

이족보행로봇의 동적 보행을 위한 혼합 위치/힘 제어

박인규*(인하대 대학원 자동화공학과), 김진걸(인하대 기계·항공·자동화공학부)

Hybrid Position/Force Control for Dynamic Walking of Biped Walking Robot

In-Gyu Park(Auto. Eng. Dept., Grad. School, IHU.), Jin-Geol Kim(Mech. · Aero. · Auto. Eng. Dept., IHU.)

ABSTRACT

This hybrid position/force control for the dynamic walking of the biped robot is performed in this paper. After the biped robot was modeled with 14 degrees of freedom of the multibody dynamics, the equations of motion are constructed using velocity transformation technique. Then the inverse dynamic analysis is performed for determining the driving torques and the ground reaction forces. From this analysis, obtains the maximum ground contact force at the moment of contacting which act on the rear of the sole of swing leg and the distribution curve of the ground reaction. Because these maximum force and distribution type acts an important role to the stability of the whole dynamic walking, they are reduced and distributed smoothly by means of the trajectory of the modified ground reaction force. This new trajectory is used to the reference input for more stable dynamic walking of the whole walking region.

Key Words : Hybrid position/force control (혼합 위치/힘 제어), Dynamic walking (동적 보행), Biped walking robot (이족보행로봇), Velocity transformation method (속도변환법), Ground reaction force (지면반력)

1. 서론

보행로봇이 주어진 보행을 유지하면서 동적으로 안정된 보행을 보장하기 위한 알고리즘들이 많이 연구되었다. 특히, 동적 보행 중 발바닥이 각 보행스텝에서 지면에 접촉하는 경우, 이 접촉현상으로 보행로봇 시스템에 충격이 가해지고, 이것으로 인하여 전체적인 보행시스템을 불안정하게 하거나, 보행로봇으로의 기능을 잃어버리게 된다. 이처럼 지면과의 관계에 의하여 시스템의 안정에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이러한 지면접촉등을 지면접촉을 개선하기 위하여 지금까지 많은 연구가 이루어지고 있다.^(1,2,3)

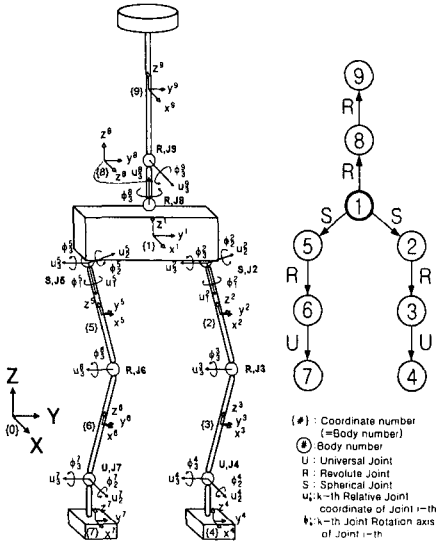
본 논문에서는 다물체 동역학 해석을 하여 아홉 개의 물체로 구성된 14 자유도의 이족보행로봇에 대하여 운동방정식을 구성한 후, 동적 보행을 수행하는 모의실험을 수행한다. 이 과정에서 지면과의 접촉순간에 발생하는 지면접촉력을 Hertz force 모델^(4,5,6)에 기초하여 얻는다. 얻어진 지면접촉력을 최소화하면서 동적보행을 수행하기 위하여 혼합 위치/힘 제

어를 수행한다.⁽⁷⁾

2. 시스템의 운동방정식과 구속조건

본 논문의 모의실험에 사용된 이족보행로봇의 전체모델을 Fig. 1에 나타내었다. 각 다리가 6자유도, 균형추가 2자유도로 구성된 아홉 개의 물체로 이루어진 14자유도의 다물체 동역학 모델로 지면과의 구속에서 자유롭기 위하여 임의의 공간상에 존재한다.⁽⁸⁾

일반적으로 이족보행로봇의 운동방정식은 개형을 이루는 분지구조(tree structure)에 대하여 운동방정식을 구성한다. 그러나 보행 중, 두 발 지지단계가 되면 지면에 착지하는 발에 구속이 가해지면서 폐형구조를 이루게 된다. 이때, 시스템의 자유도는 첨가되는 구속의 변화에 따라 바뀌게 된다. 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 한 보폭에 대하여 발이 지면과의 접촉의 형태에 따라 세 가지 모드로 구분하여 구속의 변화를 나타낸다.



(a) Coordinate system (b) Tree structure
Fig. 1 Biped system configuration

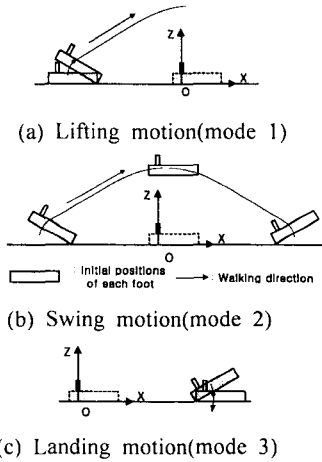


Fig. 2 Feet motion with three modes

모드 1은 보행을 시작하기 위하여 다리를 들어올리는 구간이고, 모드 2는 전진을 위한 스윙운동구간이며, 모드 3은 스윙운동을 마친 발이 지면에 착지하는 구간이다. 모드 1과 모드 3에서는 시스템의 기구학적인 형상을 표현하기 위한 구속에는 조인트구속 이외에 지면과의 관계를 나타내기 위해 지지 발 (support leg) 이외에 운동을 하고 있는 발에도 절대구속이 참가하게 된다. 그러므로 기구학적 구속은 식(1)과 식(2)처럼 세분화하여 표현할 수 있다.

$$\Phi^K(u) = 0 \quad (1)$$

$$\Phi^M(u) = 0 \quad (2)$$

여기서, 첨자 K 는 조인트구속을, M 은 모드별로 변환되는 절대구속을 각각 나타낸다. 그리고 벡터

$u = [r^T, e^T]^T$ 는 시스템의 위치를 결정하는 절대좌표벡터이다. 식(1)과 식(2)의 2차시간 변화율을 구하여 식(3)과 식(4)로 표현되는 가속도 방정식을 구성할 수 있다.

$$\Phi_u^K \ddot{u} = -(\Phi_u^K)_u \dot{u} \equiv \gamma^K \quad (3)$$

$$\Phi_u^M \ddot{u} = -(\Phi_u^M)_u \dot{u} \equiv \gamma^M \quad (4)$$

여기서, Φ_u^K 와 Φ_u^M 은 조인트구속과 절대구속의 절대좌표에 대한 편미분을 나타낸다.

조인트 좌표계로 변환하기 위하여 각 조인트의 상대각도 $\phi^i (i=1, \dots, DOF)$ 를 일반화 좌표 q^i 로 절대좌표 속도 \dot{u} 를 속도변환행렬 B 를 이용하여 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{u} = B\dot{q} \quad (5)$$

속도변환행렬 B 는 Φ_u^K 와 직교를 이루어 상대좌표로 변환하는 과정에서 절대구속의 항들만 남게 된다. 여기서, 초기에 절대좌표방식으로 구성된 운동방정식에 식(5)를 대입하여 상대좌표계로 표현된 운동방정식은 식(4)와 식(5)를 이용하여 상대좌표계로 변환된 구속을 동시에 만족하도록 하는 미분-대수방정식을 구성한다. 이 식의 표현은 식(6)과 같이 행렬의 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{M} & \Phi_q^{M^T} \\ \Phi_q^M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{g} \\ \bar{\gamma}^M \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서

$$\bar{M} = B^T M B, \quad \bar{g} = B^T (g - M \dot{B} \dot{q})$$

$$\Phi_q^M = \Phi_u^M B, \quad \bar{\gamma}^M = \gamma^M - \Phi_u^M \dot{B} \dot{q}$$

이다.

이족보행로봇의 정확한 동적 거동을 해석하기 위하여, 로봇의 정확한 동역학 모델뿐만 아니라, 로봇이 지면과의 관계를 정확히 모델링하여야 한다. 스프링-감쇠기 요소가 지면의 수직반력 F_n 을 계산하기 위하여 일반적으로 식(7)과 같이 사용한다.

$$F_n = K_f \delta + D_f \dot{\delta} \quad (7)$$

여기서 K_f 와 D_f 는 강성계수와 감쇠기 계수이다. 그리고, δ 는 접촉발바닥의 지면으로의 침투 (penetration) 깊이를 나타낸다.

이 스프링-감쇠기 요소 모델은 접촉된 발이 지면에서 이탈하기 전에 δ 가 쉽게 음의 값을 가지게 되어, 지면 수직반력의 값이 음의 값을 가지게 된다. 이것은 지면이 접촉된 발을 밀어내는 것처럼 되므로

물리적으로 정확한 표현이 아니다. 정확한 지면 수직반력을 모델링하기 위하여, 탄성계수-반발계수 (elastic modulus-restitution coefficient) 요소를 사용하여 표현 하면 식(8)와 같다.

$$F_n = 0.733E\sqrt{\frac{1}{r}\left[1 + \left\{\frac{1 - C_r^2}{1 + C_r^2}\right\}\tanh\left\{2.5\frac{V_p}{V_t}\right\}\right]}\delta^{1.5} \quad (8)$$

여기서 V_p 와 V_t 는 발바닥과 지면사이의 침투 속도와 침투하기 직전의 초기 만입속도(transition velocity)를 각각 나타내고, E 는 영 계수, C_r 은 반발 계수, r 은 접촉곡률을 각각 나타낸다. 이때의 마찰력 F_f 는 다음과 같이 나타낸다.

$$F_f = \mu_{act}F_n \quad (9)$$

여기서

$$\mu_{act} = \mu_{nom}\tanh\left(2.5\frac{V_T}{V_t}\right)$$

V_T : Tangential velocity between foot and ground

μ_{nom} : nominal friction coefficient

이 된다. 지면 수직반력 식(8)과 마찰력 식(9)는 발바닥이 지면 접촉순간의 힘들로서 운동방정식(6)에 외력으로 작용한다.

3. 혼합 위치/힘 제어

이족보행로봇의 동적 안정을 보장하는 구동력과 지면반력을 역동역학 해석을 통하여 얻었다. 이때, 모드가 바뀌는 구간에서는 지면반력의 불연속이 발생함을 알 수 있었다. 안정된 보행을 보장하기 위하여, 지면착지 순간에 발생하는 충격력을 최소화하기 위하여 다음과 같은 혼합 위치/힘 제어를 도입한다.

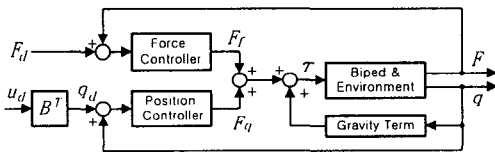


Fig. 3 Schematic block diagram of hybrid control

여기서 u_d 와 F_d 는 로봇의 동적보행을 위한 제시된 절대좌표계에서의 위치와 지면반력을 나타낸다. F_q 와 F_f 는 제어를 통하여 얻은 조인트와 지면반력의 구동력을 나타낸다. 위치와 힘 제어가 서로 독립적으로 작용함을 알 수 있다.

식(6)에서 미분방정식의 우변을 구동력 τ 과 위치와 속도에 종속되는 항 $H(q, \dot{q})$ 로 분류하여 쓰면 다

음과 같다.

$$\overline{M}\ddot{q} + \Phi_q^{MT}\lambda^M = H(q, \dot{q}) + \tau \quad (10)$$

식(10)에서 이족보행로봇을 제어하기 위하여 계산토크제어(computed torque control)법을 적용하면 구동력은 식(11)로 표현된다.

$$\tau = \overline{M}\{\ddot{q}_d + K_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q)\} + \Phi_q^{MT}\{\lambda_d^M + K_f(\lambda_d^M - \lambda^M)\} + \Phi_q^{MT}\lambda^M - H(q, \dot{q}) \quad (11)$$

여기서 K_v , K_p , K_f 는 대각행렬이며 위치, 속도, 힘에 해당하는 궤환이득행렬을 나타낸다. 첨자 i 는 지면과 접촉하는 순간을 나타내며, 실제 접촉순간의 지면접촉력 λ^{Mi} 는 식(8)에서 얻어진다.

4. 모의실험

본 논문의 모의실험은 이족보행로봇이 2sec동안 정지한 상태에서 초기위치를 결정한 후, 8sec동안 두 보폭을 보행한다. 이때, 각 보폭에서 발이 지면에 착지하는 순간인 모드 3의 점 A에서 발생하는 지면 접촉력에 대하여 힘 제어를 수행하고, 나머지 구간에서는 계산토크제어를 수행한다.

물체 1과 두 발의 절대 운동궤적을 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 이때, 물체 1의 높이는 40cm로 전 보행구간에서 동일하며, 한 보폭은 14cm/step이고 시간은 3sec/step이다.

위의 궤적들을 기준입력으로, 그리고 이들을 통하여 구한 균형추의 궤적을 기준입력궤적으로 하여 모의실험을 수행한다. 모의실험을 위한 수치적분은 4차 Runge-Kutta법을 이용하였으며, 미분대수방정식을 풀이하기 위하여 일반화좌표분할법(generalized coordinate partitioning method)을 이용하였다.

Sampling 시간은 0.001sec로 하여 8sec동안 모의 실험 한 결과의 조인트 오차를 Fig. 6에 나타내었다. 이 결과에서 킥 작용을 하는 구간에서 오차가 비교적 크게 발생한다. 그러나 다리의 경우 모두 0.1° 이하의 작은 오차를 가짐을 알 수 있다. 균형추의 운동의 경우, 조인트 8에서는 한 보폭에서 다음 보폭으로의 전환과정에서 큰 균형추의 운동으로 많은 오차를 발생함을 알 수 있다.

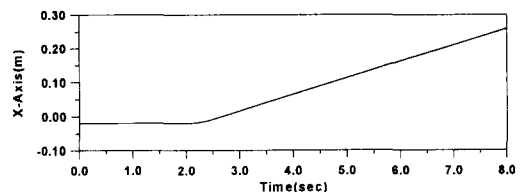


Fig. 4 Cartesian position trajectory of body

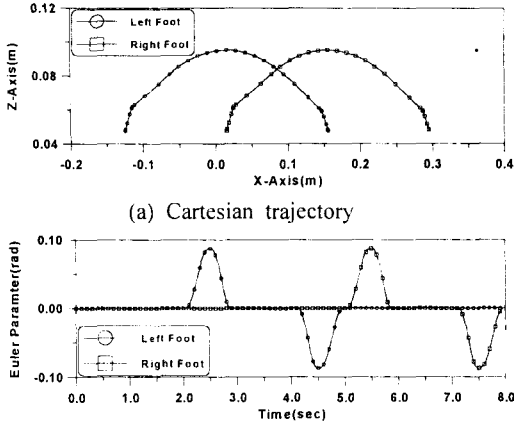


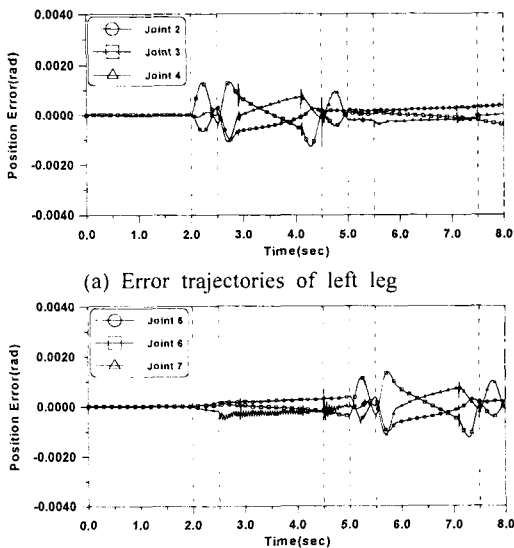
Fig. 5 Cartesian position and orientation of feet during two steps

5. 결론

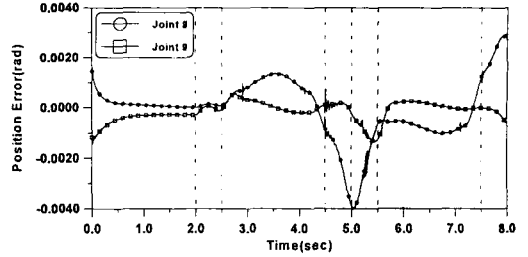
본 논문에서는 이족보행로봇이 동적 보행에서 발생하는 지면과의 접촉력에 의한 충격을 최소화하면서 안정된 보행을 수행하는 모의실험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 다음을 얻을 수 있었다.

(1) 보행 중 발생하는 모드의 변화구간에서 구속 조건 뿐만 아니라 시스템의 자유도가 바뀌게 되므로 각 모드별로 별개의 위치와 힘의 궤환이득행렬을 구하여야 한다.

(2) 두 발 지지단계에서는 각 링크와 조인트들이 태형구조를 가지므로 각 조인트의 운동이 간섭을 가지게 되어 궤환이득행렬을 구성하는데 많은 노력이 들었다.



(b) Error trajectories of right leg



(c) Error trajectories of trunk
Fig. 6 Simulation results of biped robot system during two steps

참고문헌

1. 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.
2. M. Rostami and G. Bessonnet, "Impactless sagittal gait of a biped robot during the single support phase," Proc. Robotics & Automation, pp. 1385-1391, May 1998.
3. Y. Fujimoto, S. Obata, and A. Kawamura, "Robust Biped Walking with Active Interaction Control between Foot and Ground," Proc. Robotics & Automation, pp. 2030-2035, May 1998.
4. H. M. Lankarani, and P. E. Nikravesh, "A Contact Force Model with Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems," J. of Mech. Design, Vol. 112, pp. 369-376, 1990.
5. 한형석, 박태원, "접촉을 이용한 2차원 조인트들의 모델링에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제14권, 제 2호, pp. 92-101, 1997.
6. T. Huang, S. Kajita, N. Koyachi, K. Kaneko, K. Yokoi, T. Kotoku, H. Arai, K. Komoriya, and K. Tanie, "Walking Patterns and Actuator Specifications for a Biped Robot," Proc. IEEE/RSJ, pp. 1462-1468, 1999.
7. F. L. Lewis, C. T. Abdallah, and D. M. Dawson, "Control of Robot Manipulators," Aacmillan Pub. Co. 1993.
8. 박인규, 김진걸, "이족보행로봇의 동적보행과 역동역학 해석," 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 548-555, 2000.
9. R. A. Wehage and E. J. Haug, "Generalized Coordinate Partitioning of Dimension Reduction in Analysis of Constrained Dynamic Systems," J. of Mechanical Design, Vol. 104, pp. 247-255, 1982.