

2족 보행로봇을 위한 잉여 궤적 생성

연제성[†]·박종현*

Redundancy Trajectory Generation for Biped Robot Manipulators

Je Sung Yeon and Jong Hyeon Park

Key Words: Biped Robot(이족 보행로봇), Redundancy System(여유자유도 시스템), Trajectory Generation(궤적 생성)

Abstract

Human-like biped robot is a representative multi-links manipulator and undoubted redundancy system. However many researchers separate biped robot into each limb and analyze the members individually for the convenience analysis. This approach is not desirable for natural trajectory generation and energy optimization. This paper proposes the analysis method considering both legs together and the weighted pseudoinverse optimizing energy consumption.

1. 서 론

보행로봇은 다 링크 구조의 대표적인 시스템이다. 3 차원의 공간에서 인간의 모션을 흉내 내기 위해 각 발은 보통 6개의 자유도를 갖는다. 물론 특별히 제한된 모션을 위해 자유도를 더 적게 만들기도 하고 때로는 더 많은 자유도를 통해 Singular를 극복하고 무릎을 편 보행을 실행하기도 한다. 하지만 인간의 모션은 이렇게 모든 것이 정확히 이루어진 상태에서 모션을 생성하는 것은 아니다. 만약 사람이 팔을 이용하여 물건을 잡을 때 팔만 움직이는 것이 아니라 몸 전체를 사용한다는 사실은 조금만 주의를 기울이면 알 수 있다. 걸을 때도 마찬가지이다. 인간이 다음 발을 지면에 내 던기 위해서는 몸 전체를 움직여

균형을 유지하며 던고자 하는 부분에 발을 가져간다. 이것이 바로 보행로봇의 잉여자유도(Redundancy) 해석이다. 로봇의 한 발끝으로부터 다른 한 발 끝을 다 자유도의 잉여 자유도 시스템으로 해석하는 것이 로봇의 몸 전체를 이용한 접근방식이다.

하지만 인간형 로봇을 위한 보행 궤적 생성 방식으로는 LIPM(Linear Inverted Pendulum Mode)과 GCIPM(Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode) 등처럼 로봇의 모든 관절이 하나 혹은 몇 개의 값을 갖도록 하거나, 로봇의 ZMP(Zero Moment Point)의 위치를 결정하고 그 위치로 로봇이 움직일 수 있도록 로봇의 궤적을 해석하는 방식, 그리고 로봇이 운동 규정과 안정성 등을 Cost Function으로 만들어 이를 만족하는 궤적을 찾는 GA(Genetic Algorithm) 방법 등이 있다(1,2,3,4). 하지만 LIPM과 GCIPM 방식은 기본적으로 로봇이 한 두 개의 질점으로 모델링된다는 가정을 만족시키지 못하기 때문에 로봇이 불안정하며 또한 반복적인 걸음을 위해 매번 위치 및 속도의 반복성을 만족시켜야 하기 때문에 가감속이 어렵다. 또한 FFT 방식은 ZMP 궤적을 생성할

† 한양대학교 기계공학과

E-mail : mydoban@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2297-3786 FAX : (02)2297-3786

* 한양대학교 기계공학과

근거가 뚜렷하지 않으며 또한 그 해석시간이 오래 걸린다. 또한 GA등의 방식은 off-line으로 궤적을 생성해야 한다는 점과 조건이 조금이라도 일치하지 않은 경우에는 다시 궤적을 해석하기 위해 GA알고리즘을 실시해야하기 때문에 많은 시간을 소요하게 된다.

Naoki Sonoda 등은 그의 논문에서 두발 지지상태에서의 잉여자유도를 이용한 제어에 대하여 연구를 실시하였다. 두발 지지상태에 대한 연구로 제한되었기 때문에 로봇의 안정성은 고려하지는 않았다 (5). Ryoichi Shima 등은 로봇 몸체의 일정한 속도와 로봇 허리의 일정한 높이를 유지하도록 이족 로봇의 발에 여유 자유도를 추가하고 잉여자유도를 해석하였다 (6). 보행의 안정성을 위해서는 무게중심(COM, Center Of Mass)를 이용하였기 때문에 동적인 보행에서는 이 알고리즘이 만족한다고 볼 수 없으며, 또한 추가적인 모터를 필요로 한다. 유동수 외 3명은 모바일 로봇과 같은 수평운동을 하는 물체 및 지면에 고정되어 있는 인간형 로봇을 잉여자유도 매니플레이터로 해석하였다. 로봇이 걷는 동작을 수행하지는 않지만 로봇의 안정성을 위한 ZMP를 고려하고 조작성을 최대화 하는 알고리즘을 제안하였다 (7).

본 논문에서는 인간형 로봇의 궤적을 생성하기 위해 기존의 베이스 기준 궤적 설계가 아닌 지지발 기준의 궤적 생성으로 잉여자유도를 이용하였다. 이렇게 해석하는 것이 자연스런 모션생성을 위한 기본 단계이며 이 논문에서는 이러한 모션생성 방식을 이용하여 보다 자연스러운 로봇 운동을 정의하게 된다. 그렇게 함으로써 로봇은 자신의 물리적 특성을 만족하는 개성을 지닌 걸음걸이를 갖게 되고, 또한 안정성 및 경제성을 고려하여 적합한 궤적을 생성하게 된다.

2. 로봇의 구조 및 동역학 방정식

2.1 로봇의 구조

로봇의 구조는 Fig. 1과 같이 한발이 지면에 고정되고 나머지 한발은 앞으로 나가기 위해 지면 위에서 움직이고 있다. 지면으로부터 로봇의 스윙하는 발과 로봇의 바디의 궤적을 생성하기 위한 연구를 위해 지지하는 발이 지면에 고정되었다는 가정하였고, 또한 로봇의 상체는 하나의 링크로 표현하였다.

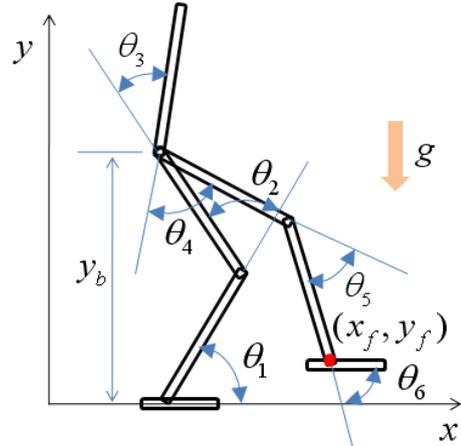


Fig. 1 2족 보행로봇의 구조

로봇의 스윙하는 발의 위치를 기구학적으로 표현하면 다음과 같이 삼각함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} x_f &= f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) \\ y_f &= g(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) \end{aligned} \quad (1)$$

잉여궤적을 생성하기위해 위에서 설명한 스윙하는 발위 위치뿐만 아니라 로봇 몸체의 각도, 스윙하는 발의 각도 및 로봇 몸체의 높이를 변수로 사용 하였다. 여기서 r 은 다음과 같이 정의된다.

$$r = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ y_b \\ \theta_b \\ \theta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) \\ g(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \\ \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

속도 관계로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{r} = J\dot{\theta} \quad (3)$$

여기서 $\dot{\theta} = (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6)^T$ 이고, $J \in R^{5 \times 6}$ 은 자코비안 매트릭스이다. 또한 로봇 각 링크의 무게중심의 위치를 x축과 y축으로 분리하여 벡터로 정의하면 다음과 같이 X_p 와 Y_p 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_p &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \\ Y_p &= [y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6]^T \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 무게중심의 가속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_p &= J_x \dot{\theta}, & \dot{Y}_p &= J_y \dot{\theta} \\ \ddot{X}_p &= \dot{J}_x \dot{\theta} + J_x \ddot{\theta}, & \ddot{Y}_p &= \dot{J}_y \dot{\theta} + J_y \ddot{\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $J_x \in R^{6 \times 6}$ 와 $J_y \in R^{6 \times 6}$ 또한 자코비안 메트릭스이다.

2.2 동역학 방정식

로봇의 동역학 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = \tau + J_F^T F \quad (6)$$

여기서 $M(\theta)$ 는 이너서, $N(\theta, \dot{\theta})$ 원심력 및 코리올리 힘, τ 는 조인트 입력 토크, F 는 지면으로부터 받은 힘 그리고 J_F 는 외력 F 가 발생하는 지점까지의 자코비안을 의미한다. 한발 지지 보행의 경우는 지면으로부터 외력 F 가 '0'이 된다.

3. 잉여 궤적 생성역기구학

만약 로봇을 나타내는 변수의 수보다 조인트의 수가 많은 경우 이 시스템은 여유자유도가 존재하는 시스템이다. 여유자유도 시스템의 경우 역기구학 결과가 무수히 많이 존재한다.

본 논문에서는 로봇이 걷기위해 주어져야 할 최소한의 조건과 안정성을 만족하도록 궤적을 생성하게 된다. 그래서 로봇이 한발을 지면에 지지하고 있다고 가정하고 다른 발이 다음 걸음을 위해 위치할 지점까지의 궤적, 그 발의 각도 그리고 몸체의 높이와 각도를 유지하면서 걸을 수 있도록 궤적을 생성하게 된다. 결과적으로 제어하고자 하는 변수가 식 (2)처럼 5개지만 로봇은 6개의 입력을 갖고 있기 때문에 2족 보행로봇은 잉여자유도 시스템이 된다. 잉여자유도 역기구학을 해석하기 위해 로봇의 안정성을 고려하여 ZMP를 만족하도록 최적화 파라미터를 잡게 구할 것이다.

3.1 한발 지지 보행에서 잉여 궤적 설계

식 (2)와 같이 벡터를 잡는 경우 벡터의 가속도 관계가 식 (7)과 같이 된다.

$$\ddot{r} = \dot{J}\dot{\theta} + J\ddot{\theta} \quad (7)$$

되먹임 형태를 갖는 구조로 설계하기 위해 에러방정식 $\ddot{e}_r + K_d \dot{e}_r + K_p e_r = 0$ 를 만족하도록 가속도 방정식을 변경하면 다음과 같다.

$$\ddot{J}\theta = \ddot{r}_d - \dot{J}\dot{\theta} + K_d \dot{e}_r + K_p e_r \approx h$$

여기서 $e_r = r_d - r$ 이며, K_p 와 K_d 는 게인 값이다. 결과적으로 각 조인트의 각가속도를 구하면 식 (8)과 같다.

$$\ddot{\theta} = J^+ h + (E_6 - J^+ J)y \quad (8)$$

여기서 E_6 는 단위행렬이며, y 는 임의의 벡터로 후에 로봇의 안정성을 위해 설계될 부분이다.

3.2 ZMP를 이용한 안정성 보장 궤적 설계

2족 보행로봇에 있어서 안정성을 증명하는 일반적인 방법은 ZMP(Zero Moment Point)를 이용하는 것이다. 모멘트의 중심이 발바닥의 안정영역에 들어오면 로봇은 넘어지지 않고 안정적인 보행을 한 것이다. 그렇기 때문에 보행로봇에서 ZMP는 매우중요하다. 따라서 잉여자유도 궤적을 생성함에 있어서도 ZMP 개념을 이용하게 된다. 로봇의 진행방향으로의 ZMP를 x_{zmp} 라 하고 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{y}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^6 m_i \ddot{x}_i y_i}{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{y}_i + g)} \quad (9)$$

여기서 x_{zmp} 는 일정한 값일 수도 있고 함수일 수도 있다. ZMP 식을 다음과 같이 변경한다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 m_i \ddot{y}_i x_i - \sum_{i=1}^6 m_i \ddot{x}_i y_i - \sum_{i=1}^6 m_i \ddot{y}_i x_{zmp} \\ = \sum_{i=1}^6 m_i g x_{zmp} - \sum_{i=1}^6 m_i g x_i \end{aligned} \quad (10)$$

식 (5)를 이용하여 벡터와 매트릭스로 ZMP 식을 변경하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_x \ddot{Y}_p - M_y \ddot{X}_p - M_z \ddot{Y}_p = C_{mg} \quad (11)$$

여기서

$$M_x = \begin{bmatrix} m_1 x_1 \\ m_2 x_2 \\ m_3 x_3 \\ m_4 x_4 \\ m_5 x_5 \\ m_6 x_6 \end{bmatrix}^T, M_y = \begin{bmatrix} m_1 y_1 \\ m_2 y_2 \\ m_3 y_3 \\ m_4 y_4 \\ m_5 y_5 \\ m_6 y_6 \end{bmatrix}^T, M_z = \begin{bmatrix} m_1 x_{zmp} \\ m_2 x_{zmp} \\ m_3 x_{zmp} \\ m_4 x_{zmp} \\ m_5 x_{zmp} \\ m_6 x_{zmp} \end{bmatrix}^T$$

그리고

$$C_{mg} = m_1 g(x_{zmp} - x_1) + m_2 g(x_{zmp} - x_2) + m_3 g(x_{zmp} - x_3) + m_4 g(x_{zmp} - x_4) + m_5 g(x_{zmp} - x_5) + m_6 g(x_{zmp} - x_6)$$

이다.

식 (5)를 식 (11)에 대입하여 조인트에 관한 식으로 변경한다.

$$M_x (\dot{J}_y \dot{\theta} + J_y \ddot{\theta}) - M_y (\dot{J}_x \dot{\theta} + J_x \ddot{\theta}) - M_z (\dot{J}_y \dot{\theta} + J_y \ddot{\theta}) = C_{mg} \quad (12)$$

이를 변경하면 다음과 같다.

$$M_J \ddot{\theta} + M_d \dot{\theta} = C_{mg} \quad (13)$$

여기서

$$M_J = M_x J_y - M_y J_x - M_z J_y$$

$$M_d J = M_x \dot{J}_y - M_y \dot{J}_x - M_z \dot{J}_y$$

이 된다.

식 (8)을 식 (13)에 대입하여 y 를 구한다.

$$y = [M_J (E_6 - J^+ J)]^+ (C_{mg} - M_d \dot{\theta} - M_J J^+ h) \quad (14)$$

식 (14)를 식 (8)에 대입함으로써 각 가속도를 구하고 이를 적분하여 각 속도 그리고 또 한 번 적분하여 각 조인트의 위치를 생성하게 된다.

3.2 두발 지지 보행에서 잉여 궤적 설계

두발 지지 보행은 말 그대로 두발을 모두 지면에 고정시키고 ZMP를 한쪽 발에서 다음발로 움직여 안정성을 유지하도록 하면서 몸체를 앞으로 이동하게 된다. 이러한 운동의 특징을 이용하여 변수를 잡으면 다음과 같다.

$$r_d = \begin{bmatrix} x_{fd} \\ y_{fd} \\ y_{bd} \\ \theta_{bd} \\ \theta_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} const. \\ const. \\ f_{y_b}(\theta_1, \theta_2) \\ f_{\theta_b}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \\ const. \end{bmatrix} \quad (15)$$

x_{fd} , y_{fd} , θ_{fd} 는 발이 지면에 고정되기 때문에 일정한 값을 갖는다. 두발 지지 보행에서의 잉여 궤적 설계를 위해서 변경되는 것은 위에서 말한 세 개의 변수가 일정한 값이 될 뿐 다른 식은 그대로 이용할 수 있다. 물론 x_{zmp} 가 한쪽 발에서 다른 쪽 발로 이동하기 때문에 함수로 구하게 된다. 물론 이 함수가 상체의 모션을 결정짓게 되므로 가속도를 고려하여 부드럽게 설계해야 한다.

4. 시뮬레이션

논문에서 제한한 방법을 통해 얻어진 보행로봇의 궤적을 시뮬레이션 하기 위해 MATLAB의 Simulink를 이용하였다. Fig. 2는 Simulink의 SimMechanics 툴박스에 의해 모델링된 로봇을 보여주고 있다.

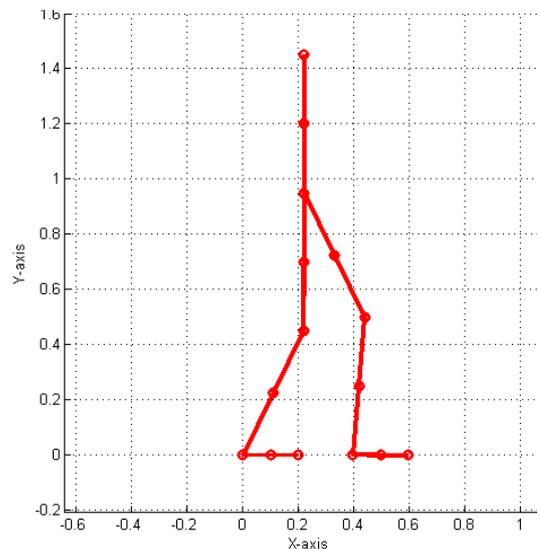


Fig. 2 SimMechanics 모델

각 다리 링크는 0.5 m의 길이를 갖고 발 링크의 길이는 0.2 m, 그리고 상체 링크 또한 0.5 m의 길이를 갖는다. 로봇의 무게는 다리 링크가 각각 5 kg이며 발 링크는 2 kg, 그리고 몸체는 20 kg으로 총 42 kg의 무게를 갖는다. 그리고 각 관절의 무게중심은 링크의 중심에 존재한다. 잉여 궤적 설계를 위해 변수 r 의 레퍼런스로 보폭은 40 cm, 스윙하는 발의 높이는 6 cm, 그리고 로봇의 허리높이는 0.95 m를 유지하도록 하였다. 그리고 몸체는 지면과 수직하도록, 스윙하는 발의 각도는 지면과 평행하도록 하였다. x_{zmp} 는 지지하는 발의 뒤에서 앞으로 움직일 수 있도록 사인함수로 주었다. 물론 한 점에 고정시킬 수도 있다.

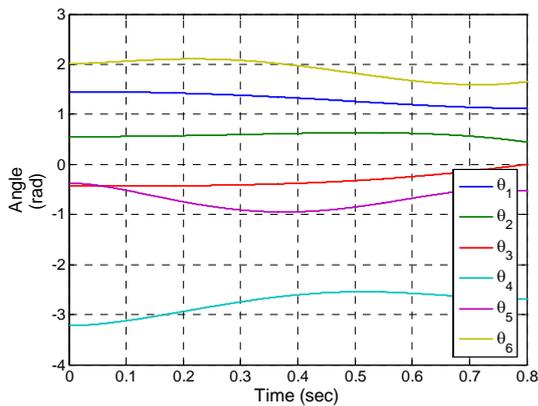


Fig. 3 로봇의 관절각도 궤적

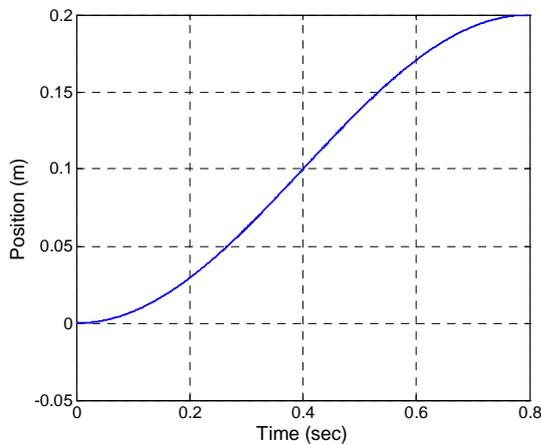


Fig. 4 로봇의 진행방향(X축)으로의 ZMP

Fig. 3은 생성된 궤적을 보여주고 있고, Fig. 4는 로봇의 안정성을 위해 추가한 ZMP의 궤적을

보여주고 있다. LIPM이나 GCIPM의 경우는 ZMP의 위치가 발의 중심에 위치하도록 하고 궤적을 생성한다. 하지만 이렇게 생성된 궤적은 로봇 몸체의 모션에 속도 변화가 큰 부자연스러운 궤적을 생성하게 된다. 본 실험에서는 자연스럽게 걷는 모션을 대상으로 하였기 때문에 ZMP가 발바닥 중심을 기준으로 앞으로 20 cm 움직이게 된다.

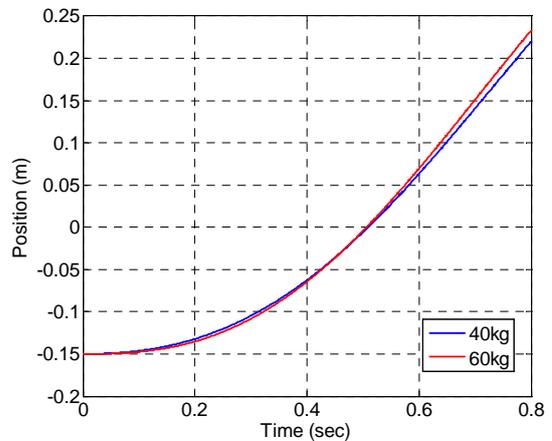


Fig. 5 질량 변화에 따른 로봇 중심의 궤적

Fig. 5은 로봇 파라미터 중 질량이 변할 때의 로봇의 궤적을 보여주고 있다. 42 kg일 때와 다리 링크에 5 kg을 더한 62 kg일 때의 로봇의 허리부분의 진행방향으로 위치변화를 보여주고 있다. 물론 관성모멘트, 질량 중심, 그리고 링크의 길이 등 로봇의 물리적 성질에 의해 궤적이 결정된다. 이점이 바로 로봇의 물리적인 특성에 따라 개성적인 궤적을 생성할 수 있다는 것을 보여주는 것이다. 시작조건이 갖기 때문에 시작점은 같지만 끝점을 다르다. 그 이유는 진행 방향으로의 위치는 잉여자유도로 주어 ZMP를 만족시키도록 자유롭게 움직이도록 하였기 때문이다. 그렇기 때문에 LIPM이나 GCIPM처럼 보행주기 양단에 위치 및 속도의 연속조건을 만족시킬 필요가 없다.

5. 결론

인간형 2족 보행로봇의 보행 궤적을 설계하는데 있어 기존의 방식은 모든 로봇이 같은 보행을 해야 했다. 하지만 잉여 자유도 시스템으로 설계

하는 본 연구에 의해 궤적을 생성 하면 로봇 관절의 질량 및 무게중심 등 물리적인 특성에 따라 로봇에 적합한 안정적인 보행이 로봇마다 다르게 생성된다. 즉 개성적인 보행이 가능하다. 이러한 알고리즘을 개발하기 위해 본 논문에서는 궤적을 위해 반드시 필요한 변수를 결정하고 안정성을 보장할 수 있도록 ZMP 개념을 이용하여 잉여 궤적을 생성하였다. 앞으로는 3자유도로 이론을 확장하여 인간형 로봇이 보다 자유롭고 개성적인 보행을 할 수 있도록 연구가 진행될 것이다.

참고문헌

- (1) Shuuji K. and Kazuo T., 1991 "Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain : Derivation and Application of the Linear Inverted Pendulum Mode", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1405-1411.
- (2) Park, J. H. and Kim, K. D., 1998, "Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control," *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 3528~3533.
- (3) Shuuji K., Fumio K., Kenji K., Kiyoshi F., Kensuke H., Kazuhito Y. and Hirohisa H., 2003, "Biped Walking Pattern Generation by using Preview control of Zero-Moment Point," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1620-1626.
- (4) Lim, I., Yeon, J. S., Kwon, O. and Park, J. H., 2005, "Stable Trajectory Generation of Biped Robots with Multiple Mass Model for Impact Force Minimization," *Proceedings of International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*.
- (5) Naoki S., Toshiyuki M. and Kouhei O., 1997, "An Approach to Biped Robot Control Utilized Redundancy in Double Support Phase," *Proceedings in Industrial Electronics Conference*, Vol. 3, pp. 1332~1336.
- (6) Ryoichi S., Masahiko H. and Masaaki S., 2006, "Gait Control for Redundant Legged Biped Robot at Constant Velocity and Constant Height of the Waist," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 156, No. 4, pp. 51~59.
- (7) Yoo, D., So, B. R., Yi, B. J. and Kim, W., 2004, "Motion Planning Algorithms for kinematically Redundant Manipulator Not Fixed to the Ground," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 10, No. 10, pp. 869~877.
- (2) Park, J. H. and Cho, H. C., 2000, "An On-Line Trajectory Modifier for the Base Link of Biped Robots to Enhance Locomotion Stability," *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 3353~3358.
- (3) Park, J. H. and Chung, H., 1999, "Hybrid Control for Biped Robots Using Impedance Control and Computed-Torque Control," *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1365~1370.
- (4) Park, J. H. and Kwon, O., 2001, "Reflex Control of Biped Robot Locomotion on a Slippery Surface," *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 4134~4139.
- (5) Yeon, J. S., Kwon, O. and Park, J. H., 2006, "Trajectory Generation and Dynamic Control of Planar Biped Robots with Curved Soles," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, No. 5, pp. 602-611.