〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.10.1014

2족 보행로봇을 위한 여유자유도 궤적 생성

연 제 성* · 박 종 현†

(2009년 1월 8일 접수, 2009년 8월 13일 수정, 2009년 8월 17일 심사완료)

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

A biped robot in locomotion can be regarded to be kinetically redundant in that the link-chain from its foot on the ground to its swing foot has more degrees of freedom that needed to realize stable bipedal locomotion. This paper proposes a new method to generate a trajectory for bipedal locomotion based on this redundancy, which directly generates a locomotion trajectory at the joint level unlike some other methods such as LIPM (linear inverted-pendulum mode) and GCIPM (gravity-compensated inverted-pendulum mode), each of which generates a trajectory of the center of gravity or the hip link under the assumption of the dominance of the hip-link inertia before generating the trajectory of the whole links at the joint level. For the stability of the trajectory generated in the proposed method, a stability condition based on the ZMP (zero-moment point) is used as a constraint as well as other kinetic constraints for bipedal motions. A 6-DOF biped robot is used to show how a stable locomotion trajectory can be generated in the sagittal plane by the proposed method and to demonstrate the feasibility of the proposed method.

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 같은 원리를 갖는다. 인간이 발을 지면에 내 딛기 위해서는 몸 전체를 움직여 균형을 유지하며 딛고자 하는 부분에 발을 가져간다. 즉 추종 하고자하는 요소의 개수보다 로봇의 자유도가 더 크다. 이것이 바로 여유자유도(Redundancy) 해석이다. 로봇의 한 발 끝으로부터 다른 한 발 끝을 다 자유도의 여유자유도 시스템으로 해석하는 것이 로봇의 몸 전체를 이용한 접근방식이다. 하지만 보행 로봇의 궤적을 생성하기 위한 기존의 연구는 역기구학을 쉽게 풀기위해 로봇 몸체를 기준으로 양 다리를 분리하여 해석하는 경우가 대부분이다.

인간형 로봇을 위한 보행 궤적 생성 방식으로는 LIPM(Linear Inverted Pendulum Mode)과 GCIPM(Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode)처럼 여러 개의 로봇 관절을 하나 혹은 두 개의 질점으로 가정하고 궤적을 생성하는 방식과

[이 논문은 대한기계학회 2008년도 추계학술대회 (2008. 11. 5.-7., 용평리조트) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : jongpark@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0435 FAX : (02)2298-4634
* 한양대학교 기계공학과

로봇의 ZMP의 위치를 결정하고 그 위치로 로봇의 ZMP가 올 수 있도록 로봇의 각 조인트 궤적을 해석하는 FFT(Fast Fourier Transformation) 방식, 그리고 로봇의 운동 규정과 안정성 등을 Cost Function으로 만들어 이를 만족하는 궤적을 찾는 GA(Genetic Algorithm) 방법 등이 있다.[1~4] 하지만 LIPM과 GCIPM 방식은 실제 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 근거가 뚜렷하지 않으며 또한 그 해석시간이 오래 걸린다. 또한 GA등의 방식은 off-line으로 궤적을 생성해야 한다는 점과 조건이 조금이라도 일치하지 않은 경우에는 다시 궤적을 해석하기위해 GA알고리즘을 실시해야하기 때문에 많은 시간을 소요하게 된다.

Naoki Sonoda 등은 그의 논문에서 두발 지지상태에서의 여유자유도를 이용한 제어를 제안하였다.[5] 두발 지지상태에 대한 연구로 로봇의 안정성은 고려하지는 않았다. Ryoichi Shima 등은 로봇 몸체의 일정한 속도와 로봇 허리의 일정한 높이를 유지하도록 이족 로봇의 발에 여유 자유도를 추가하였다.[6] 하지만 보행의 안정성을 위해서는 무게중심(COM, Center Of Mass)을 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 여유자유도 매니퓰레이터로 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 로봇 몸체 기준 양다리 개별적 궤적 설계가 아닌 지지발 기준의 궤적 생성 방법으로 여유자유도를 이용하였다. 제안한 여유자유도 궤적생성 방식을 이용하면 로봇의 동역학 방정식과 ZMP 방정식을 이용하기 때문에 로봇의 질량을 하나 혹은 둘로 가정할 필요도 없고 반복조건 또한 필요하지 않기 때문에 가감속이 자유롭다. 그리고 잉여자유도 궤적 생성 방식은 로봇의 물리적 특성에 따라서 조건에 맞는 궤적이 생성되므로 개성적인 궤적을 얻게 된다.

본 논문은 다음과 같은 구조를 갖는다. 2장에서는 로봇의 구조 및 동역학 방정식에 대하여 설명하고 궤적을 설계하기 위한 초소한의 변수를 잡는다. 3장에서는 한발지지구간과 두발지지구간에서의 여유자유도 궤적 생성 법에 대하여 설명하고, 4장에서는 연속성을 보장하기 변수를 추가하여 여유자유도 궤적을 생성한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문에 대한 결론을 서술한다.

2. 로봇의 구조 및 동역학 방정식

2.1 로봇의 구조

여유자유도 궤적 생성을 위한 로봇의 구조는 Fig. 1과 같이 6 DOF의 평면형 보행로봇이다. 로봇의 한발은 지면에 고정되고 나머지 한발은 앞으로 나가기 위해 지면 위에서 움직이고 있다. 지면으로부터 로봇의 스윙하는 발과 로봇의 몸체의 궤적을 생성하기 위해 지지하는 발이 지면에 고정되었다고 가정하였고, 또한 로봇의 상체는 하나의 링크로 표현 하였다. Fig. 1에서 θ_1, θ_2, θ_3, θ_4, θ_5, 그리고 θ_6는 보행로봇 각 링크의 상대좌표에서의 각도를 의미한다.

로봇의 스윙하는 발의 위치를 기구학적으로 표현하면 다음과 같이 표현된다.

$$x_f = f(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5) \qquad (1)$$
$$y_f = g(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5)$$

로봇의 보행을 위해서는 앞에서 설명한 스윙하는 발의 위치 (x_f, y_f), 로봇 몸체의 각도 θ_b, 스윙하는 발의 각도 θ_f 및 로봇 몸체의 높이 y_b가 중

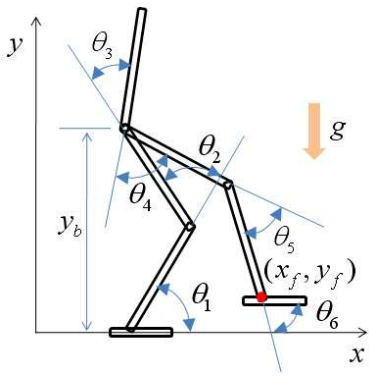


Fig. 1 Structure of biped robot

요하다. 따라서 여유자유도 궤적 생성을 위해 최소한의 변수 r_1을 다음과 같이 정의한다.

$$r_1 = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ y_b \\ \theta_b \\ \theta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5) \\ g(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5) \\ l_1\sin(\theta_1)+l_2\sin(\theta_1+\theta_2) \\ \theta_1+\theta_2+\theta_3 \\ \theta_1+\theta_2+\theta_3+\theta_4+\theta_5+\theta_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 l_1과 l_2는 각각 로봇의 정강이와 허벅지 링크의 길이이다. 최소한의 변수를 속도 관계로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{r_1} = J_1\dot{\theta} \quad (3)$$

여기서 $\dot{\theta} = (\dot{\theta_1},\dot{\theta_2},\dot{\theta_3},\dot{\theta_4},\dot{\theta_5},\dot{\theta_6})^T$이고, $J_1 \in R^{5\times 6}$은 자코비안 행렬로 비정방이다.

또한 로봇 각 링크의 무게중심의 위치를 x축과 y축으로 분리하여 벡터로 정의하면 다음과 같이 X_p와 Y_p 벡터로 나타낼 수 있다.

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

따라서 무게중심의 가속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{X_p} = J_x\dot{\theta}, \qquad \dot{Y_p} = J_y\dot{\theta} \quad (5)$$
$$\ddot{X_p} = \dot{J_x}\dot{\theta} + J_x\ddot{\theta}, \quad \ddot{Y_p} = \dot{J_y}\dot{\theta} + J_y\ddot{\theta}$$

여기서 $J_x \in R^{6\times 6}$와 $J_y \in R^{6\times 6}$는 자코비안 매트릭스이다.

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 질량 행렬, $N(\theta,\dot{\theta})$는 원심력 및 코리올리 힘, τ는 조인트 입력 토크, F는 지면으로부터 받은 힘, 그리고 J_F는 외력 F가 발생하는 지점까지의 자코비안을 의미한다. 한발 지지 보행의 경우 지면으로부터 외력 F는 '0'이 된다. 즉 지지하고 있는 발의 외력은 고려하지 않는다.

3. 여유자유도 궤적 생성 역기구학 - I

본 논문에서는 로봇이 걷기위해 주어져야 할 최소한의 조건과 안정성을 만족하도록 여유자유도 개념을 이용하여 궤적을 생성하게 된다. 로봇의 보행을 위해서 제어해야하는 변수는 식 (2)처럼 5개지만 로봇은 6개의 입력을 갖고 있기 때문에 2족 보행로봇은 여유자유도 시스템이 된다. 여유자유도 시스템을 해석하기 위해 최소한의 변수 r_1뿐만 아니라 ZMP까지 고려하여 로봇의 안정적인 보행궤적을 생성할 것이다.

3.1 한발지지 보행에서 여유자유도 궤적 설계

식 (2)를 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\ddot{r_1} = \dot{J_1}\dot{\theta} + J_1\ddot{\theta} \quad (7)$$

되먹임 형태를 갖는 구조로 설계하기 위해 에러방정식을 다음과 같이 정의한다.

$$\ddot{\tilde{r_1}} + K_{d1}\dot{\tilde{r_1}} + K_{p1}\tilde{r_1} = 0 \quad (8)$$

여기서, $\tilde{r_1} = r_{1d} - r_1$이고, r_{1d}는 여유자유도 궤적 생성을 위해 잡은 벡터 r_1이 추종해야 할 궤적이며, K_{p1}와 K_{d1}는 게인 값이다.

가속도 방정식을 변경하면 다음과 같다.

$$J_1\ddot{\theta} = \ddot{r}_{1d} - \dot{J_1}\dot{\theta} + K_{d1}\dot{\tilde{r}}_1 + K_{p1}\tilde{r_1} \simeq h_1 \quad (9)$$

결과적으로 각 조인트의 각가속도를 구하면 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = J_1^+ h_1 + (E_6 - J_1^+ J_1)y \quad (10)$$

여기서 J_1^+은 비대칭 행렬 J_1의 의사역행렬(pseudo inverse matrix)를 의미하고, E_6은 단위행렬이며, $y \in R^6$는 임의의 벡터로 3.2장에서 로봇의 안정성을 만족하도록 설계될 것이다.

3.2 ZMP를 이용한 안정성 보장 궤적 설계

2족 보행로봇에 있어서 안정성을 증명하는 일

반적인 방법은 ZMP(Zero Moment Point)를 이용하는 것이다. 즉, 지지하고 있는 다리의 발에 지면으로부터 작용하는 힘의 모멘트 중심이 발바닥의 안정영역에 들어오면 로봇은 넘어지지 않고 안정적인 보행을 한 것으로 본다. 여유자유도 궤적을 생성함에 있어서도 로봇의 안정성을 확보하기 위해 ZMP 개념을 이용하였다. 여유자유도 궤적 생성에서 이용한 ZMP는 지면으로부터 작용하는 힘으로부터 얻은 ZMP가 아니고 로봇의 모션에 의해 얻어진 값이다.

로봇 진행방향의 ZMP 좌표를 x_{zmp}라 하면, 이는 다음과 같이 구할 수 있다.[12]

$$x_{zmp}=\frac{\sum_{i=1}^{6}m_i(\ddot{y}_i+g)x_i-\sum_{i=1}^{6}m_i\ddot{x}_iy_i}{\sum_{i=1}^{6}m_i(\ddot{y}_i+g)} \tag{11}$$

여기서 m_i는 링크 i의 질량을 의미하며, x_{zmp}는 일반적으로 시간에 대한 함수로 정해진다. 결과적으로 ZMP 식을 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{6}m_i\ddot{y}_ix_i-\sum_{i=1}^{6}m_i\ddot{x}_iy_i-\sum_{i=1}^{6}m_i\ddot{y}_ix_{zmp}\\ =\sum_{i=1}^{6}m_igx_{zmp}-\sum_{i=1}^{6}m_igx_i\end{aligned} \tag{12}$$

벡터와 매트릭스로 ZMP 식을 변경하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_x\ddot{Y}_p-M_y\ddot{X}_p-M_z\ddot{Y}_p=C_{mg} \tag{13}$$

여기서

$$M_x=\begin{bmatrix}m_1x_1\\m_2x_2\\m_3x_3\\m_4x_4\\m_5x_5\\m_6x_6\end{bmatrix}^T,M_y=\begin{bmatrix}m_1y_1\\m_2y_2\\m_3y_3\\m_4y_4\\m_5y_5\\m_6y_6\end{bmatrix}^T,M_z=\begin{bmatrix}m_1x_{zmp}\\m_2x_{zmp}\\m_3x_{zmp}\\m_4x_{zmp}\\m_5x_{zmp}\\m_6x_{zmp}\end{bmatrix}^T$$

그리고

$$\begin{aligned}C_{mg}=&m_1g(x_{zmp}-x_1)+m_2g(x_{zmp}-x_2)\\&+m_3g(x_{zmp}-x_3)+m_4g(x_{zmp}-x_4)\\&+m_5g(x_{zmp}-x_5)+m_6g(x_{zmp}-x_6)\end{aligned}$$

이다.

로봇 각 링크의 무게중심 변화를 각 조인트 변화로 나타낸 식 (5)를 ZMP 관계식 (13)에 대입하면 조인트에 관한 식으로 변경할 수 있다.

$$\begin{aligned}M_x(\dot{J}_y\dot{\theta}+J_y\ddot{\theta})-M_y(\dot{J}_x\dot{\theta}+J_x\ddot{\theta})\\-M_z(\dot{J}_y\dot{\theta}+J_y\ddot{\theta})=C_{mg}\end{aligned} \tag{14}$$

이를 변경하면 다음과 같다.

$$M_J\ddot{\theta}+M_{dJ}\dot{\theta}=C_{mg} \tag{15}$$

여기서

$$\begin{aligned}M_J&=M_xJ_y-M_yJ_x-M_zJ_y\\M_{dJ}&=M_x\dot{J}_y-M_y\dot{J}_x-M_z\dot{J}_y\end{aligned}$$

이 된다.

조인트의 각 가속도인 식 (10)을 ZMP 관계식 (15)에 대입하여 각가속도를 제거하면 y를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y=[M_J(E_6-J_1^+J_1)]^+\left(C_{mg}-M_{dJ}\dot{\theta}-M_JJ_1^+h_1\right) \tag{16}$$

구해진 y를 식 (10)에 대입함으로써 ZMP를 고려한 각 조인트의 각가속도 정보를 구하게 된다.

3.3 두발지지 보행에서 여유자유도 궤적 설계

두발지지 보행은 말 그대로 두발을 모두 지면에 고정시키고 ZMP를 한쪽 발에서 다음발로 움직여 안정성을 유지하도록 하면서 몸체를 앞으로 이동하는 행동이다. 그렇기 때문에 두발지지 보행을 위한 최소한의 변수 r_1은 한발지지 보행과 같은 변수를 갖는다. 단지 추종해야할 궤적의 함수가 변하는 것이다. 두발지지 보행의 운동특징을 추종궤적으로 표현하면 다음과 같다.

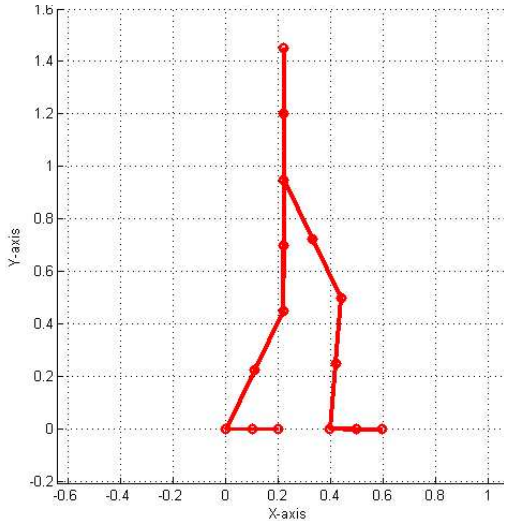


Fig. 2 SimMechanics model

$$r_{1d} = \begin{bmatrix} x_{fd} \\ y_{fd} \\ y_{bd} \\ \theta_{bd} \\ \theta_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} const. \\ const. \\ f_{y_b}(\theta_1, \theta_2) \\ f_{\theta_b}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \\ const. \end{bmatrix} \tag{17}$$

두발지지 보행의 경우 여유자유도 궤적 설계를 위해서 x_{fd}, y_{fd}, θ_{fd}는 발이 지면에 고정되기 때문에 지면의 높이와 지면의 형상에 일치하도록 일정한 값을 갖는다.

로봇의 안정적인 보행을 위한 ZMP 고려 시에는 x_{zmp}가 한쪽 발에서 다른 쪽 발로 두발지지 구간 동안 빠르게 이동해야 하기 때문에 적합한 함수형태로 주어지게 된다. 물론 이 함수가 상체의 모션을 결정짓게 되므로 가속도를 고려하여 부드럽게 설계해야한다.

3.4 시뮬레이션

본 논문에서 제한한 방법을 통해 얻어진 보행로봇의 궤적을 시뮬레이션 하기위해 MATLAB의 Simulink를 이용하였다. Fig. 2는 Simulink의 SimMechanics 툴박스에 의해 모델링된 보행로봇을 보여주고 있다.

Table 1은 로봇의 물리적 파라미터를 보여주고 있다. 로봇의 정강이와 허벅지 링크의 길이는 0.5 m이고 발 링크의 길이는 0.2 m, 그리고 상체 링크 또한 0.5 m의 길이를 갖는다. 로봇의 무게는 3가지 경우에 대하여 정리되어 있다. 첫 번째 경우에 대하여 설명하면 다리 링크가 각각 5 kg이며 발 링크는 2 kg, 그리고 몸체는 20 kg으로 총 44 kg의 무게를 갖는다. 두 번째 경우는 64 kg 그리고 세 번째 경우에는 32 kg 이다. 각 링크의 무게중심은 링크의 중심에 존재한다.

Table 1 Robot parameters

	Length	Mass		
		Case I	Case II	Case III
Trunk	0.5 m	20 kg	20 kg	20 kg
Thigh(l_2)	0.5 m	5 kg	10 kg	2 kg
Shank(l_1)	0.5 m	5 kg	10 kg	2 kg
Foot	0.2 m	2 kg	2 kg	2 kg

Table 2 Walking pattern parameters

Step-time(T)	1 sec (single:0.8sec, double:0.2sec)
Step-size	0.3 m
Maximum foot height	0.03 m
Robot base height	0.9 m
Body angle	$\pi/2$ rad
Swing foot angle	0 rad
X-zmp	$0.1 - 0.1\cos(\omega t), \omega = \frac{\pi}{T}$

여유자유도 궤적 설계를 위한 보행 패턴 파라미터는 Table 2와 같다. 이 내용은 로봇의 추종변수 r_{d1}으로 이용된다. 로봇의 보폭은 0.3 m, 스윙하는 발의 높이는 0.03 m, 그리고 로봇의 허리높이는 0.9 m를 유지하도록 하였다. 그리고 몸체는 지면과 수직하도록, 스윙하는 발의 각도는 지면과 평행하도록 하였다. x_{zmp}는 지지하는 발의 뒤에서 앞으로 자연스럽게 움직일 수 있도록 사인함수로 주었다.

본 논문에서 제안한 보행로봇을 위한 여유자유도 궤적 생성 법의 가·감속에 대한 성능을 확인하기 위하여 로봇의 궤적은 정지 상태에서 출발하고, 운동 상태에서 다시 정지하는 총 5스텝의 궤적으로 선택하였다.

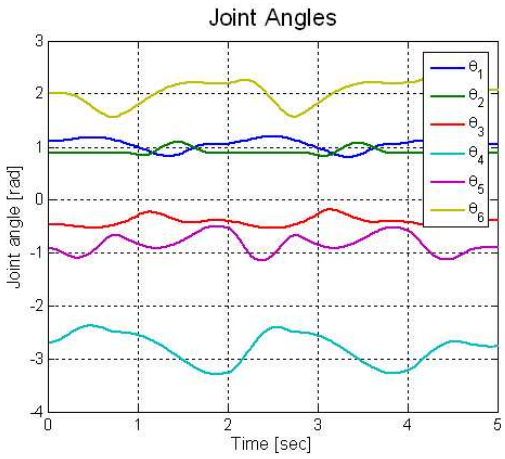
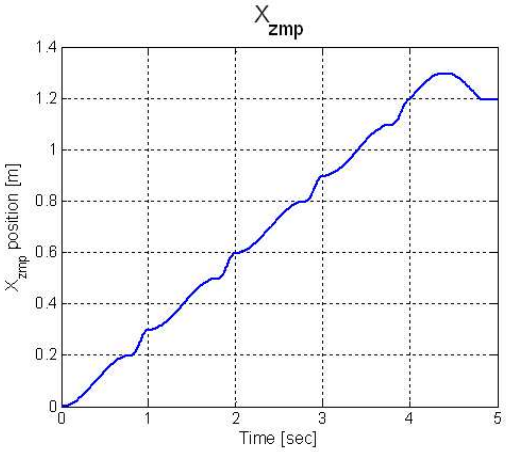
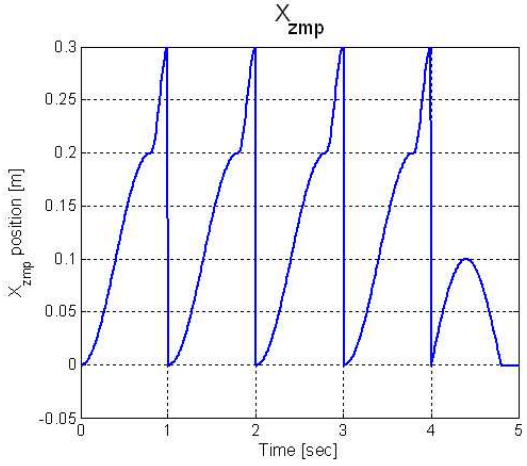


Fig. 3 Joint trajectories



(a) X-ZMP on the global axes



(b) X-ZMP on each supporting leg

Fig. 4 X-ZMP in moving direction

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

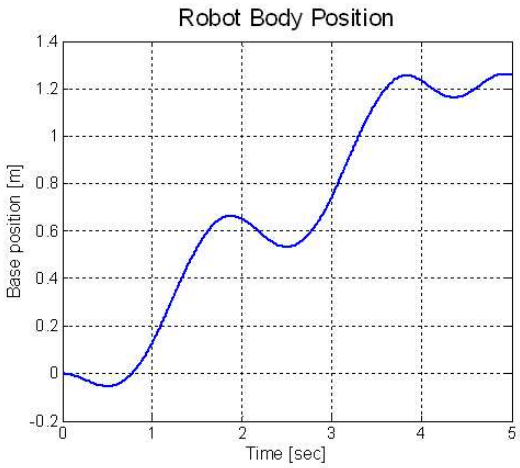


Fig. 5 Robot body position

보여주고 있다. LIPM이나 GCIPM의 경우는 ZMP의 위치가 발의 중심에 위치하도록 하고 궤적을 생성하지만 이렇게 생성된 궤적은 로봇 몸체의 모션에 속도 변화가 큰 부자연스러운 궤적을 생성하게 된다. 본 논문에서는 자연스러운 모션을 얻기 위해 ZMP가 발바닥 중심을 기준으로 발 뒤에서 앞쪽으로 자연스럽게 0.2 m 움직이게 된다. Fig. 4의 (a)는 로봇의 진행 방향에 대한 생성된 ZMP 궤적을 보여주고 있다. 한발지지상태에서도 자연스럽게 ZMP가 움직이는 것을 확인할 수 있다. 또한 지지하는 발에 대한 ZMP의 변화를 알아보기 위해 매 걸음 시 로봇 발의 뒷면을 기준으로 한 ZMP의 변화를 Fig. 4의 (b)에서 보여주고 있다. 결과에서 보여주듯이 제시한 방법에 의한 여유자유도를 이용한 보행로봇의 궤적 생성법은 ZMP에 대한 feedback 정보를 반영하여 궤적을 생성하기 때문에 지면이 기울어진 경우에도 안정적인 보행을 위한 궤적을 생성할 수 있다.

하지만 여유자유도 궤적생성 방식은 매 스텝에서 궤적을 생성하기 때문에 로봇 몸체의 위치, 속도 등, 초기 조건에 따라서 매번 적합한 궤적을 생성하게 된다. 그렇기 때문에 Fig. 5와 같이 로봇 몸체가 앞뒤로 움직이는 것을 확인 할 수 있다. 물론 얻어진 궤적이 원하는 ZMP를 만족시키며 안정적인 보행 또한 가능하지만 로봇의 몸체가 앞뒤로 움직이는 현상이 발생하여 자연스럽지 못하며 또한 스윙하는 발이 원하는 궤적을 추종하는데 있어 인간의 무릎과 다른 방향으로 무릎이 꺾이는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 여유자유도 해석 시 연

속적인 보행임을 조건에 추가해야만 한다. 다음 장에서는 이것에 대하여 설명할 것이다.

4. 여유자유도 궤적 생성 역기구학 - II

4.1 한발지지 보행에서 여유자유도 궤적 설계

로봇이 연속적으로 걷고 있다는 것을 여유자유도 궤적 생성 역기구학을 풀기위한 변수로 잡지 않으면 Fig. 5와 같이 로봇 몸체가 앞뒤로 움직이는 현상이 발생할 수 있다. 또한 로봇 몸체의 움직임이 많아져서 스윙하는 발의 궤적 추종을 만족시키지 못하는 결과를 얻을 수 있다. 따라서 로봇의 반복적인 보행을 위한 벡터 r_2를 추가적으로 다음과 같이 정의하였다.

$$r_2 = \dot{x}_b = J_2\dot{\theta} \tag{18}$$

여기서 $\dot{x}_b$는 로봇 몸체의 속도를 나타내고, J_2는 비정방 자코비안 메트릭스를 의미한다. 속도 조건을 벡터로 선택함으로써 로봇이 연속적으로 진행하고 있다는 것을 포함 시킬 수 있다.

벡터의 가속도 관계는 다음과 같다.

$$\ddot{r}_2 = \dot{J}_2\dot{\theta} + J_2\ddot{\theta} \tag{19}$$

되먹임 형태를 갖는 구조로 설계하기 위해 에러방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{r}}_2 + K_{p2}\tilde{r}_2 = 0 \tag{20}$$

여기서 r_{2d}는 r_2의 추종 값이며, $\tilde{r}_2 = r_{2d} - r_2$이고, K_{p2}는 게인 값이다.

식 (10)을 벡터 r_2의 가속도 관계식인 식 (19)에 대입하여 첫 번째 벡터 r_1을 위한 값 y를 찾으면 다음과 같다.

$$y = J_3^+(h_2 - J_2J_1^+h_1) + (E_6 - J_3^+J_3)z \tag{21}$$

여기서 $J_3 = J_2(E_6 - J_1^+J_1)$으로 비대칭 행렬이고, $h_2 = \ddot{r}_{2d} + K_{d2}\tilde{r}_2 - \dot{J}_2\dot{\theta}$이며 z는 임의의 벡터이다.

여유자유도 해석 결과 식 (21)을 ZMP 방정식 (15)에 대입하여 z를 다음과 같이 찾는다.

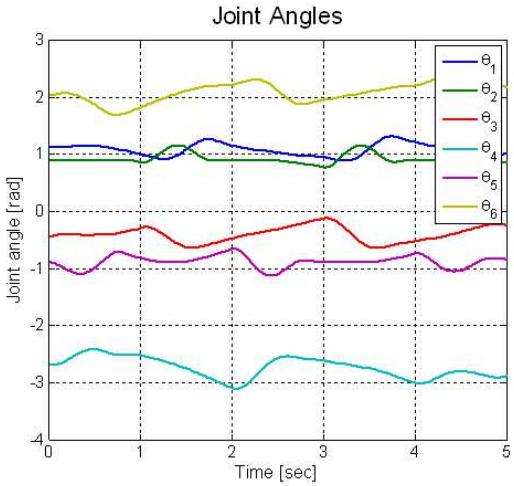


Fig. 6 Joint trajectories

$$z = \left(M_J(E_6 - J_1^+J_1)(E_6 - J_3^+J_3)\right)^+ \bullet \begin{pmatrix} C_{mg} - M_{d,J}\dot{\theta} - M_JJ_1^+h_1 \\ -M_J(E_6 - J_1^+J_1)J_3^+(h_2 - J_2J_1^+h_1) \end{pmatrix} \tag{22}$$

결과적으로 구한 z를 식 (21)에 대입하여 y를 구하고 이것을 다시 식 (10)에 대입함으로써 보행 로봇의 궤적을 구하게 된다. 이렇게 구해진 로봇의 각 조인트 궤적은 걷는 모션을 위한 첫 번째 조건 r_{1d}를 만족시키고, 여러 걸음을 자연스럽게 걷기위한 반복조건 r_{2d}를 만족시키며, 안정적인 보행을 위한 ZMP 조건까지 만족하게 된다.

4.2 두발지지 보행에서 여유자유도 궤적 설계

두발지지 보행에서의 궤적도 반복성을 갖는 한발지지 보행과 같은 조건을 갖는다. 단지 추종해야할 궤적의 함수가 변할 뿐이다. 그 결과 r_{1d}은 식 (17)과 같고, r_{2d}는 한발지지나 두발지지나 같은 속도로 움직여야 하므로 한발지지 궤적의 조건과 같은 추종궤적을 갖게 된다. 결과적으로 보폭과 보행 주기의 함수로 구할 수 있다.

4.3 시뮬레이션

여유자유도 궤적 설계를 위한 최소한의 변수 r_{1d}은 Table 2의 보행 패턴 파라미터를 이용하여 설계하게 된다. 그리고 로봇의 반복적인 보행을 위한 벡터 r_{2d}는 로봇 몸체의 속도인 $\dot{x}_b$으로 로봇의 보폭과 한걸음에 걸리는 시간을 이용하여 구할 수 있다.

Fig. 6은 생성된 궤적을 보여주고 있고, Fig. 7

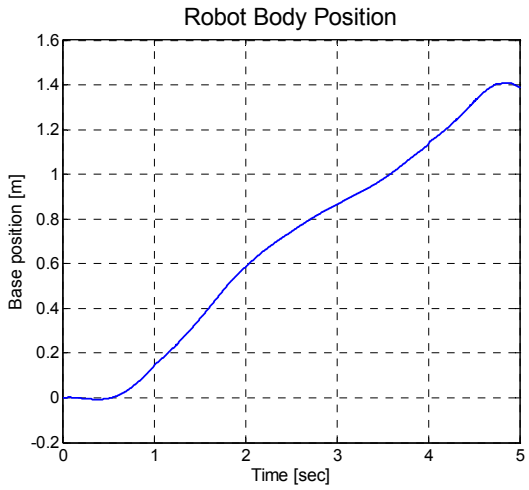


Fig. 7 Robot body position

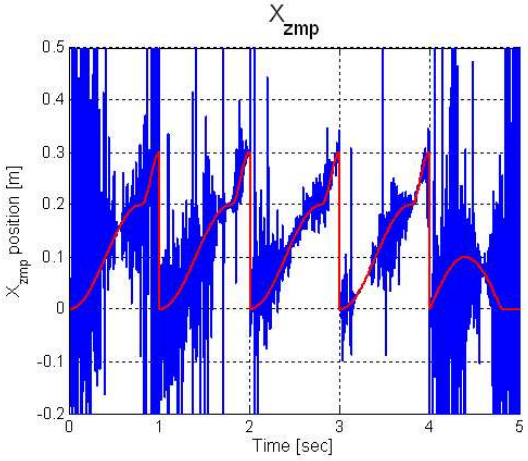


Fig. 8 X-ZMP in moving direction

는 로봇 몸체의 움직임을 보여주고 있다. 로봇의 연속적인 움직임을 위해 속도에 관한 벡터를 추가함으로써 Fig. 5와 달리 로봇의 몸체가 진행방향으로 자연스럽게 움직이고 있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 로봇이 정지 상태에서 걷기 시작하거나 혹은 로봇이 걷다가 정지하는 경우에도 자연스럽게 궤적이 생성된다는 것을 확인 할 수 있다. 다시 말해서 본 논문에서 제안한 여유자유도를 이용한 궤적 생성 방법은 LIPM이나 GCIPM처럼 보행주기 양단에 위치 및 속도의 연속조건을 만족시킬 필요가 없다.

Fig. 8은 로봇의 진행방향으로의 ZMP를 보여주고 있다. 비록 전반적인 경향이 계획한 ZMP 궤적을 추종하고 있지만 가속도가 크게 변해서 결과적으로 ZMP 궤적에 채터링 현상이 발생하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 연속적인 걸음을 위

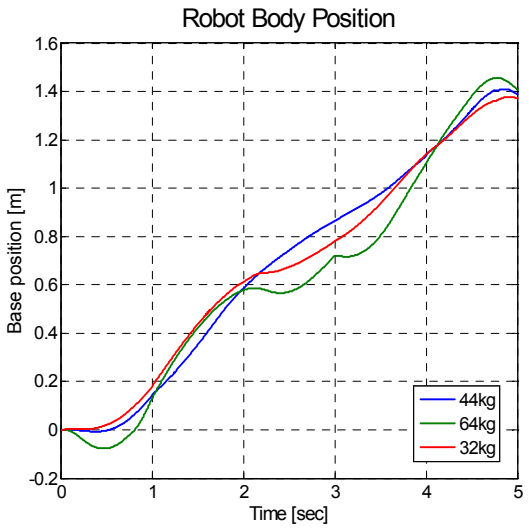


Fig. 9 Robot body position in different masses

한 조건 벡터 r_2의 대입 전 결과인 Fig. 4와는 다르게 채터링이 발생한 이유는 로봇 자유도 보다 많은 조건식 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 추종 조건 수를 줄이거나 혹은 자유도를 추가하여 여유자유도를 확보하는 방법이 있겠다. 이러한 부분은 추후에 연구될 것이다.

Fig. 9은 로봇 파라미터 중 질량의 변화에 따른 궤적 변화를 보여주고 있다. Table 1에서 정의한 로봇 링크의 질량이 다른 3가지 경우에 대한 로봇 허리부분의 위치변화를 보여주고 있다. 로봇 질량이 무거운 경우 로봇 몸체의 움직임이 앞뒤로 많이 움직이고, 그와 반대로 로봇의 질량이 가벼운 경우에는 출발 및 정지 시 몸체의 움직임이 지연 없이 움직이고 있는 것을 확인할 수 있다. 물론 관성모멘트, 질량 중심, 그리고 링크의 길이 등 로봇의 물리적 성질에 의해서도 각각 다른 궤적을 생성하게 된다. 즉 본 논문에서 제안한 여유자유도 궤적 생성방식을 이용하면 안정적인 가·감속 운동을 실행할 수 있을 뿐만 아니라 로봇의 물리적 특성에 따라 개성적인 보행궤적을 생성할 수 있다.

5. 결 론

인간형 2족 보행로봇의 보행 궤적을 설계하는데 있어 한 두 개의 질점으로 가정하여 궤적을 생성하는 기존의 방식으로는 비슷한 질량의 로봇은 비슷한 보행을 해야 했다. 또한 로봇의 속도를 변화시키기 위해서는 많은 조건들이 필요했

다. 하지만 본 연구에서 제안한 궤적생성 방법을 이용하면 로봇의 질량, 무게중심, 링크길이 등 물리적인 특성에 따라 적합하고 안정적인 궤적이 로봇마다 다르게 생성되며, 또한 복잡한 조건 없이 로봇의 속도 변화도 가능하다. 즉 본 논문에서 제안한 여유자유도 궤적 생성 방법을 이용하면 개성적이고 실용적인 보행 궤적을 생성할 수 있다. 이러한 알고리즘을 개발하기 위해 본 논문에서는 보행에 반드시 필요한 변수를 결정하고 안정성을 보장할 수 있도록 ZMP 개념을 이용하여 여유자유도 궤적을 생성하였다. 또한 반복적인 모션이 특징인 보행로봇의 특성상 로봇 속도를 변수로 추가하여 안정적인 궤적을 얻을 수 있었다. 앞으로는 3자유도로 이론을 확장하여 인간형 로봇이 보다 자유롭고 개성적인 보행을 할 수 있도록 연구를 진행할 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.

(8) 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.

(9) 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.

(10) 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.

(11) 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.

(12) Park, J. H., 2001, "Impedance Control of Biped Locomotion," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 6, pp. 870~882.