

FRI 를 이용한 이족 보행 로봇의 안정도 해석

김상범*, 최상호, 김종태, 박인규, 김진걸(인하대 자동화공학과)

Stability Analysis of a Biped Robot using FRI

S. B. Kim*, S. H. Choi, J. T. Kim, I. G. Park, J. G. Kim (Dept. of Automation Eng. Inha Univ.),

ABSTRACT

This paper presents the comparison of FRI (Foot Rotation Indicator) point and ZMP (Zero Moment Point) in biped robot stability. We showed FRI may be employed as a useful tool in stability analysis in biped robot. Also, we proposed the balancing joint trajectory derived from FRI point equation for stable gait. The numerical calculation routines and walking algorithms for simulation are performed by MATLAB. The procedure is composed of the leg trajectory planning, the generation of balancing trajectory, and the verification of dynamic stability.

Key Words : Biped Robot (이족 보행 로봇), FRI (Foot Rotation Indicator) point, ZMP (Zero Moment Point), Stability Analysis (안정도 해석)

1. 서론

이족 보행 로봇이 다양한 환경에 적응하여 보행을 하기 위해서는 보행의 안정도 제어와 해석이 필수적이다. M. Vukobratovic 에 의해 제안된 ZMP 는 보행 안정 현상에 대하여 간단하고 직관적이며 쉽게 받아들여질 수 있는 해석으로서 효과적으로 응용되었다. [1] Takanishu 는 이족 보행 로봇 WL-12 의 안정도 판별을 위해 ZMP 를 사용하여 무릎 관절의 움직임을 계획하고 몸체 운동을 해석하였으며 허리 관절에 외부 힘과 모멘트가 작용할 때의 안정도에 관해서도 언급하였다 [2] C. L. Shih 는 이족 보행 로봇을 7 자유도로 단순화시켜 강체에 대한 ZMP 식을 유도하였다 그러나 ZMP 를 한 점에 고정하여 보행 후 안정도 판별에 이용하였을 뿐 보행 중엔 ZMP 자체를 변화시키거나 이를 제어와 연결시키지 못하였다 [3] Hirai 와 Hirose 는 ZMP 를 관성력과 중력에 의한 모멘트의 합이 영(零)인 지면 위의 점이라고 정의하였고, C-ATRGF (Center of Actual Total Ground Reaction Force, or center of mass position) 라는 개념과 함께 이족 보행 로봇의 안정도 해석에 이용하였다 [4] ZMP 는 바닥면이 보행 로봇에 주는 반발력과 반발 모멘트를 바닥면의 임의의 한 점에 집중시켰을 때, 집중된 반발 모멘트의 x, y 성분이 영(零)인

점이라고 정의하며 [5] 본 연구실에서는 ZMP 를 한 점에 고정시켰던 기존 연구에서 벗어나 ZMP 의 궤적을 생성함으로써 다양한 걸음세에 대한 해석과 보행 한 주기 구현에 소요되는 시간을 줄이는 연구를 하였다. [6] 또한 유전 알고리즘을 사용하여 이족 보행 로봇의 최적 균형 궤적 생성을 시도하였다 [7] 그러나 Chevaliercau 는 이족 보행 로봇의 발과 지면이 접촉하는 점에서의 안정도에 관한 연구에서 ZMP 는 고정되어 있고 시스템의 동역학에 의존하거나 영향을 미치지 못한다고 말함으로써 ZMP 해석의 한계성을 지적하였다 [8]

Goswami 는 로봇의 발과 지면이 접촉하는 점에서 발생하는, 상호 작용하는 인력이 존재하지 않는 일방성 (unilaterality)과 제어 인자들이 사라져서 발생하는 불충분한 구동 (underactuation)이 다리 운동의 본질적인 특징이라고 언급하면서 이것들이 로봇 움직임의 불안정성의 원인이라고 하였다 [9],[10] 그래서 그 불안정성의 큰 원인 중에 하나로 지면에 접촉하고 있는 발의 회전을 꼽았으며 ZMP 해석에서는 고려 하지 않았던 발의 회전을 고려한 FRI point 개념을 제시하였다. 그러나 Goswami 는 이론으로만 제시 하였고, 실제 이족 보행 로봇에 적용한 실험이나 모의 실험은 보여주지 못하였다.

본 논문에서는 FRI point 의 개념을 설명하고 이

즉 보행 로봇 IWR-III에 적용하기 위한 모의 실험을 실행한 후, 그 결과를 ZMP 와 비교하여 고찰하였다 또한 FRI point 식을 이용한 이족 보행 로봇의 균형관절의 궤적을 생성하는 방법을 제안 하였다

2. FRI Point

Newton 과 D'Alembert 의 원리에 의하여 이족 보행 로봇의 발 안의 임의의 점 P 에 대하여 질량 중심에 대한 회전 운동방정식을 정리하면 다음과 같다

$$\bar{M} + \bar{P} \times \bar{R} + \sum_{i=0}^n (\bar{r}_i - \bar{p}) \times m_i \bar{G}_i = \sum_{i=0}^n \bar{H}_i + \sum_{i=1}^n (\bar{r}_i - \bar{P}) \times m_i \bar{r}_i \quad (1)$$

\bar{M} 은 발바닥 안의 임의의 점 P 에 작용하는 접선방향 모멘트 벡터, \bar{P} 는 기준 좌표계에서 P 점까지의 거리벡터, \bar{R} 은 P 점에 작용하는 지면 반발력 벡터, m_i 는 i 번째 질점, \bar{r}_i 는 i 번째 질점의 거리벡터, $\bar{r}_i - \bar{p}$ 는 P 점에서 i 번째 질점까지의 거리벡터, \bar{G} 는 중력가속도, \bar{H}_i 는 임의의 점에 대한 각운동량의 시간 변화율 벡터로 임의의 점에 관한 외력의 모멘트 합과 같다. 그리고 \bar{r}_i 는 i 번째 질점의 가속도를 의미한다 Goswami 는 위 운동 방정식 가운데서 발의 운동에 관심의 초점을 발목 관절에 모았으며 발과 발목 관절의 운동방정식을 이족 보행 로봇의 나머지 관절들과 따로 떼어 정리 하였다 그리고 발바닥이 정적 평형을 이루고 접선 방향 성분만을 고려하여 다음과 같은 식을 유도하였다

$$(\bar{\tau}_i + (\bar{O}_i - \bar{F}) \times \bar{R}_i - (\bar{r}_i - \bar{F}) \times m_i \bar{G})_i = 0 \quad (2)$$

\bar{O}_i 은 기준 좌표계에서 발목 관절까지의 거리벡터, $\bar{\tau}_i$ 은 발목관절에 작용하는 힘 벡터, \bar{R}_i 은 발목관절에 작용하는 모멘트 벡터이다 이 식에서 아래 첨자 i 는 지면과 접선 성분 만을 고려하였음을 의미하고 F 는 위 운동 방정식을 만족시키는 위치 벡터로써 지지각의 발바닥 안에 존재할 수도 있고 바깥에 존재할 수도 있다 Goswami 는 이러한 F 점 을 FRI point 라고 명명하였고 발목 관절에 작용하는 $\bar{\tau}_i$, \bar{R}_i 그리고 발바닥의 질량에 의한 중력이 발생시키는 합력 모멘트가 지면에 수직인 점이라고 정의하였다^[10] 식 (2)를 이용해서 지지각의 발목 관절 윗부분의 운동방정식을 지면의 접선 방향에 대하여 정리하면 FRI point 의 위치를 구할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다

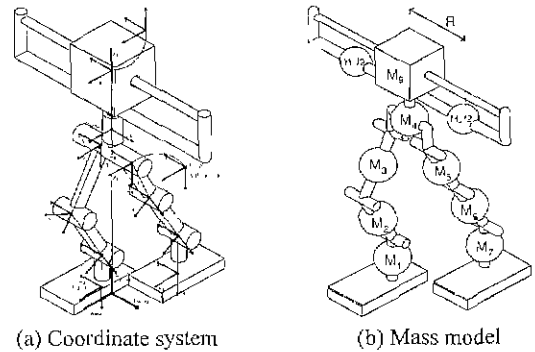
$$x_{iFRI} = \frac{m_i x_i G + \sum_{i=2}^n m_i x_i (z_i + G) - \sum_{i=2}^n m_i z_i \dot{x}_i - \sum_{i=2}^n H_{ix}}{m_i g + \sum_{i=2}^n m_i (z_i + G)} \quad (3)$$

$$y_{iFRI} = \frac{m_i y_i G + \sum_{i=2}^n m_i y_i (z_i + G) - \sum_{i=2}^n m_i z_i \dot{y}_i + \sum_{i=2}^n H_{iy}}{m_i g + \sum_{i=2}^n m_i (z_i + G)} \quad (4)$$

x_{iFRI}, y_{iFRI} 는 FRI point 의 위치, x_i, y_i, z_i 는 i 번째 질점의 x 방향, y 방향, z 방향의 위치, $\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i$ 는 i 번째 질점의 x 방향, y 방향, z 방향의 가속도, H_{ix}, H_{iy} 는 i 번째 질점에 작용하는 각운동량의 시간 변화율의 x 성분, y 성분이다.

3. 모의 실험

3.1 Biped Modeling



절 궤적식을 유도하고 이를 통하여 FRI point 를 보 상할 수 있는 방법을 제안하였다

식 (3)와 (4)에 각운동량의 시간 변화율을 첨가 하여 모의 실험에 사용한 질량 모델에 적용시키면 다음과 같다.

$$x_{FRI} = \frac{m_1 x_1 G + \sum_{i=2}^9 m_i x_i (2z_i + G) - 2 \sum_{i=2}^9 m_i z_i \dot{x}_i}{m_1 G + \sum_{i=2}^9 m_i (z_i + G)} \quad (5)$$

$$y_{FRI} = \frac{m_1 y_1 G + \sum_{i=2}^9 m_i y_i (2z_i + G) - 2 \sum_{i=2}^9 m_i z_i \dot{y}_i}{m_1 G + \sum_{i=2}^9 m_i (z_i + G)} \quad (6)$$

식 (6), (7) 로부터 균형추의 질량 m_0 를 분리하 고 기지의 항과 미지의 항으로 나누고 정리하면 다 음과 같이 2 계 미제차 미분 방정식으로 표현된다.

$$x_0 - \frac{(2z_0 + G)}{2z_0} x_0 = - \frac{x_{FRI} (z_0 + G)}{2z_0} + \frac{m_1 G (x_1 - x_{FRI})}{2m_0 z_0} + \frac{\sum_{i=2}^9 m_i x_i (2z_i + G) - 2 \sum_{i=2}^9 m_i z_i \dot{x}_i - \sum_{i=2}^9 m_i x_{FRI} (z_i + G)}{2m_0 z_0} \quad (7)$$

$$y_0 - \frac{(2z_0 + G)}{2z_0} y_0 = - \frac{y_{FRI} (z_0 + G)}{2z_0} + \frac{m_1 G (y_1 - y_{FRI})}{2m_0 z_0} + \frac{\sum_{i=2}^9 m_i y_i (2z_i + G) - 2 \sum_{i=2}^9 m_i z_i \dot{y}_i - \sum_{i=2}^9 m_i y_{FRI} (z_i + G)}{2m_0 z_0} \quad (8)$$

여기서 x_0, y_0, z_0 는 기준 좌표계에 대한 균형 관절의 질량 중심의 위치 벡터, $\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i$ 는 기준 좌표계에 대한 균형 관절의 질량 중심의 가속도 벡 터, x_{FRI}, y_{FRI} 는 기준 좌표계에 대해 원하는 FRI point 의 위치이다.

3.3 모의 실험기

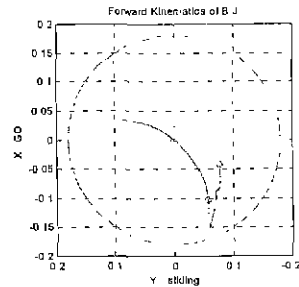
모의 실험기는 MATLAB 을 사용하여 프로그램 되었으며 PC 환경에서 구현되었다. 모의 실험기는 지지각과 유각, 균형점의 경유점이 주어지면 각각의 궤적 계획을 수행한 후, 역기구학을 수행하여 지지각과 유각의 각 관절 값들을 구한다. 그리고 Newton-Euler 방정식을 이용하여 각 링크의 운동을 해석한다. 여기서 각 링크의 동특성 항들과 원하는 ZMP (or FRI point)가 포함되어 있는 상미분 방정식을 풀어서 매 순간의 균형 관절의 위치를 구하고 실제 ZMP (or FRI point)를 계산하여 실제 안정 영역 인 발바닥 안에 있는지 판별하게 된다. 모의 실험에 쓰인 보행은 한 걸음에 3 초가 소요된다. 0 초에서 2 초까지는 한 다리 지지 (single support) 상태이며 2 초에서 3 초까지는 두 다리 지지 (double support) 상태이다. 3 초 보행 시 유각은 2 초까지 구

동되며, 두 다리 지지 상태인 나머지 1 초 동안 다음 보행을 위한 초기 상태로 균형추가 이동한다. 그리고 발바닥의 형상은 가로 9cm 세로 17cm 의 직사각형이며 균형관절의 움직임은 25cm 의 원으로 제한하였다

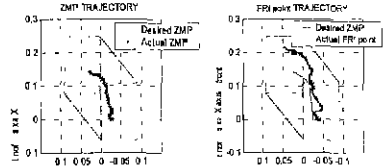
본 논문에서는 3 초 보행 시 동일한 다리 궤적에 대해 ZMP 궤적과 FRI point 궤적의 결과를 비교 하였으며 3.2 절에 나온 식을 이용하여 FRI point 식에 의한 균형 관절의 움직임에 대한 결과를 얻게 되었다.

3.4 모의 실험 결과

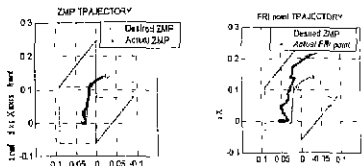
원하는 ZMP 를 사용하여 구한 동일한 균형 관절의 움직임과 균일한 다리궤적을 이용하여 구한 ZMP 와 FRI point 에 대한 결과가 Fig. 2 에 나와 있다.



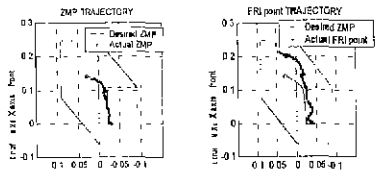
(a) Original balancing joint motion



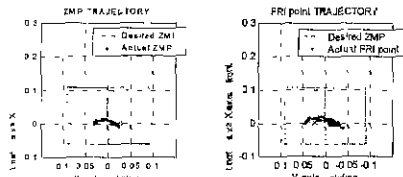
(b) ZMP & FRI point on unit step 1



(c) ZMP & FRI point on unit step 2



(d) ZMP & FRI point on unit step 3



(e) ZMP & FRI point on unit step 4
 Fig. 2 Result of ZMP and FRI point

Unit step 1 은 보행을 위한 초기 자세에서 왼 다리를 첫발로 내딛는 보행이다. Unit step 2 는 왼 다리를 지지각으로 하여 오른 다리를 진행 방향으로 내딛는 보행이다. Unit step 3 은 오른 다리를 지지각으로 하여 왼다리를 진행 방향으로 내딛는 보행이다. Unit step 4 는 오른발을 마지막으로 두 다리를 평행하게 함으로써 보행을 종료한다.

ZMP 해석에서는 각각의 단위 걸음새에서 한 다리 지지 상태에서 안정적인 결과를 나타내었으나 FRI point 해석의 결과는 한 다리 지지 상태인 0 초에서 2 초 사이에 Unit step 1 의 경우에는 보행 후 1.54 초 이후에, Unit step 2 의 경우에는 보행 후 1.61 초 이후에, Unit step 3 의 경우에는 보행 후 1.59 초 이후에 안정 영역인 발바닥 안을 벗어난 지점에 FRI point 가 존재해 불안정한 상태였음을 나타내고 있다. 이것은 ZMP 해석에서는 ZMP 식을 유도하는 과정에서는 식에 포함되어져 고려할 수 없이 고정되었던 발 m_i 에 존재하는 가속도의 성분에 의한 발의 회전이 FRI point 해석에서 임의의 한 점에 관한 외력의 모멘트 합과 같은 각운동량의 시간 변화율을 통해 고려함으로써 이족 보행 로봇의 안정도에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

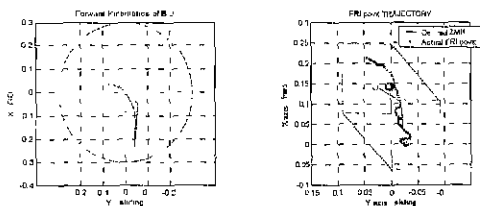


Fig. 3 Balancing joint trajectory and FRI point

Fig. 3 은 Unit step 1 에 대하여 식 (8), (9) 를 이용하여서 구한 균형 관절의 궤적과 그 때의 FRI point 궤적이다. 이를 통해 균형 관절의 움직임을 제어함으로써 FRI point 가 안정 영역인 발바닥 안에 존재할 수 있음을 보여주고 있다.

4. 결론

이족 보행 로봇에 대한 모의 실험을 통해 발의 회전을 고려한 FRI point 해석이 ZMP 해석보다 좀 더

민감한 안정도 검증 인자라는 사실을 확인하였다. 또한 FRI point 식으로부터 유도한 균형 관절의 움직임을 통하여 FRI point 의 위치를 이족 보행 로봇의 안정 영역 안으로 유도할 수 있는 가능성을 보였다. 향후 연구에서는 모의 실험의 결과를 실제 이족 보행 로봇에 적용하여 확인해 보는 작업이 필요하며 FRI point 해석을 보행 속도의 변화, 보폭의 변화 등 다양한 걸음새에 적용하여 보다 안전한 보행을 얻어내야 한다.

참고문헌

1. M. Vukobratovic and D. Juricic, "Contribution to the synthesis of biped gait", IEEE Trans on Biomedical Engineering, BME-16:1-6, 1969.
2. Atsuo Takanishi, "Robot Biped Walking Stability with Trunk Motion," Robots and Biological Systems Towards a New Bionics, Springer-Verlag, pp. 271-297, 1989.
3. Ching-Long Shih, "Analysis of the Dynamics of a Biped Robot with Seven Degree of Freedom," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.4, pp.3008-3013, 1996.
4. Hirai K., Hirose M., Haikawa Y., Takenaka T., "The Development of Honda Humanoid Robot," IEEE International Conference on Robotics & Automation, Vol. 2, pp. 1321-1326, 1998.
5. T. Arakawa, T. Fukuda, "Natural motion generation of biped locomotion robot using hierarchical trajectory generation method consisting of GA, EP layers." IEEE ICRA, Vol.4, pp. 211-216, 1997
6. S. H. Choi, "A study on the ZMP analysis for the dynamic stability of IWR biped walking robot", Master Thesis, Inha Univ., 1998.
7. J. T. Kim, "A Study on the Generation of Optimal Balancing Trajectory for Biped Robot", Mater Thesis, Inha Univ., 1999.
8. R. Stojic, C. Chevallereau, "On the Stability of Biped with Point Foot-Ground Contact," IEEE International Conference on Robotics & Automation, Vol. 4, pp 3340-3345, 2000
9. A. Goswami, "Postural stability of biped robot and the foot rotation indicator (FRI) point." International Journal of Robotics Research, Vol 18, No.6, pp 523 - 533, 1999.
10. A. Goswami, "Foot rotation indicator (FRI) point a new gait planning tool to evaluate postural stability of biped robots," IEEE International Conference on Robotics & Automation, Vol.1, pp 47-52. 1999