

Zero Moment Point를 이용한 이족 보행 로봇의 경사로 걸음새 제어에 관한 연구

Gait Control on Slope Way using Zero Moment Point for Robot

엄승현*, 임미섭**, 임준홍***
Seung-hyun Um*, Mee-seub Lim**, Joon-hong Lim***

Abstract - In this paper, we propose stable walking algorithm using ZMP for the biped robot in the slope-way. At first, we define discrete state variables that classified stable area and unstable area by center of mass from ZMP during slope-way walking. For the stable walking gait, the discrete state controller for determining the high-level and low-level decision making are designed. The high-level decision making is composed of the discrete state variables; left foot support phase, right foot support phase, flat-way, and slope-way. Then the continuous state controller is implemented for the low-level decision making using ZMP.

Key Words : biped robot, ZMP, hybrid system, slope way

1. 서론

사람의 생활공간에서 로봇이 자유롭게 이동할 수 있으려면 바퀴 구동형 이동 메커니즘보다는 인간의 보행을 닮은 이족 보행 로봇이 이동성에 있어서 효율적이다. 인간의 주거환경은 인간의 인체구조에 맞게 설계되어 있기 때문에 인간의 모습을 닮지 않은 다족 로봇이나 바퀴를 갖춘 로봇이 이동하는데 한계가 있다. 이족 보행은 현재 지능형 로봇을 연구하는 사람들에 의해 활발한 연구가 진행 중이며, 사람의 보행 패턴을 로봇에 심어주기 위해 실제 사람의 보행을 3D 스캔하여 로봇에 보행을 만들어낸 연구도 이미 발표되어 있다.[1]

인간의 생활공간에서 이족 보행 로봇이 함께 살아간다면 겪게 되는 난관들이 있다. 장애물에 부딪혔을 때, 특이한 지형을 만났을 때(계단, 경사로), 외부의 압력을 받았을 때 등 로봇 설계자가 고려하지 못한 상황에 놓여 오동작을 하거나 안정하지 못하는 상태, 즉 넘어지는 상태가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 ZMP(Zero Moment Point)[2]를 이용하여 로봇이 이동 중에 자세의 안정도를 ZMP 기준으로 판단할 수 있는 걸음새를 연구하였으며, 특히, 경사로 지형에서 안정되게 보행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

본 연구에서는 이족 보행 로봇의 안정된 경사로 보행을 위해 ZMP를 이용한 경사로 보행 알고리즘을 제안하였다. 본 알고리즘에서는 경사로 보행 중에 ZMP상에 얻어진 무게 중심점의 위치를 기준으로 안정 구역(Stable Area)과 불안정 구역(Unstable Area)으로 구분한 이산상태 변수를 정의하였다. 이산상태 변수는 걸음새의 왼발 디딤과 오른발 디딤, 평

지와 경사로를 각각 구분한 상위 수준 의사 결정(high-level decision making)을 위한 이산상태 제어기를 구성하여 안정된 걸음새 제어를 실현하였다. 또한, 하위수준(low-level)의 ZMP를 이용한 연속상태(Continuous State) 제어기를 구현하였다.

마지막으로 안정된 경사로 보행을 위한 Hybrid Gait Controller를 구성하여 실험적으로 성능을 평가하였다.

2. 이족 보행 로봇 시스템

실험에 사용한 이족 보행 로봇(AHR-I)은 엉덩이 3 DOF(Degree Of Freedom), 무릎 1 DOF, 발목 3 DOF로 총 14 DOF를 가지고 있다. 특히 로봇의 발목은 사람과 비슷한 동작을 할 수 있는 3DOF로 구성하였다.

제어 시스템은 2개의 MCU(Microcontroller unit)를 사용하여 구성하였다. 2개의 MCU는 서로의 통신을 원활하게 하기 위해 같은 Device를 사용하였으며, 하나는 모터제어, 다른 하나는 센서제어의 역할을 담당하도록 구성하였다.

고려하여 Sensing되는 부위에 완충작용을 하는 고무를 로봇의 ZMP 위치를 추적하기 위해 총 8개의 FSR(Force

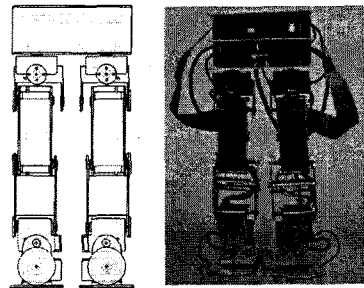


그림 1. 로봇(AHR-I) 설계도(왼쪽)와 실제 모습

지자 소개

* 嚴勝賢 : 漢陽大學 電子制御計測學科 碩士課程

** 林美燮 : 京畿工業大學 메카트로닉스學科 教授

*** 林俊弘 : 漢陽大學 電子컴퓨터工學部 教授

Sensing Resistor) 센서를 사용했으며, 그림 2처럼 설계하였다. FSR은 약한 충격에도 민감하게 반응하는 센서임을 부착하여 Sensing Error를 줄였다. Gyro 센서와 가속도 센서는 시뮬레이션에서 얻을 수 없었던 외력에 대비하기 위함이다. 이상적인 상태로 가정하고 얻어진 결과를 실제에 적용할 때, 생기는 오차와 관성에 적용하기 위해서 사용하였고, 위치는 가장 유동이 심한 몸체 쪽에 부착하였다.

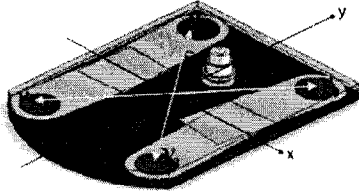


그림 2. FSR을 이용한 ZMP 탐색(설계도)

3. FSR을 이용한 ZMP 탐색 및 보정

이족 보행 로봇이 넘어질 경우와 사람이 넘어질 경우는 확연한 차이를 보인다. 사람은 발바닥에도 수많은 근육이 존재하고, 오랜 생활에서 습득된 조건반사 때문에 안정하지 못한 상태에 놓이게 될 경우 재빨리 이를 인식하고 보정을 하게 된다. 이에 반해 로봇은 발바닥이 평평한 구조로 이루어져 있기 때문에 보정을 위해서는 민감한 발바닥을 만드는 것이 필요했다.

3.1 ZMP 탐색

로봇의 상태를 알아내기 위해서는 각각 FSR에서 구해진 절대적인 값이 그 상태를 좌우하지 못한다. 구조적 결함으로 얻어진 FSR의 잘못된 결과는 로봇을 항상 기울어져 있게 인식하거나, 어쩌면 넘어진 상태로 인식할 수도 있기 때문이다.

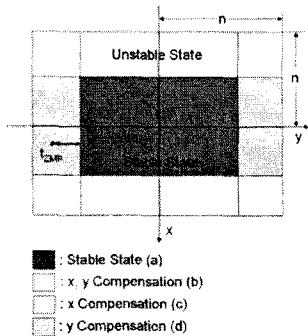


그림 3. ZMP의 위치와 영역

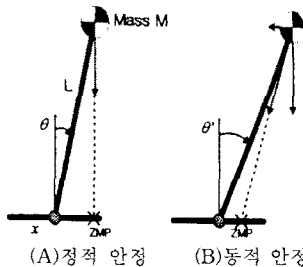


그림 4. ZMP의 정적, 동적 안정도

$$x_{ZMP} = n \frac{\sum_{i=0}^3 s_i x_i}{\sum_{i=0}^3 s_i} \quad y_{ZMP} = n \frac{\sum_{i=0}^3 s_i y_i}{\sum_{i=0}^3 s_i} \quad (1)$$

그림 2와 같이 한 발바닥의 FSR에서 얻을 수 있는 4개의 값과 그 해당 좌표 값을 식(1)에 대입하여 상대적인 로봇 발의 ZMP를 구한다. 상대적인 값의 일정비율(임의의 수 n)을 곱하여 상대적인 ZMP를 구하게 된다. n>0일 경우 발바닥 보다 넓은 필드를 설계하여 그 안에서 안정도를 결정하게 되고, n<0일 경우는 발 내부에 ZMP를 존재하게 함이다. s는 양자화된 센서 값.

3.2 ZMP 보정

위의 방법으로 얻어진 ZMP값은 n에 의해 임계값이 결정된다. 하지만 이 값은 상대적인 값이기 때문에 절대로 n을 넘을 수 없다. 따라서 임의의 Margin을 설정하여 로봇의 ZMP를 Stable state에 들어오도록 제어한다.

그림 4에 (B)의 경우 질량 M이 오른쪽 방향으로 가속하고 있다면 무게중심은 반대방향(왼쪽)으로 힘을 받게 된다. 이 힘과 중력이 합해져 ZMP는 그림과 같이 된다. 그림 3에서 보행 중 (d)영역에 나타난 t_{ZMP}는 정적 안정일 경우 Stable State를 벗어난 상태이지만 그림 4에 (B)에서 보인 동적 안정에 해당한다. 따라서 경사로를 오르는 상태에서는 이 영역의 y축 보정을 하게 되면 로봇이 뒤로 넘어지게 된다. 이것은 이산상태로 정의하여 결정하고, ZMP의 Stable State 위치를 해당 영역 방향으로 이동시킴으로 경사로 보행이 가능하다.

실험에서 사용된 ZMP 보정은 움직이는 상태의 가속도를 센서를 통해 얻어낸 후, 식(2)를 통해 가속도에 따른 동적인 ZMP의 위치를 구하고, 허리의 위치를 안정 구역 안쪽으로 끌고 오도록 하였으며, 허리의 위치에 역기구학(Inverse kinematics)을 적용하여 허리 밑의 각도를 구했다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i - g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{x}_i - g) z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i - g)} \quad (2)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i - g) y_i - \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{y}_i - g) z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i - g)}$$

4. 하이브리드 시스템

스윙하는 발이 바닥으로부터 떨어지는 순간에는 모든 무게중심은 지탱하는 발에 두어야 하며 ZMP도 역시 지탱하는 발에 의존해야 한다. 이 순간에 상태 천이가 일어나게 되며, 이 SSP(Single Support Phase)상태를 오른발, 왼발 각각 정의하고, 다른 SSP로의 전환 사이에 존재하는 DSP(Double Support Phase)상태를 정의한다. 이렇게 상위에서 로봇의 기준 동작을 제어하기 위한 상위 수준의 이산상태 제어를 구성하고, 하위에는 로봇의 ZMP와 모터를 제어하기 위한 하위 수준의 연속상태 제어, 그리고 상위와 하위의 상태공간을 연결하고 상호작용을 위해서 인터페이스 제어로 구성한다.

상태 천이가 이루어지는 상위 레벨 이산 상태 제어 형태는 히스테리시스 함수적인 특성을 갖고 있다. 로봇 보행의 상태를 히스테리시스 함수로 나타내면 그림 6과 같다.

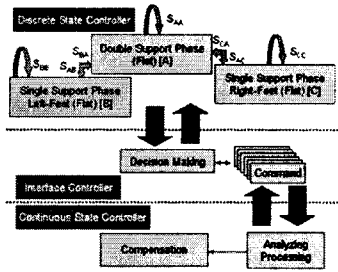


그림 5. 하이브리드 시스템 구조

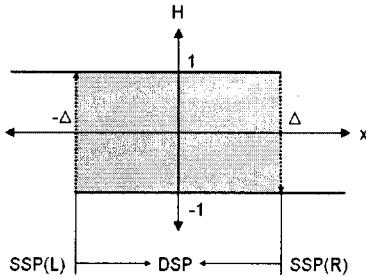


그림 6. 히스테리시스 함수 적용

여기서 Δ 는 보폭을 나타내며, 식 (3)과 같이 각각의 상태에서는 조건을 만족해야 한다. 조건을 만족하지 못한 상태에서는 현재의 상태와 x 에 의해 천이가 일어나게 된다.

$$\begin{aligned}
 SSP(L) &: ZMP_L \ni (x_L, y_L) \\
 SSP(R) &: ZMP_R \ni (x_R, y_R) \\
 DSP &: [ZMP_L \ni (x_L, y_L)] \\
 &\quad \cap [ZMP_R \ni (x_R, y_R)]
 \end{aligned} \quad (3)$$

5. 시뮬레이션 및 실험

제안된 ZMP 보정과 하이브리드 시스템 방법을 사용한 이족 보행 로봇은 시뮬레이션과 실험을 통해 평가하였다. 그림 7에서 보인 시뮬레이션에서는 바닥에 대한 외력을 무시하고 진행하기 위해 발바닥을 점으로 표시하였으며, 허리의 위치는 ZMP에 의해 정확하게 수직으로 존재하는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션에서 볼 수 있는 것처럼 내리막을 내려갈 때는 무릎을 세우게 되며, 오르막을 오를 때는 상대적으로 무릎이 굽혀지는 것을 볼 수 있다. 실제 경사로를 오르는 실험에서 얻어진 ZMP데이터는 그림 8과 그림 9와 같다.

6. 결론

본 논문에서는 경사로 지형에서 안정되게 보행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 또, 이를 하이브리드 시스템에서 상위 수준의 보행 계획을 위하여 이산상태와 동작제어모드를 정의하였고 이것을 이산상태 모델로 보행을 위한 알고리즘을 설계하였다. 보행을 위한 이산상태 시스템은 하위의 연속상태 제어기의 변수로부터 이산상태가 결정되고 이산상태에 의해서 상위 수준에서의 동작 명령을 생성하게 하였다. 제안한 경사로 보행패턴과 하이브리드 제어기의 성능을 보이기 위하여 이족보행 로봇(AHR-I)에 대한 실험을 통하여 보행을 하였고 보행 시 ZMP 위치를 모니터링 하였다. 앞으로 다른 지형에서의 보행 알고리즘 개발과 로봇의 절대적인 무게중심에 의한 ZMP해석과 전체적인 하이브리드 시스템의 안정도 해석을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

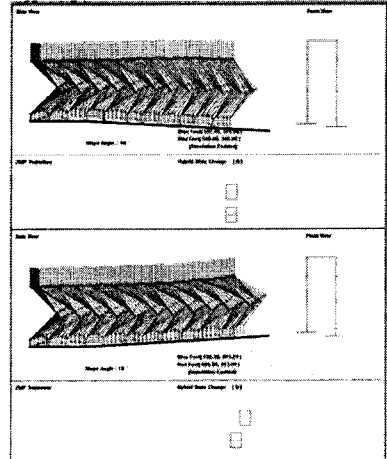


그림 7. 시뮬레이션 결과 내리막(위쪽)오르막(아래쪽)

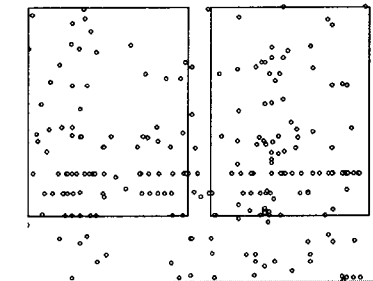


그림 8. ZMP(+ 경사로 3걸음)

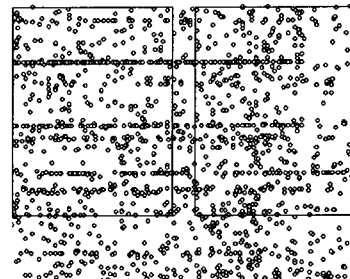


그림 9. ZMP(+ 경사로 6걸음, 평지 9걸음)

참 고 문 헌

- [1] Dasgupta, A. Y. and Y. Nakamura, "Making Feasible Walking Motion of Humanoid Robots From Human Motion Capture Data," Proceedings, 1999 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1044-1049, May 1999.
- [2] 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, pp431-436, July 2002.
- [3] Y. Kuroki, T. Ishida, J. Yamaguchi, K. Nagasaka, "A Small Biped Walking Entertainment Robot SDR-4X with a Highly Integrated Motion Control", Proc. of the 20th Annual Conference of RSJ, Osaka, Japan, IC17, 2002.