

# 이족 보행 로봇을 위한 추적 제어

## Tracking Control for Biped Robot

이 용 권(한양대 대학원), 박 종 현(한양대 공대)

Yong Kwon Rhee(Hanyang Univ.) Jong Hyeon Park(Hanyang Univ.)

### ABSTRACT

In this paper, an optimal trunk trajectory for stable walking of biped robots is expressed as a simple differential equation, which is then solved by numerical methods. We used ZMP (Zero Moment Point), the virtual total ground reaction point within the region of the supporting foot, as the criterion of stability of biped robot walking. If the ZMP is located outside of the stable region in dynamic walking, biped robots fall down. The biped robot considered in this paper consists of two legs and a trunk. The trajectories of the two legs and the ZMP of the biped robot are determined such that they are similar to those of a human. Based upon those trajectories, the trunk trajectory is solved by numerically integrating differential dynamic equations. Leg motions are controlled by the computed torque control method. The effectiveness of control algorithm as well as the trajectories is confirmed by computer simulations.

**Key Words** : 이족 보행 로봇(Biped Robot), ZMP, 트렁크(Trunk) 궤적, 계산 토크 제어 방식(Computed-Torque Control Method)

### 1. 서 론

이족 보행 로봇(Biped Robot)이 알려지지 않은 환경에 적응하기 위해서는 트렁크(몸통)와 하체(Lower-limbs) 부분의 상호 협력체제가 매우 중요시된다. 따라서, 이족 보행 로봇이 잘 걷기 위해서는 트렁크 부분에서 발생하는 모멘트를 잘 보상해주어야 한다. 이런 모멘트를 보상해주는 방법으로 ZMP(Zero Moment Point)를 사용해왔다[1]. 이 ZMP를 이용한 방법은 이족 보행 로봇의 각 링크의 무게중심과 동적인 운동에서 발생하는 관성력의 합 모멘트에 의해 로봇이 안정성(stability)을 유지하며 걸을 수 있도록 모멘트가 영(zero)이 되는 지점의 궤적을 결정해주는 방법이다. 따라서, 이 ZMP는 로봇의 발바닥에서 작용하는 모든 반발력의 합이 되는 점이다.

일반적으로, 1980년대 보행 로봇에 관한 연구에서는 주로 두 다리의 궤적에 초점을 두어서 로봇의 안정성을 유지시키는데 많은 연구성과를 거두었지만, 경사진 지면이나 울퉁불퉁한 계단 같은 주변의 환경에 적응하는데는 그 한계가 있었다. 1990년대에 들어서, 보행 로봇의 두 다리 위에 트렁크를 붙이고 이를 이용하여 동적인 걸음에 대한 안정성을 만족시켜주는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 실제로, 안정

성이 증명된 이족 보행 로봇이 여러 연구팀에 의해 개발되었다[1-4].

보행 로봇의 연구중 가장 큰 목적은 알려지지 않은 환경에 적응하여 안정하게 걷도록 하는 것이다. 그와 같은 환경에 적응하기 위한 하나의 방법으로 트렁크의 운동을 제어하는 것이다. 본 논문에서는 이런 트렁크의 운동에 초점을 두고, 로봇에 대한 트렁크의 보상 궤적을 구했다. 여기서는 기존의 복잡한 트렁크 궤적의 계산식[1]을 간단한 2차 미분방정식으로 표현했다. 사용된 로봇 모델은 총 7-자유도(DOF)로 구성되었고, 로봇은 2차원 정적(static) 운동을 한다. 로봇이 주어진 궤적을 잘 추적하기 위한 조인트 오차의 보상 방법으로 비선형 제어법인 계산 토크 제어 방식(computed-torque control method)이 사용되었다[4].

### 2. 운동 방정식

그림 1은 본 연구에서 사용된 이족 보행 로봇의 모델이다. 로봇은 8개의 링크로 이루어졌고, 하체 부분의 6-자유도와 트렁크의 1-자유도로 이루어져 총 7-자유도로 구성되었다. 그리고 sagittal plane(로봇의 이동 방향과 수직 축에 의해 정의되는 면)에서만

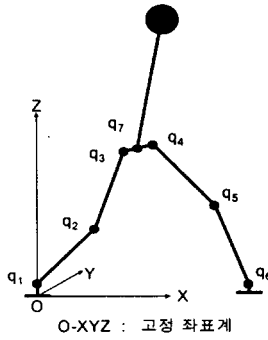


그림 1. 이족 보행 로봇의 모델링.

움직인다고 가정한다. 즉, 조인트가 피치(pitch) 방향 (좌표계에서 y축을 중심으로 회전하는 방향)에서만 운동을 한다. 또한, 로봇이 걸을 때, 지면에 접촉된 다리는 다른 쪽의 다리 및 트렁크를 지지한다고 가정한다.

이족 보행 로봇의 운동 방정식은 조인트 공간상의 좌표인 Lagrangian의 관점에서 모델화 되었다[6]. Lagrangian에 의한 운동 방정식은 수식이 크고 복잡한 단점이 있지만, 폐형식(closed-form equation)의 방정식을 얻을 수 있다는 잇점이 있다.

여기서 쓰인 7-자유도 이족 보행 로봇의 운동방정식은 다음과 같다.

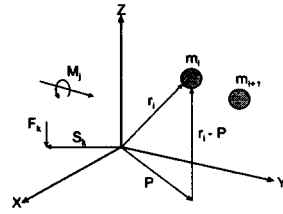
$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + J^T F_{ext} \quad (1)$$

$H$ 는  $7 \times 7$  관성행렬,  $C$ 는  $7 \times 7$  구심력 및 코리올리 힘에 관한 행렬 그리고  $G$ 는 중력 힘을 표현하는  $7 \times 1$  벡터이다. 벡터  $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_7]^T$ 는 각 링크의 관절 각이며, 또한  $J$ 는  $7 \times 7$  자코비안 행렬,  $\tau$ ,  $F_{ext}$ 는 조인트 토크와 외부에서 로봇에 가해지는 반발력 및 외력을 나타내는  $7 \times 1$  벡터이다.

### 3. ZMP 제어

#### 3-1. ZMP(Zero Moment Point)

ZMP는 로봇이 보행을 할 때에 로봇의 안정성을 판별하는 기준조건으로 사용된다. 이 ZMP는 이족 보행 로봇의 두 다리중 바닥에 접촉되어 있는 다리의 발바닥에 임의의 기준 좌표 계를 설정해 놓고 그 점에 대해서 모멘트 합 조건을 적용했을 시, 로봇 발 위쪽 링크들의 전체 운동량을 보상하기 위한 반



$m_i$ : 질점의 질량  $r_i$ : 질점의 위치 벡터  $P$ : 위치 벡터  
 $F_k$ : 외력  $S_k$ : 외력이 작용하는 점의 위치 벡터  
 $M_j$ : 외부 모멘트  $T$ : P에서 작용하는 토크

그림 2. 로봇 시스템에 대한 벡터의 정의.

발력이 발바닥의 어느 한 점에 존재한다는 물리법칙에 근거한 이론이다. 여기서 ZMP의 위치가 로봇 발바닥의 크기를 벗어나서 존재한다면 로봇은 안정성을 잃게 된다. 따라서, ZMP를 발바닥 이내에 존재하게 하면 이족 보행 로봇은 넘어지지 않고 어떤 지면이든 걸을 수 있다는 결론을 얻어 낼 수 있다.

그림 2는 직교 좌표계에서 고정 좌표계  $O_{XYZ}$ 를 설정해 놓고, 임의의 질량 시스템에 대해 벡터의 관계를 나타낸 식이다. 이 시스템에 대해 달랑베르 법칙(D'Alembert Principle)을 적용하면 다음과 같은 식이 주어진다.

$$\sum_i m_i (\ddot{r}_i - P) \times (\ddot{r}_i + G) + T - \sum_j M_j - \sum_k (S_k - P) \times F_k = 0 \quad (2)$$

이것을 로봇 시스템에 적용하면 아래와 같은 식을 얻어낼 수 있다.

$$X_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i + \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum F_k} + \frac{\sum_k x_k F_k}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum F_k} \quad (3)$$

위의 식은 ZMP인  $X_{zmp}$ 의 위치를 나타내는 식으로서 보행 로봇의 안정성을 판별하는 조건으로 쓰인다. 이 시스템은 2차원적 운동인 피치 방향에서만 모델링 되었고, 고정 좌표계  $O_{XYZ}$ 는 지지된 발바닥의 중앙에 설정해 놓았다.

#### 3-2. 로봇 하체 시스템의 궤적

이족 보행 로봇을 위한 제어기를 구성하기 위해서는 합리적이면서 최적 상태의 궤적 기준입력을 만들어낼 필요가 있다. 로봇의 하체구조는 6-자유도를 가지고, 이것은 인간의 피치 방향에서의 관절 수와 동일하다. 따라서, 인간의 걷는 모양(gait)이 완벽한 궤적을 형성한다고 가정을 하면, 우리가 희망하는 로봇의 다리에 대한 기준입력으로 인간이 걷는 것과 흡사한 궤적의 자료(임의의 값)를 사용할 수 있다. 실제로 위의 가정은 인간과 흡사한 보행 로봇의 개발 차원에서 만족할 만한 가정이다.

### 3-3. 트렁크 궤적 제어

이족 보행 로봇의 하체부분에 대한 궤적과 로봇 발 바닥 안에 존재하는 임의의 ZMP 궤적을 결정해주면 트렁크 궤적에 대한 2차 미분방정식을 얻어낼 수 있다. ZMP에 대한 식(3)으로부터 다음과 같이 아래의 식(4)가 얻어진다.

$$m_7 \ddot{x}_7 z_7 + m_7 (\ddot{z}_7 + g_z) x_7 = - \sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_{i=1}^6 m_i \ddot{x}_i z_i - X_{zmp} \sum_{i=1}^7 m_i (\ddot{z}_i + g_z) \quad (4)$$

트렁크의 z축 방향의 운동이 직선운동을 한다고 구속 조건( $\ddot{z}_7 = 0$ )을 적용하면, 위의 식(4)는 x방향에 대한 간단한 2차 미분방정식의 형태로 얻어진다.

$$m_7 \ddot{x}_7 z_7 + m_7 g_z x_7 = - \sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g_z) \cdot x_i - \sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i - X_{zmp} \sum_{i=1}^7 m_i (\ddot{z}_i + g_z) \quad (5)$$

따라서, 식(5)의 해를 얻기 위해 4차 Runge-Kutta 방법을 적용하여 수치적으로 미분방정식을 풀고, 직교 좌표계에서의 이 해( $x_7$ )를 역기구학 식을 이용하여 조인트 좌표계로 변환해 주면 트렁크의 궤적인  $q_7$ 의 값을 얻어 낼 수 있다. 이  $q_7$ 의 궤적은 로봇이 임의의 궤적으로 걸어갈 때, 바닥에 넘어지지 않게 하기 위한 최소한의 트렁크의 보상 운동이 된다.

### 4. 계산 토크 제어

위의 로봇 운동 방정식을 시뮬레이션할 경우 생기는 외란을 고려해서 다시 운동 방정식을 정리하자.

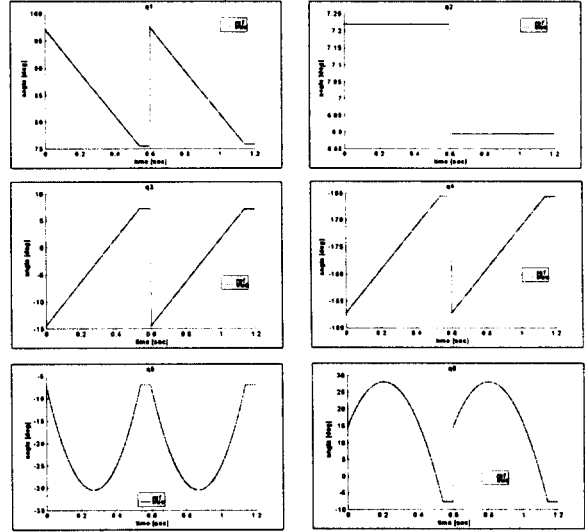


그림 3. 로봇 하체 시스템의 궤적 및 제어 결과.

$$H(q) \ddot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau \quad (6)$$

여기서  $N(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F_d - J^T F_{ext}$  이고,  $F_d$ 는 외란항이 된다. 조인트 변수에 대한 궤적 추적의 정확성을 확인하기 위해 조인트의 추적 오차( $e = q_d - q$ )를 정의하고, 다음과 같이 제어입력을 정의한다.

$$\tau = H(\ddot{q}_d - u) + N \quad (7)$$

여기서  $u$ 를 다음과 같이 PD이득을 가진 제어 신호  $u = -k_v \dot{e} - k_p e$ 로 정의해서, 이 식을 위의 식(7)에 대입하여 로봇에 입력되는 토크를 구한다.

$$\tau = H(\ddot{q}_d + k_v \dot{e} + k_p e) + N \quad (8)$$

### 5. 시뮬레이션

질량 80Kg, 높이 1.45m, 그리고 발(x축 방향) 0.3m의 로봇 모델을 가지고 보행 시뮬레이션을 수행하였다. 로봇의 초기 위치는 그림 6처럼 두 발이 벌려진 상태이고, 고정 좌표계는 오른쪽 발바닥에 설정되어서 먼저 왼발을 지면에서 들어서 한 걸음 걷고 그 다음 고정 좌표계를 지면에 놓인 왼 발로 바꾸어서 오른 발로 걷는 단계로 시뮬레이션되었다. 보행 로봇의 하체 시스템에 대한 궤적을 그림 3에 도시화하였다. 점선으로 표시된 기준 입력과 실선의 추적하

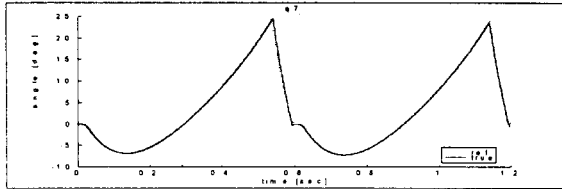


그림 4. 로봇의 안정성을 위한 트렁크 궤적( $q_7$ ).

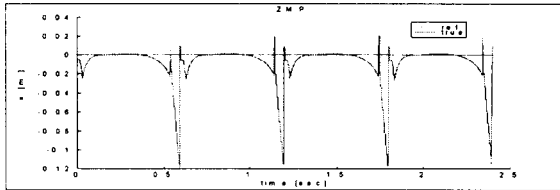


그림 5. 로봇의 보행에 대한 ZMP 위치.

는 결과 값이 거의 일치하였다. 시뮬레이션 시, 외란 항에 대한 입력 값으로 비선형성에 의해 생기는 수치적인 오차를 사용하였고, 실제로 수치 오차가 매우 크게 작용한다는 점을 감안 할 때 제안된 제어가 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있었다. 그림 4는 주어진 하체 시스템의 궤적에 대해서 보행 로봇이 안정성을 유지하며 걸을 수 있는 트렁크 궤적을 도시화한 것이다. 그리고 이 트렁크의 궤적이 안정성을 만족하는가를 검증하는 단계로 그림 5에 ZMP를 도시화하였다. 희망하는 ZMP의 궤적은 0 [m]로 주었고, 시뮬레이션의 결과는 대체로 잘 추적하고 있는 것을 보여준다. 그림에서 발을 허공에서 바닥에 내려놓을 때와 그 반대인 경우에 대해서 생기는 충격력의 영향에 의해 ZMP가 조금 요동치는 것을 볼 수 있지만 ZMP의 위치가 발바닥 영역 안에 존재함으로써 안정성을 만족시키고 있다. 하지만 이 충격력에 대한 보상 토크를 적절히 찾아내는 것이 중요한 문제로 남는다.

## 6. 결 론

이족 보행 로봇이 안정성을 유지하며 걷는데 매우 중요한 트렁크의 궤적을 간단한 미분방정식의 형태로 표현했고, 수치 해법을 이용하여 방정식의 해를 구했다. 안정성을 판별하는 기준조건으로 ZMP를 사용했고, 시뮬레이션에 의한 결과로써 ZMP는 로봇 발 영역 안에 위치하고 있는 것이 확인되었다. 비선형성에 의한 오차는 계산 토크 제어 방식에 의해 극복되어 안정성면에서 우수한 성능을 보였음이 확인됐다. 로봇의 보행 시, 안정성의 보상에 의한 트렁크의 회전운동이 지나치게 크면 불안정해지므로 이것을 보상할 새로운 알고리즘의 필요성이 제안된다.

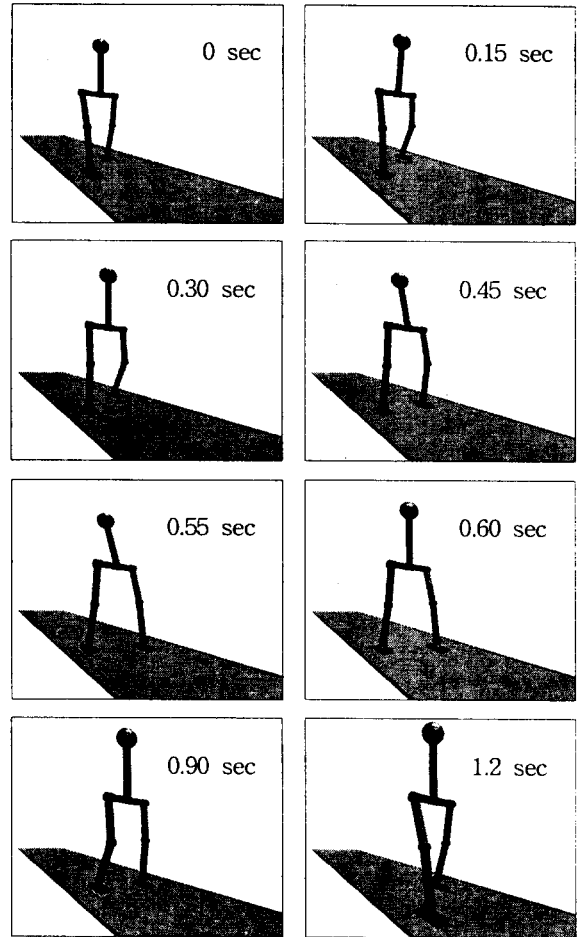


그림 6. 이족 보행 로봇의 보행 시뮬레이션.

## 참고 문헌

1. A. Takanishi, et. al., "Dynamic Biped Walking Stabilized with Optimal Trunk and Waist Motion", Proc. IEEE Int. Workshop Intelligent Robots and Sys.'89, pp. 187-192.
2. Yuan F. Zheng and Jie Shen, "Gait Synthesis for the SD-2 Biped Robot to Climb Sloping Surface", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.6, No.1, 1990. pp. 86-96.
3. Shuji Kajita and Kazuo Tani, "Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain", Proc. of the IEEE Int. Conf. on R&A, 1991, pp. 1405-1411.
4. K. Mitobe, et. al., "Nonlinear Feedback Control of a Biped Walking Robot", Proc. of the IEEE Int. Conf. on R&A, 1995, pp. 2865-2870.
5. H. Asada, J. J. E. Slotine, "Robot Analysis and Control", Wiley, 1986.