

이족 보행로봇의 3차원 모의실험기 개발

노경곤*(as900515@hotmail.com), 김진걸**(john@inha.ac.kr), 허욱열**(uyhuh@kosef.re.kr)
 *인하대학교 자동화공학과, **인하대학교 전자전기공학부

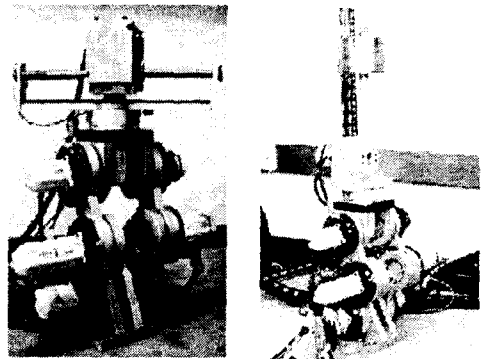
Development of 3-Dimensional Simulator for a Biped Robot

Kyung-Kon Noh*, Jin-Geol Kim**, Uk-Youl Huh**

*Dept. of Industrial Automation Inha Univ., **School of Electronics and Electrical Eng. Inha Univ.

Abstract - This study is concerned with development of 3-Dimensional simulator of a biped robot that has a prismatic balancing weight or a revolute balancing weight. The dynamic stability equation of a biped robot which have a prismatic balancing weight is conditional linear but a walking robot's stability equation with a revolute balancing weight is nonlinear. To get a stable gait of a biped robot, stabilization equations with ZMP (Zero Moment Point) are modeled as non-homogeneous second order differential equations for each balancing weight type. A trajectory of balancing weight can be directly calculated with the FDM (Finite Difference Method) solution of the linearized differential equation. In this paper, the 3-Dimensional graphic simulator is programmed to get and calculate the desired ZMP and the actual ZMP. Walking of 4 steps was simulated and verified. This balancing system will be applied to a biped humanoid robot, which consist legs and upper body, at future work.

그림 1의 (a)는 원통형 균형추를 장착한 이족 보행로봇 IWR-III의 실제 사진이며, (b)는 원구형 균형추를 장착한 IWR-IV를 나타낸다. 본 연구는 각 균형추에 따른 실제 물성 치에 기반을 두어 보행 안정성을 모의실험 한다.



(a) Prismatic balancing weight (b) Revolute balancing weight

그림 1. 각 균형추 형태에 따른 이족 보행로봇

1. 서 론

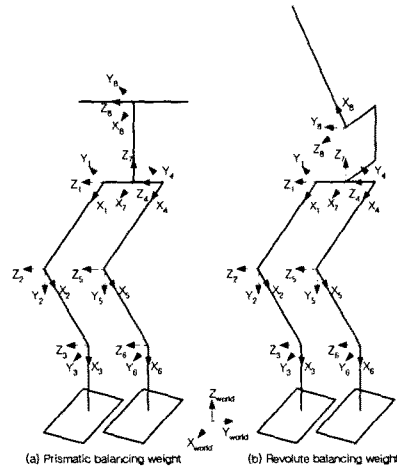
초기 보행로봇에 관한 연구는 안정된 보행을 구현하기 위한 연구에서 시작됐으며[1], 이후 다양한 환경에 적용 가능할 수 있고 인간과 유사한 동작을 구현하는 연구까지 계속되고 있다[2]-[6]. 또한 인간을 보조하고 대신할 수 있는 다양하고 복잡한 환경에 대처 가능한 인간과 유사한 관절 형태를 가지는 로봇의 걸음새와 동작에 관한 연구가 진행되고 있다.[7][8]

본 연구는 자체 제작한 이족 보행로봇에 안정된 보행을 구현하기 위하여 다리 관절의 걸음새에 따라 별도의 독립된 원통형 균형추와 원구형 균형추 각각에 대하여 균형점(ZMP)에 의거하여 균형추 제어 방식을 수학적으로 모델링 한다[9]. 이를 이용하여 이족 보행로봇의 균형점이 안정 영역 내부에 위치하도록 균형점의 움직임을 결정하고 균형점 검정 방식으로 이족 보행로봇의 안정도를 판별한다. 또한 각 균형추의 움직임을 결정하기 위한 모의실험기의 작성과 모의실험을 통해 각 균형추 형태에 따른 이족 보행로봇의 안정성을 비교 및 분석한다.

2. 이족 보행로봇 시스템

이족 보행로봇의 전체 시스템 구성은 양쪽 다리와 균형관절로 구성된 8자유도의 이족 보행로봇과 각 관절을 구동시키기 위한 AC 서보 모터 및 드라이브, 8축 동시 제어기, 모의실험기 그리고 제어 프로그램으로 구성된다. 제어 시스템은 PC Windows 운영체제에 기반을 둔 MMC (Multi Motion Controller)가 사용했으며 모의실험기와 서보 제어 프로그램으로 구성된다.

원통형 균형추 이족 보행로봇의 중량은 약 45kg이고 높이는 550mm이다. 또한 원통형 균형추 이족 보행로봇의 중량은 약 50kg이고 높이는 750mm이다. 그림 2의 (a)는 원통형 균형추를 장착한 이족 보행로봇의 각 관절 좌표계를 나타내며, (b)는 원구형 균형추에 관한 좌표계를 나타낸다. 전체 좌표계는 보행 진행방향이 X축을 나타내며, 이에 수직인 좌우방향이 Y축 그리고 높이 방향이 Z축을 나타낸다.



(a) Prismatic balancing weight (b) Revolute balancing weight

그림 2. 이족 보행로봇 시스템의 구성

3. 균형 방정식의 수학적 모델

이족보행로봇의 걸음새 분석과 안정도 해석을 위한 동역학적 해석은 D'Alembert 원리에 의한 모멘트 운동 방정식을 정리하면 다음의 균형점 검증 방정식을 유도 할 수 있다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z) x_i - \sum_{i=0}^8 m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)}$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z) y_i - \sum_{i=0}^8 m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)} \quad (1)$$

식 (1)은 균형점 x_{ZMP} , y_{ZMP} 을 구하는 식으로 m_i 는 각 링크의 질량과 x_i , y_i , z_i 는 각 질점의 위치성분을 나타내며, \ddot{x}_i , \ddot{y}_i , \ddot{z}_i 은 각 질점의 가속도 성분이고 G_z 는 중력가속도를 나타낸다. 따라서 이를 이용하여 균형점의 XY-좌표 평면상의 위치와 이족보행로봇의 지지각으로 이루어진 다각형과의 상관관계로써 안정성을 관측 할 수 있다. 또한 식 (1)을 이용하여 균형추 m_0 의 X-방향, Y-방향 움직임을 다음과 같이 유도한다.

$$\ddot{x}_0(t) - \gamma(t)x_0(t) = \alpha(t)$$

$$\ddot{y}_0(t) - \gamma(t)y_0(t) = \beta(t)$$

$$\alpha(t) = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)(x_i - x_{ZMP}) - m_i \ddot{x}_i z_i}{m_0 z_0} \cdot \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)x_{ZMP}}{z_0}$$

$$\beta(t) = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)(y_i - y_{ZMP}) - m_i \ddot{y}_i z_i}{m_0 z_0} \cdot \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)y_{ZMP}}{z_0}$$

$$\gamma(t) = \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0}$$

식 (2)의 x_0 , y_0 , z_0 는 균형추의 위치 성분을 나타내며 \ddot{x}_0 , \ddot{y}_0 , \ddot{z}_0 는 가속도 성분을 나타낸다. 또한 x_{ZMP} , y_{ZMP} 는 목표 균형점을 나타낸다.

원통형 이족 보행로봇의 균형추 제어 방정식은 식 (2)의 $\gamma(t)$ 항이 상수로 나타나며, 원구형 균형추인 경우는 시변항의 형태를 가져서 식 (2)은 비선형 미분 방정식이다. 따라서 본 연구에서는 원통형 균형추와 원구형 균형추를 가지는 이족 보행로봇의 균형추 제어 방정식에 대하여 보행 안정성을 모의실험 한다. 모의실험은 유한차분법을 사용하여 식 (2)의 균형추 궤적을 구한다.

4. 모의실험

그림 3은 보행에 필요한 다리부의 경유점 데이터와 목표 균형점을 입력받아 이족 보행로봇의 걸음새를 생성하고 안정성을 검증하기 위한 모의실험기의 구조이다.

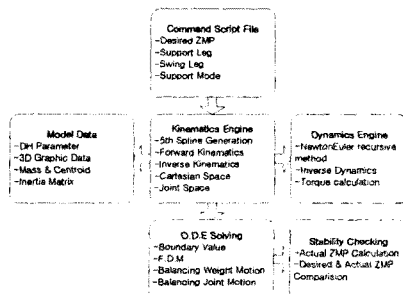


그림 3. 모의실험기의 구조

모의실험기는 양쪽 다리 궤적과 목표 균형점을 생성하고 이를 경계조건으로 균형추의 이차 미분 방정식의 해를 유한차분법으로 계산한다. 이에 따라 균형추의 운동을 결정하고 실제 균형점을 도출하여 이족 보행로봇 걸음새의 안정성을 판별한다.

원통형 균형추와 원구형 균형추를 각각 장착한 이족 보행로봇의 모의실험 프로그램은 C++로 작성되었으며 그림 4와 같다.

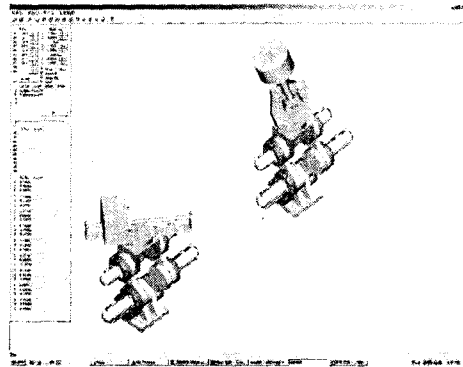


그림 4. 3차원 모의실험기

그림 4의 3차원 모의실험기는 OpenGL에 기반을 둔 3차원 그래픽을 구현하였으며, 각 관절의 위치, 속도, 가속도 및 토크(Torque) 값을 모의실험 할 수 있다. 또한 걸음새에 관한 경유점과 목표 균형점을 입력받아 각 균형추 형태에 따라 균형추의 동작 궤적을 도출한다. 그리고 이를 종합하여 실제 균형점의 궤적을 검증 방정식에 따라 안정 영역 내부에 존재하는지를 확인할 수 있다.

모의실험은 총 16초 동안 4보의 보행에 대해 실시한다. 단위보행은 4초간 1보이며 몸체는 0.14m, 다리는 0.28m 로서 모의실험에 입력된 양쪽 다리의 위치궤적은 그림 5와 같다. 그림 5에 나타난 바와 같이 양쪽 다리의 관절은 서로 유사한 형태를 가지며 시간에 대해 연속적인 궤적을 가진다.

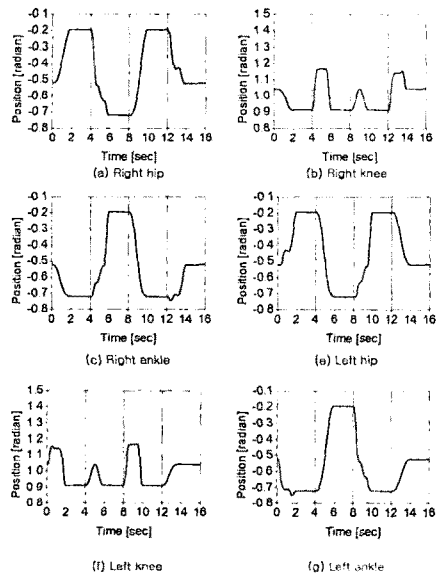


그림 5. 다리부 관절의 위치궤적

5. 결 론

본 연구는 기존 원통형 균형추를 가지는 이족 보행로봇과 인간과 유사한 형태를 지니는 원구형 균형추를 가지는 이족 보행로봇의 안정된 보행을 비교 및 분석하기 위한 모의실험기 제작을 연구하였다. 각 균형추에 따른 균형점 운동방정식을 유도하고 이를 3차원 모의실험기로서 구현하여 안정된 보행에 필요한 균형추의 궤적을 도출하고, 각 관절의 궤적과 실제 균형점의 궤적을 확인할 수 있었다. 또한 각 균형추 형태에 따른 실제 균형점의 궤적을 비교함으로써 유도된 균형점 운동방정식이 보행 안정성을 보장할 수 있음을 모의실험을 통해 검증할 수 있었다.

향후 모의 실험한 결과를 토대로 실제 이족 보행로봇에 적용하여 실험을 통해 검증하는 단계가 요구된다. 또한 본 연구를 통해 도출된 원통형 균형추를 인간형 보행로봇에 적용하여 보다 인간과 유사하고 다양한 보행에 응용이 요구된다. 그리고 유전 알고리즘과 같은 인공지능을 적용하여 시스템의 비선형 요소를 극복하는 연구가 향후 요구된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2003-000-10364-0) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Vukobratovic and J. Stepanenko, "Legged Locomotion Robot," Nikkan Kogyo Shinbunsha, 1975.
- [2] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki and 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] C. L. Shin, Y. Z. Li, S. Churng, T. T. Lee and W. A. Gruven, "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single Support Phase," IEEE, pp.1646-1650, 1990.
- [4] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, M. Takeya and I. Kato, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion," RoManSy 7:Proc, Seventh CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Eds. Hermes, Paris, pp. 68-79, 1990.
- [5] S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Tamiya, M. Inaba and H. Inoue, "Autobalancer: An online Dynamic Balance Compensation Scheme for Humanoid Robots," Proc. of Fourth Intl. Workshop on Algorithmic Foundations on Robotics (WAFR'00), pp. 79-89, 2000.
- [6] Katja D. Mombaur, Hans Georg Bock and Johannes P. Schloder, "Human-Like Actuated Walking that is Asymptotically Stable Without Feedback," Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 4128-4133, 2001.
- [7] K. K. Noh and J. G. Kim, "A Study on the Gait Analysis for Initial Posture of a Biped Robot," 대한전기학회 추계학술대회, 2001.
- [8] K. K. Noh, J. S. Kong and J. G. Kim, "A Study on the Gait Optimization of a Biped Robot," 대한전기학회 하계 학술대회, 2003.
- [9] S. H. Lim and J. G. Kim, "Development of Adaptive Gait Algorithm for IWR Biped Robot," KACC, pp. 113-118, 1993.

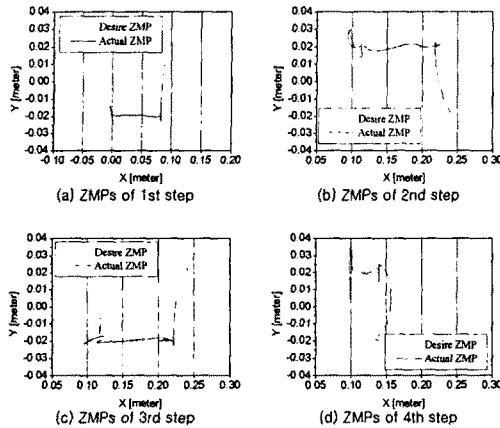


그림 6. 원통형 균형추의 목표 및 실제 균형점 궤적

그림 6은 원통형 균형추를 가지는 이족 보행로봇의 목표 균형점과 실제 균형점을 모의 실험한 결과이다. 각 단위보행은 2초간 한다리 지지상태와 2초간 두다리 지지상태로 구성된다. 목표 균형점은 보행 진행방향인 X축으로 2초간 직선으로 이동한 후 2초간 다음 지지다리로 이동한다. Y축은 보행에 수직인 방향을 나타낸다. 그림 6의 (a)와 (d)는 보행 시작과 종료 시점의 단위 보행을 나타내며 (b)와 (c)는 중간에 연속되는 보행을 나타낸다. 이는 반복적인 보행의 패턴을 위해 설계 되었다. 원통형 균형추의 각 단위보행은 그림 6에서 나타난 바와 같이 보행 시작점과 보행 종료 점에서 목표 균형점과 실제 균형점 간에 약 0.01m의 오차를 나타내고 있다. 이는 균형점 운동방정식의 1차 미분 항이 결여된 한정적 안정도 특성에 기인한다.

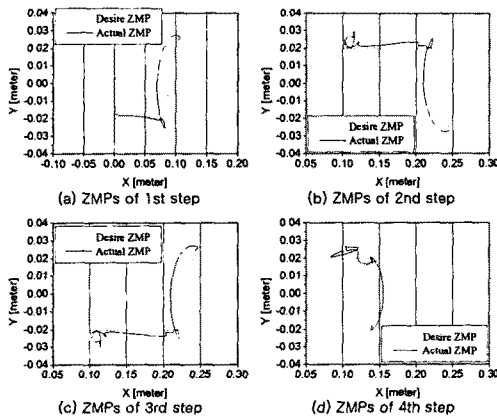


그림 7. 원구형 균형추의 목표 및 실제 균형점 궤적

그림 7은 원구형 균형추를 가지는 이족 보행로봇의 목표 균형점과 실제 균형점을 모의 실험한 결과이다. 그림 7에서 나타난 바와 같이 각 단위 보행의 경계조건, 즉 보행 시작시점과 종료 시점에서의 목표 균형점과 실제 균형점 간의 위치 오차가 발생한다. 이는 시스템 모델링 시 균형관절의 집중 질량의 위치가 역기구학 해석에 반영되지 않는 원인에 기인한다. 또한 목표 균형점과 실제 균형점 간의 경계조건에서의 오차도 원통형 균형추보다 증가 하였다. 이는 균형추의 회전운동으로 인한 비선형 항의 영향이 증가에서 원인을 찾을 수 있다. 그러나 한다리 지지상태에서의 목표 균형점에 대한 실제 균형점의 추종은 예측한 바와 같이 보행의 안정성을 확인할 수 있다.