

이족보행로봇을 위한 슬라이딩 제어기 설계

박인규*, 김진결**, 김기식***

Sliding Mode Controller Design for Biped Robot

In-Gyu Park*, Jin-Geol Kim**, Kisik Kim***

ABSTRACT

A robust controller with the sliding mode is proposed for stable dynamic walking of the biped robot in this paper. For the robot system to be controlled, which is modeled as 14 DOF rigid bodies by the method of multi-body dynamics, the joint angle trajectories are determined by the velocity transformation matrix. Also Hertz force model and Hysteresis damping element are utilized for the ground reaction and impact forces during the contact with the ground. The biped robot system becomes unstable since those forces contain highly confused noise components and some discontinuity, and modeling uncertainties such as parameter inaccuracies. The sliding mode control is applied to solve above problems. Under the assumption of the bounded estimation errors on the unknown parameters, the proposed controller provides a successful way to achieve the stability and good performance in spite of the presence of modeling imprecisions or uncertainties.

Key Words : Biped Robot (이족보행로봇), Sliding Mode Controller (슬라이딩 모드 제어기), Multibody Dynamics (다물체 동역학), Velocity Transformation Matrix (속도변환행렬), Hysteresis Damping Model (Hysteresis 댐핑모델).

1. 서론

작업자나 일반차량의 접근이 어려운 환경이나 산업현장들 뿐만 아니라 인간활동 중심으로 설계되어진 공간 즉, 공공장소, 병원, 혹은 가정에서 인류를 보조하기 위하여 이족보행로봇의 연구가 활발히 진행중이다. 보행로봇의 제어 연구분야에는 안정된 동적 보행을 만족시키는 보행계획의 생성에 관한 연구와 생성된 궤적을 불완전한 시스템 모델특성, 조인트 추종오차, 지면에서 작용하는 반력 등의 불규칙한 입력에 강인성을 가지거나 적응성을 가지도

록 하는 제어부분으로 크게 나눈다. 그리고 이들은 서로 연관성을 가지는 계층적(hierarchical) 구조를 이룬다^(1~12). 최근에는 불규칙한 지면이나 외란에 대해 실시간으로 보행계획을 보상하는 시스템제어 방법들이 아직 2차원 운동에 한정되었지만 연구중이다^(13,14).

이족보행로봇의 제어를 위한 운동방정식의 구성은 매우 복잡할 뿐만 아니라, 이것의 구성이 강한 비선형성을 가진다. 그래서 많은 기존의 연구에서는 이족보행로봇의 제어를 위하여 시스템을 간략화 혹은 선형화된 모델로 변환한 후 현대선형제어

* 인하대학교 자동화공학과 박사과정

** 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부

*** 인하대학교 물리학과

이론을 적용하여 구현하고자 하였다^(1~4). 그러나 실제의 운동방정식 구성에서 외부와의 접촉으로 발생하는 지면반력, 백래쉬 등은 선형화가 불가능하다. 또한, 시스템 모델과정에서 제외된 부분, 불확실한 시스템 파라미터들로 인해 제어영역에 많은 제약을 받는다.

컴퓨터의 발전에 힘입어 보다 정확한 시스템 모델링이나 운동방정식의 구성에서 이런 문제점들을 극복하기 위한 많은 비선형 제어기법들의 연구가 이루어졌다. 이러한 방법들 중에는 개념상 간단한 계산-토크 방법에 기초한 Impedance제어, 힘/위치 혼합제어기법 등이 있다^(5,6). 그러나 이 방법들은 시스템 파라미터들이 모두 파악된 상태에서 적용이 가능하다. 최근에는 시스템의 불확실성과 부정확성을 제어기에 포함시킬 수 있는 강건제어기법이나 최적제어기법들이 적용되고 있다^(7~9). 또한 복잡한 수학적 접근을 벗어나 인공지능의 기법을 이용하여 이러한 문제점들에 해결하고자 하였다^(10,11). 그러나 이 기법들이 보다 우수한 제어성능을 가지기 위하여 역시 시스템의 운동방정식을 필요로 한다.

본 논문에서는 역진자형태의 균형추를 가진 3차원 이족보행로봇을 다물체 동역학 모델링기법을 이용하여 14자유도를 갖도록 구성한다^(12,15,16). 특히 지면 접촉력을 보다 엄밀하게 계산하기 위하여 지면 접촉의 물리적 특성을 고려한 Hertz의 힘 모델에 기초하고, 접촉시 발생하는 에너지 소모를 포함시키기 위하여 Hysteresis 댐핑모델을 적용한다⁽¹⁷⁾. 이때 얻어진 지면반력의 특성은 불규칙 진동의 특성을 가진다. 또한 보행 중 지면접촉충돌로 충격력의 입력을 생성한다. 이들 외력의 입력으로 보행로봇 전체 시스템 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 또한 비교적 엄밀한 운동방정식의 구성에도 불구하고 시스템 모델링 오차가 발생할 수 있다. 이러한 문제점들을 극복하고 안정된 보행을 위하여 비선형 강건제어기인 슬라이딩모드 제어기를 도입한다^(18~20).

2. 이족보행로봇의 구성과 보행 궤적생성

2.1 이족로봇의 구성

본 논문의 모의실험에 사용된 이족보행로봇의 모델은 Fig. 1(a)와 같다. 인류와 유사한 보행을 위하여 각 다리를 6자유도로, 시스템의 균형을 제어

하기 위한 역진자형태의 균형추 부분을 2자유도로 각각 모델링하여 모두 아홉 개의 물체로 이루어진 14자유도의 다물체 동역학 모델을 나타낸다. 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 상대회전좌표 ϕ 로 나타낸다. 즉, ϕ 를 일반화좌표벡터 q 로 정의한다. 주 물체인 물체 1 즉, 힙(hip)의 상대좌표는 관성좌표계에 관한 절대좌표 $q^1 = [r^1, p^1]^T$ 로 정의한다. 여기서 $r^1 = [x^1, y^1, z^1]^T$ 는 위치벡터를 나타내며, $p^1 = [e_0^1, e_1^1, e_2^1, e_3^1]^T$ 는 오일러파라미터로 나타낸 방향이다.

속도변환행렬을 이용하여 상대조인트좌표계로 변환된 보행로봇 시스템의 운동방정식은 다음의 식(1)과 같다.

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

여기서

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

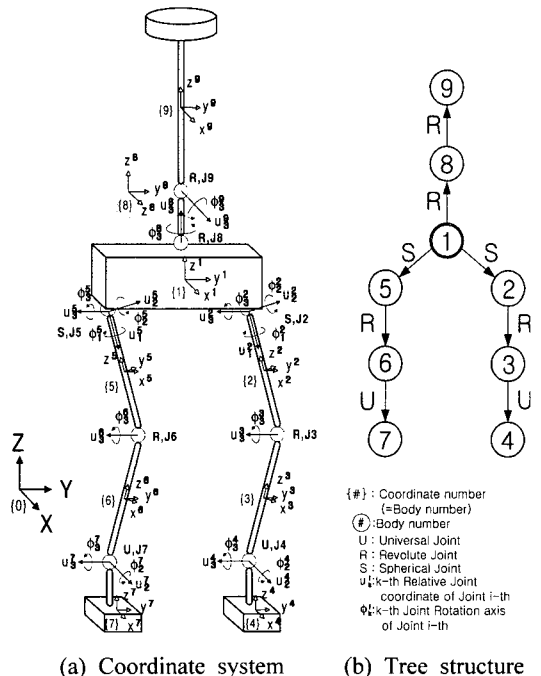


Fig. 1 Biped system configuration

이고, 벡터 τ_{drv} 는 각 조인트의 구동력을 나타내고, 벡터 \hat{F}_{foot} , \hat{G} 는 절대좌표계로 표현된 발바닥에 작용하는 외력, 중력가속도에 의한 외력을 나타내고, ω 는 각속도 벡터, $\tilde{\omega}$ 는 ω 의 외대칭행렬(skew symmetric matrix), 행렬 B 는 절대좌표와 상대좌표와의 관계를 나타내는 속도변환행렬이다. 행렬 \hat{M} 과 \hat{J} 그리고 벡터 \hat{H} 는 절대좌표계로 나타낸 시스템의 질량과 관성행렬 그리고 외력들과 코리올리항을 포함하는 벡터를 각각 나타낸다. 행렬 M 은 행렬 \hat{M} 을 상대좌표계로 표현한 행렬이다.

2.2 지면 접촉력 모델

일반적으로, 강체계내의 다물체 동역학에서 접촉에 의한 충돌현상의 해석을 충돌의 전·후의 운동방정식이 별개로 구분되는 방법과 같은 운동방정식에 충돌에 의한 힘을 외력의 항으로 직접 입력하는 방법으로 구분하여 해석하는 방법으로 구분한다. 전자의 방법으로 간주하는 경우에는 접촉으로 발생하는 에너지 소모의 특성을 표현할 수 없으며, 지속적인 접촉현상을 해석하기 어려울 뿐만 아니라 수치적분 방법상에 어려움이 존재한다. 본 논문에서는 접촉면의 형상과 재료의 성질뿐만 아니라 반발계수의 항으로 이루어져 물리적 특성을 나타낼 수 있는 Hertz의 접촉력 모델에 기초하는 후자의 연속적인 방법을 이용하여 접촉력을 계산한다. 이때 사용된 발의 모델을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 지면과의 접촉은 양 발바닥에 존재하는 4개의 반구 A_0, A_1, B, C 에 의하여 이루어지는 것으로 가정을 한다.

연속적인 방법에 의한 접촉력 계산을 위하여 탄성이론(theory of elasticity)에 기초한 Hertz 접촉력 모델을 적용하면 수직접촉력은 다음과 같다.

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

여기서 δ 는 두 접촉물체 표면의 지역 상대침투량(local 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.

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

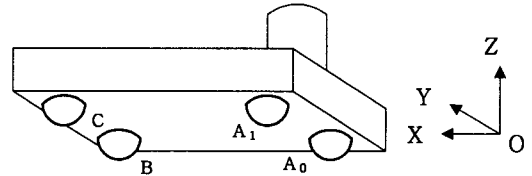


Fig. 2 Four hemisphere contacting points on the sole of the foot

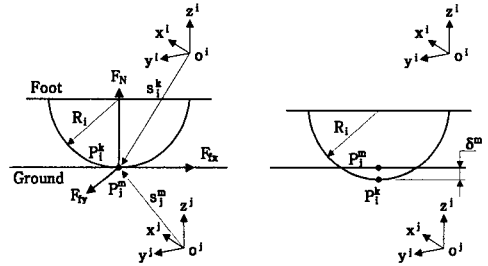


Fig. 3 A hemisphere coordinate system and maximum penetration δ^m during contact

여기서 재료 파라미터 h_i 와 h_j 는 다음과 같다.

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

변수 ρ_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 Hysteresis형태의 특성을 갖는 댐핑계수 D 를 식(3)에 첨가하여 식(4)와 같이 표현하여 이 문제점을 극복한다.

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

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

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

여기서 $\dot{\delta}^{(-)}$ 는 접촉하는 순간의 초기속도이다. 이

식(5)를 접촉력식인 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

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

여기서 δ 는 접촉하는 전 구간에서의 침투속도를 나타낸다. 위 식(6)은 접촉하는 재료의 특성과 형상뿐만 아니라 접촉에 의한 수직반력과 반발계수와와의 직접적인 관계를 나타내고, 비선형특성을 가진다.

이때 지면에서 작용하는 수평력 F_j 는 수직반력과의 관계로부터 다음과 같이 표현된다.

$$F_{j_k} = \mu_s F_{N_k} \frac{V_k^{ij}}{|V_k^{ij}|} \quad (7)$$

여기서 V_k^{ij} 는 두 물체의 접촉점 P_i^k 와 P_j^k 사이의 상대속도로 다음과 같이 표현된다. 첨자 k 는 k 번째 접촉반구를 나타낸다. μ_s 는 물체의 정지마찰계수이고, $\mu_s F_{N_k}$ 은 최대정지마찰력이다.

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

여기서 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 \hat{F}_{foot} 으로 나타내고 그 요소는 $[F_{fx}, F_{fy}, F_N]^T$ 이다. 이 절대좌표 벡터 힘은 속도변환행렬을 이용하여 조인트 좌표값으로 변환하여 운동방정식에 입력으로 사용한다.

3. 슬라이딩 모드 제어기

3.1 모델링 가정과 정의

제어대상인 운동방정식은 식(1)과 같으며, 지면과의 접촉력 \hat{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,

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

$$H = [\hat{G}^T, (\tilde{\omega}\hat{\omega})^T]^T$$

$$d(t) = B^T D(t)$$

로 각각 상대좌표계로 변환된 외력들을 나타낸다.

시스템 파라미터 불확실을 고려한 시스템의 모델은 다음과 같다고 가정한다.

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

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

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

모델링 오차의 크기와 외란은 다음과 같이 임의의 한정된 범위에 존재하는 것으로 가정한다.

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

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

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

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

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

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

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

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 측정 가능하다고 가정을 한다.

일반적으로 n 입력, $2n$ 상태변수를 갖는 시스템의 슬라이딩 모드 제어는 n 스위칭 평면을 가지므로 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 이룬다.

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 $s(t) = 0$ 이면, 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 식(21)은 식(9)를 이용하여 다음의 식(22)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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.

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

여기서,

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

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

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

이다. 제어입력 $u(t)$ 를 식(22)에 대입하면 다음과 같다.

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

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, 식(24)의 오른쪽 두 번째 항은 다음 식(27)을 만족한다.

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

이것은 식(24)의 두 번째 항이 negative semi-definite 함수가 되도록 한다. 또한 $z_i(t)$ 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 첫째 항은 다음과 같은 식을 만족한다.

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

그래서 식(24)의 첫째 항은 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 부정정값을 보장한다. 그래서 제어입력 식(23)은 Lyapunov 안정조건을 만족한다.

그러나 제어입력이 sgn 함수에 의해 불연속인 제어입력으로 작용한다. 이것은 떨림현상(chattering)을 발생하므로 실제적용에는 바람직하지 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.

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

여기서,

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

PID구조를 갖는 제어입력으로, $s(t) \rightarrow 0$ 이 되도록 할 수 있다. 그러므로, 이 시스템의 상태가 슬라이딩 면을 중심으로 어떤 범위 내에 있는 것이 아니라, 바로 슬라이딩 면에 있도록 할 수 있다.

4. 모의실험 및 고찰

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 16sec동안의 보행을 주기로 하는 보행운동을 한다⁽¹³⁾. 이때 모의실험에 사용된 이족보행로봇의 공칭 물성치(nominal mass properties)는 참고문헌(12)에 자세히 나타내었다. 그리고, 시스템 모델링 파라미터의 불확실성을 제어기에 포함시키기 위하여 다음 식(32)에서 식(34)와 같이 시스템 공칭값에 10%의 값을 추가하였으며 외란 $d(t)$ 는 지면접촉반력을 사용하였다.

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

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

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

안정된 동적 보행을 보장하기 위한 균형추의 운동은 FFT방법을 이용하여 결정한 결과를 원하는

균형추의 운동으로 한다. 그래서, 모의실험에 사용된 절대운동계적은 균형추(trunk), 힙, 그리고 두 발의 궤적값이 된다. 이 궤적값들은 아래의 Fig. 4에서 Fig. 6에 각각 나타내었다.

Fig. 4에서는 힙이 고정좌표계에 관하여 약 3cm 뒤에서 출발하여 네 보 동안 56cm 전진운동을 한다. 약 2초까지 정지된 상태로 있다가 약 12sec동안 선형운동을 하고 난 후, 다시 약 2초간 정지운동을 한다. 이때의 힙의 속도는 약 0.05m/sec로 등속운동을 한다. 또한 힙의 높이는 약 40cm로 전 보행구간에서 동일하고 좌우의 흔들림 운동은 하지 않는다. Fig. 5는 두 발의 절대운동계적을 나타내며, 진행-높이 방향을 평면으로 하는 운동과 두 발의 킥(kicking)을 위한 회전각을 각각 나타내었다. 한 보폭은 14cm/setp, 3sec/step이고, 높이는 약 10cm들어 올린다. 그리고 킥을 위한 발의 회전각은 0.5sec동안 $\pm 10^\circ$ 이다.

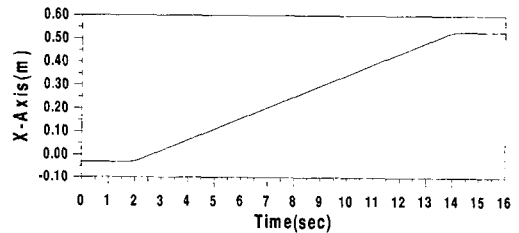
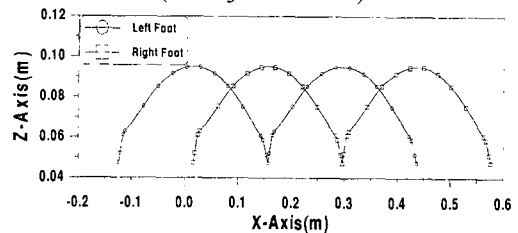
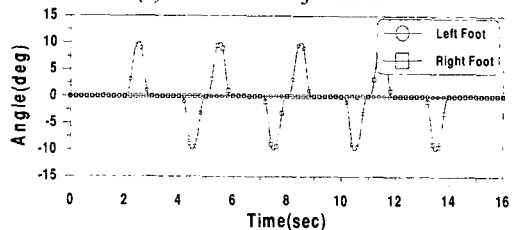


Fig. 4 Cartesian position trajectory of hip ($x^1 - y^1 - z^1$ frame)



(a) Cartesian trajectories



(b) Angle trajectories

Fig. 5 Cartesian position and orientation of feet during four steps ($x^4 - y^4 - z^4$ frame and $x^7 - y^7 - z^7$ frame)

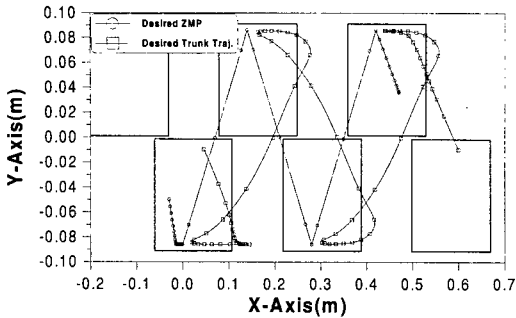


Fig. 6 Desired ZMP and trunk trajectories ($x^g - y^g - z^g$ frame)

Fig. 6은 네 보를 전진하는 동안의 발바닥 위치, 이 발바닥을 안정영역으로 하는 계획된 ZMP 궤적, 그리고 FFT를 통하여 얻은 균형추의 운동을 함께 나타내었다. ZMP 궤적은 초기의 준비운동구간과 마지막 정지운동구간을 제외한 나머지의 정상보행 구간에서는 대부분이 지지발바닥 내에 존재한다는 것을 알 수 있다. 그리고 균형추의 운동이 처음의 시작과 끝부분을 제외한 나머지 구간에서 서로 대칭을 이루며 규칙적인 운동양상을 보여준다.

슬라이딩 모드 제어기 설계에 사용되는 매개변수(parameter)들에는 다음과 같이, 식(19)의 슬라이딩 면의 기울기 Λ , 식(30)의 Lyapunov 함수가 negative-definite이기 위한 K 행렬, 그리고 제어입력 식(31)의 PID구조에서 이득(gain) K_p, K_I, K_D 가 있다. 본 모의실험에 사용된 값들을 Table 1에 나타내었다. 이때 지면반력이 지면충격력, 미끄러짐 등의 현상, 혹은 강체로 구성된 이족보행로봇의 외부에 대한 순응(compliance) 부족으로 불규칙한 진동 특성을 가지고 있으므로 이를 억제하고 운동방정식의 불확실성을 보상하기 위해, 그리고 지면충돌로 발생되는 큰 외력의 입력에 대한 조인트 오차를 줄이기 위해 큰 슬라이딩 면의 게인이 필요로 하였다. 그러나, 너무 큰 게인을 사용할 경우에는 조인트 제어가 강경(stiff)하게 되어 오히려 지면반력에 너무 민감하게 반응하여 보행로봇 시스템을 불안정하게 하는 경향이 있었다.

이 조건들을 이용하여 모의실험을 수행한 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 절대좌표계로 나타낸 힙과 균형추의 운동결과를 입력궤적과 비교하여 각각 나타내었다. 각 조인트의 슬라이딩 모드 제어에 대한 결과의 최대오차가 0.05° 이하로 전 보행구간에서 잘 추종하므로 본 결과에서는 언급을 하지 않는다.

Table 1 Design parameters for sliding surface and PID structure

Joints	Λ	K	K_p	K_I	K_D
J2	500.0	800.0	20.0	2.0	0.0005
J3	800.0	500.0	30.0	1.0	0.0005
J4	900.0	100.0	20.0	5.0	0.0001
J5	500.0	800.0	20.0	2.0	0.0005
J6	800.0	500.0	30.0	1.0	0.0005
J7	900.0	100.0	20.0	5.0	0.0001
J8	800.0	500.0	10.0	5.0	0.020
J9	800.0	500.0	10.0	10.0	0.020

Fig. 7은 힙 운동에 대한 보행 모의실험의 결과를 절대좌표계로 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 진행방향으로의 운동결과를 나타낸다. 0.1cm이하의 오차를 유지하며 원하는 궤적을 잘 추종한다. Fig. 7(b)는 좌우의 흔들림을 나타낸다. 두 발 지지단계가 시작 혹은 끝나는 구간인 2, 5, 8, 11, 14sec 의 ± 0.5 sec에서 미소한 좌우 흔들림이 발생한다. 이 흔들림의 양상이 각각의 발에 대하여 규칙적으로 발생한다. Fig. 7(c)에서는 보행 중 지면충돌로 힙이 순간적으로 적은 양이지만 튀어 오르는 모습을 나타낸다. 이 그림에서도 역시 각 발에 대하여 규칙적으로 튀어 오르는 양상을 가진다. 또한 실제 발바닥은 강체의 평면으로 설계되었지만, 모의실험에서는 지면의 접촉이 완전탄성체로 가정된 네 개의 반구가 접촉하는 것으로 가정을 하였다. 그래서 이 족보행로봇이 보행 중 이 탄성반구는 충돌과 자체 무게에 의한 탄성변형의 영향으로 원하는 궤적값의 오차가 발생하였음을 나타낸다. 한 발 지지단계에서 더 많은 하중의 영향으로 큰 변형을 가진다. Fig. 7(d)는 힙의 Z축에 관한 보행 중 지면과 미끄러짐이나 충돌현상으로 인한 뒤틀어짐의 정도를 나타낸다. 전체적으로 최대 약 0.08° 정도 뒤틀림이 발생한다. 이 결과 역시 Fig. 7(b)와 같이 운동 중 발을 바꾸는 구간에서 미끄러짐이 비교적 크게 발생한다. Fig. 7에 나타낸 힙 운동 그래프들은 ZMP 조건뿐만 아니라 지면접촉의 조건, 즉 미끄러짐이 없도록 하는 잘 선택된 균형추의 운동궤적을 입력으로 한 모의실험결과를 나타낸 것이다. 그러나, 4차 runge-kutta 방법을 이용한 수치적분의 오차, 모델링의 불확실성, 이로 인한 충돌현상 등으로 인하여 오차가 발생함을 추정할 수 있다.

Fig. 8은 균형추 COM 운동의 모의실험 결과를 절대좌표계로 입력 값과 비교하여 각 평면 운동으로 나타내었다. 전체적인 결과로서 입력과 비교적

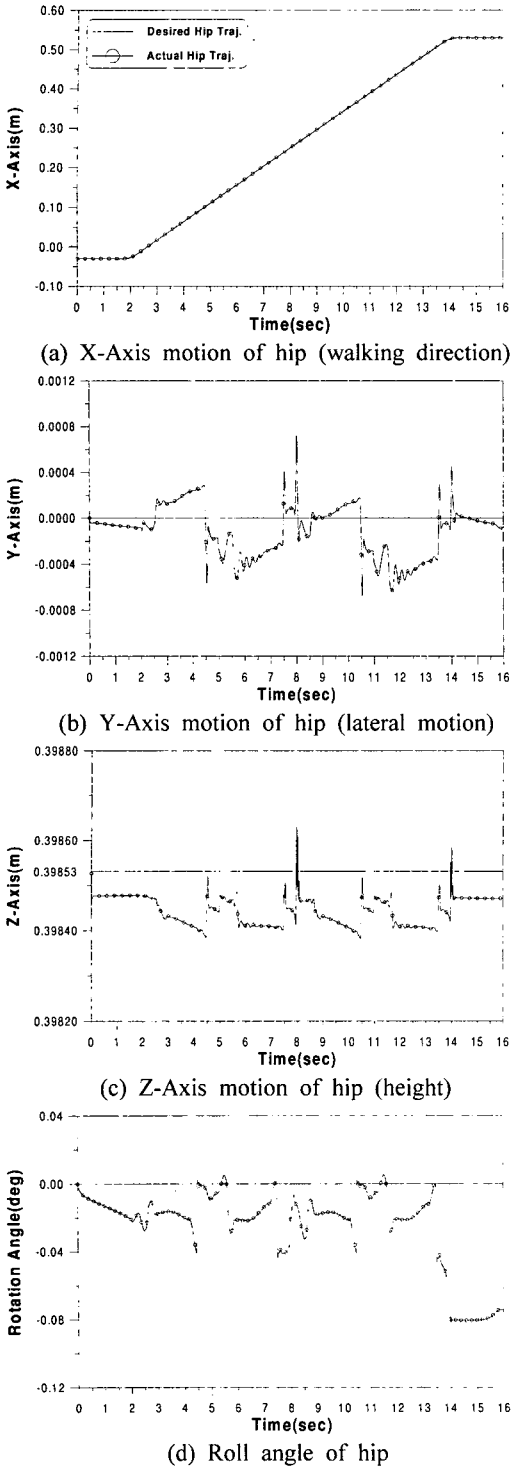
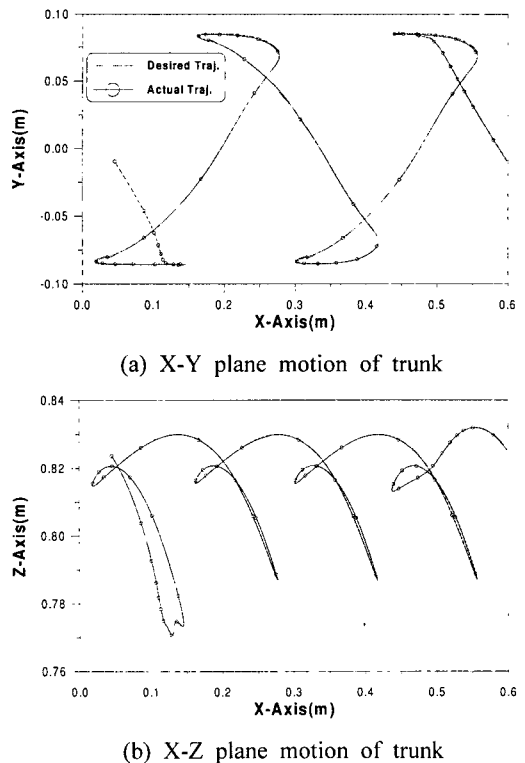
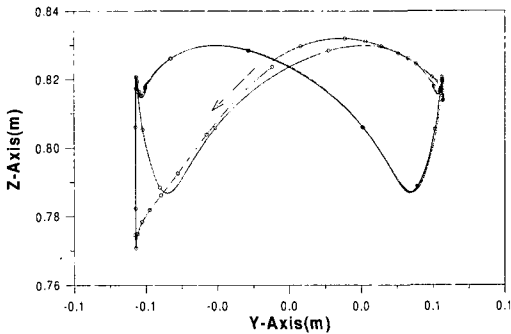


Fig. 7 Cartesian motion of hip the result of simulation

잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 8(a)는 X-Y 평면에 나타난 운동결과로서 처음과 끝 부분의 정지운동구간을 제외하고 비교적 대칭적인 연속운동을 나타낸다. Fig. 8(b)에서는 초기에 약 5cm 정도 앞으로 크게 균형추가 기울어지지만 전체적인 운동에서 약 4cm 정도 기울어짐으로 규칙적으로 반복함을 알 수 있다. Fig. 8(c)는 좌우의 운동을 나타낸 것이다. 초기위치, 즉 균형추가 왼쪽으로 약 1cm, 앞으로 약 5cm의 위치에서 운동을 시작하여 약 5cm 정도 크게 불규칙한 운동을 한 후, 나머지 보행구간에서 전체적으로 안정된 주기적인 균형추의 운동양상을 띄면서 운동을 완료한다. 이 균형추의 운동결과 또한 앞에서 언급한 오차요인들로 인하여 미소의 오차가 존재한다.

Fig. 9는 본 논문에서 제안한 지면접촉모델과 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 모의실험한 결과인 16sec 동안 네 보, 56cm 전진 운동한 결과를 막대그림(stick diagram)으로 나타낸 것이다. 전체적인 대칭을 이루며 안정된 보행을 수행하는 양상을 띤다. 이것은 더 많은 연속보행의 수행결과에도 잘 적용되리라 예측할 수 있다.





(c) Y-Z plane motion of trunk

Fig. 8 Cartesian motion of trunk the result of simulation

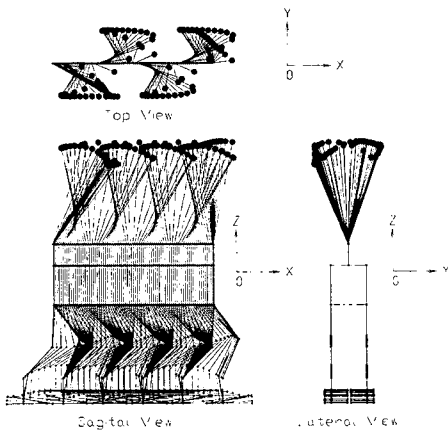


Fig. 9 The result of simulation for dynamic walking with sliding mode controller

5. 결론

본 논문에서는 이족보행로봇의 동적 보행을 수행하였다. 이 과정에서 아래와 결론과 예측을 얻을 수 있었다.

(1) 발과 지면과의 접촉·충돌 현상을 나타내기 위하여 단지 수학적인 모델인 선형 혹은 비선형 스프링-댐퍼 모델의 범위를 넘어, 접촉부분의 물리적 특성을 고려하고 충돌 시 발생하는 에너지 소모의 특성을 나타낼 수 있는 Hertz 힘 모델에 기초하여 Hysteresis 댐핑요소를 추가하였다. 이 접촉모델을 바탕으로 수학적으로 보다 현실성을 부여한 동적 보행의 모의실험을 수행하였다.

(2) 지면의 접촉과 충돌현상, 그리고 이족보행로봇의 모델링의 불확실성과 수치적분 오차 등의 불

안정성으로 인하여 발과 지면사이에는 불규칙한 외란 특성을 갖는 지면반력이 형성되었다. 이로 인하여 동적 보행을 보장하도록 잘 선정된 균형추의 운동제적임에도 불구하고 오차가 존재하거나 이로 인한 보행을 수행할 수 없게 되었다^(21,22). 이러한 영향들과 시스템 모델링의 오차에 의한 영향을 최소화하여 동적 보행을 보장하도록 하기 위한 방법으로 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 강인성을 지닌 강건 제어를 구성하였다. 또한 불연속적인 제어 입력의 특성을 없애고 정상상태오차를 줄이기 위하여 PID구조를 갖는 제어입력을 적용하였다. 이 결과로 최대 조인트 오차가 0.05° 이내로 잘 추종함을 알 수 있었다.

(3) 앞에서 언급한 모델오차, 수치적분의 오차, 그리고 지면충돌에 의한 불안정성 등에도 불구하고 전체적인 운동이 주기적으로 안정된 결과를 얻을 수 있었다. 이것으로 보다 더 많은 연속적인 보행에도 잘 만족되리라 예측할 수 있다.

앞으로, 지면반력의 급격한 변화를 줄일 수 있는 개선된 발바닥모델을 위하여, 인간의 발 구조와 유사한 지면접촉을 구현할 수 있는 수학적 모델을 개발하기 위해 FEM 기법을 적용하여야 할 것으로 예측된다. 이를 바탕으로 실시간으로 ZMP의 운동을 보상할 수 있는 방법의 연구가 요구된다.

후기

이 논문은 2000학년도 인하대학교 지원에 의하여 연구되었음(INHA-00000)

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. 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. In-Gyu Park and Jin-Geol Kim, "Dynamic Walking Planning and Inverse Dynamic Analysis of Biped Robot," J. of KSPE, Vol. 17, No. 9, pp. 133-144, 2000.
13. J. H. Park and H. C. Cho, "An On-Line Trajectory Modifier for the Base Link of Biped Robots To Enhance Locomotion Stability," Conf. Robotics and Automation, pp. 3353-3358, 2000.
14. Q. Huang, K. Kaneko, K. Yokoi, S. Kajita, T. Kotoku, N. Koyachi, H. Arai, N. Imamura, K. Komoriya, and K. Tanie, "Balance Control of a Biped Robot Combining Off-line Pattern with Real-time Modification," Conf. Robotics and Automation, pp. 3346-3352, 1996.
15. 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.
16. E. J. Haug, "Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Vol. I, Basis Methods," Allyn and Bacon, 1989.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. J. J. Slotine and W. Li, "Applied Nonlinear Control," Prentice Hall, 1991.
21. In-Gyu Park and Jin-Geol Kim, "Hybrid Position/Force Control for Dynamic Walking of Biped Walking Robot," Conf. of KSPE(in Korea), pp. 566-569, 2000.
22. In-Gyu Park and Jin-Geol Kim, "A Study on the Determination of Linear Model and Linear Control of Biped Robot," Conf. of KIEE(in Korea), pp. 765-768, 2000.