韓國精密工學會 '97年度 秋季學術大會論文集 pp.311~314

바이패드 로봇의 안정적인 거동을 위한 제어
Biped Robot Control for Stable Walking

김 경 대(한양대 대학원), 박 종 현(한양대)
Kyoung Dae Kim(Graduate School, Hanyang Univ.), Jong Hyeon Park(Hanyang Univ.)

ABSTRACT

Biped locomotion can be simply modeled as a linear inverted pendulum mode. This model considers only the CG (center of gravity) of the entire system. But in real biped robot systems, the free-leg motion dynamics is not negligible. So if its dynamics is not considered in designing the reference CG motion, it is badly influence to the ZMP(zero moment point) position of the biped robot walking in the sagittal plane. Therefore, we modeled the biped locomotion similar to the linear inverted pendulum mode but considered the predetermined free-leg dynamics. To verify that the proposed biped locomotion is more stable than the linear inverted pendulum mode, we constructed a biped robot simulator and designed a servo controller to track both the reference motion of the free leg and the reference motion of CG of the biped robot using the computed torque control law. And through simulations, we verified that the proposed walking pattern is better in stability than the one based on the linear inverted pendulum mode.

Key Words : biped locomotion(바이패드 거동), biped robot(바이패드 로봇), ZMP(제로 모멘트 포인트), linear inverted pendulum mode(선형 인버티드 펜듈럼 모드), computed torque control(컴퓨티드 토크 제어)

1. 서 론

바이패드 거동(biped locomotion)은 사람의 경우에서 알 수 있듯이 상황에 따라 매우 복잡한 양상을 보이게 되며, 역학적으로 매우 불안정하기 때문에 완전한 모델링을 하기란 매우 어렵다. 그러나, 제한적이긴 하지만 어떤 특정한 형태의 거동은 비교적 쉽게 모델링 할 수 있으며, 그 대표적인 방법이 "Linear Inverted Pendulum Mode"[1]를 이용한 방법이다. 그러나, 이러한 모델링은 바이패드 로봇(biped robot)이 지나치게 단순화되어 실제 바이패드 로봇으로 하여금 이러한 형태의 거동을 하게 할 경우 모델링에 포함되어 있지 않은 부분의 영향으로 거동의 안정성이 나빠지게 될 수 있다[2]. 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제를 개선시키고자 모델링 과정에서 지면과 접촉하고 있지 않은 다리의 역학적 영향을 고려하였으며, 개선된 안정성을 검증하기 위해 Fig.1과 같은 바이패드 로봇 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안된 바이패드 거동이 좀 더 안정함을 확인하였다. 이러한, 시뮬레이션의 결과는 4장에서, 제안된 모델링 방법은 2장, 바이패드 로봇의 서보 제어기(servo controller) 설계에 대해서는 3장에서 각각 서술하고 있다.

2. 바이패드 거동의 모델링

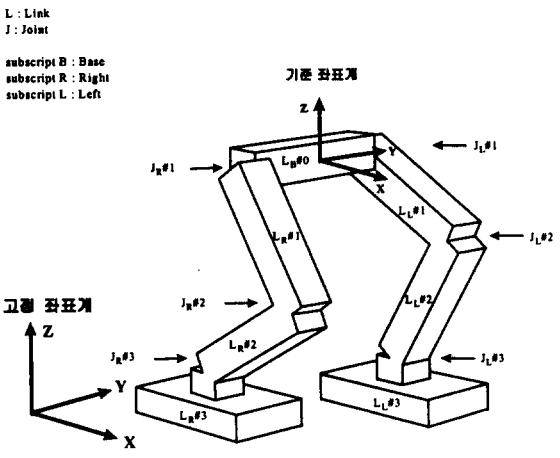

Fig.1 바이패드 로봇 모델의 구조

바이패드 로봇의 거동을 모델링함에 있어서 free leg이 작용하는 역학적인 영향까지 고려하기 위하여 Fig.2와 같은 단순화시킨 바이패드 로봇 시스템을 생각 할 수 있다. Fig.2에서 M은 Fig.1의 바이패드 로봇에서 기준 링크(링크 L_B#0)에 집중되어 있다고 근사화 시킨 바이패드 로봇 전체의 질량을 나타

내며, m 은 free leg 의 끝단에 집중되어 있다고 가정한 free leg 의 질량을 나타낸다. 이때, 질량 m 이 외력에 의해 강제적으로 어떠한 거동을 한다고 가정을 한 상태에서 ZMP 가 지지점(supporting point)에 있도록 두 질량의 모멘트 평형식을 세우면 식(1)과 같다.

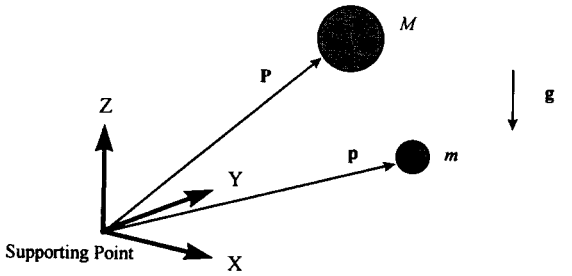

Fig.2 단순화된 바이패드 로봇 시스템

$$\mathbf{P}\times(M\ddot{\mathbf{P}})=\mathbf{p}\times(m\ddot{\mathbf{p}})+\mathbf{P}\times(M\mathbf{g})+\mathbf{p}\times(m\mathbf{g}) \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{P}^T=[X \quad Y \quad Z]$, $\mathbf{p}^T=[x \quad y \quad z]$,

$\mathbf{g}^T=[0 \quad 0 \quad -g]$

위 식에서 Y = 상수 = 0, y = 상수 = 0, Z = 상수= H_z (지면으로부터 M의 높이)라고 가정하고, 식(1)을 정리하면 식(2)와 같다.

$$\ddot{X}-\omega^2 X=\mathrm{F(t)} \quad (2)$$

여기서, $\mathrm{F(t)}=\beta(gx+z\ddot{x}-x\ddot{z})$,

$$\omega=\sqrt{\frac{g}{H_z}},\quad \beta=\frac{m}{MH_z}$$

식(2)에서 비제차 항인 F(t)는 m이 M의 거동에 미치는 영향을 나타내며, m의 거동을 식(3), 식(4)와 같이 설정하였을 경우 F(t)는 식(5)와 같다.

$$x(t)=S\sin\left\{\frac{\pi}{T}(t-\frac{T}{2})\right\} \quad (3)$$

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

여기서, S 는 보폭, h_f 는 free leg 의 끝단이 지면으로부터 최대한 들렸을 때의 높이, T는 한 스텝 동안의 시간을 나타낸다.

$$\mathrm{F(t)}=\beta S\sin\left\{\omega_f(t-\frac{T}{2})\right\}\{g+\gamma(t)\} \quad (5)$$

여기서, $\gamma(t)=\dfrac{\omega_f^2 h_f}{2}\left[3\sin\left\{2\omega_f(t-\dfrac{\omega_f T}{4})\right\}-1\right]$,

$\omega_f=\dfrac{\pi}{T}$

위 식에서 식(6)의 조건을 만족할 수 있도록 T와 h_f 를 적절히 선정해 주면 F(t)는 식(7)과 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$|g| \;>>\; |\gamma(t)| \quad (6)$$

$$\mathrm{F(t)}\approx K_F\sin\left\{\omega_f(t-\frac{T}{2})\right\}=-K_F\cos(\omega_f t) \quad (7)$$

여기서, $K_F\approx\beta Sg$

비제차 항인 F(t)가 위의 식(7)과 같을 경우 식(2)의 비제차 선형 미분방정식의 해를 구하면 아래와 같다.

$$X(t)=C_1e^{\omega t}+C_2e^{-\omega t}+\eta\cos(\omega_f t) \quad (8)$$

여기서, $C_1=\dfrac{1}{2}\left\{X(0)+\dfrac{\dot{X}(0)}{\omega}-\eta\right\}$,

$C_2=\dfrac{1}{2}\left\{X(0)-\dfrac{\dot{X}(0)}{\omega}-\eta\right\}$,

$\eta=\dfrac{K_F}{(\omega^2+\omega_f^2)}$

위 식에서 $X(0)$와 $\dot{X}(0)$는 각각 M의 초기 위치와 초기 속도이며, 식(8)은 결국 Fig.1 에서 기준 링크가 고정 좌표계내에서 추종해 나가야 하는 기준 거동 경로(reference locomotion trajectory)를 나타낸다. 여기서, 바이패드 로봇이 주어진 $X(0)$에 대해 T를 주기로 지지점을 전환하면서 지속적으로 걸어갈 수 있도록 하기 위해서는 식(9)와 같은 반복 조건을 만족하는 초기 속도를 결정해야 한다.

$$X(0)=-X(T) \text{ and } \dot{X}(0)=\dot{X}(T) \quad (9)$$

위의 반복 조건을 만족하도록 M의 초기 속도 $\dot{X}(0)$를 계산하면 식(10)과 같다.

$$\dot{X}(0)=\frac{(1+e^{\omega T})}{(1-e^{\omega T})}\omega X(0)-\frac{(1+e^{\omega T})}{(1-e^{\omega T})}\omega\eta \quad (10)$$

이상과 같이 모델링 된 바이패드 거동을 Fig.1 의 바이패드 로봇에 기준 거동(reference locomotion)으로

적용하여 보면, 식(8)과 같은 M의 거동 $X(t)$는 바이패드 로봇의 기준 링크가 추종해야 할 기준 경로이며, $X(0)$와 식(10)의 $\dot{X}(0)$는 바이패드 로봇이 T를 주기로 EOS (exchange of support)하면서 지속적으로 걸어 갈 수 있도록 하는 기준 링크의 초기 조건이다.

한편, 지금까지의 제안된 모델링 과정에서 free leg을 근사화 시킨 질량 m이 만일 영(zero)이라면 식(8)과 식(10)의 결과는 "Linear Inverted Pendulum Mode"에서와 동일하게 된다는 것은 주목할 만하다.

3. 서보 제어기 설계

바이패드 로봇이 추종해야 할 경로(trajectory)는 앞 장에서 설계된 무게중심 M(Fig.1 에서 L_B#0)의 거동 $X(t)$와 free leg의 끝단이 다음 지지점으로 이동해 나가도록 미리 설정해 준 경로 $x(t)$, $z(t)$이다. 본 논문에서는 바이패드 로봇의 추종 제어를 위해 "computed torque control"[6] 방법을 바이패드 로봇에 확장 적용하였으며, 방법은 다음과 같다.

3.1 Free Leg 거동 제어

Single support phase의 경우 바이패드 로봇의 free leg은 기준 링크(Fig.1 에서 L_B#0)에 연결된 하나의 로봇 매니퓰레이터와 같이 생각할 수 있으며, 아래와 같이 free leg의 dynamics만을 이용하여 설계된 경로 $x(t), z(t)$를 추종하도록 할 수 있다.

$$\tau_u = \mathbf{H}_u\ddot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{K}_u\mathbf{a}_0 + \mathbf{L}_u \tag{11}$$

위 식은 바이패드 로봇의 dynamics에서 free leg만의 dynamics이며, 아래 첨자 u(unconstrained)는 지면과의 접촉이 없는 상태를 의미한다. 그리고, 위 식에서 $\ddot{\mathbf{q}}_u$는 free leg 조인트의 기준 각가속도 (reference angular acceleration) 벡터, $\mathbf{a}_0$는 기준 링크의 가속도 벡터를 나타낸다.

식(11)로부터, free leg의 조인트들이 inverse kinematics[5]를 통해 얻어진 기준 경로를 따라가도록 하는 제어 입력 τ_u는 식(12)와 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_u = \mathbf{H}_u(\ddot{\mathbf{q}}_u^d - \mathbf{u}_u) + (\mathbf{K}_u\mathbf{a}_0 + \mathbf{L}_u) \tag{12}$$

여기서, $\ddot{\mathbf{q}}_u^d$는 free leg 조인트들의 기준 각가속도 벡터, $\mathbf{u}_u$는 " computed torque control" 방법에서 외곽 제어 신호(outer control signal)를 나타내며 본 논문에서는 PD 패드백 제어를 사용하였다.

3.2 기준 링크 거동 제어

바이패드 로봇의 기준 링크가 2 장에서 설계된 거동 $X(t)$를 추종하기 위해서는 지면과 접촉하면서 바이패드 로봇을 지지하고 있는 다리의 dynamics(식(14))와 지면과의 접촉으로 인한 구속조건식(식(16)), 기준 링크의 dynamics(식(15)), free leg의 dynamics(식(13))등이 모두 고려되어야 한다.[3,4]

$$\tau_u = \mathbf{H}_u\ddot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{K}_u\mathbf{a}_0 + \mathbf{L}_u \tag{13}$$

$$\tau_c = \mathbf{D}_c\mathbf{h}_c + \mathbf{H}_c\ddot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{K}_c\mathbf{a}_0 + \mathbf{L}_c \tag{14}$$

$$0 = \mathbf{P}_c\mathbf{h}_c + \mathbf{Q}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}\mathbf{a}_0 + \mathbf{S} \tag{15}$$

$$0 = \mathbf{A}_c\ddot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{B}_c\mathbf{a}_0 + \mathbf{C}_c \tag{16}$$

여기서, $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix}\mathbf{Q}_u & \mathbf{Q}_c\end{bmatrix}^T$, $\ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix}\ddot{\mathbf{q}}_u & \ddot{\mathbf{q}}_c\end{bmatrix}^T$

아래 첨자 c(constrained)는 지면과 접촉하고 있는 상태를 의미하며 u(unconstrained)는 지면과의 접촉이 없는 상태를 의미한다. 그리고, 위 식에서 $\ddot{\mathbf{q}}$는 조인트의 기준 각가속도(reference angular acceleration) 벡터, $\mathbf{a}_0$는 기준 링크의 가속도 벡터, $\mathbf{h}$는 지면과의 접촉으로 인한 접촉력 벡터를 각각 나타낸다. 위 식들로부터, 기준 링크의 추종을 위한 제어 입력 τ_c는 아래의 유도 과정을 거쳐 구할 수 있다.

우선, 식(13), 식(15), 식(16)를 이용하면 아래의 관계식을 얻을 수 있으며,

$$\tilde{\mathbf{R}}\mathbf{a}_0 + \mathbf{P}_c\mathbf{h}_c + \tilde{\mathbf{S}} = 0 \tag{17}$$

여기서, $\tilde{\mathbf{R}} = (\mathbf{R} - \mathbf{Q}_c\mathbf{A}_c^{\#}\mathbf{B}_c - \mathbf{Q}_u\mathbf{H}_u^{-1}\mathbf{K}_u)$,

$\tilde{\mathbf{S}} = (\mathbf{S} + \mathbf{Q}_u\mathbf{H}_u^{-1}\tau_u - \mathbf{Q}_c\mathbf{A}_c^{\#}\mathbf{C}_c - \mathbf{Q}_u\mathbf{H}_u^{-1}\mathbf{L}_u)$

다시, 식(14), 식(16)와 식(17)을 이용하면 아래와 같이 지면에 구속된 다리의 제어 입력 벡터와 기준 링크의 가속도 벡터 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{K}}_c\mathbf{a}_0 + \tilde{\mathbf{L}}_c = \tau_c \tag{18}$$

여기서, $\tilde{\mathbf{K}}_c = (\mathbf{K}_c - \mathbf{H}_c\mathbf{A}_c^{\#}\mathbf{B}_c - \mathbf{D}_c\mathbf{P}_c^{-1}\tilde{\mathbf{R}})$

$\tilde{\mathbf{L}}_c = (\mathbf{L}_c - \mathbf{H}_c\mathbf{A}_c^{\#}\mathbf{C}_c - \mathbf{D}_c\mathbf{P}_c^{-1}\tilde{\mathbf{S}})$

결국, 식(18)로부터 기준 링크가 설계된 기준 경로 $X(t)$를 추종하도록 하는 제어 입력 τ_c를 유도하면 식(19)와 같다.

$$\tau_c = \tilde{\mathbf{K}}_c(\mathbf{a}_0^d - \mathbf{u}_c) + \tilde{\mathbf{L}}_c \tag{19}$$

여기서, $\mathbf{a}_0^d$는 기준 경로 $X(t)$의 가속도 벡터, $\mathbf{u}_c$는 기준 링크의 위치 추종 에러와 속도 추종 에러의 피드백 제어 입력 벡터이다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션에서 사용된 바이패드 로봇 모델의 질량 및 링크 길이는 아래의 Table.1 과 같고, T는 1(초), H_z는 0.5(m), 보폭 S는 0.2(m), h_f는 0.1(m)로 설정하였으며, 제안된 바이패드 거동 모델링에서 상수 K_F의 값을 계산하기 위해 M은 10(kg), m은 2(kg)으로 설정하였다.

Table.1 바이패드 로봇 모델 파라미터

	Mass(kg)	Length(meter)
L_B#0(기준 링크)	10	0
L_R#1 / L_L#1	1	0.3
L_R#2 / L_L#2	1	0.3
L_R#3 / L_L#3	1	0.1

Fig.3 은 "Linear Inverted Pendulum Mode"와 제안된 바이패드 거동과의 기준 링크에 대한 기준 거동을 비교한 그림이다. 바이패드 거동의 안정성은 ZMP의 결과를 비교하여 판단하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안된 바이패드 거동이 좀 더 안정적임을 Fig.4와 같이 확인 할 수 있었다.

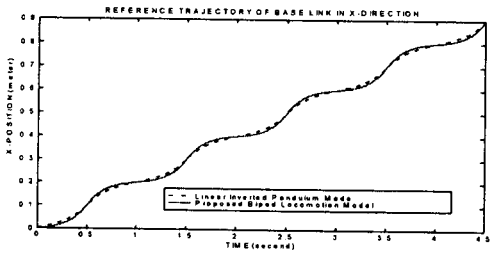

Fig.3 기준 링크의 거동

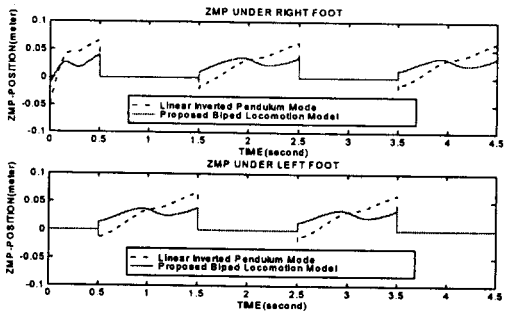

Fig.4 ZMP 의 위치

5. 결 론

바이패드 로봇이 보다 안정된 상태로 걸어 갈 수 있도록 하기 위하여 바이패드 거동의 모델링 과정에 근사적으로 free leg 의 역학적 영향을 고려하여 모델링 하였으며, "computed torque control" 제어 기법을 바이패드 로봇에 확장 적용하여 서보 제어기를 설계하였다. 그리고, 시뮬레이션을 통해 제안된 바이패드 거동이 "Linear Inverted Pendulum Mode"에서의 경우보다 ZMP 가 더 안정한 위치에 있음을 확인할 수 있었으며, 설계된 서보 제어기도 만족할 만한 추종 성능을 보이고 있음을 확인 할 수 있었다.

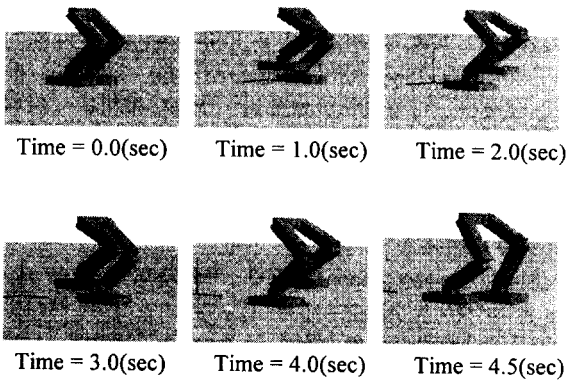

Fig.5 Graphic simulation snapshot

참고문헌

1. S. KAJITA, K. TANI, "Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain:Derivation and Application of the Linear Inverted Pendulum Mode", Proc. IEEE Int. Conf. on RA, pp. 1405-1411, 1991.
2. Y. Fujimoto, A. Kawamura, "Three Dimensional digital Simulation and Autonomous Walking Control for Eight-Axis Biped Robot", Proc. IEEE Int. Conf. on RA, pp. 2877-2884, 1995.
3. S.Y. OH, D.E. Orin, "Dynamic Computer Simulation of Multiple Closed-Chain Robotic Mechanisms", Proc. IEEE Int. Conf. on RA, pp. 15-20, 1986.
4. M.W. Walker, D.E. Orin, "Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotics Mechanism", Trans. of ASME Journal of Dyn., Sys., Meas. and Control., vol. 104, pp. 205-211, 1982.
5. L. Sciavicco, B. Siciliano, "Modeling and Control of Robot Manipulators", McGraw-Hill, 1996.
6. F.L. Lewis, C.T. Abdallah, D.M. Dawson, "Control of Robot Manipulators", Macmillan., 1993.