

2족 보행 로봇의 보행 안정성 향상을 위한 ZMP 보상 및 임피던스 제어

박종현* · 정호암**

(1999년 7월 21일 접수)

ZMP Compensation and Impedance Control for Improving Walking Stability of Biped Robots

Jong Hyeon Park and Hoam Chung

Key Words : ZMP Compensation(ZMP 보상), Impedance Control(임피던스 제어), Biped Robot(2족 보행 로봇), Impedance Modulation(임피던스 조절), On-Line Trajectory Generation(온라인 궤적 생성)

Abstract

This paper proposes an adaptive trajectory generation strategy of using on-line ZMP information and an impedance control method for biped robots. Since robots experience various disturbances during their locomotion, their walking mechanism should have the robustness against those disturbances, which requires an on-line adaptation capability. In this context, an on-line trajectory planner is proposed to compensate the required moment for recovering stability. The ZMP equation and sensed ZMP information are used in this trajectory generation strategy. In order to control a biped robot to be able to walk stably, its controller should guarantee stable footing at the moment of feet contacts with the ground as well as maintaining good trajectory tracking performance. Otherwise, the stability of robot will be significantly compromised. To reduce the magnitude of an impact and guarantee a stable footing when a foot contacts with the ground, this paper proposes to increase the damping of the leg drastically and to modify the reference trajectory of the leg. In the proposed control scheme, the constrained leg is controlled by impedance control using the impedance model with respect to the base link. Computer simulations performed with a 3-dof environment model that consists of combination of a nonlinear and linear compliant contact model show that the proposed controller performs well and that it has robustness against unknown uneven surface. Moreover, the biped robot with the proposed trajectory generator can walk even when it is pushed with a certain amount of external force.

1. 서론

협소한 인간의 생활 환경 하에서 높은 이동성을 갖는 2족 보행 로봇의 구현은 로봇의 뛰어난 작업 능력을 인간의 일상 생활에 접목시키는데 중요한 열쇠가 된다. 현재 그 어느 때 보다도 많은 연구가 다수의 국가에서 활발히 진행되고 있다. 그러나 그

동역학적인 측면에서 볼 때, 2족 보행은 매우 불안정하며 이러한 2족 보행 로봇의 제어는 여전히 까다롭고 도전적인 주제로 남아있는 것이 현실이다.

복합 위치/힘 제어기,^(1,2) 계산-토크 제어기,⁽⁷⁾ 복합제어기⁽⁶⁾ 등 많은 제어기들이 2족 보행 로봇의 제어를 위해 제안되었다. 2족 보행 로봇을 위한 제어기는 각 다리의 기준 궤적 추종 외에도 발이 땅에 닿을 경우 스윙하던 다리의 안정적인 접촉을 보장할 수 있어야 한다. 접촉 시 발생하는 바운싱(bouncing)은 불안정한 보행을 야기할 수 있다.

본 논문에서는 스윙하는 다리의 지면 접촉을

* 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : erobots@yahoo.com

TEL : (02)2290-0435 FAX: (02) 2290-0434

** 한양대학교 대학원

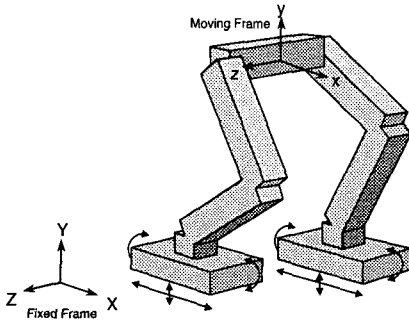


Fig. 1 Model of the biped robot

다루기 위해 임피던스 조절을 포함한 임피던스 제어가 제안되었다. 인간의 경우 다리의 근육은 걸음걸이 상태에 따라 반복적으로 근육과 이완을 되풀이 하며 이로 인해 지면과의 매우 안정적인 접촉이 가능하다. 이러한 맥락에서 안정적인 접촉을 확보하기 위해 임피던스 제어기의 파라미터들은 로봇의 걸음걸이 상태에 따라 조절된다.

보행 중에 로봇은 미는 힘 또는 당기는 힘과 같은 다양한 외란을 겪게 되며 그러한 외란에 대해 충분히 강인해야 한다. 2족 보행 로봇의 안정성은 ZMP(Zero Moment Point) 측정을 통해 평가될 수 있으며 이것은 온라인 모멘트 보상에 이용될 수 있다. 이러한 사실을 바탕으로 본 논문에서는 ZMP 방정식과 현재의 ZMP 정보를 이용하는 온라인 궤적 생성 알고리즘을 제안하였다. 궤적 생성기는 측정된 ZMP가 미리 설정된 ZMP 경계를 벗어나게 되면 활성화 되고 모멘트를 보상하기 위해 기준 링크의 수직방향 가속도를 생성한다.

2족 보행 로봇의 거동을 시뮬레이션 하기 위해 도입되는 환경 모델은 합당한 상호 작용력을 제공하여야 한다. Fujimoto 등은 이러한 환경 모델로 소성 충돌 모델(Plastic Collision Model)을 사용한 바 있다.^(1,2) 본 논문에서는 Marhefka와 Orin이 제안한 비선형 순응 접촉 모델(nonlinear compliant contact model)⁽⁶⁾과 Kraus와 Kumar가 제안한 선형 순응 접촉 모델⁽⁵⁾의 조합으로 이루어진 3자유도 외부 환경 모델을 사용하였다. 이 모델을 통해 충격 흡수를 위해 발 밑에 부착된 패드로 인한 작은 변위들을 시뮬레이션할 수 있으며 보다 실제에 가까운 반력들을 얻을 수 있다.

2족 보행 로봇의 동역학은 2장에 기술하였다. 임피던스 제어기의 설계 및 임피던스 계수 조절 알고리즘은 3장에 제시하였으며 4장에서는 ZMP 보상을 위한 궤적 생성 알고리즘을 서술하였다. 5

장에서는 시뮬레이션을 위한 환경 모델을, 6장에서는 시뮬레이션 결과를 보였으며 7장에서는 결론을 논하였다.

2. 2족 보행 로봇의 동역학

Fig. 1은 본 논문에서 사용된 2족 보행 로봇을 나타낸다. 각 다리는 3자유도를 가지며 전체 운동은 sagittal 평면에 제한된다고 가정하였다.

2족 보행 로봇은 보통의 매니플레이터와는 달리 지면에 고정된 고정 점을 갖지 않으며 보행 중에 발과 지면 사이의 구속 관계는 반복적으로 변하게 된다.⁽⁹⁾ 본 논문에서 사용된 2족 보행 로봇의 동역학은 기준링크에 관한 부분과 걸음걸이 상태에 따라 변하게 되는 두 다리에 관한 부분으로 이루어져 있다.

$$H_c \ddot{q}_c + G_c a_0 + D_c \dot{q}_c + n_c = \tau_c \quad (1)$$

$$H_u \ddot{q}_u + G_u a_0 + D_u \dot{q}_u + n_u = \tau_u \quad (2)$$

$$Q_c \ddot{q}_c + Q_u \ddot{q}_u + R a_0 + P_c \dot{q}_c + P_u \dot{q}_u + g = 0 \quad (3)$$

여기서 $\ddot{q} \in \mathcal{R}^3$ 은 해당 다리의 관절 가속도 벡터이며 $a_0 \in \mathcal{R}^6$ 는 기준 링크의 가속도 벡터이다. $h \in \mathcal{R}^6$ 는 구속력 벡터를 나타낸다. $H, G, Q, R \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ 는 다리 링크와 베이스 링크의 관성과 관련된 항들이며 $n, g \in \mathcal{R}^6$ 는 다리의 코리올리, 구심력 및 중력의 영향을 나타내는 비선형 항 및 베이스 링크의 중력 항이다. $P, D \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ 는 다리 및 베이스 링크에 대한 외력의 동역학적 영향을 나타내는 행렬이다.

아래 첨자 'c'와 'u'는 각각 '구속된(constrained)'과 '구속되지 않은(unconstrained)'의 의미를 갖는다. 구속되지 않은 다리의 구속력의 경우 스윙 상태에서는 영(zero)이지만 하중 이동 상태에서는 값이 존재한다는 것에 유의하여야 한다.

3. 2족 보행 로봇의 임피던스 제어

3.1 걸음걸이 상태와 제어 전략

인간의 정상 걸음걸이에 대한 정형 외과적 연구에 의하면 각각의 걸음걸이는 뒤꿈치 접촉 상태(heel contact phase), 발 디딤 상태(stance phase), 스윙 상태(swing phase)와 같이 3개의 주요한 상태로 나눌 수 있으며,⁽¹⁰⁾ 발 디딤 상태는 다시 하중 이

동 상태(weight acceptance phase)와 단일 다리 지지 상태(single limb support phase)로 나뉘어진다.

본 논문에서는 각 다리에 그 다리의 걸음걸이 상태에 따라 다른 제어 대상을 사용한다. 먼저 다리가 스윙 상태와 하중 이동 상태에 있을 경우에는 발 끝의 중심점에 대한 임피던스 제어 법칙이 사용된다. 이 두 상태에 있어서 제어 구조의 다른점은 하중 이동 상태에서 충격 에너지를 흡수하기 위해 더 큰 감쇄비가 사용된다는 것이다. 단일 다리 지지 상태에서는 기준 링크가 더 정확하게 움직일 수 있도록 기준 링크의 중심점에 대한 임피던스 제어가 사용되며 임피던스 파라미터는 궤적 추종에 적합하도록 고정된다.

3.2 구속되지 않은 다리에 대한 임피던스 제어

구속되지 않은 다리에 대한 임피던스 제어식은 Park 과 Chung 의 경우⁽⁶⁾와 동일하다. 제어 입력은 다음과 같은 식에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} \tau_u = H_u J_{ue}^{-1} [& -M_u^{-1} B_u (\dot{x}_{ue} - \dot{x}_{ue,d}) - M_u^{-1} K_u (x_{ue} - x_{ue,d}) \\ & + M_u^{-1} (f_0 - f) - a_0 - \dot{J}_{ue} \dot{q}_u] \\ & + G_u a_0 + D_u h_u + n_u \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$f_0 = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ w_i \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} & \text{if the pad is squeezed.} \\ \begin{bmatrix} 0_{6 \times 1} \end{bmatrix} & \text{otherwise} \end{cases}$$

이며 M_u , B_u , K_u 는 각각 목표 질량, 감쇄비, 강성을 나타내는 행렬들이다. f 는 외력을 나타내는 벡터이다. J_{ue} 는 기준 링크에서 발바닥 중심점까지의 자코비안이며 $\dot{x}_{ue} \in \mathbb{R}^6$ 는 구속되지 않은 다리의 발바닥 중심점의 속도이다. w_i 는 하중 이동 상태에서 해당 다리가 지지 다리로부터 넘겨 받아야 할 목표 하중을 나타낸다.

3.3 임피던스 조절

스윙 상태와 하중 이동 상태의 경계에서 다리는 공간상의 자유 운동에서 외부 환경에 구속된 운동으로의 천이를 겪게 된다. 일반적으로 로봇은 그 관절에 순응성을 갖지 않으므로 이러한 충돌 순간의 접촉 안정성은 중요한 문제가 된다.

따라서 본 논문에서는 충돌 시의 충격을 완화하고 접촉 안정성을 보장하기 위해 다음과 같은 방

법을 사용한다. 우선 충돌 순간에는 감쇄비를 임계 감쇄비의 50 배로 증가 시켰다. 목표 임피던스 모델의 강성 및 질량 요소들은 궤적 추종에 요구되는 강성 및 대역 폭을 갖도록 선택한다.⁽⁴⁾ 이 방법은 아주 단순하지만 충돌 천이를 안정화하는 데에는 매우 효과적이다. 충돌 안정화 성능을 더욱 향상시키기 위해 제어기는 충돌 순간에 발의 수직 방향 레퍼런스 위치를 $\dot{z}_c - \dot{t}_{pad}$ 로 고정 시키며 레퍼런스 속도를 강제로 영(zero)으로 만든다.

3.4 구속된 다리의 임피던스 제어

구속된 다리에 대한 제어 입력은 기준 링크에 대해 정의되는 임피던스 제어에 의해 결정된다. 기준 링크에 대한 임피던스 제어 법칙은 다음과 같이 유도될 수 있다.

먼저 식 (1)과 식 (2)로부터

$$\ddot{q}_c = H_c^{-1} (\tau_c - G_c a_0 - D_c h_c - n_c) \quad (5)$$

$$\ddot{q}_u = H_u^{-1} (\tau_u - G_u a_0 - D_u h_u - n_u) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 식 (3)에 대입하여 정리하면

$$Q_c H_c^{-1} \tau_c - \tilde{R} a_0 + \tilde{P} h + \tilde{g} = 0 \quad (7)$$

여기서,

$$\tilde{R} = Q_c H_c^{-1} G_c + Q_u H_u^{-1} G_u - R.$$

$$\tilde{g} = g + Q_u H_u^{-1} (\tau_u - n_u) - Q_c H_c^{-1} n_c,$$

$$\tilde{P} = [P_c - Q_c H_c^{-1} D_c \quad P_u - Q_u H_u^{-1} D_u], \quad h = \begin{bmatrix} h_c \\ h_u \end{bmatrix}$$

위의 식으로부터

$$\tau_c = (Q_c H_c^{-1})^{-1} \{ \tilde{R} a_0 - \tilde{P} h - \tilde{g} \} \quad (8)$$

기준 링크의 중심에 대한 목표 임피던스 모델을 다음과 같이 정의한다.

$$M_0 (a_0 - a_{0,d}) + B_0 (\dot{x}_0 - \dot{x}_{0,d}) + K_0 (x_0 - x_{0,d}) = 0 \quad (9)$$

여기서 첨자 '0'은 기준 링크를 의미하며 M_0 , B_0 , K_0 는 기준 링크에 대한 질량, 댐핑, 강성 요소를 나타낸다. 기준 링크에 대한 목표 임피던스 거동을 얻기 위해 식 (9)를 다음과 같이 정리하고

$$a_o = a_{o,d} - M_o^{-1} \{ B_o (\dot{x}_o - \dot{x}_{o,d}) + K_o (x_o - x_{o,d}) \} \quad (10)$$

이를 식 (8)에 대입하면 식 (11)과 같은 구속된 다리의 제어식을 얻을 수 있다.

$$\tau_c = (Q_c H_c^{-1})^{-1} \left[\tilde{R} \{ a_{o,d} - M_o^{-1} \{ B_o (\dot{x}_o - \dot{x}_{o,d}) + K_o (x_o - x_{o,d}) \} \} - \tilde{P}h - \tilde{g} \right] \quad (11)$$

4. 온라인 ZMP 보상

2족 보행 로봇의 동역학은 매우 불안정하기 때문에 그 안정성을 관찰할 수 있는 기준이 필요하다. ZMP는 발 밑의 반력을 측정하면 간단한 식으로 표현이 가능하기 때문에 많은 2족 보행 연구에서 안정성 지표로 사용되고 있다. ZMP는 여러 가지 좌표계에 대해 표현 될 수 있는데 본 논문에서는 고정 좌표계에 대하여 나타낸 ZMP를 사용한다.

Kajita 등은 기준 링크의 궤적 생성 방법으로 Linear Inverted Pendulum Mode (LIPM)⁽³⁾를 제안한 바 있으며 Park 과 Kim 은 이동 다리의 질량도 고려하는 Gravity Compensated Inverted Pendulum Mode(GCIPM)⁽⁸⁾를 제안한 바 있다. 이러한 방법들의 공통점은 기준 링크의 궤적 생성 시 ZMP 방정식을 이용할 때 ZMP 방정식의 비선형성을 제거하기 위해 기준 링크의 수직 방향 운동을 없다고 가정하는 데에 있다. 본 논문에서는 기준 링크의 궤적으로 GCIPM 을 두 다리 지지 상태에까지 확장하여 사용한다. 기준 링크의 수직 방향 레퍼런스가 고정되어 있기 때문에 수직 방향으로의 온라인 궤적 생성은 보행 운동에 대한 영향을 최소화 하면서 안정된 보행을 위한 모멘트를 보상할 수 있다.

온라인 궤적 생성 알고리즘을 유도하기 위해 앞서 서술한 2족 보행 로봇을 Fig. 2와 같이 질점계로 가정한다. 질점계로 가정된 2족 보행 로봇의 ZMP 방정식은 다음과 같다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^6 m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=0}^6 m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=0}^6 m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (12)$$

여기서 g 는 중력 가속도이다. 기준 링크의 수직 방향 가속도 \ddot{z}_0 를 각 합들로부터 분리하면,

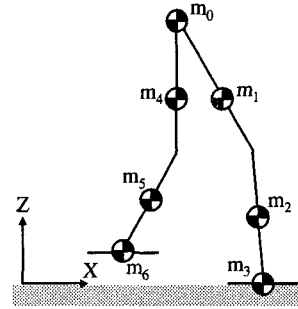


Fig. 2 Model of the biped robot as a system of particles

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g) x_i + m_0 (\ddot{z}_0 + g) x_0 - \sum_{i=0}^6 m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g) + m_0 (\ddot{z}_0 + g)} \quad (13)$$

만약 $\ddot{z}_{0,b}$ 를 x_{zmp} 를 미리 설정된 ZMP 경계 값인 $x_{zmp,b}$ 에 고정시키기 위한 기준 링크의 가속도라고 정의하면 $\ddot{z}_{0,b}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{zmp,b} = \frac{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g) x_i + m_0 (\ddot{z}_{0,b} + g) x_0 - \sum_{i=0}^6 m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g) + m_0 (\ddot{z}_{0,b} + g)} \quad (14)$$

식 (13)과 (14)로부터

$$\ddot{z}_{0,b} - \ddot{z}_0 = \frac{(x_{zmp,b} - x_{zmp}) \left(x_0 \sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g) - \sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g) x_i + \sum_{i=0}^6 m_i \ddot{x}_i z_i \right)}{m_0 (x_{zmp,b} - x_0) (x_{zmp} - x_0)} \quad (15)$$

식 (15)에서 알 수 있듯이 $x_{zmp,b} = x_0$ 또는 $x_{zmp} = x_0$ 가 되는 근접부에서는 $\ddot{z}_{0,b}$ 가 매우 커지게 되며 따라서 $\ddot{z}_{0,b}$ 만 사용할 경우 일반적인 ZMP 궤적 추종은 불가능함을 알 수 있다. \ddot{x}_i 와 \ddot{z}_i 등은 실제로 구하기 힘든 항들이므로 식 (15)는 기준 링크의 질량과 스윙하는 발의 질량 m_s 만을 고려하여 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$e_{acc} = \frac{(x_{zmp,b} - x_{zmp}) \{ m_s (\ddot{z}_s + g)(x_0 - x_s) + m_s \ddot{x}_s z_0 + m_0 \ddot{x}_0 z_0 \}}{m_0 (x_{zmp,b} - x_0)(x_{zmp} - x_0)} \quad (16)$$

e_{acc} 는 정확한 크기 정보를 가지고 있지는 않지만 ZMP 보상을 위한 기준 링크 가속도의 충분한 방향 정보를 갖고 있다. 따라서 e_{acc} 는 온라인 궤적 생성에 사용될 수 있다. 만약 x_{zmp} 가 $x_{zmp,b}$ 밖으로 나간다면 궤적 생성기는 다음과 같은 기준 링크의 수직 방향 레퍼런스 가속도를 생성한다.

$$\ddot{z}_{0,d} = K_{gain} e_{acc} \quad (17)$$

만약 x_{zmp} 가 $x_{zmp,b}$ 안으로 복귀하게 되면 궤적 생성기는 본래 궤적으로 복귀하기 위한 부가적인 궤적을 생성하게 된다. 본 논문에서는 이러한 부가 궤적 생성을 위해 3차 polynomial 함수를 사용하였다.

5. 시뮬레이션을 위한 환경 모델

자유 공간에서 운동하던 다리가 지면과 접촉할 때에 발생하는 충격력은 매우 크다. 이러한 충격을 다루기 위해서 로봇의 제어기는 매우 높은 대역폭을 가지고 있어야 하며 액추에이터는 큰 파워를 생성하여야 한다. 큰 충격을 피하기 위해서 로봇은 관절과 같은 곳에 어느 정도의 순응성을 갖추고 있어야 한다. 그러나 이러한 순응성을 갖춘 관절을 구현하기는 매우 어렵기 때문에 충격 흡수를 위한 패드가 많은 2족 보행 로봇들에서 사용되고 있다.⁽¹¹⁾ 이러한 패드를 장착한 경우 발은 지지 상태에서 미소한 움직임을 갖게 되며 이러한 미소 변위는 불안정한 이동을 초래할 수 있다.

본 논문에서는 발 밑에 패드를 장착한 2족 보행 로봇의 이동을 고려하였다. 시뮬레이션을 위해 충격 흡수를 위한 패드들은 스프링과 댐퍼를 사용하는 순응 접촉 모델로 모델링 되었다. 비선형 댐퍼 모델⁽⁶⁾은 지면에 대한 법선 방향에 대해 사용되었고 선형 댐퍼 모델⁽⁵⁾은 접선 방향 모델링에 사용되었다.

패드에 의해 생성되는 법선 방향 반력의 일반식은

$$f = -\frac{3}{2} \alpha k p p - k p \quad (18)$$

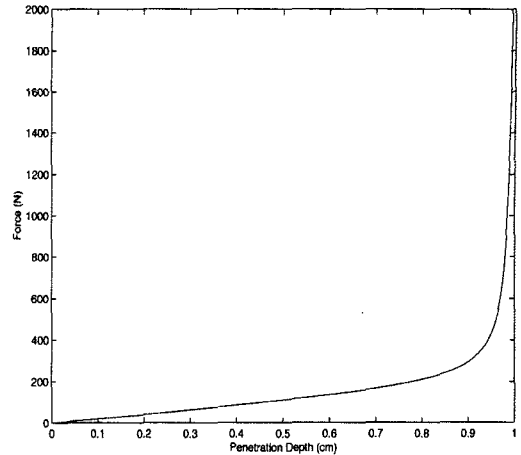


Fig. 3 Spring force vs. penetration depth

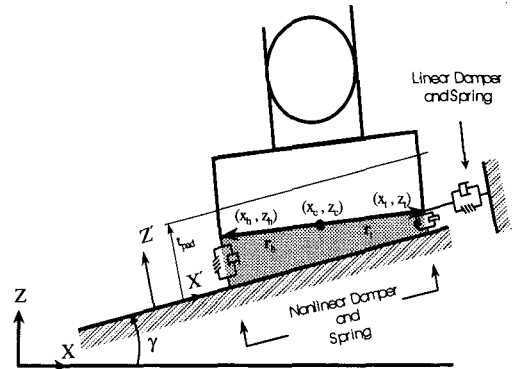


Fig. 4 3-dof environment model

와 같으며 여기서 p 는 환경 모델 내부로의 침투 깊이, k 는 강성 계수이며 α 는 회복 계수와 충격 속도의 관계를 정의하는 상수이다. 일반적으로 패드에 사용되는 물질은 압축될 경우 그 강성이 매우 커지는 비선형 특성을 가지고 있다. 더욱 현실적인 외력을 얻기 위해 법선 방향에 대한 스프링은 다음과 같은 비선형 강성을 갖도록 하였다.

$$k_n(p) = k_0 \left[1 + 0.1 \tan \left(\frac{\pi p}{2 t_{pad}} \right) \right] \quad (19)$$

시뮬레이션에 사용된 스프링 힘은 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 4는 발에 대한 환경 모델을 나타내고 있는데 (x_c, z_c) , (x_h, z_h) , (x_t, z_t) 는 각각 발바닥의 중심점, 발의 뒤꿈치, 발가락의 끝점을 뜻하며 r_h 는

Table 1 The parameters of the biped robot

link	link length (m)	link mass (kg)
1	0.3	1
2	0.3	1
3	0.1	1
base	0.3	10

Table 2 The parameters of the environment model

α	0.5	k_0	2.0×10^4 N/m
k_i	1.5×10^5 N/m	b_i	1000 Ns/m

(x_c, z_c) 에서 (x_h, z_h) 까지의 벡터를, r_i 는 (x_c, z_c) 에서 (x_i, z_i) 까지의 벡터를 나타낸다. 또한 t_{pad} 는 패드의 정상 두께를 나타낸다. γ 는 지면의 기울기 각을 나타낸다. 좌표축 X' 와 Z' 는 각각 지면의 접선 및 법선 방향과 나란하며 기호 '은 해당 변수 및 벡터가 좌표계 $X'Y'Z'$ 에서 표현되었음을 나타낸다. 이러한 변수들로부터 접촉력은 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

우선 법선력 f'_n 는 뒤꿈치와 발끝에서의 법선 방향 힘 $f'_{n,h}$ 와 $f'_{n,t}$ 로부터

$$f'_{n,i} = \begin{cases} -\frac{3}{2}\alpha k_n(t_{pad} - z'_i)(t_{pad} - z'_i) \dot{z}'_i \\ -k_n(t_{pad} - z'_i)(t_{pad} - z'_i) & z'_i < t_{pad} \\ 0 & z'_i \geq t_{pad} \end{cases}$$

$$f'_n = f'_{n,h} + f'_{n,t} \quad (20)$$

와 같으며 여기서 뒤꿈치의 경우 $i = h$, 발 끝의 경우 $i = t$ 이다.

접선 방향 힘의 경우

$$f'_t = -b_t \dot{x}'_{ue} - k_t (x'_{ue} - x'_{org}) \quad (21)$$

와 같다. 여기서 x'_{org} 는 접선 방향 탄성력을 구하기 위한 발의 접선 위치 기준이다. x'_{org} 는 발의 초기 접촉시의 발 위치에 의해 결정된다. 지면과 발 밑면 사이의 각도가 작다고 가정하면 접선력에 의한 모멘트는 무시할 수 있으므로 (x_c, z_c) 에 작용하는 모멘트는 다음과 같이 계산 될 수 있다.

$$m'_c = r'_h \times f'_{n,h} + r'_t \times f'_{n,t} \quad (22)$$

6. 시뮬레이션

제한된 온라인 궤적 생성기와 임피던스 제어기의 효율성을 알아보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터들을

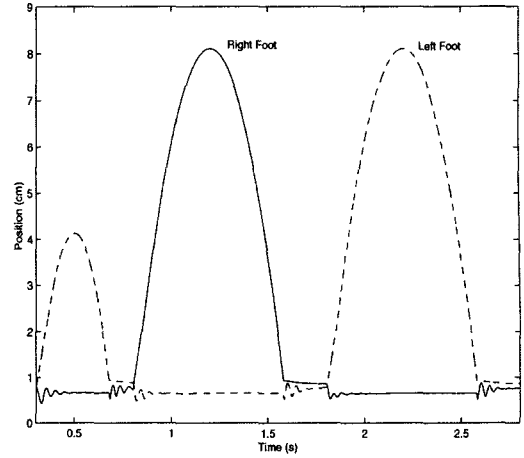


Fig. 5 Walking with the impedance control

Table 1 과 2 에 정리하였다. 발 밑 패드의 두께는 1cm 로 가정하였다.

6.1 임피던스 제어기의 성능

첫번째 시뮬레이션에서는 지면의 형상에 불확실성이 없다는 가정하에서 제안된 제어 알고리즘을 2족 보행 로봇에 적용하였다. 우선 로봇은 환경 모델이 정상 상태에 도달할 때까지 두발 지지 상태로 있게 된다. 그 이후에 왼쪽 다리가 보폭 0.1m를 0.4초 동안 이동하게 되는 기준 궤적을 따라 이동하게 된다. 이후 왼쪽 다리는 지면과 접촉하게 되며 0.1초 동안 하중 이동 상태를 유지하게 된다. 두 번째 걸음부터 로봇은 첫번째 걸음의 보행 파라미터들 보다 2배가 큰 정상 걸음 걸이로 보행을 계속한다. Fig. 5는 2족 보행 로봇을 제안된 임피던스 제어기로 제어한 경우 발 중심의 수직 변위를 나타낸 것이다. 충돌 순간 바운싱이 일어나지 않고 점차적으로 로봇의 하중이 이동되는 것을 관찰할 수 있다. 두 번째 시뮬레이션은 지면 형상에 불확실성이 존재하는 경우에 대하여 수행되었다. Fig. 6은 지면에 ± 1 cm의 편차가 존재하는 경우의 발의 stick diagram 이며, Fig. 7은 지면에 $\pm 3^\circ$ 의 기울기 편차가 존재하는 경우의 stick diagram 이다. 두 경우 모두 복잡한 적응 구조 없이도 제안된 제어기가 고르지 않은 지면에 대해 완벽한 적응성을 보임을 나타내고있다.

6.2 온라인 궤적 생성기의 성능

Fig. 8은 외란이 존재하지 않는 경우 ZMP 궤적과 기준 링크의 궤적을 나타낸 것이다. 비록 스윙 하던 다리가 지면에 접촉할 때 많은 진동을 보이

고 있지만 7cm로 설정된 ZMP 경계 안에서 머물고 있는 것을 볼 수 있다. 다음 시뮬레이션에서는 1.8초에서 2.0초까지 +15N의 X 방향 외란을 기준 링크의 중심에 작용시켰다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 ZMP 궤적은 외란이 작용하는 구간에서 ZMP 경계를 벗어남을 알 수 있다. 하지만 제안된 궤적 생성기를 적용하였을 경우에 보상하지 않은 경우보다 충분한 안정 마진(margin)을 가짐을 알 수 있다. 궤적 생성기에 의해 생성된 기준 링크의 수직방향 가속도를 Fig. 10에 나타내었다.

마지막 시뮬레이션에서는 외란의 크기를 +20N으로 증가시켰다. 온라인 보상이 없는 경우에는 Fig. 11에서 보듯이 ZMP는 발끝에 머물게 되며 지지 다리의 접촉 안정성이 악화되고 결국 두 다

리가 지면에서 떨어지면서 로봇이 넘어지는 것을 볼 수 있다. 그러나 제안된 온라인 궤적 생성 알고리즘을 적용하였을 경우 Fig. 12에 나타낸 바

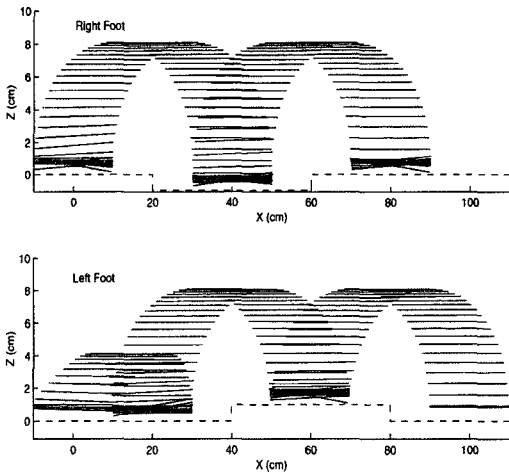


Fig. 6 Stick diagram of the feet when the robot is walking on an uneven surface

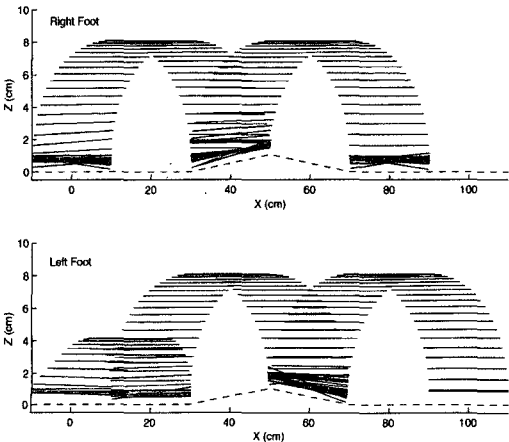


Fig. 7 Stick diagram of the feet when the robot is walking on the slant surface

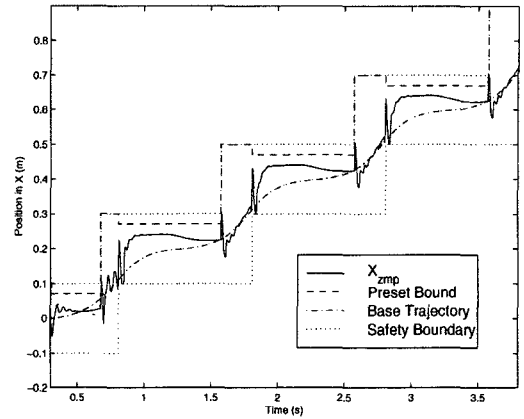


Fig. 8 Trajectory of the ZMP and base link in normal situation

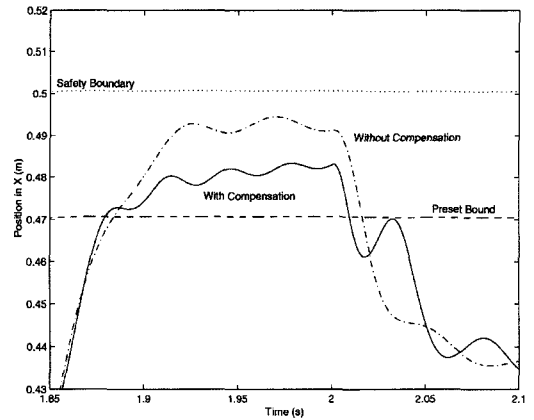


Fig. 9 ZMP trajectory with a pushing force.

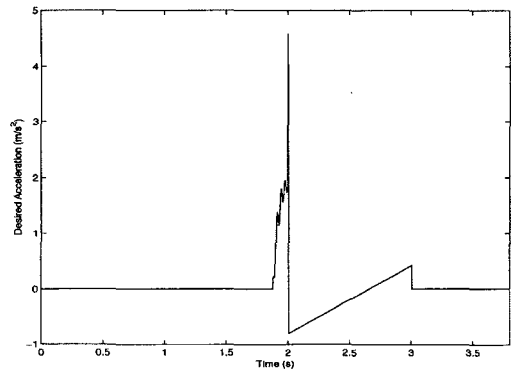


Fig. 10 Generated desired acceleration

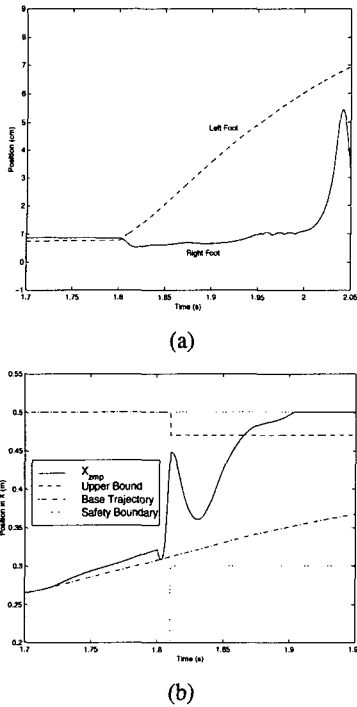


Fig. 11 The biped robot without any on-line compensation falls down when a large disturbance is applied at it: (a) trajectory of the feet and (b) ZMP trajectory

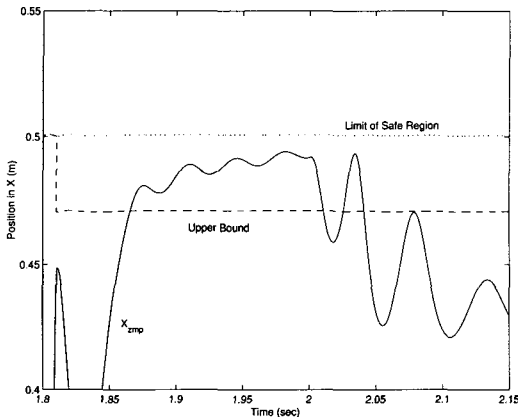


Fig. 12 ZMP trajectory of the biped robot with the on-line compensation when a large disturbance is applied at it

와 같이 보행을 지속하였으며 ZMP 또한 안전 영역 내에 머물렀다. 전술한 일련의 시뮬레이션을 통해 제안된 온라인 궤적 생성기가 기준 링크에 작용하는 외란 하에서도 안정된 보행을 가능케 함을 알 수 있다.

7. 결론

외부 환경과 반복적으로 상호 작용하는 2족 보행 로봇의 제어를 위해 온라인 ZMP 보상기와 임피던스 제어기 및 임피던스 조절 알고리즘을 제안하였다. 제안된 제어기와 궤적 생성기의 성능을 검증하기 위해 3자유도 환경 모델을 포함한 2족 보행 거동을 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션 결과를 통해 제안된 제어기가 접촉 안정화 및 지면 정보의 불확실성 극복에 강인한 성능을 나타냄을 알 수 있었으며 외란에 의해 보행을 할 수 없는 경우에 대해서도 제안된 궤적 생성기를 적용하였을 경우 안정된 보행을 유지할 수 있었다.

후기

본 연구는 한국 과학재단의 연구비 지원(과제번호 986-100-001-2)하에 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Fujimoto, Y. and Kawamura, A., 1995, "Three Dimensional Digital Simulation and Autonomous Walking Control for Eight-Axis Biped Robot," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2877~2884, Nagoya, Japan.
- (2) Fujimoto, Y. and Kawamura, A., 1997, "Biped Walking Control with Optimal Foot Force Distribution by Quadratic Programming," *Proc. Advanced Intelligent Mechatronics*, Tokyo, Japan.
- (3) Kajita, S., Yamaura, T., and Kobayashi, A., 1992, "Dynamic Walking Control of a Biped Robot along a Potential Energy Conserving Orbit," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 4.
- (4) Kazerooni, H., Sheridan, T. B., and Houpt, P. K., 1986, "Robust Compliant Motion for Manipulators, Part I: The Fundamental Concepts of Compliant Motion," *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. 2, No.2, pp. 83~92.
- (5) Kraus, P. R. and Kumar, V., 1997, "Compliant Contact Models for Rigid Body Collisions," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1382~1387, Albuquerque, USA.
- (6) Marhefka, D. W. and Orin, D. E., 1996, "Simulation of Contact Using a Nonlinear Damping Model," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1662~1668, Minneapolis, USA.
- (7) Park, J. H. and Kim, K. D., 1998, "Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3528~3533, Leuven, Belgium.
- (8) Park, J. H. and Chung, H. A., 1999, "Hybrid Control

- for Biped Robots Using Impedance Control and Computed-Torque Control,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1365~1370, Detroit, USA.
- (9) Walker, M. W. and Orin, D. E., 1986, “Dynamic Computer Simulation of Multiple Closed-Chain Robotic Mechanisms,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 15~20, San Francisco, USA.
- (10) Winter, D. A., 1980, “Overall Principle of Lower Limb Support during Stance Phase of Gait,” *J. of Biomechanics*, vol. 13, pp. 123~127.
- (11) Yamaguchi, J., Takanishi, A., and Kato, I., 1995, “Experimental Development of a Foot Mechanism with Shock Absorbing Material for Acquisition of Landing Surface Position Information and Stabilization of Dynamic Biped Walking,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2892~2899, Nagoya, Japan.
- (12) 김경대, 박중현, 1999, “중력보상 역진자 모드를 이용한 2족보행 로봇의 거동 및 제어,” 대한기계학회 논문집 A 권, 23 권, 2 호, pp. 209 ~ 216.
- (13) 정호암, 박중현, “계산-토크 제어와 임피던스 제어를 이용한 2족 보행 로봇의 제어,” 대한기계학회 논문집. (심사중)