

선형 역덤벨 모델을 이용한 이족 보행 로봇의 기준 ZMP 궤적 생성 및 보행 구현

Reference ZMP Trajectory Generation and Implementation for a Biped Robot via Linear Inverted Dumbbell Model (LIDM)

이상용¹, 김화수^{2,✉}
Sang-yong Lee¹ and Hwa Soo Kim^{2,✉}

¹ 한국과학기술연구원 (KIST)

² 경기대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Kyonggi Univ.)

✉ Corresponding author: hskim94@kgu.ac.kr, Tel: 031-249-9806

Manuscript received: 2011.8.17 / Accepted: 2011.12.9

This paper presents reference ZMP trajectory generation and implementation for a biped robot via linear inverted dumbbell model (LIDM), which can consider the effect of external momentum on the center of mass (COM) of robot. Based on a reference ZMP trajectory derived by using LIDM, a base trajectory is proposed not only to make the locomotion of robot similar to that of human but also to facilitate its implementation and tuning. In order to realize a dynamic walking using the proposed trajectory, compliance, impedance and ZMP tracking controllers are adopted together. Extensive experiments show that the proposed locomotion of a biped robot is stable and also, similar to that of human. Further researches on balance recovery of a biped robot will be carried out to guarantee its robust locomotion in combination with the proposed trajectory.

Key Words: Biped robot (이족 보행 로봇), Linear inverted dumbbell model (선형 역덤벨 모델), Zero moment point (균형 점), Trajectory generation (궤적 생성), Tracking control (추종 제어)

1. 서론

두 다리를 이용하여 이동하는 이족 보행 로봇의 보행 안정성은 로봇의 모션 제어와 관련하여 매우 중요한 문제로 인식되어 왔다. 따라서, 안정된 인간의 걸음걸이(gait pattern)을 관찰하고 이를 이족 보행 로봇에 적용하기 위해 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔지만, 이동 자세 및 보폭, 속도 등 여러 조건에 의해 결정되는 인간의 걸음걸이를 정확하게 모델링 하는 것은 아직 풀어야 할 과제로 남아 있다.¹⁻³

이족 보행 로봇의 보행 안정성과 관련하여 M.

Vukobratovic et al.⁴ 은 이족 운동의 안정성을 몸체 안정성, 몸체 경로 안정성, 걸음걸이 안정성으로 구분하고 처음으로 ZMP(zero moment point)의 개념을 적용하였다. ZMP란 중력 및 관성력에 의해 로봇에 작용하는 모멘트가 영(zero)이 되는 점으로 로봇 발바닥에 의해 구성되는 투영 영역(support polygon) 내에 ZMP가 존재할 때, 로봇의 안정성이 보장된다고 알려져 있다. 이를 바탕으로 Kajita et al.⁵ 는 로봇을 선형 역진자(linear inverted pendulum)로 단순화하고 제한적이지만 인간의 특징적인 걸음걸이를 근사적으로 모사하였다. 그러나, 이 방법은 이족 보행 로봇의 모든 질량이 한 점에 모여

있다고 가정함으로써, 간단한 보행 궤적의 생성에는 적합하나 외란에 의하여 발생하는 질량 중심(center of mass)에 대한 각운동량의 변화를 고려하지 않아 정확한 동적 특성을 반영할 수 없다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 Pratt et al.⁶은 외란이 작용할 때, 로봇이 발바닥을 기준으로 임의의 회전을 한다고 가정함으로써 각 운동량을 고려하려고 했지만 이 역시 발목에서 발생하는 모멘트에 대한 고려는 없었으며 외란은 로봇이 한 발로 지지될 때만 존재한다고 한정하였다. 앞서 언급한 두 방법 외에도, 로봇 전체에 대한 동적 해석을 통해 보행 패턴을 계산하는 방법이 있으나 이는 너무 복잡하고 계산량이 많아 실제 로봇에 적용하기에는 많은 어려움이 있다.

본 논문에서는 외란의 영향을 받는 로봇의 정확한 동적 모델링을 위해 선형 역덤벨 모델(linear inverted dumbbell model)을 이용하여 각운동량의 변화를 효과적으로 고려할 수 방법을 제안한다.⁷ 이를 바탕으로 로봇의 안정적 보행을 보장하는 로봇 무게중심에 대한 ZMP 궤적을 생성한다. 기존의 선형 역진자 모델을 이용하여 구한 ZMP 와 비교할 때, 선형 역덤벨 모델을 이용하여 구한 ZMP 의 영역이 보다 확장되었다는 점에 착안하여, 앞서 구한 ZMP 궤적의 구간 내에서 인간의 보행 궤적과 유사한 보행 궤적을 유도한다. 이 때, 로봇 발과 지면 사이에서 발생하는 충격을 최소화하며 보다 자연스러운 걸음걸이를 구현하기 위하여 발목에 대한 compliance 제어 및 로봇 발바닥과 지면이 닿는 순간에 발생하는 충격에 대한 impedance 제어가 수행된다. 설계된 기준 궤적에 대해 다양한 실험을 통하여 이족보행로봇의 동적 보행에 대한 안정성을 확인한다.

본 논문의 2 장에서는 선형 역덤벨 모델을 소개하고 이를 기반으로 로봇의 안정적 보행을 보장하는 ZMP 영역을 유도한다. 3 장에서는 2 장에서 제시된 기준 ZMP 궤적을 바탕으로 보다 자연스러운 보행 궤적의 설계 방법이 논의된다. 4 장에서는 설계된 보행 궤적을 실제 로봇에 적용하기 위한 compliance, impedance 제어기 및 ZMP 궤적 추종 제어기 설계가 논의되며 마지막으로 5 장에서는 제작된 이족보행로봇에 대한 다양한 실험을 통해 이를 검증한다.

2. 로봇 모델링 및 ZMP 궤적 생성

2.1 선형 역덤벨 모델

로봇의 동적 보행에 영향을 미치는 여러 요소 가운데 가장 중요한 것은 가속도에 의하여 발생하는 관성이다. 충분히 느린 속도로 움직이는 정적인 보행의 경우엔 무시 가능하지만 동작 중인 로봇에 외력이 가해질 때 증가되며, 보행 중 로봇의 발이 불규칙한 지형에 닿았을 때도 유사한 효과가 나타난다. 이와 같은 외란에 대하여 균형을 회복하는 방법 중 하나는 외란에 의하여 로봇 무게 중심에서 발생한 운동량을 예측하고 동역학적으로 안정 영역에 발이 위치하도록 하는 것이 있다. 이 장에서는 먼저 외란의 영향을 받는 로봇의 정확한 동적 거동을 얻기 위해 선형 역덤벨 모델을 소개한다.

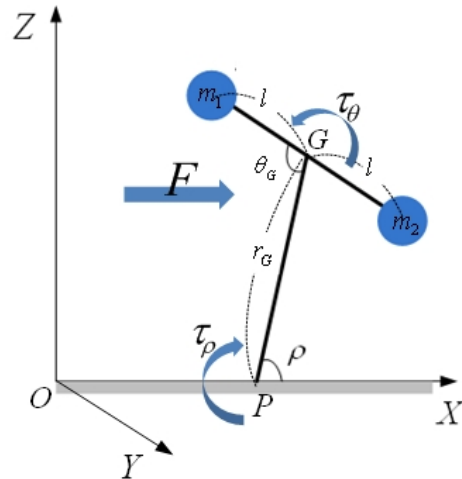


Fig. 1 Linear inverted dumbbell model

선형 역덤벨 모델은 Fig. 1 에서 보이는 것처럼 로봇 몸체가 팔, 얼굴 또는 움직이는 두 다리 등에 의하여 회전되는 현상을 명시적으로 나타낼 수 있도록 무게 중심에서의 하나의 질량을 두 개의 질량 m_1 과 m_2 로 나누고 질량을 무시한 선형 강체에 의하여 연결되어 평면 상에서 회전 및 병진 운동을 한다고 가정한다. 덤벨 중심 G 로부터 바닥 P 까지의 거리와 덤벨의 두 질량 사이의 거리를 각각 r_G 과 l 이라 하고 덤벨 중심 G 의 회전 위치 및 덤벨 축의 자세각을 각각 θ_G 와 ρ 라 하자.

덤벨이 좌우 대칭이라는 가정 하에서 점 P 에 대한 덤벨의 각운동량은 다음과 같이 계산된다.

$$H_p = \sum_{i=1}^2 r_i \times \frac{m}{2} v_i = m r_G \times \dot{r}_G + H_G \quad (1)$$

여기서, $m/2 = m_1 = m_2$ 이고 H_G 는 질량 중심 G 에서의 덤벨의 운동량이다. 평행축 정리를 이용하면 질량 중심에 대한 덤벨의 각운동량 H_G 는 다음과 같이 유도된다.

$$H_G = \sum_{i=1}^2 l_i \times \frac{m}{2} (\dot{\theta}_G \times l_i) \quad (2)$$

따라서, 원점에 대한 덤벨의 운동량 H_O 와 운동량의 변화율 \dot{H}_O 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} H_O &= H_G + \overline{OG} \times m \dot{r}_G \\ \dot{H}_O &= \dot{H}_G + \overline{OG} \times m \ddot{r}_G \end{aligned} \quad (3)$$

한편, 로봇의 보행 안정성을 보장하기 위해서는 로봇의 발바닥에 의해 형성되는 투영 영역 내에 지면으로부터의 각운동량이 0 이 되도록 하는 반력점이 존재해야 하며, 앞서 구한 덤벨의 각운동량을 고려할 때, X 축 방향의 ZMP 값 p_x 는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} m p_x (\ddot{z}_G + g) &= \pm m l^2 \ddot{\theta}_G + m x_G (\ddot{z}_G + g) - m \ddot{x}_G z_G \\ \therefore p_x &= x_G - \frac{z_G}{\ddot{z}_G + g} \ddot{x}_G \pm \frac{l^2}{\ddot{z}_G + g} \ddot{\theta}_G \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, x_G 및 z_G 는 질량 중심 G 의 X 축 및 Z 축 방향의 좌표이며 g 는 중력가속도이다. 한편, 유사한 방법으로 Y 축 방향의 ZMP 값 p_y 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_y = y_G - \frac{z_G}{\ddot{z}_G + g} \ddot{y}_G \mp \frac{l^2}{\ddot{z}_G + g} \ddot{\theta}_G \quad (5)$$

여기서, y_G 는 질량 중심 G 의 Y 축 방향의 좌표이다. 위의 식 (4)와 (5)에서 확인할 수 있듯이, 역진자 모델을 이용하여 ZMP 방정식을 유도한 경우와 비교할 때, 역덤벨 모델을 이용한 경우엔 ZMP 방정식에 무게 중심에서의 각운동량이 추가되어 동적 보행 시 로봇 몸체의 각운동량을 적절히 고려할 수 있게 된다.

2.2 역덤벨 모델을 이용한 ZMP 궤적 생성

이 절에서는 선형 역덤벨 모델을 바탕으로 유도된 ZMP 값 (p_x, p_y) 을 이용하여 보행 중 로봇의 동적 안전성을 보장하는 기준 ZMP 궤적을 생성한다. 먼저, Z 축 방향을 따라 무게 중심의 변화량이 미소하다고 가정할 때, X 축 방향의 기준 ZMP 궤적에 대한 방정식은 식 (4)로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} p_x &= x_G - \frac{z_G}{g} \ddot{x}_G - \frac{l^2}{g} \ddot{\theta}_{yG} \\ \therefore \ddot{x}_G - \frac{g}{z_G} x_G &= -\frac{g}{z_G} p_x - \frac{l^2}{z_G} \ddot{\theta}_{yG} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\ddot{\theta}_{yG}$ 는 덤벨 중심의 회전 가속도 성분 중 Y 축 방향으로의 성분이다. 식 (6)을 풀면 구간 $0 \leq t \leq T$ 에서 다음과 같은 X 축 방향으로의 기준 ZMP 궤적은 식 (7)의 방정식으로부터 얻을 수 있다.

$$x_G(t) = \left\{ \frac{f_x}{\omega^2} + x_G(0) \right\} \cosh(\omega t) + \frac{\dot{x}_G(0)}{\omega} \sinh(\omega t) - \frac{f_x}{\omega^2} \quad (7)$$

여기서, $\omega = \sqrt{g/z_G}$, $f_x = -\omega^2 p_x - l^2 \ddot{\theta}_{yG}/z_G$ 이고 무게 중심의 X 축 방향으로의 초기 위치 및 초기 속도에 대한 조건은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} x_G(0) &= \frac{-S_t}{2}, \\ \dot{x}_G(0) &= \omega \left\{ \frac{S_t}{2} \left(\frac{1 + \cosh \omega T}{\sinh \omega T} \right) + \frac{f_x}{\omega^2} \left(\frac{1 - \cosh \omega T}{\sinh \omega T} \right) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, S_t 는 보폭이고, T 는 보행 주기이다. 유사한 방법으로 Y 축 방향의 기준 ZMP 궤적은 식 (9)의 방정식으로부터 얻을 수 있다.

$$y_G(t) = \left\{ \frac{f_y}{\omega^2} + y_G(0) \right\} \cosh(\omega t) + \frac{\dot{y}_G(0)}{\omega} \sinh(\omega t) - \frac{f_y}{\omega^2} \quad (9)$$

여기서, $f_y = -\omega^2 p_y + l^2 \ddot{\theta}_{xG}/z_G$ 이고 $\ddot{\theta}_{xG}$ 는 덤벨 중심의 회전 가속도 성분 중 X 축 방향으로의 성

분이다.

ZMP 를 발바닥 중심 좌표계의 원점에 두고 생성된 보행 궤적을 실제 로봇에 적용하게 되면 여러 가지 외부 변수들로 인하여 동적 안정성을 얻기가 쉽지 않다. 따라서, 동적 보행 시 안정성을 크게 향상시킬 수 있도록 로봇 특성에 맞는 적절한 궤적을 생성해 줄 필요가 있다고 판단된다. 식 (7)과 식 (9)는 기본적으로 기준 ZMP 를 발바닥 중심 좌표계 원점에 두고 있지만 외란에 의해서 덤벨 중심의 회전 가속도 향이 발생되면 기준 ZMP 영역이 확장됨을 의미한다. 따라서, 외란이 작용하는 경우에 변화된 ZMP 영역에서 여유(margin)를 가지고 움직일 수 있게 된다. 이러한 여유 확장은 자연스러운 동적 보행 궤적을 세우는 데 용이하게 작용될 수 있을 것이다.

3. ZMP 궤적 기반의 로봇 보행 궤적 생성

이전 연구에서, Kim et al.²은 보행 시 인체의 무게 중심 궤적을 고려하여 에너지 소모를 최소화하는 보행 궤적을 유전알고리즘을 이용하여 제시한 바 있으며, Kang et al.¹도 역진자 모델을 바탕으로 역시 유전알고리즘을 적용하여 유연한 궤적을 제시한 바 있다. 이와 비교할 때, 본 연구에서 제시하는 방법은 보행 궤적변수를 이용하여 주어진 ZMP 영역 안에서 보다 안정적이고 자연스러운 보행 궤적을 생성하는 것이 가능하다. 따라서, 다양한 이족 보행 로봇에 대하여 비교적 간단하게 적용 가능하다는 장점이 있다.

먼저, 무게 중심의 수직 Z 방향으로의 이동이 제한적이므로 로봇의 보행 안정성에 미치는 영향은 미미하다는 가정 하에서 주어진 ZMP 영역 내에서 보행 궤적은 충분히 부드러우며 미분 가능해야 한다. 또한, 보폭, 보행 주기 등 보행 궤적에 중요한 영향을 미치는 요소들에 의해 궤적 생성 및 구현이 용이하여야 한다. 이와 같은 가정 하에서 다음과 같이 X 축 및 Y 축 방향으로의 보행 궤적을 생성할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x(t) &= S_x \left\{ \frac{t - (\alpha + t_0)}{T - \alpha + \beta} - \frac{\epsilon}{2\pi} \sin \frac{2\pi [t - (\alpha + t_0)]}{T - \alpha + \beta} \right\} + x(0) \\
 y(t) &= \frac{S_y}{2} \left\{ 1 - \cos \frac{\pi [t - (\alpha + t_0)]}{T - \alpha + \beta} \right\} + y(0)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

여기서, S_x 및 S_y 는 각각 X 축 및 Y 축 방향으로의 보폭이며, t_0 는 initial time 이다. 아래 Fig. 2 에서 확인할 수 있듯이, α 및 β 는 initial/final time delay factor 로서 그 값이 증가할수록 보행 시작 및 종료 시간이 지연되는 효과를 가져오게 된다. 따라서, 이 두 값을 조절함으로써 기준 ZMP

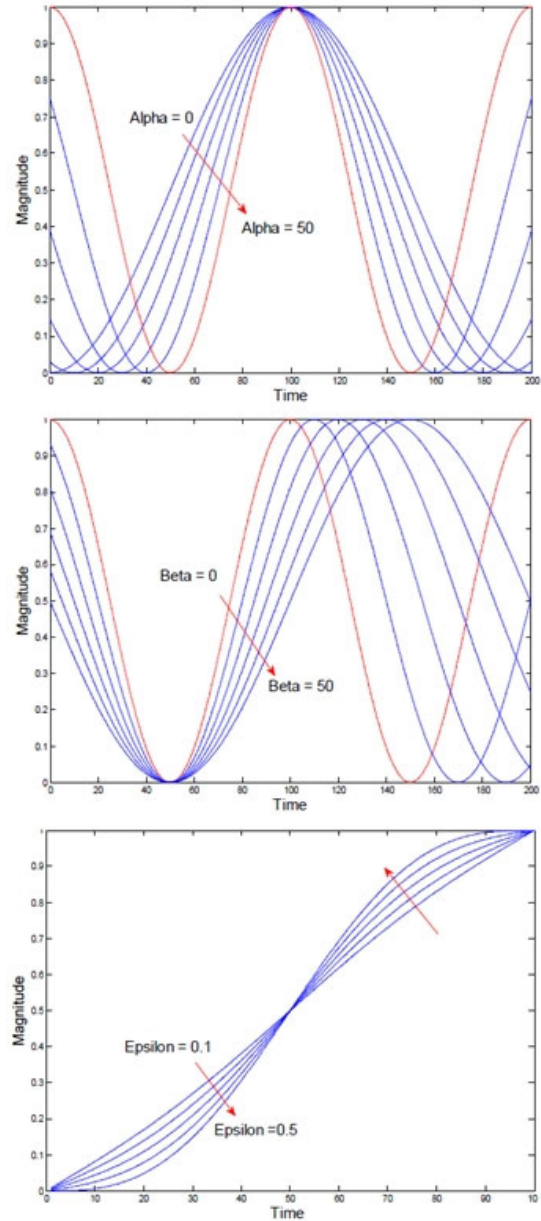


Fig. 2 Varying base trajectories in X - axis with respect to α , β and ϵ

영역 내에서 머무르는 시간을 조절할 수 있다. 또한, ε 은 형상 결정 인자로서 그 값이 증가할수록 궤적의 유연성은 증가하게 된다. 이와 같은 보행 변수들은 환경에 따라 손쉽게 자연스러운 최적의 보행 궤적을 생성할 수 있으므로 식 (10)의 보행 궤적은 다양한 보행 조건 하에서 변하는 ZMP 를 추종하는 데 유용하게 적용될 수 있다.

식 (10)에서 제시된 보행 궤적을 바탕으로 이에 적합한 다리 궤적을 생성하기 위해서는 아래 사항이 반드시 고려되어야 한다. 첫째, 다리의 지지 상태와 무관하게 무게 중심은 여전히 ZMP 영역 내에 존재하여야 한다. 둘째, 위의 보행 궤적이 X 축 방향을 따라서 일정한 거리로 이동 가능하도록 대칭을 이루어야 한다. 셋째, 다리 지지부가 접히거나 혹은 완전히 펴지는 등의 특이형상을 취하지 않도록 도달 가능한 거리로 다리 궤적은 이동하여야 한다. 위에서 언급된 내용을 고려하여, X 축 및 Z 축 방향으로의 다리 궤적은 다음과 같이 설계되었다.

$$x_f(t) = S_f \sin \left[\frac{\pi}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) \right] \tag{11}$$

$$z_f(t) = \frac{h_f}{2} \left[1 + \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{4} \right) \right]$$

여기서, S_f 는 X 축 방향의 보폭이고 h_f 는 최대 다리의 높이이다.

Fig. 3-(a)와 (b)는 각각 X 축 및 Y 축 방향으로의 2 절에서 얻어진 기준 ZMP 궤적과 식 (10)의 보행 궤적을 비교하고 있으며 이를 통해 식 (10)의 보행 궤적은 기준 ZMP 를 중심으로 동적 거동을 하는 부드러운 패턴으로 설계되었음을 확인할 수 있다.

4. 로봇의 동적 보행을 위한 제어기 설계

4.1 compliance 제어기 설계

로봇이 보행 시 접촉하게 되는 실제 지면은 이상적인 경우를 제외하면 일반적으로 평탄하다고 볼 수 없기 때문에 로봇의 발바닥이 항상 지면과 평행하게 면 접촉하지는 않는다. 심한 경우 점 접촉이 빈번히 발생하기도 한다. 이런 경우, 로봇은 신속히 지면에 순응해야 중심을 유지할 수 있으며 다음 동작을 수행할 수가 있다. Park et al.⁸은 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위하여 인간 발에

대한 해부학적 분석을 바탕으로 발가락과 뒤꿈치 조인트를 갖는 유연한 구조의 로봇 발을 제안한 바 있으며, 본 논문에서는 로봇의 발목을 질량-스프링으로 모델링하고 비 평탄면과의 접촉으로 발목에 발생하는 토크에 대하여 stiffness 와 damping 을 부여하는 방식으로 compliance 제어하였다. 아래 Fig. 4 는 compliance 제어를 통해 로봇 발바닥이 비 평탄면에 대하여 순응하는 모습을 개략적으로 보여 주고 있다.

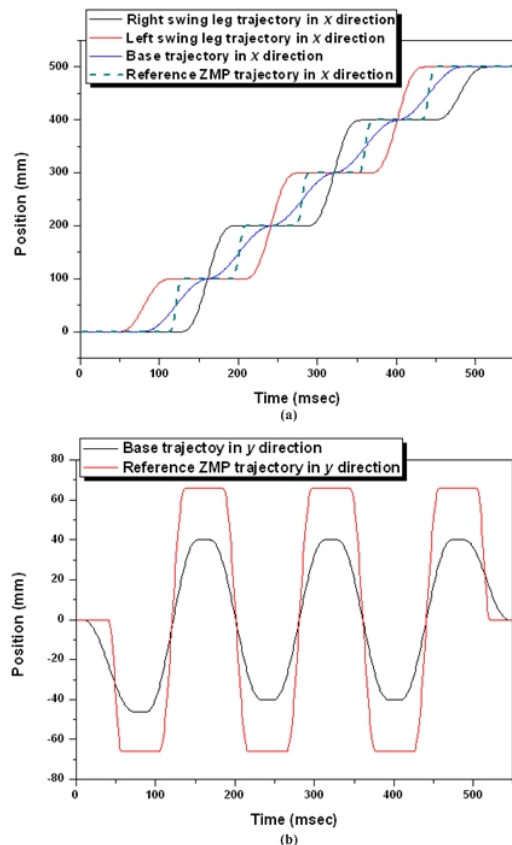


Fig. 3 Comparison of base and foot trajectories in X and Y axes with ZMP trajectories

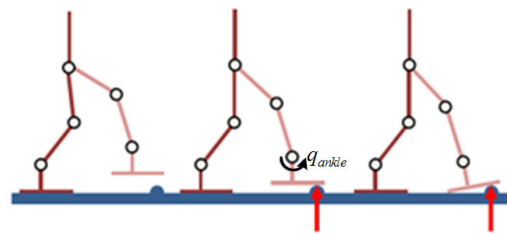


Fig. 4 Schematics of compliance control

로봇 발바닥의 질량을 m_f , 길이를 l 이라 두면, 질량-스프링-댐퍼 모델에 근거하여 로봇 발목에 대한 운동방정식은 다음과 같이 유도된다.⁹

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{q}_{pitch} \\ \Delta \ddot{q}_{roll} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 & 0 \\ 0 & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{q}_{pitch} \\ \Delta \dot{q}_{roll} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_{pitch} \\ \Delta q_{roll} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{pitch} \\ \tau_{roll} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, q_{pitch} , q_{roll} 은 각각 발목의 pitch 및 roll 방향의 각도이다. 한편, $\Delta \dot{q}_{pitch,roll}$, $\Delta \dot{q}_{pitch,roll}$ 와 $\Delta q_{pitch,roll}$ 은 발목의 pitch 및 roll 방향의 각각속도, 각속도 및 각도 오차이다. I 는 로봇 발목의 관성 모멘트이고, $d_{1,2}$ 와 $k_{1,2}$ 는 각각 발목의 pitch 및 roll 방향의 damping 및 stiffness 이다. 또, $\tau_{pitch,roll}$ 은 각각 발목에 부착된 힘-토크 센서로부터 측정되는 pitch 및 roll 방향의 토크이다. Fig. 4 에서처럼, 비 평탄면과의 접촉에 의해 발생하는 토크에 대하여 식 (12)의 기준 발목 각도는 다음과 같이 보정된다.

$$\begin{cases} \ddot{q}_{pitch} = \ddot{q}_{pitch}^d + \frac{12}{m_f l^2} [\tau_{pitch} - d_1 \Delta \dot{q}_{pitch} - k_1 \Delta q_{pitch}] \\ \ddot{q}_{roll} = \ddot{q}_{roll}^d + \frac{12}{m_f l^2} [\tau_{roll} - d_2 \Delta \dot{q}_{roll} - k_2 \Delta q_{roll}] \end{cases} \quad (13)$$

여기서, q_{pitch}^d 와 q_{roll}^d 는 각각 발목의 pitch 및 roll 방향의 기준 각도이다. 식 (13)에서 이동 상태에 따라, damping 과 stiffness 는 달리 설정될 수 있으며, 이를 통하여 지면 형상에 따라 적절히 순응할 수 있게 된다.

4.2 impedance 제어기 설계

로봇이 보행 시 고려해야 하는 또 다른 문제점은 발바닥과 지면이 접촉할 때 발생하는 충격이다. 보통의 경우, 이러한 충격을 흡수하기 위하여 로봇 발바닥에 충격 흡수제를 사용하기도 하지만, 적절한 흡수제를 사용하지 않을 경우 로봇의 불안정성이 증가될 수 있으며 보폭 또한 제한된다. 따라서, 충격을 흡수하거나 완화할 수 있는 운동을 주어야 하며 본 논문에서는 impedance 제어를 사용하였다. 발목에 부착된 힘-토크 센서로부터 수직 방향에 대한 힘을 측정하여 로봇의 발바닥이 지면에 착지하는 순간부터 적용된다. 아래의 Fig. 5 는 질량-스프링-댐퍼로 모델링 된 로봇 발의 모습과

impedance 제어를 통해 로봇이 지면으로부터의 충격을 완화하며 보행하는 모습을 개략적으로 보여 주고 있다.

본 논문에서는 Shin et al.³ 이 제안한 pseudo-impedance 기법을 바탕으로 지면으로부터의 충격을 완화하였다. 보행 중 발생하는 수직방향의 힘을 제어하기 위하여, 발목에 부착된 힘-토크 센서로부터 측정된 수직방향의 힘을 F_z 라 하고, 이족 보행 로봇의 보행 상태에 따라 설계된 수직 방향의 힘을 F_z^d 라 할 때, Shin et al.³에 의하여 제안된 pseudo-impedance 모델은 다음과 같이 유도될 수 있다.

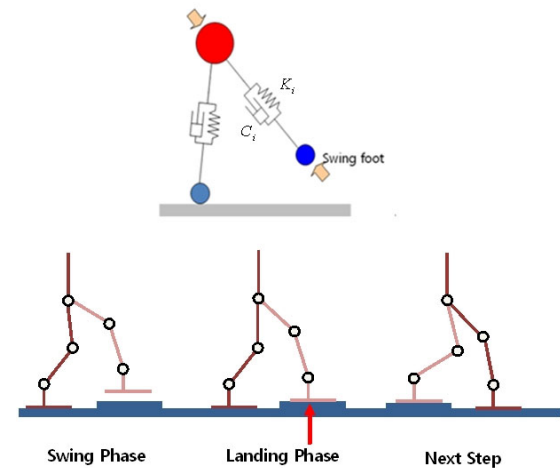


Fig. 5 Schematics of impedance control and mass-spring-damper model for swing leg

$$M_z \ddot{z} + C_z \dot{z} + K_z z = F_z - F_z^d \quad (14)$$

여기서, M_z , C_z 및 K_z 는 수직방향의 힘을 보상하기 위한 질량, damping 계수 및 stiffness 를 나타내며, z 는 보상 높이를 의미한다. 따라서, 식 (14)로부터 얻어진 보상 높이 z 을 3 절의 무게 중심의 궤적으로부터 계산된 발목 위치에 더해줌으로써 impedance 제어를 적용할 수 있게 된다.

4.3 ZMP 추종 제어기 설계

이족 보행 로봇은 Fig. 1 의 역덤벨 모델에 댐퍼와 스프링이 첨가된 형태로 아래 Fig. 6 와 같이 표현될 수 있다. 위의 모델을 상태변수 방정식의 형태로 표현하면 식 (15)와 같다.⁹

$$\begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \beta & -b/\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k/\alpha \end{bmatrix} u \quad (15)$$

$$y = \begin{bmatrix} k & 0 \\ m_1g+m_2g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -k \\ m_1g+m_2g \end{bmatrix} u$$

여기서, α 와 β 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} \alpha = m_1(r-1)^2 + m_2(r+l)^2 \\ \beta = m_1g(r-1) + m_2g(r+l) - k \end{cases} \quad (16)$$

여기서, ψ 와 r 은 각각 덤벨 축의 자세각과 덤벨 중심으로부터 바닥까지의 거리를 나타낸다. 한편, u 와 y 는 각각 실제 ZMP 값 (p_x^{real}, p_y^{real})과 2.2 절의 식 (7)과 (9)에 주어진 기준 ZMP 궤적과의 오차와 로봇 몸체의 보상값이다. 실제 X 축 방향의 ZMP 값 p_x^{real} 은 발목에 부착된 힘-토크 센서로부터 측정된 Y 축 방향의 토크와 수직 방향의 힘을 이용하여 다음과 같이 근사적으로 얻어질 수 있다. 이 때, 덤벨 중심의 회전은 없다는 가정을 통하여 식 (4)의 마지막 항은 제거될 수 있다.

$$p_x^{real} = x_G - \frac{z_G}{\ddot{z}_G + g} \ddot{x}_G \approx -\frac{\tau_y}{F_z} \quad (17)$$

p_y^{real} 역시 유사한 방법으로 구할 수 있다. 또한, stiffness k 와 damping b 는 외력이 주어졌을 때, 발목 각도만을 조정하여 목표 시간 내에 로봇이 안정된 자세를 취할 수 있도록 설정되며, 이 기준에 도달하게끔 제어기 설계가 수행된다. 본 논문에서는 $k=2594.1$ N/m 및 $b=108.15$ N·sec/m 로 각각 설정되었으며 이 경우, settling time 은 0.55 sec 로 측정되었다.

로봇의 무게 중심에 대한 실제 ZMP 값이 기준 ZMP 궤적을 추종하도록 식 (15)의 모델링을 바탕으로 LQR 최적 제어기를 설계하였다. 앞서 언급한 stiffness 와 damping 및 settling time 조건을 만족시키도록 가중행렬 $Q=diag(5000, 0)$ 와 $R=0.01$ 이 선택되었으며, 이 때, 제어기의 이득은 $K=[883.55 \ 49.8]$ 가 되었다. 한편, 정상상태에서의 ZMP 궤적 오차를 줄이기 위하여 추가적으로 feed-forward 이득을 더하여 2-자유도의 제어기를 구성하였다. 여러 번의 시행오차를 통하여 feed-forward 이득 N

은 501로 선택되었다.

Fig. 7 은 발목의 초기 위치와 속도가 0.1745 rad 과 0 rad/sec 일 때, Fig. 6 의 모델에 대하여 계단 입력을 주는 시뮬레이션을 통해 얻은 응답 곡선을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 기준 settling time 인 0.55 sec 이내에 발목의 위치와 속도는 각각 1 rad 와 0 rad/sec 로 수렴하므로 주어진 요구 조건을 만족함을 쉽게 확인할 수 있다.

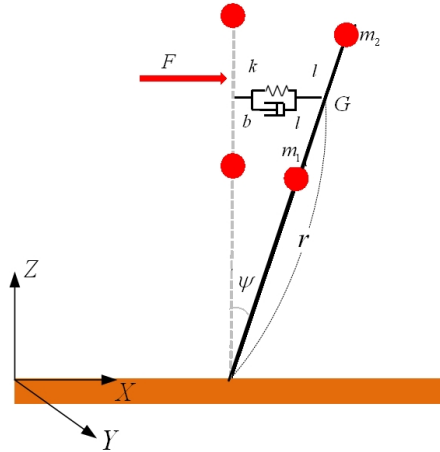


Fig. 6 Schematics of linear inverted dumbbell model with spring and damper

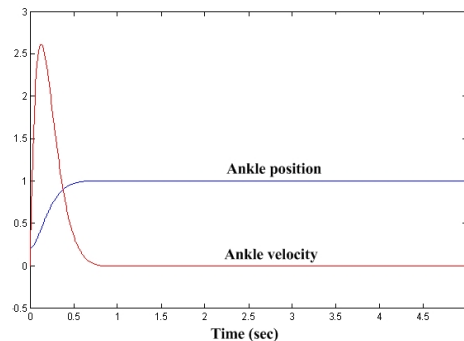


Fig. 7 Step response of linear inverted dumbbell model with 2-DOF control system

앞서 언급한 Compliance 제어기, impedance 제어기 그리고 기준 ZMP 추종 제어기의 구현에 대한 block diagram 이 아래 Fig. 8 에 나타나 있다. 역기구학을 통해 얻어지는 관절의 각도, 각속도 및 가속도가 로봇에 대한 입력으로 주어지게 되는 데 이와 관련된 제어기에 대한 설명은 본 논문에서는 생략되었다.⁹

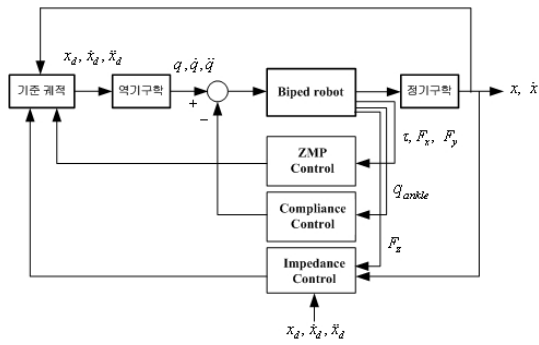


Fig. 8 Block diagram of control for dynamic walking of a biped robot

5. 실험 및 토의

먼저 설계된 보행 궤적을 실제 로봇에 적용하여 보행 궤적에 따라 움직이는 모습을 확인해 보았다. 실험을 위해 사용된 로봇은 총 13 개의 자유도(다리: 6 자유도, 허리: 1 자유도)를 가지고 있으며 높이는 90 cm, 무게는 32 kg 이다. 6 축의 힘-토크 센서가 발목 부위에 장착되어 있으며 몸체에 부착된 gyro 센서가 가속도와 기울기를 측정할 수 있다. 보행 속도는 0.8 km/h 이고 보행 주기 T 는 0.8 sec/step 이다. 아래 Fig. 9 은 85 mm 의 보폭으로 동적 보행 중인 로봇의 모습을 보여주고 있다. 단 순히 앞으로 전진만 하는 것이 아니라 좌우로 적절히 움직이면서 안정적인 보행을 하는 모습을 확인할 수 있다.

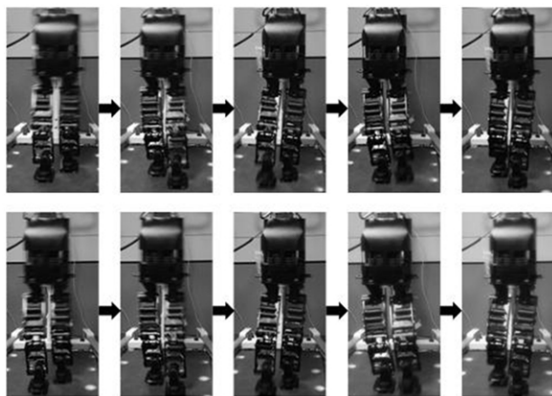


Fig. 9 Snapshot of dynamic walking of a biped robot

기본적으로 ZMP 영역은 로봇 발바닥의 크기와 깊은 상관관계가 있다. 발바닥이 커질수록 그만큼

ZMP 영역이 증가하게 되고 안정적이겠지만 동적 보행은 어렵기 때문에 적절한 사이즈로 발바닥을 설계해 줘야 한다. 본 논문에서 사용된 로봇의 발바닥의 길이와 폭은 각각 170 mm 와 94 mm 이며, X 축과 Y 축 방향으로의 안정 영역은 각각 100 mm 와 90 mm 이다.

아래 Fig. 10 의 (a)와 (b)는 50 mm 의 보폭으로 로봇이 보행할 때, 얻어진 실제 ZMP 궤적을 기준 ZMP 궤적 및 무게 중심의 기준 궤적과 비교한 것이다. 발바닥의 크기에 의해 결정되는 X 축과 Y 축 방향의 ZMP 영역이 좁은 점선으로 표시되었다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 보폭을 내딛는 순간 실제 ZMP 궤적과 기준 ZMP 궤적 사이에 오차가 발생하지만 안정적인 ZMP 영역 안에 존재하였으며 다음 보폭을 내딛기 전까지 점차 감소하였다. 보폭을 증가시키며 추가적인 실험을 수행한

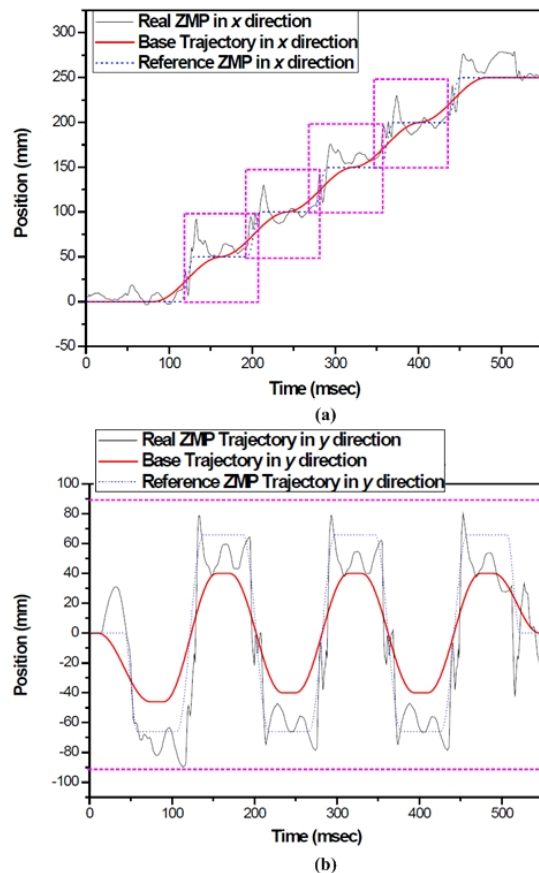


Fig. 10 Comparison of real ZMP and reference ZMP trajectories in X - and Y-direction

결과, 실제 ZMP 궤적은 여전히 안정적인 ZMP 영역 안에 존재하였지만, 기준 ZMP 궤적 사이의 오차는 점점 증가하였으며 따라서 향후, 보폭의 크기에 상관없이 실제 ZMP 궤적이 기준 ZMP 궤적을 추종할 수 있는 연구와 더불어, compliance 제어나 impedance 제어를 통해 보상할 수 없는, 보행 중 발생할 수 있는 외란에 대하여 로봇의 균형을 회복하는 방안에 대한 연구가 추가적으로 수행될 계획이다.

6. 결론

본 논문에서는 선형 역담벨 모델을 이용하여 이족 보행 로봇을 위한 기준 ZMP 궤적을 생성하였고 실제 로봇에 적용하여 그 효용성을 검증하였다. 제안된 모델을 통해 얻은 기준 ZMP 궤적은 로봇의 보행 궤적을 설계하는 근거로 사용되었으며 보다 자연스러운 동적 보행을 위한 유연성을 제공해 주었다. 한편, 로봇의 동적 보행을 구현하기 위해 compliance 및 impedance 제어기, 그리고 기준 ZMP 궤적 추종 제어기가 설계되었으며, 다양한 실험을 통하여 로봇이 안정적인 동적 보행을 수행할 수 있음을 확인하였다. 향후, 외부 교란이 주어지는 경우에도 넘어지지 않고 균형을 유지할 수 있는 회복 방안에 대한 추가적인 연구를 통하여 본 논문의 결과를 바탕으로 강인한 동적 보행을 수행할 수 있는 이족 보행 로봇을 개발할 계획이다.

참고문헌

1. Kang, C., Noh, K., Kong, J. and Kim, J., "A Smooth Trajectory Generation for an Inverted Pendulum Type Biped Robot," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 7, pp. 112-121, 2005.
2. Kim, B., Han, Y. and Han, H., "Gait Pattern Generation of 5-link Biped Robot Based on Trajectory Images of Human's Center of Gravity," Journal of KIISE: Software and applications, Vol. 36, No. 2, pp. 131-143, 2009.
3. Shin, H., Park, J. and Kwon, O., "Locomotion of Biped Robots on Irregular Surface Based on Pseudo-Impedance Model," Transactions of KSME, Vol. 34, No. 6, pp. 667-673, 2010.

4. Vukobratovic, M., Borovac, B. and Surdilovic, D., "Zero Moment Point-Proper Interpretation and New Applications," Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, pp. 237-244, 2001.
5. Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H., "The 3D Linear Inverted Pendulum Model: A simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation," Proc. of IEEE-RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 239-246, 2001.
6. Pratt, J. E., Carff, J., Drakunov, S. and Goswami, A., "Capture Point: A Step toward Humanoid Push Recovery," Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, pp. 200-207, 2006.
7. Lee, S., Kim, M., Kim, J. and Choi, M., "Receding Horizon Viability Radius for Stability of Humanoid Robot under External Perturbation," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 24, No. 5, pp. 1127-1139, 2010.
8. Park, J., Kim, H. and Kwon, S., "Design of a Flexible Robot Foot with Toes and Heel Joints," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 446-454, 2011.
9. Lee, S., "Balance Recovery Methodology enabling ZMP Expansion for Humanoid Robot," Mechanical Engineering, Ph. D Thesis, Seoul National University, 2010.