 (Tel: 860-7384; Fax : 863-4386; E-mail : minsu@dragon.inha.ac.kr)

Abstracts It is necessary to develop the simulator for the test of stability and torque before the walking experiment of biped robot, because a robot may be damaged in an actual experiment. This thesis deals with the development of three-dimensional simulator for improving efficiency and safety during development and experimentation.

The simulator is composed of three parts - solving dynamics, rendering pictures and communicating with the robot. In the first part, the D-H parameter and parameter of links can be loaded from the file and edited in the program. The results are obtained by using the Newton-Euler method and are stored in the file. Through the above process, the proper length of link and driving force can be found by using simulator before designing the robot. The second part is organized so that the user can easily see a specific value or a portion he wants by setting viewing parameters interactively. A robot is also shown as a shaded rendering picture in this part. In the last part, the simulator sends each desired angle of joints to the robot controller and each real angle of joints is taken from the controller and passed to the second part.

The safety of the experiment is improved by driving the robot after checking whether the robot can be actuatable or not and whether the ZMP is located within the sole of the foot or not for a specific gait. The state of the robot can be easily grasped by showing the shaded rendering picture which displays the position of the ZMP, the driving force and the shape of robot.

Keywords biped, ZMP, robot, simulator, OpenGL.

1. 서론

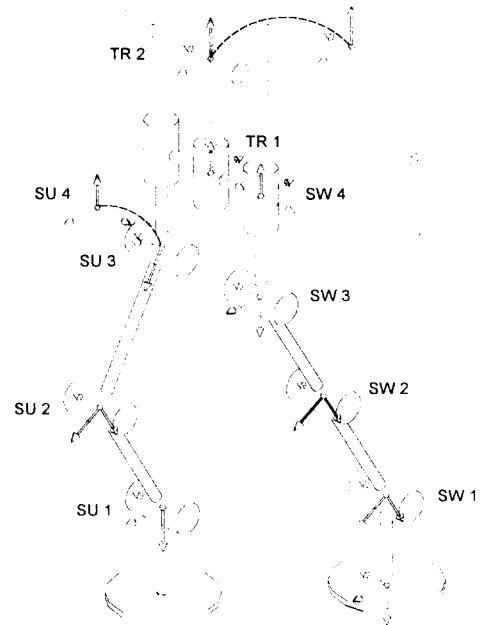
산업 현장에서 쓰이고 있는 이동 로봇의 대부분은 바퀴를 이용하고 있다. 그러나 작업 환경이 열악한 곳에서는 바퀴를 이용한 이동 로봇에는 한계가 있으므로 다족 보행 로봇의 개발 필요성이 증가하고 있다. 그 중에서도 작업 환경에 따라 보폭, 보행 속도, 자세를 제어할 수 있는 이족 보행 로봇은 미래의 산업적, 군사적 목적을 위해 중요한 연구 과제이다.

이족 보행 로봇의 개발 과정에서 적당한 링크의 길이와 구동기의 동력을 결정하는 것은 매우 중요하다. 또한 보행 실험 도중 로봇의 전복으로 인한 몸체의 파손은 가장 피해야 할 것 중 하나이다. 때문에 모의 실험기의 개발을 통한 균형점¹⁾과 구동력의 검증 및 설계의 합당성 확인은 필수적이다. 본 논문에서는 주어진 궤적을 넘어지지 않고 수행하는 것을 확인하기 위해 Windows NT 환경에서 수행되는 모의 실험 프로그램을 개발하였으며 실험자가 각각의 데이터를 자세히 읽어 보지 않고 고서도 한 눈에 상태를 확인할 수 있도록 로봇의 균형점, 토크, 자세를 3 차원 솔리드 모델로 한 화면에 표시하였다. 4 장에서는 본 연구실에서 제작중인 이족 보행 로봇에 대하여 모의 실험을 통하여 임의의 궤적의 추종 가능성을 알아본다.

2. IWR의 모델 및 궤적 계획

2.1 IWR의 모델

모의 실험 대상은 본 연구실에서 개발 중인 이족 보행 로봇이며 크게 지지각, 유각, 균형추로 구성되어 있다. 다리부는



• 그림 1. 좌표계 시스템
• Fig 1. Coordinate System

진행 방향 변경을 위한 롤 관절, 보폭 및 몸체의 높이를 조절하기 위한 2 개의 피치 관절 그리고 경사 지형에 대비하고 몸체의 각도를 조정하기 위한 발목의 피치 관절로 구성되어 있다.

균형추는 로봇트 전체의 균형점을 걸음새와 무관하게 제어 하기 위하여 롤 관절과 직선 운동 관절로 구성되어 있다. 해석을 편리하게 하기 위하여 Denavit-Hartenberg 의 링크 표시법을 사용하여 링크 구조를 표현하였다. 그림 1은 로봇트의 링크 구조와 각 관절의 좌표계 시스템을 보여준다. 여기서 SU n 은 지지각의 관절, SW n 은 유각의 관절 그리고 TR n 은 균형추의 관절을 의미한다. 표 1은 그림 1과 같은 좌표계에 대한 지지각, 유각, 균형추의 D-H 파라미터이다. 여기서 4열은 SU 4와 TR 1 사이의 관계를 나타내는 파라미터이고 4'열은 SU4와 SW 4사이의 관계를 나타내는 파라미터이다.

표 1. D-H 변수 값
Table 1. D-H parameter

	$\theta_1(^{\circ})$	$D_1(m)$	$a_1(m)$	$\alpha_1(^{\circ})$	비고
1	θ_1	0	-0.2	0	
2	θ_2	0	-0.2	0	
3	$90+\theta_3$	0	0	-90	
4	$90+\theta_4$	-0.193	0.125	0	균형추
4'	$90+\theta_4$	-0.193	0.25	0	유각
5	$-90+\theta_5$	0.193	0	90	
6	$-90+\theta_6$	0	0.2	0	
7	θ_7	0	0.2	0	
8	θ_8	0	0.14	0	
9	$-90+\theta_9$	0.161	0	90	
10	0	0	0	θ_{10}	

2.2 궤적 계획

경유점으로 부터 지지 다리, 이동 다리, 몸통의 궤적을 구한다. 궤적 방정식은 경유점에서 가속도가 연속이 되도록 하기 위하여 5차 방정식으로 표현하였으며 이때의 시간에 대한 함수는 식 (1)과 같다. 식 (2)는 6개의 구속 조건과 6개의 미지수를 갖는 연립방정식이다.

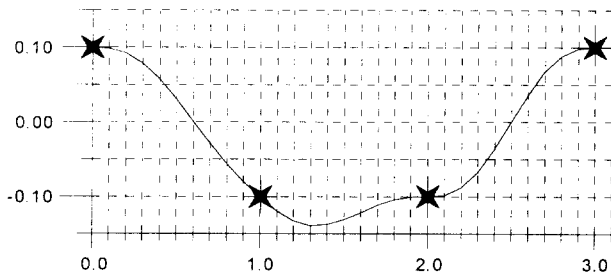


그림 2. 궤적 계획 예

Fig 2. The example of trajectory planning.

$$\lambda(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= a_0 \\ \lambda_f &= a_0 + a_1t_f + a_2t_f^2 + a_3t_f^3 + a_4t_f^4 + a_5t_f^5 \\ \dot{\lambda}_0 &= a_1 \\ \dot{\lambda}_f &= a_1 + 2a_2t_f + 3a_3t_f^2 + 4a_4t_f^3 + 5a_5t_f^4 \\ \ddot{\lambda}_0 &= 2a_2 \\ \ddot{\lambda}_f &= 2a_2 + 6a_3t_f + 12a_4t_f^2 + 20a_5t_f^3 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)와 같은 구속 조건을 갖는 방정식의 해는 식 (3)과 같

다. 식 (2)에서 시작점과 끝점의 속도는 0으로 경유점의 속도는 두 점 사이의 기울기로 하고 모든 경유점에서의 가속도는 0으로 놓았을 때 \blacklozenge 표로 표시된 4개의 경유점을 갖는 궤적은 그림 2로 표현된다.

$$\begin{aligned} a_0 &= \lambda_0 \\ a_1 &= \dot{\lambda}_0 \\ a_2 &= \frac{\ddot{\lambda}_0}{2} \\ a_3 &= \frac{20\lambda_f - 20\lambda_0 - (8\dot{\lambda}_f + 12\dot{\lambda}_0)t_f - (3\ddot{\lambda}_0 - \ddot{\lambda}_f)t_f^2}{2t_f^3} \\ a_4 &= \frac{30\lambda_0 - 30\lambda_f + (14\dot{\lambda}_f + 16\dot{\lambda}_0)t_f + (3\ddot{\lambda}_0 - 2\ddot{\lambda}_f)t_f^2}{2t_f^4} \\ a_5 &= \frac{12\dot{\lambda}_f - 12\dot{\lambda}_0 - (6\ddot{\lambda}_f + 6\ddot{\lambda}_0)t_f - (\ddot{\lambda}_0 - \ddot{\lambda}_f)t_f^2}{2t_f^5} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 동특성 해석

본 논문에서는 로봇트를 개방형 링크 구조로 모델링 하였다. 즉 유각과 균형추에 의한 힘을 지지각에 작용하는 외력으로 고려하여 토크를 구하였다. 여기서 구한 토크는 주어진 궤적을 따라 움직이기 위해서 얼마 만큼의 구동력이 필요한지를 알 수 있도록 한다.

구동력을 구하는데는 여러 방법이 있으나 컴퓨터를 이용하여 반복적으로 구하기 위하여 뉴턴-오일러 방법을 사용하였다. 뉴턴-오일러 방법은 크게 순방향 방정식(Forward equations)과 역방향 방정식(Backward equations)으로 나뉘는데 순방향 방정식에서는 질량 중심에서의 가속도, 선가속도, 각가속도, 각속도 등을 구하고 역방향 방정식에서는 힘, 모멘트 그리고 토크를 구한다.

$$\tau_i = \begin{pmatrix} {}^i R_0 n_i \\ {}^i R_0 f_i \end{pmatrix}^T ({}^i R_{i-1} Z_0) \quad (4)$$

식 (4)에서 τ_i 는 토크, n_i 는 모멘트, f_i 는 힘, R_i 은 변환 행렬 그리고 Z_0 는 $(0, 0, 1)^T$ 를 의미하며 회전 관절과 직선 관절에 대하여 각각 토크를 구하는 식이다.

2.4 균형점

로봇트가 보행을 할 때에는 중력, 반발력, 관성 힘들이 작용한다. D'Alambert 원리에 의하면 위의 모든 힘들이 균형을 이룰 때 로봇트의 동작은 안정적이다. 즉, 로봇트에 작용하는 모든 힘과 모멘트의 합은 각각 0이어야 한다. 로봇트에 작용하는 모든 관성력과 중력의 합(F_c), 그리고 모든 관성 모멘트의 합(M_c)은 각각 식 (5)와 같다.¹⁶⁾

$$\begin{aligned} F_c &= \sum_{i=0}^n -m_i (v_i + g) \\ M_c &= \sum_{i=0}^n -\frac{d}{dt} (I_i \Omega_i) \end{aligned} \quad (5)$$

V_i : 순간 속도
 Ω_i : 순간 절대 각속도
 I_i : 관성 모멘트
 m_i : 질량

이때 모멘트의 합이 0인 점, 균형점(Zero Moment Point), 은

Z 값이 0 인 평면에 위치한다고 생각한다. 그리고 정의에 의해 X 축과 Y 축에 작용하는 모멘트는 0 이므로 XY 평면에서의 값을 구하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} y' F_z' - 0 F_y' + 0 &= \sum_{i=1}^n (m_i y_i (-z_i - g) + m_i z_i y_i) - \sum_{i=1}^n M_{ix} \\ 0 F_x' + x' F_z' + 0 &= \sum_{i=1}^n (m_i x_i (z_i + g) - m_i z_i x_i) - \sum_{i=1}^n M_{iy} \\ x' F_y' - y' F_x' + M_z &= \sum_{i=1}^n (-m_i x_i y_i + m_i y_i x_i) - \sum_{i=1}^n M_{iz} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 F_i' 은 균형점($x', y', 0$)에서의 힘, M_i' 은 균형점($x', y', 0$)에서의 모멘트, n 은 링크의 개수, (x_i, y_i, z_i) 는 고정된 기준 좌표계로부터 각 좌표계의 질량 중심까지의 벡터이다. 위 식을 정리하면 균형점의 좌표 ($x', y', 0$)는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} x' &= \frac{\sum_{i=1}^n (m_i x_i (z_i + g) - m_i z_i x_i) - \sum_{i=1}^n M_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i + g)} \\ y' &= \frac{\sum_{i=1}^n (m_i y_i (z_i + g) - m_i z_i y_i) + \sum_{i=1}^n M_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i + g)} \end{aligned} \quad (7)$$

3. 모의 실험기의 구조

모의 실험기는 Windows NT 3.5 이상의 버전에서 수행 가능하며 크게 3개 부분(동특성 해석부, 직렬 통신부, 렌더링부)으로 구성되어 있다. 모의 실험기의 전체 구성도는 그림 3과 같다.

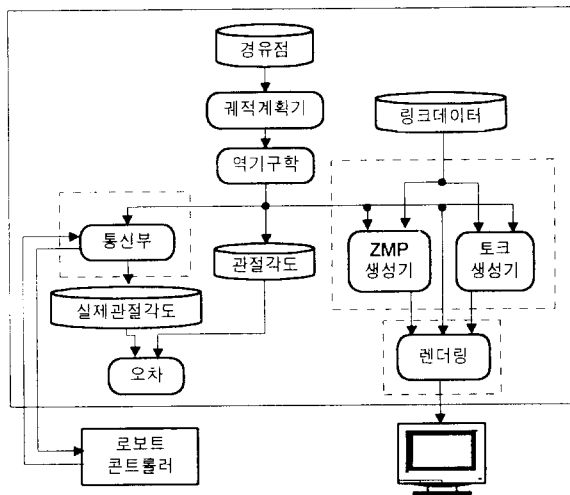


그림 3. 모의 실험기의 구조.
Fig 3. The structure of simulator.

동특성 해석부는 관절의 각도와 링크의 물리적 데이터들을 입력 받아 뉴턴 오일러 방정식과 균형점 방정식으로부터 토크와 균형점을 구한다. 이때 물리적 데이터 즉, 관절의 길이, 질량, 질량 중심 및 관성 모멘트를 임의로 프로그램 내에서 편집할 수 있도록 함으로써 초기 개발 시에 적절한 구동기를 선택할 수 있다. 그림 4의 좌측 하단부에 그 한 예가 있다. 여기서 구한 각 값은 로봇의 전

복 여부를 결정하는 정보로서 렌더링부에 넘겨져서 사용자에게 보여지게 되며 모든 것은 오프 라인으로 처리된다.

렌더링부는 균형점과 토크는 동특성 해석부로부터, 관절 각도는 전 처리부로부터 받아서 실제 로봇의 모습과 흡사하게 3차원 형상으로 표현한다. 균형점은 Z축과 평행한 직선으로 표현함으로써 그 위치를 어느 관점에서나 쉽게 파악할 수 있으며 또한 발바닥을 벗어 나면 붉은 색으로 표시함으로써 정확한 위치를 보지 않더라도 보행 중 넘어지는지의 여부를 확인할 수 있다. 또한 토크는 그 관절에서 낼 수 있는 최대 구동력에 가까워질수록 붉은색을 띠고 0에 가까워질수록 푸른색을 띠게 함으로써 부하의 양을 쉽게 알아 볼 수 있다. 그리고 관찰 각도, 확대율, 상하좌우 변위 등을 인터랙티브하게 선택함으로써 실험자가 원하는 특정한 값이나 부분을 보기 쉽도록 하였다. 그림 4의 좌측 하단부에 그 한 예가 있다. 본 모의 실험기에서는 그래픽 라이브러리의 표준으로 자리 잡아가고 있는 OpenGL을 이용함으로써 차후에 빠른 그래픽 처리를 위하여 IrixSM를 연결하여 사용할 경우 이식성이 높도록 하였다.^[16]

마지막으로 직렬 통신부는 위에서 나온 결과로부터 넘어지지 않는 것을 확인한 후에 직접 로봇을 구동할 수 있도록 하였다. 또한 그림 4와 같이 프로그램 내에서 통신 포트, 보오 레이트 그리고 명령 펄스 값을 보내는 주기를 바꿀 수 있도록 하였다. 로봇에게 각 관절 값을 보내는 주기는 하드웨어 타이머를 사용함으로써 정확도를 기했으며 로봇으로부터 각 관절의 실제 각도를 피드백 받아 화일에 저장함으로써 보행 실험 후 오차를 쉽게 구한다.

4. 보행 모의 실험

그림 5와 같은 궤적에 대하여 모의 실험을 수행했을 경우 각 관절의 토크 곡선은 그림 6과 같다. 그림 6(a)를 보면 지지각의 토크 변화량이 아주 적음을 알 수 있다. 이는 몸통의 보상으로 인해 유각의 지지각에 대한 영향이 많이 감소되었기 때문이다. 이것으로부터 균형추의 궤적이 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 또한 지지각에 미치는 힘은 중력이 대부분임을 알 수 있다. 그림 6(a)를 보면 SU2가 가장 큰 토크를 필요로 한다. 그러나 그림 4의 우측 하단부를 보면 SU1 관절이 진홍색이므로 SU1이 궤적을 추종할 수 없음을 알 수 있다. 즉, 그림 5와 같은 궤적을 추종하기 위해 SU1에 필요한 토크가 그 관절의 최대 토크를 넘어선 것이다. 위의 결과로부터 그림 5와 같은 궤적을 추종하기 위해서는 발목의 관절의 기어비를 높이거나 구동력이 더 높은 모터로 교체해야 함을 알 수 있다. 그림 7은 균형점의 궤적을 나타내었는데 균형점이 발바닥 내에 위치하므로 토크에 문제가 없다면 넘어 지지 않는다. 실선 그래프는 그림 5의 궤적을 샘플링 주기 0.1초로 하여 4초 동안 수행토록 하였을 때의 그래프이며 점선 그래프는 같은 궤적을 12초 동안 수행토록 하였을 때의 그래프이다. 그림으로부터 수행 시간을 늘릴수록 그래프가 부드러운 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 모의 실험기로 인하여 이족 보행 로봇의 개발 과정에서 시행착오 없이 정확한 몸체의 설계를 할 수 있도록 하고 실험 과정에서는 각 관절의 부하 양과 균형점의 위치로부터 로봇의 안전성을 확인한 후에 보행 토크 함으로써 몸체의 파손없이 안전하게 보행 실험을 할 수 있음을 보였다.

참고 문헌

- [1] J. J. Craig, "Introduction to robotics and control", Addison-Wesley, 1989.
- [2] K. S. Fu, R.C. Gonzalez, and C.S.G. Lee, "Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligence", McGraw-Hill, 1987.
- [3] J. Neider, T. Davis, M. Woo, "OpenGL Programming Guide: The official guide to learning OpenGL, Release 1", Addison-Wesley, 1992.
- [4] OpenGL Architecture Review Board, "OpenGL Reference Manual: The official reference document for OpenGL, Release 1", Addison Wesley, 1992.
- [5] SGI, "Programming on Silicon Graphics Systems : Overview", Silicon Graphics, Inc. 1994
- [6] C.L. Shih, Y. Z. Li, S. Churng, T. T. Lee, and W. A. Gruver, "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single-Support Phase.", *IEEE*, PP 1646 - 1652, 1990.
- [7] 김진걸, 임선호, "이족 보행 로봇 IWR 을 위한 균형점 제어 알고리즘.", *전기 학회 논문집*, PP 1365 - 1371, 1995.

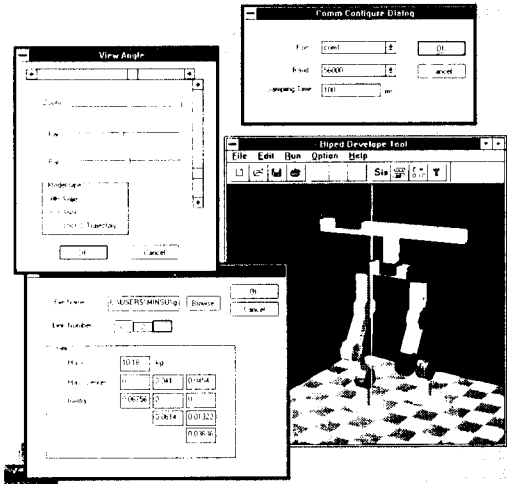


그림 4. 모의 실험기의 렌더링 화면
Fig 4. The rendering screen of simulator

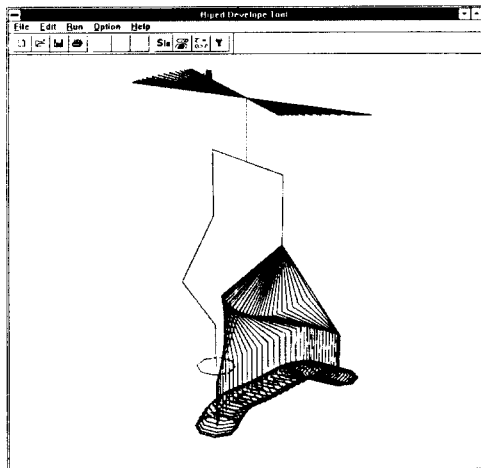
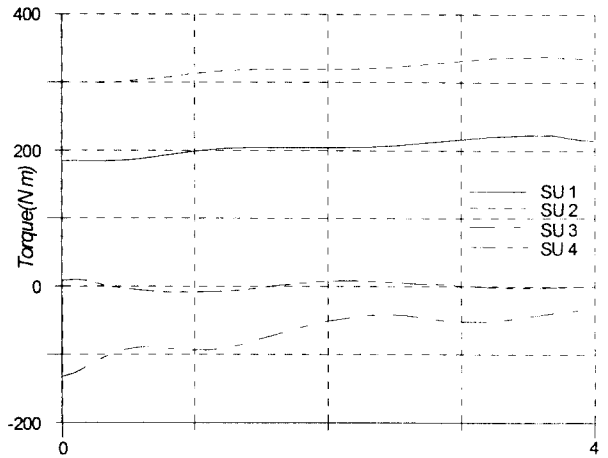
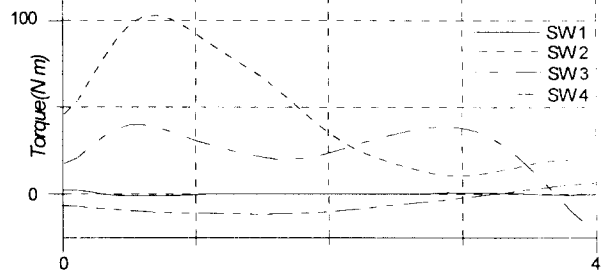


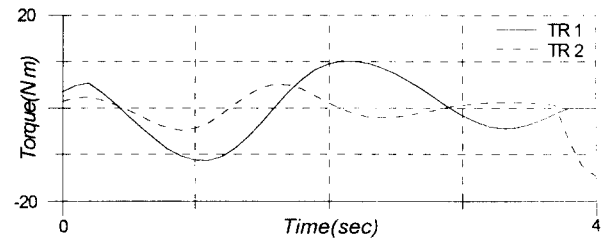
그림 5. 스틱 다이어그램
Fig 5. Stick diagram



(a) The torque of support leg



(b) The torque of swing leg



(c) The torque of trunk

그림 6. 토크 곡선
Fig 6. Torque curve

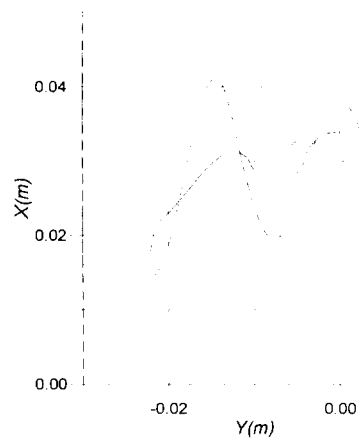


그림 7. ZMP 궤적.
Fig 7. The trajectory of ZMP