

# 슬라이딩 모드 제어를 이용한 이족로봇의 강건제어

박인규\* · 김진걸\*\*

## Robust Control of Biped Robot Using Sliding Mode Controller

In-Gyu Park, Jin-Geol Kim

**Key Words:** Biped Robot (이족로봇), Sliding Mode Controller (슬라이딩 모드 제어기), Multibody dynamics (다물체 동역학), Velocity transformation matrix (속도변환행렬), Hysteresis Damping Model (Hysteresis 댐핑모델).

### Abstract

A robust position control using a sliding mode controller is adopted for the stable dynamic walking of the biped. For the biped robot that is modeled with 14 degrees of freedom rigid bodies using the method of the multibody dynamics, the joint angles for simulation are obtained by the velocity transformation matrix using the given Cartesian foot and trunk trajectories. Hertz force model and Hysteresis damping element which is used in explanation of the energy dissipation during contact with ground are used for modeling of the ground reactions during the simulation. By the obtained that forces which contains highly confused noise elements and the system modeling uncertainties of various kinds such as unmodeled dynamics and parameter inaccuracies, the biped system will be unstable. For that problems, we are adopting a nonlinear robust control using a sliding mode controller. Under the assumption that the estimation error on the unknown parameters is bounded by a given function, that controller provides a successful way to preserve stability and achieve good performance, despite the presence of strong modeling imprecisions or uncertainties.

### 1. 서 론

작업자나 일반차량의 접근이 어려운 환경이나 산업현장 등의 인간활동 중심으로 설계되어진 공간에서 인류를 보조하기 위하여 이족보행로봇의 연구가 활발히 진행중이다.

보행로봇의 연구분야에는 동적 보행을 만족시키는 보행계획의 생성에 관한 연구와 생성된 계획을 불완전한 시스템 모델특성, 조인트 추종오차, 지면에서 작용하는 반력 등의 외란에 강인성을 가지거나 적응성을 가지도록 하는 제어부분으

로 크게 나눈다. 그리고 이들은 서로 연관성을 가지는 계층적(hierarchical) 구조를 이룬다<sup>(1~12)</sup>. 최근에는 불규칙한 지면이나 외란에 대하여 실시간으로 보행계획을 보상하는 시스템제어방법들이 연구중이다.

보행로봇의 제어를 위한 운동방정식의 구성은 매우 복잡할 뿐만 아니라, 이것의 구성이 강한 비선형성을 가지는 비선형운동방정식을 구성하게 된다. 그래서, 이족로봇의 제어를 위하여 시스템을 간략화 혹은 선형화된 모델을 적용하여 현대 선형제어이론을 적용하여 구현하였다<sup>(1~4)</sup>. 그러나 실제의 운동방정식 구성에서 외부와의 접촉에서 발생하는 지면반력, 백래시 등은 선형화하기가 불가능하다. 그리고 시스템 모델과정에서 제외된 부분과 불확실한 시스템 파라미터들로 인하여 제어영역에 많은 제약을 받는다.

컴퓨터의 발전에 힘입어 보다 정확한 모델링이

\* 인하대학교 대학원 자동화공학과

\*\* 인하대학교 기계·항공·자동화공학부 교수

나 운동방정식의 구성에서 이런 문제점들을 극복하기 위하여 많은 비선형 제어기법들의 연구가 이루어졌다. 이러한 방법들 중에는 개념상 간단한 계산-토크 방법에 기초한 Impedance 제어, 힘/위치 혼합제어기법 등이 있다<sup>(5,6)</sup>. 그러나 방법들은 시스템 파라미터들이 모두 파악된 상태에서 적용이 가능하다. 최근에는 시스템의 불확실성과 부정확성을 제어기에 포함시킬 수 있는 강건제어 기법이나 최적제어기법들이 적용되고 있다<sup>(7-9)</sup>. 또한 복잡한 수학적 모델링기법을 떠나 인공지능의 기법을 이용하여 이러한 문제점들에 접근을 한다<sup>(10,11)</sup>. 그러나 이 기법들이 보다 확실한 제어 성능을 위하여 시스템의 운동방정식을 필요로 한다.

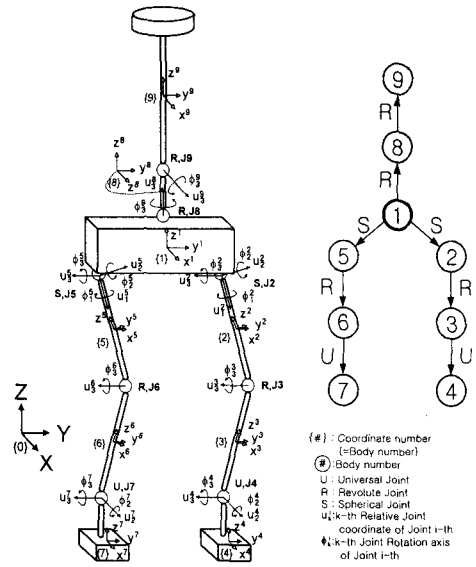
본 논문에서는 역진자형태의 균형추를 가진 3차원 이족로봇을 다물체 동역학 모델링기법을 이용하여 14자유도를 갖도록 구성한다<sup>(12-14)</sup>. 특히 지면 접촉력을 계산하기 위하여, 지면 접촉의 물리적 특성을 고려한 Hertz의 힘 모델에 기초하고, 접촉시 발생하는 에너지 소모를 포함시키기 위하여 Hysteresis 댐핑모델을 적용한다<sup>(15)</sup>. 이때 발생하는 지면반력의 특성이 불규칙 진동의 특성을 내포한다. 이 현상으로 인하여 보행로봇 전체 안정성에 문제가 발생하게 된다. 또한 비교적 엄밀한 운동방정식의 구성에도 불구하고 발생가능한 모델링오차를 보상하기 위하여 비선형강건제어기인 슬라이딩모드 제어기를 도입하여 이러한 문제들을 해결하고자 한다<sup>(16-18)</sup>.

## 2. 이족로봇의 구성과 보행 궤적생성

### 2.1 이족로봇의 구성

본 논문의 모의실험에 사용된 이족보행로봇의 모델은 Fig. 1(a)와 같다. 각 다리를 6자유도로, 역진자형태의 균형추 부분을 2자유도로 모델링하여 모두 아홉 개의 물체로 이루어진 14자유도의 다물체 동역학 모델이다. 외부의 구속에서 자유롭기 위하여 임의의 공간상에 존재하는 것으로 가정한다.

도식이론(graph theory)을 적용하여 시스템의 형상을 나타낼 경우, 본 시스템은 Fig. 1(b)에서와 같이 분지 구조(tree structure)를 이루게 된다. 본 시스템에서는 각 물체의 기준물체에 대한 상대좌표  $\phi$ 로 나타낸다. 그래서  $\phi$ 를 일반화좌표  $q$ 로 정



(a) Coordinate system (b) Tree structure

Fig. 1 Biped system configuration

의한다. 주 물체인 물체 1의 상대좌표는 관성좌표계에 관한 절대좌표로 정의한다.

속도변환행렬을 이용하여 상대좌표계로 변환된 보행로봇 시스템 운동방정식은 다음과 같다.

$$M \ddot{q} = B^T(\hat{H} - \hat{M}\dot{B}\dot{q}) + \tau_{drv} \quad (1)$$

여기서

$$M = B^T \hat{M} B$$

$$H = [(-\hat{G} + \hat{F}_{foot})^T, (-\tilde{\omega}^i \hat{J}^i \omega^i)^T]^T$$

이고, 벡터  $\tau_{drv}$ 는 보행운동을 위한 각 조인트의 구동력을 나타내고, 벡터  $\hat{F}_{foot}$ ,  $\hat{G}$ ,  $\omega$ 는 절대좌표계로 나타낸 발바닥에 작용하는 외력, 중력 가속도에 의한 외력, 각속도를 각각 나타낸다. 행렬  $B$ 는 절대좌표와 상대좌표와의 관계를 나타내는 속도변환행렬, 행렬  $\hat{M}$ 과 벡터  $\hat{H}$ 는 절대좌표계로 나타낸 시스템의 질량관성행렬과 외력들과 코리올리항을 각각 나타낸다. 행렬  $M$ 은 행렬  $\hat{M}$ 을 상대좌표계로 표현한 행렬이다.

### 2.2 Hysteresis 댐핑 특성을 갖는 접촉력모델

일반적으로, 강체계내의 다물체동역학에서 접촉에 의한 충돌현상이 불연속(piecewise)적인 것으로 보는 것과 충돌현상이 연속(continuous)적인 것으로 보고 해석하는 것으로 구분할 수 있다. 불

연속으로 간주하는 경우에는 접촉으로 발생하는 에너지 소모의 특성을 나타낼 수 없으며, 지속적인 접촉현상을 해석하기 어려우므로, 접촉면의 형상과 재료의 성질뿐만 아니라 반발계수의 향으로 이루어져 물리적 특성을 나타낼 수 있는 Hertz의 접촉력 모델에 기초하여 접촉력을 계산한다. 이때 사용된 발의 모델을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 이때, 지면과의 접촉은 양 발바닥에 존재하는 4개의 반구  $A_0, A_1, B, C$ 에 의하여 이루어지는 것으로 가정을 한다.

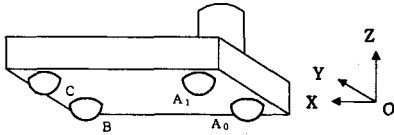


Fig. 2 Four hemisphere contacting points on the sole of the foot

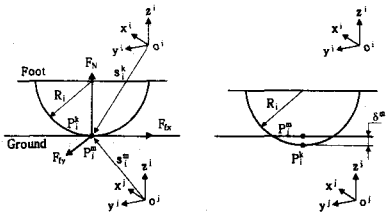


Fig. 3 a hemisphere coordinate system and maximum penetration during contact

접촉력의 연속적인 해석을 위하여 탄성이론(theory of elasticity)에 기초한 Hertz 접촉력 모델을 적용하면 수직접촉력은 다음과 같다.

$$F_N = K \delta^n \quad (2)$$

여기서  $\delta$ 는 두 접촉물체 표면의 지역 상대침투량(relative penetration)을 나타내고,  $n=3/2$ 이다. 접촉하는 두 물체  $i, j$ 의 재료의 특성과 형상에 의해 결정되는 일반화 매개변수  $K$ 가 반경이  $R$ 인 구와 평면이 접촉하는 경우는 다음과 같다.

$$K = \frac{4}{3\pi(h_i + h_j)} \sqrt{\frac{1}{R_i}} \quad (3)$$

여기서 재료 파라미터  $h_i$ 와  $h_j$ 는 다음과 같다.

$$h_l = \frac{1 - \rho_l^2}{\pi E_l}; \quad l = i, j$$

변수  $\rho_l$ 과  $E_l$ 은 각각의 접촉하는 물체의 포와송의 비(Poisson's ratio)와 영 계수(Young's modulus)를 나타낸다.

그러나, 식(3)은 접촉에 의한 에너지 손실을 나타낼 수 없으므로 Hysteresis 형태의 특성을 갖는 댐핑계수  $D$ 를 식(3)에 첨가하면 식(4)와 같이 표현된다.

$$F_N = K \delta^n + D \dot{\delta} \quad (4)$$

여기서  $D = \eta \delta^n$ 로 표현되고,  $\eta$ 는 hysteresis 댐핑계수이다. hysteresis 댐핑계수  $\eta$ 는 역적-모멘텀식과 일-에너지원리에 기초하여 구한다. 이때, 충돌하는 동안의 손실된 에너지는 흡수된 최대탄성에너지에 비하여 상당히 작다는 가정, 즉 반발계수가 1에 가까운 완전탄성으로 가정하여 구하면 다음과 같이 반발계수  $e$ 와의 관계로 다음과 같이 나타난다.

$$\eta = \frac{3K(1-e^2)}{4\delta^{(-)}} \quad (5)$$

여기서  $\delta^{(-)}$ 는 접촉하는 순간의 초기속도이다. 이 식(5)를 접촉력식인 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$F_N = K \delta^n \left[ 1 + \frac{3(1-e^2)}{4} \frac{\dot{\delta}}{\delta^{(-)}} \right] \quad (6)$$

여기서  $\dot{\delta}$ 는 접촉하는 전 구간에서의 침투속도를 나타낸다. 위 식(6)은 접촉하는 재료의 특성과 형상뿐만 아니라 마찰계수의 향으로 접촉력을 계산하며, 비선형특성을 가진다.

이때 지면에서 작용하는 수평력  $F_x$ 는 수직반력과의 관계로부터 다음과 같이 표현된다.

$$F_{f_x} = \mu_s F_{N_x} \frac{V_k^j}{|V_k^j|} \quad (7)$$

여기서  $V_k^j$ 는 두 물체의 접촉점  $P_i^k$ 와  $P_j^k$ 사이의 상대속도로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} v_k^j &\equiv v_k^i - v_k^j \\ &= \dot{r}^i + \tilde{\omega}^i s_i^k - \dot{r}^j - \tilde{\omega}^j s_j^k \end{aligned} \quad (8)$$

이때, 물체  $j$ 는 고정된 지면을 나타내므로 이것에 해당하는 선속도와 각속도항은 모두 영이 된다.

이들 수직반력의 벡터성분들은 각 발의 COM(Center of Mass)의 힘과 모멘트로 변환하여  $F_{foot}$ 으로 나타내고, 이 절대좌표값은 속도변환행렬을 이용하여 조인트좌표값으로 변환하여 운동방정식에 입력으로 사용한다.

### 3. 슬라이딩 모드 제어기

#### 3.1 모델링 가정과 정의

제어대상인 운동방정식은 식(1)에 주어져 있으며, 지면과의 접촉력  $F_{foot}$ 의 불균일한 입력의 형태를 외란  $D(t)$ 로 모델링된 형태의 운동방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau_{drv}(t) + d(t) \quad (9)$$

여기서,

$$h(q, \dot{q}) = B^T(\hat{H} + MB\dot{q})$$

$$d(t) = B^TD(t)$$

로 각각 상태좌표계로 변환된 외력들을 나타낸다.

시스템 파라미터 불확실을 고려한 시스템의 모델은 다음과 같다.

$$M(q) = M^0(q) + \Delta M(q) \quad (10)$$

$$h(q, \dot{q}) = h^0(q, \dot{q}) + \Delta h(q, \dot{q}) \quad (11)$$

여기서 첨자“0”는 모델의 공칭값(nominal value)을 나타내고, “ $\Delta$ ”는 모델링 오차를 나타낸다.

모델링 오차의 크기와 외란은 다음과 같이 임의의 한정된 범위에 존재한다.

$$|\Delta M(q)| \leq M_{ij}^m(q) \quad (12)$$

$$|\Delta h_i(q, \dot{q})| \leq h_i^m(q, \dot{q}) \quad (13)$$

$$|d_i(t)| \leq d_i^m(t) \quad (14)$$

여기서 첨자“ $m$ ”은 각 요소들의 최대 절대모델링 오차를 나타낸다. 그리고 추가적으로

$$|\dot{M}_{ij}(q)| \leq \dot{M}_{ij}^m(q, \dot{q}) \quad (15)$$

이라 가정한다. 또한 계획된 궤적  $q_d$ 와 가속도  $\ddot{q}_d$ 가 다음과 같은 범위내에 존재한다고 가정한다.

$$|(\Delta M(q)\ddot{q}_d)| \leq \sigma_i^m(t) \quad (16)$$

계획된 궤적  $q_d, \dot{q}_d$ 에 대한 추적오차는 다음과 같이 정의한다.

$$e(t) = q(t) - q_d(t) \quad (17)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{q}(t) - \dot{q}_d(t) \quad (18)$$

여기서  $q(t)$ 와  $\dot{q}(t)$ 는 측정가능하다고 가정한다.

일반적으로  $n$  입력,  $2n$ 상태변수를 갖는 시스

템의 슬라이딩 모드 제어는  $n$  스위칭 평면을 가지고 이들은 다음과 같이 정의한다.

$$s(t) = \Lambda e(t) + \dot{e}(t) \quad (19)$$

여기서

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n), \quad \lambda_i > 0$$

이다. 이 식은 점근적으로 안정한 상미방을 이루며, 만일  $s(t) \rightarrow 0$ 이라면,  $e(t) \rightarrow 0$ 이 성립된다.

그러므로 이 문제의 주된 관심은  $s(t)$ 가 0이 되도록 하는 입력  $u(t)$ 를 어떻게 구성하는가에 있다.

#### 3.2 제어입력의 결정

슬라이딩 모드제어에서, 시스템의 상태가 슬라이딩 면에 놓이게 되면, 즉  $s(t) = 0$ , 시스템은 모델링의 불확실성과 외란에 둔감하게 된다. 그러므로, 제어입력  $u(t)$ 를 결정하는데 있어 시스템의 상태가 슬라이딩 면을 향하고 도달하도록 하는 어떤 조건을 결정하여야 한다. 이 조건을 도달조건(reaching condition)이라 하고, 이 함수는 Lyapunov 함수후보를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} s^T(t) M(q) s(t) \quad (20)$$

이 함수를 시간  $t$ 의 미분의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = \frac{1}{2} s^T \dot{M} s + s^T M \dot{s} \quad (21)$$

여기서  $\dot{s} = \Lambda \dot{e}(t) + \ddot{q}(t) - \ddot{q}_d(t)$ 이므로 위 식은

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} s^T \dot{M} s + s^T [M\Lambda \dot{e} + M\ddot{q} - M\ddot{q}_d] \\ &= \frac{1}{2} s^T \dot{M} s + s^T [M\Lambda \dot{e} - h + \tau_{drv} + d - M\ddot{q}_d] \end{aligned} \quad (22)$$

만일 시스템이 안정하다면,  $\dot{V}$ 는 negative definite가 된다. 그러므로 제어입력의 구성을 파라미터들의 상위경계(upper bound)값들을 이용하여  $\dot{V}$ 가 negative definite가 되도록 다음과 같이 도입한다.

$$u(t) = -M^0 [ \Lambda \dot{e} - \ddot{q}_d ] + h^0 - Z(t)s - W(t)\text{sgn}(s) \quad (23)$$

여기서,

$$Z(t) = \text{diag}(z_1(t), \dots, z_n(t))$$

$$W(t) = \text{diag}(w_1(t), \dots, w_n(t))$$

$$\text{sgn}(\cdot) = \begin{cases} +1, & s > 0 \\ -1, & s < 0 \end{cases}$$

이다. 제어입력  $u(t)$ 를 식(22)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} s^T \dot{M}s + s^T [M\Lambda \dot{e} - h + d - M\dot{q}_d] \\ &+ s^T \{-M^0[\Lambda \dot{e} - \dot{q}_d] + h^0 - Zs - W\text{sgn}(s)\} \\ &= -s^T [Z - \frac{\dot{M}}{2}]s \\ &+ s^T [-W\text{sgn}(s) + \Delta M\Lambda \dot{e} - \Delta h + d - \Delta M\dot{q}_d] \end{aligned} \quad (24)$$

이때,  $\text{sgn}(s_i)s_i = |s_i|$ 임을 적용하면

$$s^T W\text{sgn}(s) = w_1(t)|s_1| + \dots + w_n(t)|s_n| \quad (25)$$

이 된다. 여기서,

$$w_i(t) = \sum_{j=1}^n (M^m \Lambda)_{ij} \dot{e}_j + h_i^m + d_i^m + \sigma_i^m \quad (26)$$

이라 정의하면 다음 식(27)를 만족한다.

$$s^T W\text{sgn}(s) \geq s^T (\Delta M\Lambda \dot{e} - \Delta h + d - \Delta M\dot{q}_d) \quad (27)$$

이것은 식(24)의 두 번째항이 negative semi-definite 함수가 되도록 한다. 또한  $P(t)$ 가 다음과 같다고 가정을 한다.

$$z_i(t) = \sum_{j=1}^n \frac{M_{ij}^m}{2} + k_i, \quad k_i > 0 \quad (28)$$

그러면, 식(22)의 오른쪽의 첫번째항은 다음과 같은 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} Z - \frac{\dot{M}}{2} &= \\ \frac{1}{2} &\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n M_{1j}^m - M_{11} & -M_{12} & \dots & -M_{1n} \\ -M_{21} & \sum_{j=1}^n M_{2j}^m - M_{22} & \dots & -M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -M_{n1} & -M_{n2} & \dots & \sum_{j=1}^n M_{nj}^m - M_{nn} \end{bmatrix} \\ &+ \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_n) \end{aligned} \quad (29)$$

그래서 식(24)의 첫번째항은 positive semi-definite 행렬이 된다.

즉, 식(24)에서  $\dot{V}$ 는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\dot{V} \leq -s^T \text{diag}(k_1, \dots, k_n)s \leq 0 \quad (30)$$

이것은  $s$ 에 관하여 negative-definite를 보장한다. 그래서 제어입력 식(23)은 Lyapunov 안정조건을 만족한다.

그러나 제어입력이  $\text{sgn}$ 함수에 의해 불연속인 제어입력으로 작용한다. 이것은 떨림현상(chattering)을 발생하므로 실제적용에는 바람직하

지 못하다. 그래서, 어떤 경계층(boundary layer)내에서 연속적인 제어입력이 되도록 근사화 한다. 그러나, 억제된 떨림현상에 의하여 추적오차가 발생한다.

제어응답이 떨림현상이 없고 정상상태오차가 없도록 하기 위하여, 제어입력 식(23)을 다음과 같이 변환을 한다.

$$u(t) = -M^0[\Lambda \dot{e} - \dot{q}_d] + h^0 - Z(t)s + W(t)F_{PID}(s) \quad (31)$$

여기서,

$$F_{PID}(s) = K_P s + K_I \int s dt + K_D \frac{d}{dt} s$$

PID구조와 유사한 제어입력으로,  $s(t) \rightarrow 0$ 이 되도록 할 수 있다. 그러므로, 이 시스템의 상태는 어떤 경계 내에 있는 것이 아니라 슬라이딩 면에 있도록 할 수 있다.

#### 4. 모의실험

본 논문의 모의실험은 이족보행로봇이 2sec동안 정지한 상태를 유지하면서 초기위치를 결정한 후, 12sec동안 네 보를 동적 안정을 유지하면서 전진운동을 수행한다. 그리고 다시 2sec동안 정지하는 운동을 하는 총 16sec동안 완전보행운동을 한다. 이때 모의실험에 사용된 이족로봇의 공칭 물성치(nominal mass properties)는 참고문헌(12)에 나타낸 것과 같다. 그리고, 시스템 모델링 파라미터의 불확실성을 포함하기 위하여 다음 식(32)에서 식(34)와 같이, 시스템 공칭값에 10%의 값을 추가하였으며 외란  $d(t)$ 는 지면반력을 사용하였다.

$$\Delta M(q) = 0.1M(q) \quad (32)$$

$$\Delta h_i(q, \dot{q}) = 0.1h_i(q, \dot{q}) \quad (33)$$

$$d_i(t) = F_{foot}(t) \quad (34)$$

균형추의 운동 역시 참고문헌(12)에서 FFT방법을 이용하여 결정하였다. 그래서, 모의실험에 사용된 절대 운동궤적은 균형추(trunk), 물체 1, 두 발과 각도를 다시 나타내면 다음 Fig. 4에서 Fig. 6과 같이 나타낸다.

이때 물체 1의 높이는 40cm로 전 보행구간에서 동일하고, 한 보폭은 14cm/sec이고 시간은 3sec/step이다.

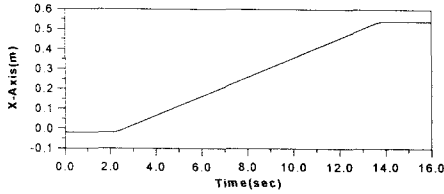
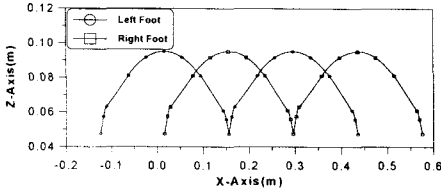
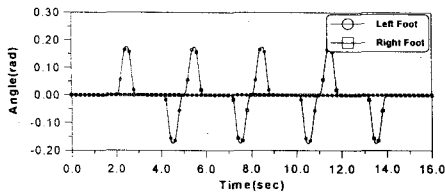


Fig. 4 Cartesian position trajectory of body



(a) Cartesian trajectories



(b) Angle trajectories

Fig. 5 Cartesian position and orientation of feet during four steps

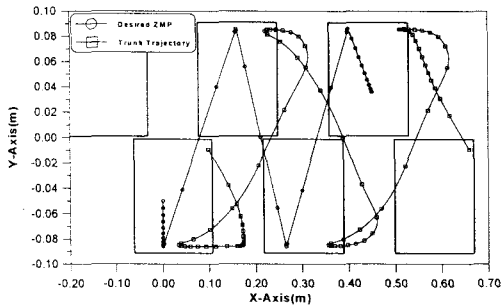


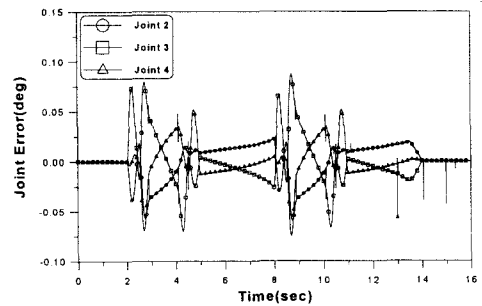
Fig. 6 Desired ZMP and trunk trajectories

그리고, 슬라이딩 모드 제어에 사용된 설계 게인에는 다음과 같이, 식(19)의 슬라이딩면의 기울기  $\lambda$ , 식(30)의 Lyapunov함수가 negative-definite이기 위한  $K$ 행렬, 그리고 제어입력식(31)의 PID구조에서 게인  $K_p, K_i, K_d$ 가 있으며, 본 모의실험에 사용된 값을 Table 1에 나타내었다. 여기서 지면반력이 포함하고 있는 잡음의 특성을 억제하고 운동방정식의 비선형성분을 보상하기 위하여, 그리고 지면충돌현상으로 발생하는 큰 외력에 대한 조인트 오차를 줄이기 위하여 큰 슬라이딩면의 게인이 필요로 함을 알 수 있다.

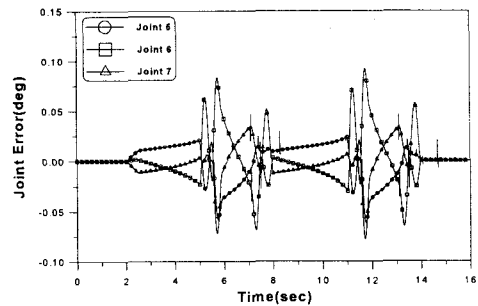
Table 1. Design parameters for sliding surface and PID structure

Joints	$\lambda$	$K$	$K_p$	$K_i$	$K_d$
J2	500.0	800.0	10.0	0.0005	5.0
J3	800.0	500.0	28.0	0.0005	8.0
J4	900.0	100.0	5.0	0.0001	1.5
J5	500.0	800.0	10.0	0.0005	5.0
J6	800.0	500.0	28.0	0.0005	8.0
J7	900.0	100.0	5.0	0.0005	1.5
J8	800.0	500.0	10.0	0.5	5.0
J9	800.0	500.0	10.0	0.5	5.0

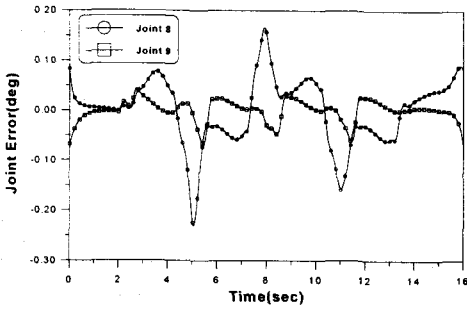
이러한 조건으로 모의실험을 수행한 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. Fig. 7은 슬라이딩모드 제어기에 의한 강건위치제어의 결과를 보여주고 있다. 각각의 조인트 오차의 성분들이 떨림현상이 없이 원하는 궤적을 추종함을 알 수 있다. 그러나, 너무나 외란의 성격이 강한 지면반력의 영향으로 조인트 오차가 존재함을 알 수 있다. 두 다리의 조인트 오차의 크기가 구동력의 크기와 비례함을 알 수 있다. 개형구조를 이루는 균형추 관절의 경우에, 지면과 접촉운동을 하는 두 다리의 운동보다 오차가 오히려 크게 발생함을 알 수 있다. 이것은 슬라이딩면의 설정에 문제가 있는 것이 아닌가 판단된다.



(a) Joint error for left leg

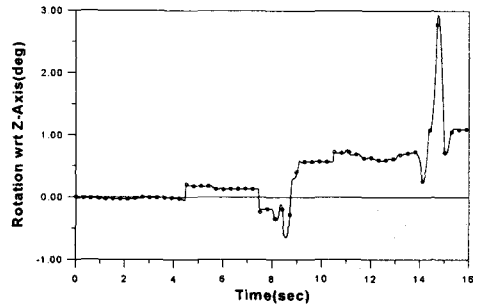


(b) Joint error for right leg



(c) Joint error for trunk joints

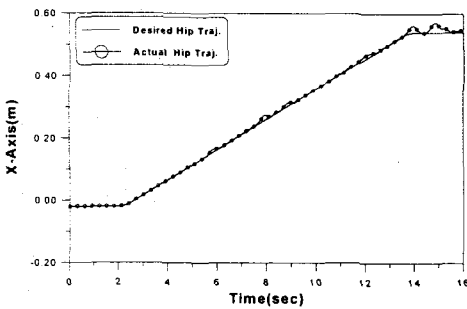
Fig. 7 Joint errors the results of simulation using sliding mode controller



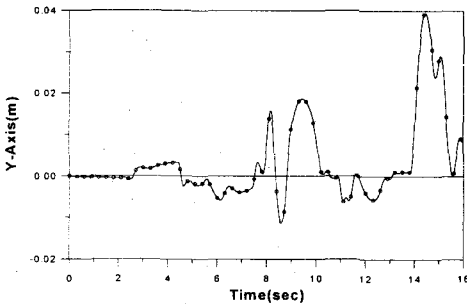
(d) Rotation of body 1 wrt Z-axis

Fig. 8 Cartesian motion of body 1 the result of simulation

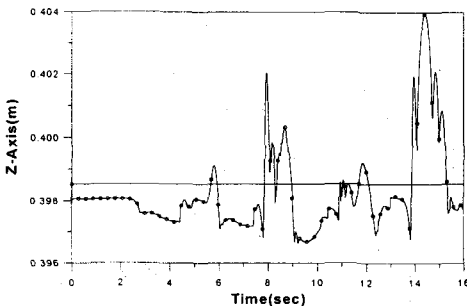
Fig. 8은 이 모의실험으로 얻은 물체 1의 3차원 운동의 결과를 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 보행로봇의 진행방향의 운동이 수직적분과 지면의 충돌현상의 으로 인하여 마지막 착지하는 부분에서 많은 흔들림을 가지고 정지함을 알 수 있다. 또한 Fig. 8(b)는 보행중에 발생하는 로봇의 좌우 흔들림을 나타낸다. 역시 착지하는 부분에서 큰 좌우 흔들림이 발생함을 알 수 있다. Fig. 8(c)는 시간에 따른 보행로봇의 높이 변화를 보여주고 있으며, 높이의 차이는 조인트 오차뿐만 아니라 지면과의 충돌에 의하여 발생한다. Fig. 8(d)는 물체 1이 지면과의 미끄러짐으로 인하여 생성되는 뒤틀림을 보여준다. 역시 마지막 도착부분에서 큰 오차가 발생한다.



(a) X-axis motion of body 1(walking direction)



(b) Y-axis motion of body 1(lateral motion)



(c) Z-axis motion of body 1(height)

## 5. 결론

본 논문에서는 이족보행로봇의 동적보행을 수행하는 과정에서 발생하는 지면반력을 결정하기 위하여 접촉부분의 물리적 특성을 고려하고 충돌시 발생하는 에너지 소모의 특성을 포함하는 Hertz 힘 모델을 기반으로 Hysteresis 댐핑요소를 추가하는 지면 수직반력을 구성하였다. 그리고, 불규칙한 외란의 특성을 갖는 지면반력의 영향을 최소화하여, 이 동적보행을 보장하도록 하기 위하여 슬라이딩모드제어기를 이용하여 강건제어기를 구성하였으며, 불연속적인 제어입력의 특성을 없애고 정상상태오차를 줄이기 위하여 PID구조와 유사한 제어입력을 가하였으며, 그 결과 추종하는 궤적이 떨림현상없이 잘 추종함을 알 수 있었다. 그러나 수치적분 오차의 누적과 제어기 자체의 게인설정의 문제로 인하여 큰 흔들림을 가지

는 운동양상을 보임을 알 수 있다.

앞으로, 지면반력의 급격한 변화를 줄일 수 있는 개선된 발바닥모델이나 제어알고리즘이 필요하고 실시간으로 ZMP의 운동을 보상할 수 있는 방법이 요구된다.

### 참고문헌

- (1) J. Furusho and A. Sano, "Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped," *J. of Robotics Research*, Vol. 2, No. 2, pp. 83-98, 1990.
- (2) J. Furusho and M. Masubuchi, "Control of a Dynamical Biped Locomotion System for Steady Walking," *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 108, pp. 111-118, 1986.
- (3) T. Mita, T. Yamaguchi, T. Kashiwase, and T. Kawase, "Realization of a High Speed Biped using Modern Control Theory," *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 114, pp. 660-665, 1992.
- (4) R. Stojic and C. Chevallereau, "On the Stability of Biped with Point Foot-Ground Contact," *Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 3340-3345, 2000.
- (5) Jong Hyeon Park and Hoam Chung, "Impedance Control and Modulation for Stable Footing in Locomotion of Biped Robots," *Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1786-1791, 1999.
- (6) W. Blajer and W. Schiehlen, "Walking without Impacts as a Motion/Force Control Problem," *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 114, pp. 660-665, 1992.
- (7) Y. Fujimoto, S. Obata and A. Kawamura, "Robust Biped Walking with Active Interaction Control between Foot and Ground," *Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2030-2035, 1998.
- (8) S. G. Tzafestas, T. E. Krikochoritis, and C. S. Tzafestas, "Robust Sliding-Mode Control of Nine-link Biped Robot Walking," *J. of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 20, pp. 375-402, 1997.
- (9) C. M. Chew and G. I. A. Pratt, "A Minimum Model Adaptive Control Approach for a Planar Biped," *Conf. Intelligent Robotics and Systems*, pp. 1469-1474, 1999.
- (10) Q. Zgou and Q. Meng, "Reinforcement Learning with Fuzzy Evaluative Feedback for a Biped Robot," *Proc. ICRA*, pp. 3829-3834, 2000.
- (11) A. Kun and W. T. Miller, "Adaptive Dynamic Balance of a Biped Robot using Neural Networks," *Conf. Robotics and Automation*, pp. 240-245, 1996.
- (12) 박인규, 김진걸, "이족보행로봇의 동적보행과 역동역학 해석," *대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A*, pp. 548-555, 2000.
- (13) S. S. Kim and M. J. Vanderploeg, "A General and Efficient Method for Dynamic Analysis of Mechanical Systems using Velocity Transformations," *J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 108, pp. 176-182, 1986.
- (14) E. J. Haug, "Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Vol. I, Basis Methods," *Allyn and Bacon*, 1989.
- (15) H. M. Lankarani and P. E. Nikravesh, "A Contact Force Model with Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems," *J. of Mechanical Design*, Vol. 112, pp. 369-376, 1990.
- (16) Y. F. Chen, T. Mita, and S. Wakui, "A New and Simple Algorithm for Sliding Mode Trajectory Control of the Robot Arm," *IEEE Trans. Automat. Contr.* Vol. 35, No. 7, pp. 828-829, 1990.
- (17) C. W. Park, J. H. Kim, C. Kwon, and Mignon Park, "Tracking Control of a Robot Manipulator using Sliding Mode Controller with Fast and Accurate Performance," *Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 305-310, 1999.
- (18) J. J. Slotine and W. Li, "Applied Nonlinear Control," *Prentice Hall*, 1991.