

# 계산-토크 제어와 임피던스 제어를 이용한 2족 보행 로봇의 제어

정 호 암\* · 박 종 현\*\*

(1999년 6월 22일 접수)

## Control of Biped Robots Based on Impedance Control and Computed-Torque Control

Hoam Chung and Jong Hyeon Park

**Key Words :** Biped Robot(2족 보행 로봇), Biped Locomotion(2족 보행), Hybrid Control(복합 제어), Impedance Control(임피던스 제어), Computed-Torque Control(계산-토크 제어), Contact Stability(접촉 안정성), Environment Model(환경 모델)

### Abstract

This paper proposes a hybrid control method of using impedance control and the computed -torque control for biped robot locomotion. Computed torque control is used for supporting (constrained) leg. For the free leg, the impedance control is used, where different values of impedance parameters are used depending on the gait phase of the biped robot. 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. Computer simulations with a 3-dof environment model for which a combination of a nonlinear and a linear compliant models is used, show that the proposed controller is superior to the computed-torque controllers in reducing impacts and stabilizing the footing.

### 1. 서론

협소한 인간의 주거 환경 하에서 높은 이동성을 갖는 2족 보행 로봇의 구현은 로봇의 우수한 작업능력을 인간의 생활 환경에 접목시키는데 필수적이다. 이러한 맥락에서 현재 다수의 국가에서 그 어느 때보다도 많은 연구가 이루어지고 있다.

2족 보행 로봇을 안정적으로 제어하기 위해 Park과 Kim은 이동 다리와 기준 링크에 대한 계산-토크 제어를 제안하였으며,<sup>(7)</sup> Fujimoto 등은 외부 환경의 영향을 고려하기 위해 복합 위치/힘 제어기<sup>(2,3)</sup>를 제안한 바 있다. 2족 보행 로봇은 보행시에 지면과 빈번하게 상호작용을 하기 때문에 2족 보행 로봇을 위한 제어기는 로봇의 안정성을 보장하기 위해

이러한 동역학적 상호작용을 적절히 조절할 수 있어야 한다. 또한 2족 보행 로봇을 위한 제어기는 자유 공간에서의 좋은 궤적 추종 성능뿐만 아니라 발이 지면과 충돌하는 순간에 안정적인 접촉을 보장하여야 한다.

본 논문에서는 이러한 지면과의 접촉을 다루기 위해 임피던스 제어와 계산-토크 제어를 병행하여 사용하는 복합 제어기를 제안하였다. 계산-토크 제어는 지지다리에 사용되며 이동하는 다리에 대해서는 임피던스 제어를 사용한다. 보통 인간의 보행에서 다리의 근육은 걸음걸이의 단계에 따라 반복적으로 경직과 이완을 되풀이 하며 이를 통해 동력의 소비를 줄인다. 이러한 사실에 근거하여 본 논문에서는 안정적인 접촉 전이를 보장하기 위해 임피던스 계수들을 조절하였다.

2족 보행 로봇의 거동을 시뮬레이션하기 위해서는 합당하고 정밀한 상호 작용력을 제공하는 외부 환경 모델이 요구된다. 본 논문에서는 Marhefka와 Orin이 제안한 비선형 순응 접촉 모델(non-

\* 한양대학교 대학원

\*\* 회원, 한양대학교 기계공학부

Email: jongpark@email.hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0435 Fax: (02) 2298-4634

linear compliant contact model)<sup>(5)</sup>과 Kraus 와 Kumar 가 제안한 선형 순응 접촉 모델<sup>(6)</sup>의 조합으로 이루어진 3 자유도 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.

2 족 보행 로봇의 동역학과 환경 모델은 2 장에 기술하였다. 복합 제어기의 설계 및 임피던스 계수 조절 알고리즘은 3 장에 제시하였으며 4 장에서는 시뮬레이션을, 5 장에서는 결론을 논하였다.

## 2. 환경 모델과 2 족 보행 로봇의 동역학

### 2.1 3 자유도 환경 모델

자유 공간에서 운동하던 다리가 지면과 접촉할 때 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 2 족 보행 로봇들에서 사용되고 있다. 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 2 족 보행 로봇의 이동을 고려하였다. 시뮬레이션을 위해 충격 흡수를 위한 패드들은 선형 스프링과 선형 및 비선형 댐퍼를 사용하는 순응 접촉 모델로 모델링 되었다. 비선형 댐퍼 모델<sup>(5)</sup>은 수직 방향에 대해 사용 되었고 선형 댐퍼 모델<sup>(6)</sup>은 수평 방향 모델링에 사용되었다.

패드에 의해 생성되는 수직 방향 반력의 일반식은

$$f = -\frac{3}{2}\alpha k p p - k p \tag{1}$$

와 같으며 여기서  $p$ 는 환경 모델 내부로의 침투 깊이,  $k$ 는 강성 계수이며  $\alpha$ 는 회복 계수와 충격 속도의 관계를 정의하는 상수이다.

Fig. 1 은 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  $(x_c, z_c)$ 에서  $(x_h, z_h)$ 까지의 벡터를,  $r_t$ 는  $(x_c, z_c)$

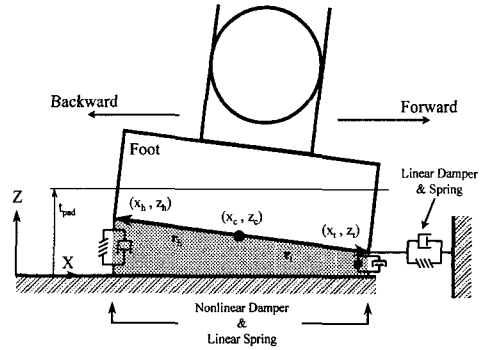


Fig. 1 3-dof environment model

에서  $(x_t, z_t)$ 까지의 벡터를 나타낸다. 또한  $t_{pad}$ 는 패드의 정상 두께를 나타낸다. 위에서 열거한 변수들은 모두 로봇의 정기구학으로부터 구할 수 있으며 그 미분값 또한 자코비안을 통해 매 시간 스텝마다 구할 수 있다. 이러한 변수들로부터 접촉력은 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

우선 수직력  $f_v$ 는 뒤꿈치와 발끝에서의 수직력  $f_{v,h}$ 와  $f_{v,t}$ 로부터

$$f_{v,i} = \begin{cases} -\frac{3}{2}\alpha k_v(t_{pad} - z_i)\dot{z}_i - k(t_{pad} - z_i) & z_i < t_{pad} \\ 0 & z_i \geq t_{pad} \end{cases}$$

$$f_v = f_{v,h} + f_{v,t} \tag{2}$$

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

수평력의 경우

$$f_h = -b_h \dot{x}_{ue} - k_h(x_{ue} - x_{org})$$

와 같다. 여기서  $x_{org}$ 는 수평 탄성력을 구하기 위한 발의 수평 위치 기준이다.  $x_{org}$ 는 발의 초기 접촉시의 발 위치에 의해 결정된다. 수직 및 수평력  $f_v$ 와  $f_h$ 는  $(x_c, z_c)$ 에 작용한다. 단, 지면과 발 밑면 사이의 각도가 작다고 가정하여 수평력에 의한 모멘트를 무시하고  $(x_c, z_c)$ 에 작용하는 모멘트를 다음과 같이 계산하였다.

$$h_{i,3} = r_h \times f_{v,h} + r_t \times f_{v,t}, \quad i = c, \text{ or } u \tag{3}$$

### 2.2 2 족 보행 로봇의 동역학

Fig. 2 는 본 논문에서 사용된 2 족 보행 로봇의

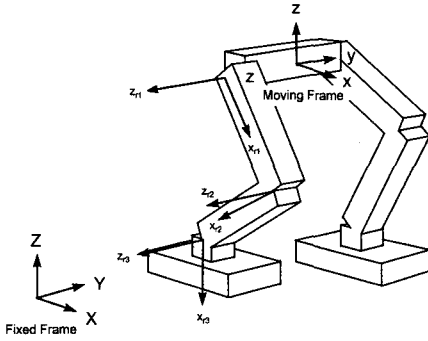


Fig. 2 Coordinate frames of the biped robot

관절 좌표계를 나타낸다. 각 다리는 3 자유도를 가지며 전체 운동은 새지탈(sagittal) 평면에 제한된다고 가정하였다.

2족 보행 로봇은 보통의 매니퓰레이터와는 달리 지면에 고정된 고정점을 갖지 않으며 보행 중에 발과 지면 사이의 구속 관계는 반복적으로 변화하게 된다. 본 논문에서 사용된 2족 보행 로봇의 동역학은 기준링크에 관한 부분과 걸음걸이 상태에 따라 변화하게 되는 두 다리에 관한 부분으로 이루어져 있다.<sup>(11)</sup>

$$H_c \ddot{q}_c + G_c a_0 + D_c \dot{h}_c + n_c = \tau_c \quad (4)$$

$$H_u \ddot{q}_u + G_u a_0 + n_u = \tau_u \quad (5)$$

$$Q_c \ddot{q}_c + Q_u \ddot{q}_u + R a_0 + P_c \dot{h}_c + g = \tau_u \quad (6)$$

식 (4)와 (5)는 각각 지지 다리 및 이동 다리의 동역학을 나타내며 식 (6)은 각 다리의 영향이 고려된 기준 링크의 동역학을 나타낸다. 아래 첨자 'c'와 'u'는 각각 '구속된(constrained)'과 '구속되지 않은(unconstrained)'의 의미를 갖는다.  $\ddot{q} \in \mathbb{R}^3$  은 해당 다리의 관절 가속도 벡터이며  $a_0 \in \mathbb{R}^6$  는 기준 링크의 가속도 벡터이다.  $h \in \mathbb{R}^6$  는 구속력 벡터를 나타낸다.  $H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,  $G \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ ,  $D \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$  는 각각 다리 링크의 관성 행렬, 베이스 링크의 각 다리 체인에 대한 영향을 나타내는 행렬, 자코비안 행렬을 나타내며  $n \in \mathbb{R}^6$ ,  $Q$ ,  $R$ ,  $P \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  은 각 다리 링크의 코리올리력, 구심력 및 중력의 영향을 나타내는 벡터, 각 다리 링크 체인의 베이스 링크에 대한 영향을 나타내는 행렬, 기준 링크의 관성 행렬, 베이스 링크에 대한 구속력의 영향을 나타내는 행렬이다.  $g \in \mathbb{R}^6$  은 기준 링크의 중력 벡터이다.

### 3. 2족 보행 로봇의 복합 제어

제어 법칙은 로봇의 발에 3축의 힘 감지 센서가 장착되어 있다는 가정 하에서 유도되었다.

#### 3.1 걸음걸이 상태와 제어 전략

인간의 정상 걸음걸이에 대한 정형외과적 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,<sup>(9)</sup> 발 디딤 상태는 다시 하중 이동 상태(weight acceptance phase)와 단일 다리 지지 상태(single limb support phase)로 나뉘어진다. 다리는 스윙 상태에서 자유롭게 움직인다. 하중 이동 상태는 다리가 지면과 접촉을 시작하는 순간부터 반대편 다리가 스윙 상태로 들어갈 때까지의 구간이다. 하중 이동 상태에서 해당 다리는 초기 충격 에너지를 흡수해야 할 뿐만 아니라 로봇 전체의 하중을 점차적으로 받아들여야 한다. 단일 다리 지지 상태에서 해당 다리는 로봇의 전체 하중을 지탱하여야 하며 기준 링크를 진행방향으로 진행시킬 토크를 생성해야 한다.

본 논문에서는 각 다리에 그 다리의 걸음걸이 상태에 따라 다른 제어 구조를 사용한다. 먼저 다리가 스윙 상태와 하중 이동 상태에 있을 경우에는 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 계산-토크 제어 법칙이 사용된다.

#### 3.2 구속되지 않은 다리에 대한 임피던스 제어

관절 각속도 벡터  $\dot{q}_u$  와 구속되지 않은 다리의 발바닥 중심점의 속도  $\dot{x}_{ue} \in \mathbb{R}^6$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\dot{x}_{ue} = v_0 + J_{ue} \dot{q}_u \quad (7)$$

여기서  $v_0 \in \mathbb{R}^6$  는 기준 링크의 속도이고  $J_{ue}$  는 기준 링크에서 발바닥 중심점까지의 자코비안이다. 식 (7)을 미분하면

$$\ddot{x}_{ue} = a_0 + \dot{J}_{ue} \dot{q}_u + J_{ue} \ddot{q}_u$$

와 같고 이를 다시 정리하면

$$\ddot{q}_u = J_{ue}^{-1}(\ddot{x}_{ue} - a_0 - \dot{J}_{ue}\dot{q}_u) \quad (8)$$

이다. 식 (8)을 식 (5)에 대입하면 아래 식과 같다.

$$\tau_u = H_u J_{ue}^{-1}(\ddot{x}_{ue} - a_0 - \dot{J}_{ue}\dot{q}_u) + G_u a_0 + L_u \quad (9)$$

구속되지 않은 다리에 대한 목표 임피던스 모델을 다음과 같이 정의한다.

$$M_u(\ddot{x}_{ue} - \ddot{x}_{ue,d}) + B_u(\dot{x}_{ue} - \dot{x}_{ue,d}) + K_u(x_{ue} - x_{ue,d}) = f_0 - f \quad (10)$$

여기서 첨자 'd'는 desired 값을 나타내며  $M_u$ ,  $B_u$ ,  $K_u$ 는 각각 목표 질량, 감쇄비, 강성을 나타내는 행렬들이다.  $f$ 는 외력을 나타내는 벡터이다. 패드의 강성에 의한 영향에 의해 기준력 벡터  $f_0$ 는 다음과 같이 표현된다.

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

목표 임피던스 식 (10)의 거동을 얻기 위해 식 (10)을 가속도  $\ddot{x}_{ue}$ 에 관하여 정리하고

$$\ddot{x}_{ue} = \ddot{x}_{ue,d} - M_u^{-1}B_u(\dot{x}_{ue} - \dot{x}_{ue,d}) - M_u^{-1}K_u(x_{ue} - x_{ue,d}) + M_u^{-1}(f_0 - f) \quad (11)$$

$\ddot{x}_{ue,d} = 0$ 이라 놓은 뒤 식 (9)에 대입하면 다음과 같은 구속되지 않은 다리에 대한 임피던스 제어 법칙을 얻을 수 있다.

$$\tau_u = H_u J_{ue}^{-1} \left[ -M_u^{-1}B_u(\dot{x}_{ue} - \dot{x}_{ue,d}) - M_u^{-1}K_u(x_{ue} - x_{ue,d}) + M_u^{-1}(f_0 - f) - a_0 - \dot{J}_{ue}\dot{q}_u \right] + G_u a_0 + n_u \quad (12)$$

### 3.3 임피던스 조절

스윙 상태와 하중 이동 상태의 경계에서 다리는 공간상의 자유 운동에서 외부 환경에 구속된 운동으로의 천이를 겪게 된다. 스윙 상태에서는 상대적으로 좋은 궤적 추종 성능이 요구되는 반면에 접촉 순간에는 충격을 완화하여야 하고 단일 지지 상태로 진입하기 전에 적절한 하중을 지지

다리로부터 넘겨 받아야 한다. 특히 충돌 순간에는 충돌에 의한 충격은 흡수 또는 완화되어야 하며 발이 튀어 오르는 현상은 억제되어야 한다. 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 방법을 사용한다. 우선 충돌 순간에는 감쇄비를 임계 감쇄비의 50 배로 증가시켰다. 목표 임피던스 모델의 강성 및 질량 요소들은 궤적 추종에 요구되는 강성 및 대역 폭을 갖도록 선택한다.<sup>(10)</sup> 이 방법은 매우 단순하지만 충돌 천이를 안정화하는데에는 매우 효과적이다. 충돌 안정화 성능을 더욱 향상시키기 위해 제어기는 충돌 순간에 발의 수직 방향 기준 위치 및 속도를 강제로 영(zero)으로 만든다.

### 3.4 구속된 다리에 대한 계산-토크 제어

구속된 다리에 대한 제어 입력은 계산-토크 제어 알고리즘에 의해 결정된다. 기준 링크에 대한 계산-토크 제어 법칙은 Park 과 Kim<sup>(7)</sup>이 사용하였던 방법과 유사한 과정을 통해 다음과 같이 유도될 수 있다.

식 (4)와 식 (5)로부터

$$\ddot{q}_c = H_c^{-1}(\tau_c - G_c a_0 - D_c h_c - n_c) \quad (13)$$

$$\ddot{q}_u = H_u^{-1}(\tau_u - G_u a_0 - n_u) \quad (14)$$

식 (13)과 (14)를 식 (6)에 대입하여 정리하면

$$Q_c H_c^{-1} \tau_c - \tilde{R} a_0 + \tilde{P}_c h_c + \tilde{g} = 0 \quad (15)$$

여기서,

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

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

$$\tilde{P} = P_c - Q_c H_u^{-1} D_c$$

위 식으로부터

$$\tau_c = (Q_c H_c^{-1})^{-1} \{ \tilde{R} a_0 - \tilde{P}_c h_c - \tilde{g} \} \quad (16)$$

만약 구속 다리에 대한 입력을 다음과 같이 선택하면

$$\tau_c = (Q_c H_c^{-1})^{-1} \{ \tilde{R}(a_{0,d} - u_c) - \tilde{P}_c h_c - \tilde{g} \} \quad (17)$$

여기서

$$u_c = -K_v \dot{e}_0 - K_p e_0$$

이고,  $e_0$  는 기준 링크의 위치 에러, 즉,

$$e_0 = x_{0,d} - x_0$$

식 (17)과 (16)으로부터 기준 링크의 오차 거동은 식 (18)과 같이 유도된다.

$$\ddot{e}_0 + K_v \dot{e}_0 + K_p e_0 = 0 \quad (18)$$

따라서  $K_v, K_p > 0$  이면  $e_0$  는 점근적으로 안정하다.

#### 4. 시뮬레이션

제안된 복합 제어기와 임피던스 조절 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터들을 Table 1 과 2 에 정리하였다.

첫번째 시뮬레이션에서는 로봇의 파라미터와 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 0.1m 를 0.4 초 동안 이동하게 되는 기준 궤적을 따라 이동하게 된다. 이후 왼쪽 다리는 지면과 접촉하게 되며 0.1 초 동안 하중 이동 상태를 유지하게 된다. 두 번째 걸음부터 로봇은 첫번째 걸음의 보행 파라미터 보다 2 배가 큰 정상 걸음 길이로 보행을 계속한다. Fig. 3 은 2족 보행 로봇을 제안된 복합 제어기로 제어한 경우 발 중심의 수직 변위를 나타낸 것이고 Fig. 4 는 이러한 다리의 움직임을 오른쪽 다리가 하중 이동 상태에 있을 경우를 중심으로 확대하여 나타낸 것이다. 충돌 순간 튀어 오르는 현상이 일어나지 않고 점차적으로 로봇의 하중이 이동되는 것을 관찰할 수 있다. 반면에 Fig. 5 는 단지 계산-토크 제어만을 사용하였을 경우를 나타낸 것이다. 오른쪽 발이 지면과 안정하게 접촉하지 못하고 튀어

Table 1 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 Parameters of the environment model

$\alpha$	0.5	$k_v$	$3.0 \times 10^4$ N/m
$k_b$	$1.5 \times 10^5$ N/m	$b_b$	1000 Ns/m

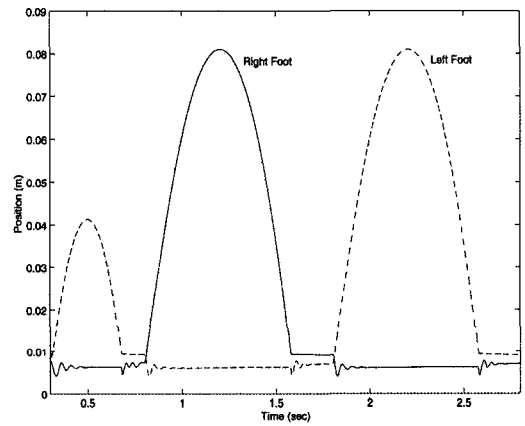


Fig. 3 Walking with the hybrid control

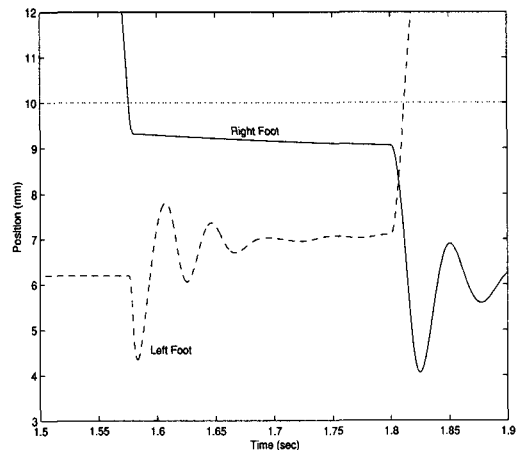


Fig. 4 A closer view on the impact with the impedance control during the weight acceptance phase

오르는 현상이 일어나는 것을 알 수 있다.

계산-토크 제어기의 성능은 모델 불확실성에 의해 심각하게 저하될 수 있으며 이는 불안정한 보행을 초래할 수 있다. 제안된 복합 제어기의 강인성을 알아보기 위해 두 번째 시뮬레이션에서는 로봇의 파라미터들을 정확하게 알지 못하는 경우를

가정하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 기준 링크의 수직 방향 변위에 있어서 로봇 각 링크의 관성 모멘트 값에  $\pm 40\%$ 의 모델링 오차가 존재하는 경우에도 첫번째 시뮬레이션의 경우와 큰 차이를 보이지 않았다. 기준 링크의 수평 방향 변위를 포함한 다른 변수들의 편차 또한 무시할 수 있을 정도로 작았다. 무엇보다도, 보행은 안정하게 유지되었다.

와세다 연구팀<sup>(4)</sup>에 의하면 매우 큰 피드백 이득을 이용한 위치 제어를 사용하였을 경우 지면 높이의 작은 변화도 전체 보행을 불안정하게 할 수 있다. 세 번째 시뮬레이션은 지면 높이에 불확실성이 존재하는 경우에 대하여 수행되었다. 세 번째 시뮬레이션은 지면 형상에 불확실성이 존재하는 경우에 대하여 수행되었다. 두 번째 걸음에서 지면은 다른 경우보다 1cm 더 높아진다. Fig. 7은 복잡한 on-line 적응 구조 없이도 제안된 제어기가 고르지 않은 지면에 대해 완벽한 적응성을 보임을 나타낸다.

시뮬레이션 결과를 통해 제안된 복합 제어기가 초기 충동의 안정화 및 접촉 안정성 향상에 기여함을 확인 하였고 로봇의 파라미터 및 지면 정보의 불확실성에 대해서도 강인한 성능을 나타냄을 보였다.

### 5. 결 론

임피던스 제어와 계산-토크 제어를 병용한 복합 제어 구조가 반복적으로 외부 환경과 상호 작용하게 되는 2족 보행 로봇의 제어를 위해 제안되었다. 제안된 제어기의 성능을 검증하기 위해 2족 보행 거동이 순응 접촉 모델을 이용한 3자유도 환경 모델과 더불어 시뮬레이션 되었으며 제안된 제어기를 사용하였을 경우와 단지 계산-토크 제어만을 사용하였을 경우를 비교하였다. 모델 불확실성에 대한 제안된 제어기의 강인성이 검증되었으며 고르지 않은 지면을 보행할 경우에도 on-line 적응 없이 안정된 보행을 유지함을 보였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 제어기가 로봇의 보행 안정화 측면에서 계산-토크 제어보다 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다. 단, 본 논문의 결과는 새 지털 평면상에서만 제한되어 있어 이를 측면운동이 억제된 2족보행로봇이 아닌 일반적인 2족보행로봇에 사용하기 어려우나, 본 논문에서 제안된 개념을 일반적인 2족보행로봇에도 확장, 적용하여 좀더 일반적인 제어법칙 개발의 필요성이 있다.

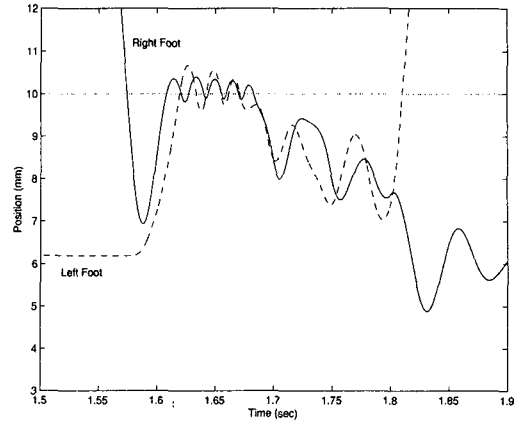


Fig. 5 Unstable footing resulted during the weight acceptance phase with the computed-torque control method

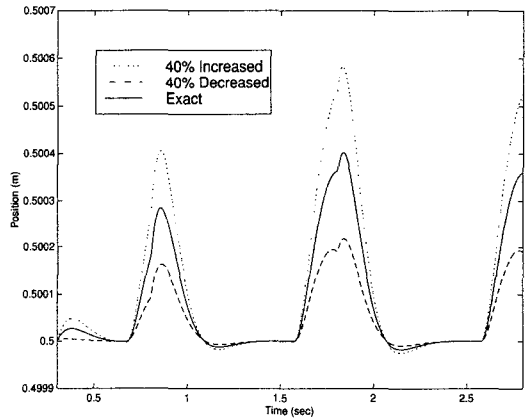


Fig. 6 Elevation of the base link under the robot parameter uncertainties

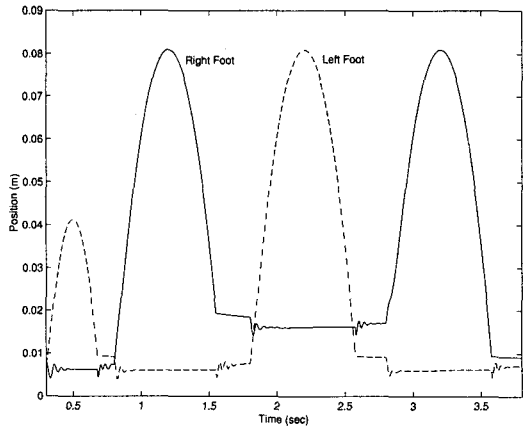


Fig. 7 Walking on an uneven surface

## 후 기

이 논문은 1998 년 한양대학교 교내연구비의 지원에 의하여 지원되었습니다.

## 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.
- (2) Fujimoto, Y. and Kawamura, A., 1997, "Biped Walking Control with Optimal Foot Force Distribution by Quadratic Programming," *Proc. Advanced Intelligent Mechatronics*, Tokyo.
- (3) Volpe, R. and Khosla, P., 1993, "A Theoretical and Experimental Investigation of Impact Control for Manipulators," *Int. J. of Robotics Research*, Vol.12, No.4, pp. 351 ~365.
- (4) 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.
- (5) 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, MN.
- (6) 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, NM.
- (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) Hogan, N., 1986, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I ~ III," *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 1~24.
- (9) Winter DA, 1980, "Overall Principle of Lower Limb Support During Stance Phase of Gait," *J. of Biomechanics*, Vol. 13, pp. 123~127.
- (10) 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.
- (11) Oh, S.Y. and Orin, D.E., 1986, "Dynamic Computer Simulation of Multiple Closed-Chain Robotic Mechanism," *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, pp. 15~20.
- (12) 김경대, 박종현, 1999, "중력보상 역진자 모드를 이용한 2족보행 로봇의 거동 및 제어," 대한기계학회논문집 A 권, 제 23 권, 제 2 호, pp. 209 ~ 216.