렌치 시스템을 이용한 이족보행 로봇의 안정도 해석

임헌영*(고려대 대학원), 심재경(고려대 기계공학과), 황규혁(고려대 대학원)

Stability Analysis of a Biped Robot using Wrench System

H. Y. Lim*(Graduate School, Korea Univ.), J. K. Shim(Mechanical Eng. Dept., Korea Univ.)
K. H. Hwang(Graduate School, Korea Univ.)

ABSTRACT

Biped robot has better mobility than other mobile robot, but it is hard to maintain balance during walking. In order to maintain balance, stability analysis is a key point for a biped robot. The zero moment point analysis has been used most in stability analysis. In this paper, we propose different method of stability analysis using wrench system. It is possible to generate a wrench system by applying a force along an axis in space and simultaneously applying a moment about the same axis. Wrench system is equivalent to a force and moment applied along the same axis. We compare the result of wrench system analysis with that of zero moment analysis in biped robot stability using simulation program.

Key Words : Biped robot(이족보행 로봇), Stability analysis (안정도 해석), ZMP (Zero Moment Point), Stable walking(안정된 보행), Balance maintenance (균형 유지), Wrench system (렌치 시스템)

1. 서론

초기의 로봇은 고정된 위치에서 단순한 반복 작업을 수행하는 산업용 로봇이 대부분이었으나, 점차 인간과 동일 공간에서 생활하며 인간을 도울 수 있는 서비스로봇이 관심을 받고 있다. 인간의 기능을 대신하며 도움을 주기 위해서는 이동성 확보가 필수적이다. 이족보행 로봇은 다른 종류의 이동로봇보다 인간의 생활 공간에서 이동하기가 적합하지만 안정된 보행을 유지하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이족보행 로봇이 다양한 환경에서 안정된 보행을 유지하기 위해서는 안정도 해석과 이를 기초로 한 제어가 필수적이다. 두발로 보행하는데 있어, 가장 중요한 점은 로봇이 넘어지지 않게 균형을 유지하는 것이다. 보행의 안정도 해석방법에는 로봇의 질량에 의해 발생하는 중력만을 고려해서 질량중심의 위치로 안정도를 판별하는 정적해석과 중력뿐만 아니라 로봇 자체의 움직임에 의한 힘까지 고려한 동적해석이 있다. Vukobratovic[1]는 동적 안정도 해석을 위해 ZMP(Zero Moment Point)를 처음으로 제안하였고 그 후 많은 연구에서 안정도 해석 방법으로 이용되고 있다. ZMP 는 중력, 가속도, 외력 등에 의해 발생하는 모멘트의 합이 영이 되는 지점이다. Takanishi[2]등은 안정된 보행을 위해 ZMP 를 기초로 한 보행 제어 알고리즘을 제안하였다. 이후 ZMP 를 궤적으로 생성해서 빠르고 안정된 보행이 가능하도록 하는 많은 연구가 진행되었다. Huang[3] 등은 안정된 보행을 하기 위해 ZMP 가 위치해야 할 발바닥내의 안정영역에 대해 소개하였다. Goswami[4]는 이족보행 로봇 전체가 아닌 발과 지면과의 관계로 안정도를 해석하였으며 발의 회전을 고려한 FRI(Foot Rotation Indicator) point 라는 해석방법을 제시하였다. 이족보행 로봇이 계단, 불규칙한 지면 등 여러 개의 평면에서 보행을 할 때 ZMP 로는 정의할 수 없는 단점이 있기 때문에 Kogami[5]는 enhanced ZMP 를, Sugihara[6]는 virtual horizontal plane 을 제안하였지만 물리적인 의미가 불확실하다는 평가를 받고 있다. ZMP 가 소개된지 35 년이 지났지만, 아직도 그 정의에 대한 논의는 계속되고 있다. Waldron[7], Murray[8]등은 렌치 시스템을 이용해서 로봇손이 물체을 잡는데 필요한 힘과 모멘트를 계산 하였다.

본 논문에서는 로봇과 지면과의 힘과 모멘트 관계는 로봇손이 물체을 잡는 관계와 유사하다고 생

각하고 렌치 시스템을 이용하여 렌치 축과 지면이 만나는 점을 안정점으로 계산한 후 ZMP 해석을 통해 얻어진 궤적과 비교해 보았다. 계산 결과를 검증하기 위해 시뮬레이션 프로그램을 작성하였고 실제 실험전에 최적화된 힙, 밭, ZMP 궤적을 만들어 안정도 해석을 하기 때문에 시간과 비용을 줄일 수 있도록 하였다.

2. 렌치 시스템 해석

2.1 스크류/렌치 시스템

공간에서 강체의 운동은 한 축에 대한 회전운동과 그 축에 대한 직선운동으로 표현할 수가 있는데 이를 스크류 운동이라 하고 그 축을 스크류 축이라고 한다. 스크류축에 대한 기구학적 해석방법은 동역학적 해석 방법과 유사한 관계가 있다. 공간운동 해석에서의 회전과 직선운동은 동역학적 해석에서의 힘과 모멘트와 유사하게 해석될 수 있다[9]. Fig.1 은 점 O 에서의 등가 힘-모멘트계를 렌치 시스템으로 변환하는 과정을 표현했다. 점 O 에서의 등가 힘과 모멘트는 서로 수직하지 않고, 0 이 아닌 힘 $\mathbf{F}$ 과 모멘트 $\mathbf{M}$ 로 구성된다[Fig. 1(a)]. 이를 동일축의 힘과 모멘트로 표현하기 위해서 모멘트벡터 $\mathbf{M}$ 을 $\mathbf{F}$ 방향의 $\mathbf{M}_1$ 성분과 $\mathbf{F}$ 에 수직한 평면내의 성분 $\mathbf{M}_2$ 로 분해하여 얻은 다른 두 모멘트벡터로 대치시킬 수 있다[Fig. 1(b)]. 이와 같이 모멘트벡터 $\mathbf{M}_2$ 와 힘 $\mathbf{F}$ 는 새로운 작용선을 따라 작용하는 단일 힘 $\mathbf{F}$ 로 대치시킬 수 있다. 따라서, 본래의 역계는 $\mathbf{F}$ 와 모멘트벡터 $\mathbf{M}_1$ 으로[Fig. 1(c)], 즉 $\mathbf{F}$ 와 수직한 평면내에서 작용하는 모멘트 $\mathbf{M}_1$ 으로 변환 될 수 있다. 이 특별한 경우의 힘과 모멘트계는 미는 힘과 비틀림의 조합이 공구 렌치에 의해 발생되는 것과 같게 되므로 렌치(wrench)라 한다. 이때 $\mathbf{F}$ 의 작용선을 렌치의 축이라 하고 $\lambda = M_1 / F$ 을 렌치의 피치라 한다. 단 F, M_1 은 각각 $\mathbf{F}, \mathbf{M}_1$ 의 스칼라 값이다. 따라서 렌치는 동일 직선상의 벡터, 즉 힘 $\mathbf{F}$ 과 모멘트벡터 $\mathbf{M}_1$ 으로 구성된다.

$$\mathbf{M}_1 = \lambda \mathbf{F} \tag{1}$$

$\mathbf{M}$ 을 $\mathbf{F}$ 의 작용선상에 투영시킨 결과와 이를 이용한 피치는 다음과 같다.

$$M_1 = \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{M}}{F} \tag{2}$$

$$\lambda = \frac{M_1}{F} = \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{M}}{F^2} \tag{3}$$

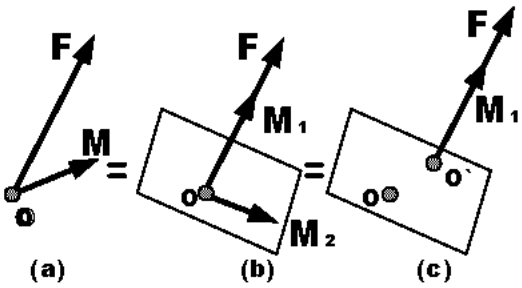

Fig. 1 Transformation to the wrench system

2.2 렌치 시스템을 이용한 해석

이족 보행 로봇이 보행을 할 때 각 링크의 움직임에 의한 중력, 반력, 관성력이 발생한다. 뉴튼-오일러 방법를 이용해서 로봇의 움직임에 의해 발생하는 힘과 모멘트를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{F}_{robot} = \sum_i (-\mathbf{F}_i - m_i \mathbf{g}) = \sum_i -m_i (\dot{\mathbf{v}}_i + \mathbf{g})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{robot} &= \sum_i -\mathbf{M}_i - \mathbf{r}_i \times m_i (\dot{\mathbf{v}}_i + \mathbf{g}) \\ &= \sum_i -\mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i - \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{r}_i \times m_i (\dot{\mathbf{v}}_i + \mathbf{g}) \\ &\quad (i = number\ of\ link) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $\dot{\mathbf{v}}$ 은 링크의 질량 중심에서 가속도이고 $\mathbf{g}$ 는 중력 가속도이다. 또한, $\mathbf{M}_i$ 는 관성모멘트이고 $\mathbf{r}_i$ 는 링크 질량중심의 위치벡터이다.

달랑베르 원리를 적용하면 이족보행 로봇에 작용하는 힘과 모멘트는 0 이 되고 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{robot} + \mathbf{F}_{ground} &= 0 \\ \mathbf{M}_{robot} + \mathbf{M}_{ground} &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, $\mathbf{F}_{robot}, \mathbf{M}_{robot}$ 은 로봇에서 작용하는 힘과 모멘트이고, $\mathbf{F}_{ground}, \mathbf{M}_{ground}$ 은 지면에서의 반발력과 반발모멘트 이다. $\mathbf{F}_{robot}, \mathbf{M}_{robot}$ 은 식(4)를 이용하여 계산할 수 있고 결과값을 이용해 렌치 축을 계산할 수 있다. 로봇에서 작용하는 렌치는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{robot} \\ \mathbf{M}_{robot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{robot} \\ \mathbf{s} \times \mathbf{F}_{robot} + \lambda \mathbf{F}_{robot} \end{bmatrix} \tag{6}$$

식(5)를 통해서 로봇과 지면사이에 작용하는 두 렌치 축은 서로 방향이 반대이고 지면에서 만나다는 것을 알 수 있다(Fig. 2).

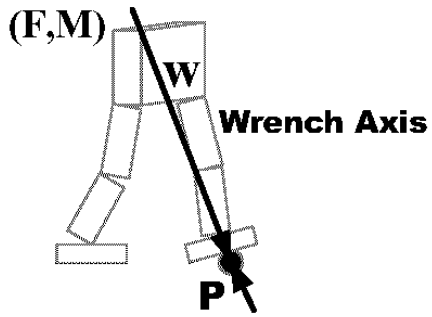

Fig. 2 Intersection point of wrench system

두 렌치 축이 만나는 지면상의 한점에서 힘과 모멘트는 균형을 이루게 되고 이 점을 안정점이라 생각할 수 있다. 지면의 위치는 $\mathbf{s}(s_x, s_y, s_z)$가 되고 s_z는 지면의 형상에 따라 적용 가능하다. 본 연구에서 지면은 평면이므로 $s_z = 0$으로 설정 하였다.
s_x, s_y는 식(7)을 이용해 구할 수 있다.

$$\mathbf{s} \times \mathbf{F}_{robot} + \lambda \mathbf{F}_{robot} = \mathbf{M}_{robot}$$
$$\mathbf{s} \times \mathbf{F}_{robot} = \mathbf{M}_{robot} - \mathbf{M}_1 \quad (7)$$

3. 모의실험

3.1 이족보행 로봇 모델링

Fig. 3(a)에서와 같이 이족보행 로봇은 발바닥과 양다리와 힙을 포함한 일곱개의 링크로 구성되어 있고 힙에 구면조인트, 무릎에 회전조인트, 발목에 유니버셜 조인트로 구성된 12 자유도 시스템이다. 3차원 공간에서 운동은 스크류 운동으로 해석하는 것이 가장 자연스럽고 여러 장점이 있기 때문에 Fig. 3(b)와 같이 스크류 축을 설정하고 스크류 매개변수를 이용해서 변위계산을 하였다. x 축은 힙 링크 방향, y 축을 전진 방향으로 설정했다.
로봇의 전체 크기는 0.342m, 무게는 0.853kg 이며 상세 제원은 Table 1 에 나타내었다.

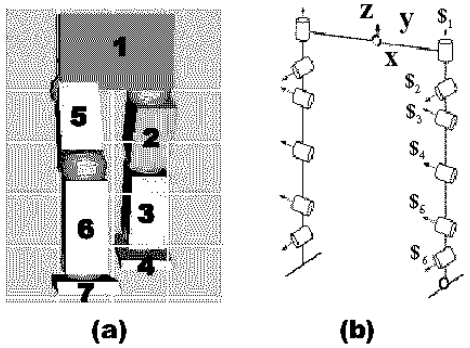

Fig. 3 Modeling of biped robot

	Size(m)	Weight(kg)
Total	0.342	0.853
Hip	0.06×0.15×0.096	0.324
Thigh	0.05×0.05×0.102	0.203
Thank	0.05×0.05×0.089	0.198
Foot	0.08×0.06×0.02	0.128

Table 1 Size and weight of biped robot

3.2 모의실험 프로그램

모의실험 프로그램은 OpenGL 을 이용해서 Visual c++ 6.0 으로 작성하였으며, 정해진 힙과 양 발끝의 궤적을 통해 역기구학을 계산해서 움직여야 할 각 조인트의 각도를 얻을 수 있다. 또한 뉴튼-오일러 방법를 이용해서 로봇에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하고 렌치 축을 구하게 된다. 결과적으로 구해진 축과 지면이 만나는 점을 궤적으로 생성해서 ZMP 해석으로 구해진 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 지면은 평면인 경우로 보행속도는 57.6m/h 로 모델링 하였다.

3.3 모의실험 결과

이상적인 경우의 ZMP trajectory 와 모의실험 결과를 비교해 보았다.

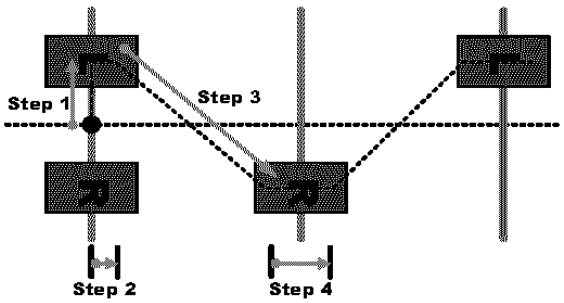

Fig. 4 Ideal ZMP trajectory

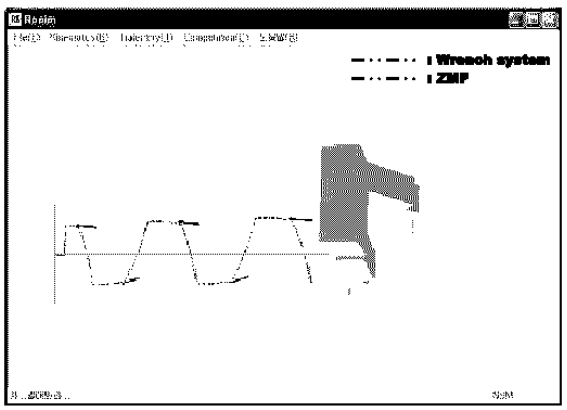

Fig. 5 ZMP and wrench system trajectory

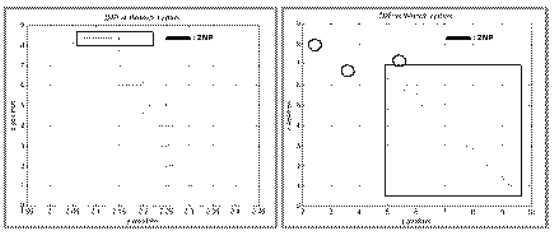

Fig. 6 Trajectory step1(a), step2(b)

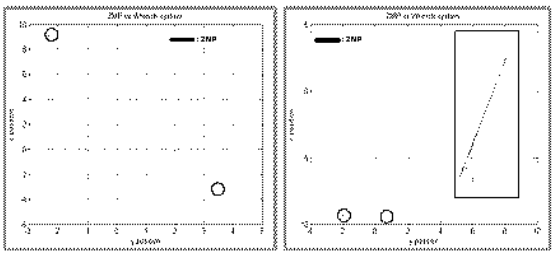

Fig. 7 Trajectory step3(a), step4(b)

이상적인 ZMP 궤적인 Fig. 4 와 모의실험을 통해 얻어진 궤적인 Fig. 5 를 비교하면 매우 유사한 형태를 보이고 있으며, 특히 한발로 지지하고 있는 가장 불안정한 상태에서 ZMP 궤적과 렌치 시스템을 이용한 궤적이 모두 발바닥내 안정영역에 존재 한다는 결과를 확인할 수 있었다.

왼발 오른발 한번씩 이동하는 한걸음을 Fig. 4 와 같이 4 단계로 분리했다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 렌치 시스템에서 구한 궤적과 ZMP 해석을 통해 구한 궤적을 비교한 결과를 나타 내었다. 힙을 왼쪽으로 이동시키는 step 1(a), 오른쪽으로 이동시키는 step 2(a) 에서의 궤적을 살펴보면 ZMP 와 렌치 시스템을 이용한 해석과 최대 0.01mm 의 오차가 발생하였고 최대오차 발생지역을 표기하였다. 이 오차는 힘과 모멘트를 하나의 축으로 만들 때 힘의 축의 위치가 변경 되었기 때문인것으로 판단된다. 그러나 발바닥 안정영역에서 모두 존재하기 때문에 안정성에는 영향이 없는것으로 판단된다. 왼발 지지상태인 step2(b), 왼발 지지상태인 step4(b)에서의 사각형영역의 오차는 힙의 모션이 있을 때 순간적으로 발생한 것이기 때문에 안정도에는 영향을 주지 않는다.

4. 결론

본 논문에서는 이족보행 로봇의 안정도 해석을 렌치 시스템을 이용해 해석해 보았다. 안정도 해석에서 사용되는 물리적인 값은 로봇에서 작용하는 힘과 모멘트이기 때문에 제시된 방법으로도 비교적 일치 되는 결과를 얻을 수 있었다. 보행 단계별로 분석해 볼 때 힙을 이동시키는 단계 및 한발 지지 단계에서 기존 ZMP 해석과 동일한 결과를 나타냈다. 특히, 가장 불안정한 상태인 한발 지지상태에서는 좋은 결과를 보였기 때문에 안정도 해석방법으로 이용이 가능할 것이다. 공간상의 축이라는 기하학적 정보를 이용하기 때문에 다양한 지면에서도 활용이 가능할 것이다. 보행속도를 변화시켜 보거나, 평면이 아닌 면에서의 해석 등 다양한 연구가 수행될 예정이다.

참고문헌

1. Vukobratovic, M., Juricic, D., "Contribution to the synthesis of biped gait," IEEE Trans. Bio-Med. Eng., Vol. BME-16, No. 1, pp. 1-6, 1969.
2. Takanishi, A., Lim, H.O., Tsuda, M., Kato, I., "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized by Trunk Motion on a Sagitally Uneven Surface, " Proc. IEEE Int. Workshop Intelligent Robots and Systems, pp. 323-339, 1990.
3. Huang, Q., Kajita, S., Koyahci, N., Kaneko, K., Yokoi, K., Arai, H., Komoriya, K., Tanie, K., "A High Stability, Smooth Walking Pattern for a Biped Robot," Proc. IEEE Int. Conference Robots and Automation, pp. 65-71, 1999.
4. Goswami, A., "Foot rotation indicator(FRI) point: A new gait planning tool to evaluate postural stability of biped robot," Proc. IEEE Int. Conference Robots and Automation, pp. 47-52, 1999.
5. Gogami, S., "A Fast Generation Method of a Dynamically Stable Humanoid Robot Trajectory with Enhanced ZMP Constraint," Proc. IEEE Int. Conference Humanoid Robotics, 2000.
6. Sugihara, T., Nakamura, Y., Inoue, H., "Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control," Proc. IEEE Int. Conference Robots and Automation, pp. 1404-1409, 2002.
7. Chung, W.Y., Waldron, K.J., "Force Distribution by Optimizing Friction Angles for Multifinger System," Proc. IEEE Int. Conference Robots and Automation, vol.3. pp. 717-722, 1993.
8. Murray, R.M., Li, Z., Sastry, S.S., "A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation," CRC Press, pp 211-258, 2000.
9. Ball, R.S., "A Treatise on the Theory of Screws," Cambridge University Press, pp 6-12, 1900.