LIPM 을 이용한 이족 로봇의 보행 속도 변화

손범규† · 김진탁* · 박종현**

Speed Translation for Walking Biped Robots using LIPM

Bumgyu Son, Jintak Kim and Jong Hyeon Park

Key Words : Biped robot(이족 보행로봇), LIPM(선형 역진자 모드), Walking(보행), Speed Translation(속도 변화), Stride change(보폭 변화)

Abstract

When biped robots speed up to run and reduce speed to walk after running, it needs stable speed translation. This paper proposed simple speed translation using the modified LIPM (Linear Inverted Pendulum Mode). We can change stride and period time of a biped robot in some bounded sets with this propose algorithm. This method is simple and effective in simulation.

1. 서 론

최근에 biped robot 에 관한 연구는 여러 방면에서 진행되고 있다. Biped robot 은 걸을 수 있고, 뛸 수 있으며, 짐을 운반할 뿐만 아니라 집에서는 도우미 역할을 수행하고, 위험한 작업장에서는 사람이 하기 어려운 일을 할 수 있다. Biped robot 이 다른 robot 과 다른 점은 인간과 같은 형태를 가지고 있어서 사람들이 친숙함을 느낄 수 있다는 것이다. Biped robot 은 인간의 주변에서 인간과 친숙한 형태를 가지고 걷고, 뛰고, 주어진 임무를 수행하고 있는 것이다.

이러한 biped robot 의 연구 중에서 궁극적인 목표 중의 하나는 두 다리를 이용하여 사람의 걸음걸이를 모방하여 안정적인 보행을 하는 것이다. 그러나 사람의 걸음걸이를 모방하기에는 어려운 점이 많다. 두 다리로 서있는 것은 역학적으로 불안한 형태를 가지고 있기 때문이다. 이처럼 biped robot 의 연구에서 가장 중요한 것은 로봇이 안정한 상태로 지속적으로 걸을 수 있도록 하는 것이다.

Biped robot 의 보행방법으로 여러 가지 방법이 연구되고 있다. 기본적인 보행방법으로 사람의 보행 형태를 근사적으로 모델링 할 수 있는 방법이 있으며 LIPM(Linear inverted pendulum mode) 거동은 역진자의 거동을 선형화시킨 그 대표적인 방법이다 [1, 2]. LIMP 거동은 biped robot 의 모델링이 쉽다는 장점을 가지고 있어서 쉽게 사용되고 있다. 하지만 반복적인 조건을 만족시켜 주기 위해 biped robot 의 거동을 매우 제한적으로 줄 수 밖에 없다는 단점을 지니고 있다.

인간은 보행 중에 장애물을 만나게 되면 속도를 줄이거나 보폭을 늘여서 장애물 회피를 할 수 있다. Biped robot 의 연구에서도 장애물 회피나 걷는 동작에서 뛰고자 할 때, 멈추고 있는 상태에서 걷고자 할 때 급격한 속도변화를 필요로 한다.

Biped robot 의 보행속도를 변화시키는 방법으로 여러 가지 방법이 제시되고 있다. 실시간으로 궤적을 생성하면서 안정성을 유지하며 속도변화를 하는 방법이 있다 [3, 4, 5]. 하지만 LIPM 거동을 사용하면서 적용하기에는 어려움이 있다. 발꿈치 contact 과 발가락을 이용한 방법은 [6, 7] robot 의 속도변화에는 유용하지만, 발바닥의 하드웨어적인

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

구조를 변경해야만 사용할 수 있다는 단점이 있다. 그리고 double support phase 에서 속도변화를 하는 방법이 있다 [8, 9]. 하지만 double support phase 의 구간이 로봇의 보행시간에서 짧은 시간을 차지하고 있기 때문에 속도변화의 한계가 생기게 된다.

이 논문에서 제시하는 방법은 LIPM 거동을 사용하면서 보행의 속도와 보폭을 변화 시키는 것이다. 위에서 언급한 바와 같이 LIPM 거동은 제한적 이라는 단점이 있지만, 기존 방법에서 제한적인 조건들을 여기서 제시하는 방법으로 수정하여 사용하게 되면 속도변화와 보폭 변화가 가능하다. double support phase 와 single support phase 의 구분 없이 보행 전 구간에서 속도변화가 가능하기 때문에 원하는 보행 속도와 보폭으로의 변화가 가능하다.

2 장에서는 제안된 방법의 기본이 되는 LIPM 거동을 설명하고, 3 장에서는 LIPM 거동을 이용하여 속도와 보폭을 변화하는 방법을 제시하였다. 4 장에서는 제안된 방법을 적용하기 위하여 사용한 biped robot 의 모델을 설명하고, 시뮬레이션 및 결과에 대해 논하였다. 5 장에서는 결과를 바탕으로 제안된 방법에 대해 고찰 하였다.

2. LIPM 거동 모델

LIPM 은 biped robot 의 시스템을 하나의 집중 질량을 가진 역진자로 근사화하고, 역진자의 거동을 선형화 시킨 biped robot 의 거동 모델이다. Biped 거동의 모델링이 쉽다는 장점 때문에 biped 시스템의 기준거동(reference locomotion) 으로 쉽게 사용되고 있다 [1, 2].

Fig. 1 에서 M 은 biped robot 의 전체 질량을 근사적으로 나타내고 있으며, 벡터 P 와 g 는 아래와 같다.

$$\boldsymbol{P}^T = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{g}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -g \end{bmatrix}$$

Fig. 2 와 같은 시스템을 지지점(supportion point) 에 대해서 모멘트 평형식을 세우면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{P} \times (M\ddot{\boldsymbol{P}}) = \boldsymbol{P} \times (M\boldsymbol{g})$$

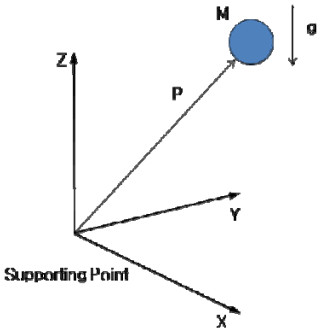

Fig. 1 Inverted pendulum model

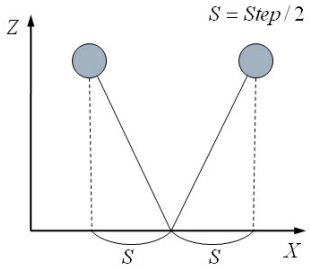

Fig. 2 LIPM (Sagittal plane)

Biped robot 이 반복적으로 보행하기 위해서 sagittal plane 에서의 기준거동 $X(t)$ 는 다음의 반복조건을 만족해야 한다.

$$X(0) = -X(T) \tag{1}$$
$$\dot{X}(0) = \dot{X}(T) \tag{2}$$

위의 식(1), 식(2)를 만족하도록 주어진 주기 T 와 초기 위치 $X(0)$, $Y(0)$ 를 사용하여 초기 속도에 관한 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\dot{X}(0) = \frac{1+e^{\omega t}}{1-e^{\omega t}}\omega X(T)$$
$$\dot{Y}(0) = \frac{1-e^{\omega t}}{1+e^{\omega t}}\omega Y(T)$$

LIPM 은 위의 초기 속도 조건을 이용하여 반복적인 보행이 가능하도록 base 의 궤적을 결정해 주고 있다.

3. 속도변화

3.1 속도변화구간

Biped robot 이 걷는 동작에서 뛰는 동작으로 또는 뛰는 동작에서 걷는 동작으로 천이를 할 때, 멈추고 있는 상태에서 걷고자 할 때 급격한 속도

변화를 필요로 한다. 역학적으로 불안한 형태를 가지고 있는 biped robot 은 급격한 속도변화로 인해 넘어지거나 보행이 불안정해 질 수 있다.

LIPM 거동을 사용해서 속도변화를 할 수 있다면 비교적 안정하게 보행 할 수 있을 것이다. 하지만 기존의 LIPM 거동을 사용하게 되면 주기적인 보행을 하기 위한 반복조건 때문에 보행속도와 보폭의 변화가 어려울 수 있다. 그래서 이 논문에서는 LIPM 거동의 반복조건을 수정하여 보행속도와 보폭을 변화시켜 주는 방법을 제시하고 있다.

기존의 방법으로는 보행속도 변화를 해주기 위한 방법으로 double support phase 에서 보행속도를 변화시키는 방법을 사용하고 있다 [8, 9]. 하지만 그렇게 되면 보행주기에서 상대적으로 single support phase 보다 짧은 double support phase 에서 급격한 속도변화를 해줘야 한다. 보행속도가 빨라짐에 따라 double support phase 는 더욱 감소하게 되고, 속도변화에 한계를 가지게 된다.

여기서 제시하는 방법은 double support phase 뿐만 아니라 single support phase 에서도 계속해서 속도변화를 할 수 있기 때문에 사용자가 원하는 속도변화를 가능하게 한다.

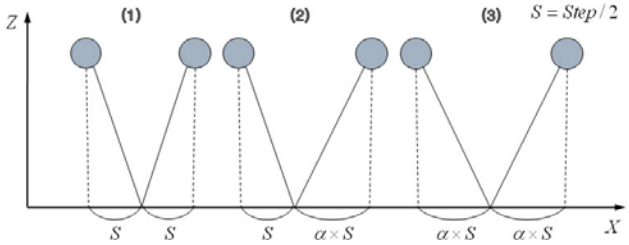

Fig. 3 Speed change of LIPM (Sagittal plane)

위의 Fig. 3 은 Fig. 2 의 LIPM 거동을 변형시킨 형태로서 보폭의 변화를 그림으로 나타내고 있다. 여기서 S 는 step 의 절반을 뜻한다. 첫 번째 step 과 세 번째 step 은 기존의 LIPM 거동이고, 두 번째 step 이 여기서 제시하고 있는 속도변화구간이다.

앞에서 설명한 것과 같이 이 논문에서 제시하는 방법은 기존의 LIPM 에서 사용하는 반복조건들을 수정하여 새로운 초기속도를 구하여 사용하게 된다. 이러한 조건들을 수정하게 되면 Fig. 3 에서 보이는 것과 같이 LIPM 거동을 계속 사용하면서 사용자가 원하는 구간에서 속도변화가 용이하도록 반복적인 보행들 사이에 속도변화 구간을 삽입하여 전체적으로 보행의 속도를 조절 할 수 있다. 이러한 방법으로 인해 보행 속도조절과 보폭의 조절이 가능하게 되는 것이다.

3.2 속도변화를 위한 조건

LIPM 의 모멘트 평형식에서 선형 미분방정식의 해를 각각 구하면

$$X(t) = C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t} \tag{3}$$

$$Y(t) = D_1 e^{\omega t} + D_2 e^{-\omega t} \tag{4}$$

여기서

$$C_1 = \frac{1}{2}\left\{X(0) + \frac{\dot{X}(0)}{\omega}\right\} \quad C_2 = \frac{1}{2}\left\{X(0) - \frac{\dot{X}(0)}{\omega}\right\}$$

$$D_1 = \frac{1}{2}\left\{Y(0) + \frac{\dot{Y}(0)}{\omega}\right\} \quad D_2 = \frac{1}{2}\left\{Y(0) - \frac{\dot{Y}(0)}{\omega}\right\}$$

이다.

반복적인 보행을 위한 조건을 사용하지 않고 속도변화를 위한 조건을 사용하여 속도변화 구간에서의 초기 속도를 구하려고 한다. 속도변화를 위한 조건은 식(5), 식(6)과 같다. 식(5)는 보폭변화를 나타내는 조건식이며, 식(6)은 속도변화를 나타내는 조건식이다.

$$\alpha X(0) = -X(T) \tag{5}$$

$$\beta \dot{X}(0) = \dot{X}(T) \tag{6}$$

위의 조건을 사용함으로써 초기 위치와 주기 T 초 후의 위치를 α 배만큼, 초기 속도와 주기 T 초 후의 속도를 β 배만큼 변화를 시켜주고자 한다.

앞에서 구한 LIPM 거동의 sagittal plane 에서의 기준 거동 경로(reference locomotion)에 대입하여 식(7), 식(8)을 구할 수 있으며

$$\alpha X(0) = -X(T) = -C_1 e^{\omega t} - C_2 e^{-\omega t} \tag{7}$$

$$\beta \dot{X}(0) = \dot{X}(T) = \omega C_1 e^{\omega t} - \omega C_2 e^{-\omega t} \tag{8}$$

식(7), 식(8)을 연립하면

$$\dot{X}(0) = \frac{\alpha + e^{\omega t}}{\beta - e^{\omega t}} \omega X(0) \tag{9}$$

와 같은 식을 구할 수 있다. 식(9)는 위치를 α 배만큼, 속도를 β 배만큼 변화시켜주기 위한 초기 속도조건이다.

초기 속도조건 식에서 α 값과 β 값은 일정한 조건을 만족시켜 줘야 한다. LIPM 거동에서 초기 위치와 초기 속도는 밀접한 관계를 가지고 있다. 이

러한 관계를 성립시켜 주지 않으면 속도변화 이후에 반복적인 보행이 어려워 질 수가 있다. 앞에서 초기속도를 구한 결과와 속도변화를 위한 조건인 식(5), 식(6), 식(9)를 이용하여 α 값과 β 값의 관계를 유도해 보면

$$\dot{X}(T)=\frac{\beta(\alpha+e^{\omega t})}{\alpha(\beta-e^{\omega t})}\omega X(T) \tag{10}$$

을 구할 수 있다. 이때 식(10)을 LIPM 거동의 일반적인 반복조건인 식(11)과 비교하여 α 값과 β 값의 관계를 비교해서 α 값과 β 값을 계산하면 식 (12)를 유도해 낼 수 있다.

$$\dot{X}(T)=\frac{1+e^{\omega t}}{1-e^{\omega t}}\omega X(T) \tag{11}$$

$$\beta=\frac{\alpha+\alpha e^{\omega t}}{2\alpha-1+e^{\omega t}} \tag{12}$$

α 값과 β 값의 관계를 이용하여 속도변화구간에서 식(9)의 초기속도를 만족시켜 주기만 하면 반복적인 보행 사이에 속도변화구간을 넣어 줄 수 있으며, 이로 인해 LIPM 거동을 사용하면서도 제한을 받지 않고 자유롭게 속도를 변화시켜 줄 수 있다.

제안한 방법을 사용하여 속도변화를 하게 되면 double support 구간과 single support 구간 사이에서 속도의 불연속점이 생기게 된다. 반복적인 보행에서는 속도연속 조건을 항상 만족시켜주면서 보행하게 되지만 위에서 구한 초기속도조건인 식(9)를 보면 이전 스텝에서 반복조건을 만족하고 구해진

$$\dot{X}(T)=\frac{1+e^{\omega t}}{1-e^{\omega t}}\omega X(T) \tag{13}$$

$$\dot{X}(0)=\frac{\alpha+e^{\omega t}}{\beta-e^{\omega t}}\omega X(0) \tag{14}$$

식(13)과 식(14)의 속도가 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 속도 불연속을 막기 위해 single support 구간에서는 제안된 LIPM 거동을 사용하고 double support 구간에서는 4 차 polynomial 을 사용하였다.

α 값을 1.3 으로 하여 β 값을 구하고, α 와 β 값을 이용하여 초기속도 $\dot{X}(0)$ 을 구하여 속도변화 구간을 위한 조건들을 얻었다. 이렇게 얻은 속도변화 구간을 6 초의 보행 중에 1~2 초, 3~4 초에 적용하였다. Fig. 4 는 속도변화 구간을 사용한 base 의 속도를 sagittal plane 에서 나타낸 것이고, Fig. 5 는 속도변화 구간을 사용한 base 의 위치를 sagittal plane 에서 나타낸 것이다.

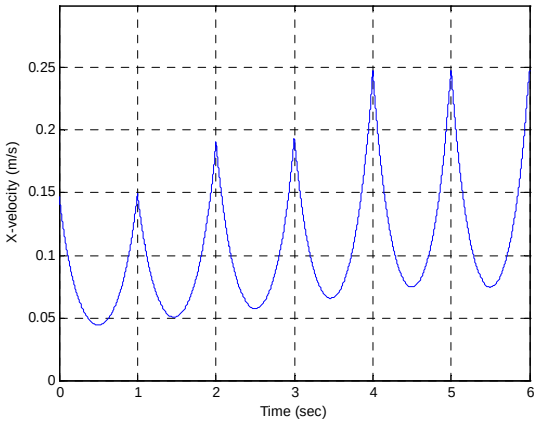

Fig. 4 Velocity of the COG of the robot in the forward direction

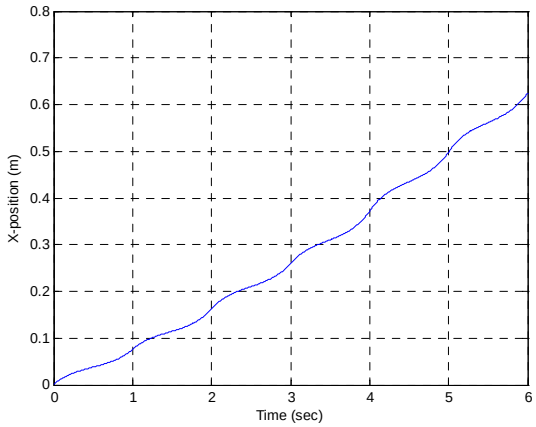

Fig. 5 Trajectory of the COG of the robot in the forward direction

4. 시뮬레이션

4.1 2 족 보행 로봇 모델

Fig. 6 은 이 논문에서 사용한 biped robot 의 모델을 나타낸다. 로봇은 하체 12 자유도로 구성되어 있으며, 각 다리마다 6 자유도를 가지고 있다. 하체의 영향만을 고려하기 위해 상체는 하나의 질량으로 나타내었다. Robot 의 전체 질량은 17.5 kg 이고, 높이는 60 cm 이다. 각 link 의 길이와 질량은 Table 1 과 같다. 제안된 보행속도 변화 알고리즘을 검증하기 위하여 RecurDyn 에서 시뮬레이션을 수행하였다.

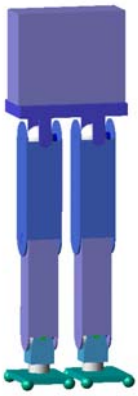

Fig. 6 Biped robot model

Table 1 Parameters of the biped robot

Link	Link length (m)	Link mase (kg)
body	0.21	6.37
1	0.16	2.04
2	0.16	1.84
foot	0.08	0.75

4.2 시뮬레이션 결과

속도변화 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션을 실시 하였다. 아래의 Fig.7 은 시뮬레이션을 수행한 결과로서 속도와 보폭을 변화시키면서 보행하였을 때의 결과를 확인할 수 있다. Fig.8 은 오른쪽 발과 왼쪽 발의 궤적을 sagittal plane 에서 나타낸 것이다. 파란색 실선이 오른쪽 발을 빨간색 점선이 왼쪽 발의 궤적을 나타낸 것이다.

결과를 보면 biped robot 의 속도와 보폭이 주어진 속도변화 알고리즘으로 인해 변화된 것을 확인할 수 있다.

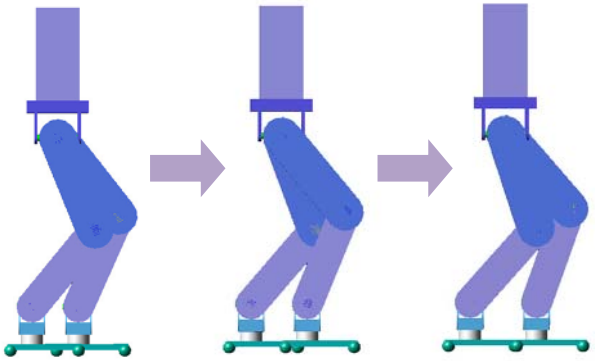

Fig. 7 Simulation

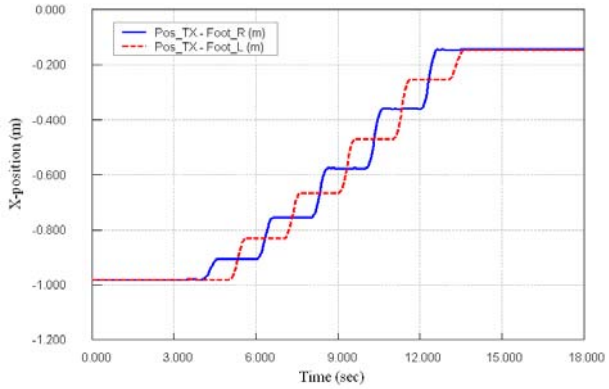

Fig. 8 Foot Trajectory

5. 결 론

본 논문에서는 LIPM 을 이용한 속도와 보폭의 변화가 제안되었다. 제안된 방법은 기존의 LIPM 거동에서 사용하는 조건들을 수정하여 새로운 초기속도를 구하여 속도를 변화시켜 줄 수 있는 구간을 만들게 되고, 이렇게 만들어진 속도 변화 구간을 LIPM 의 반복적인 보행들 사이에 삽입하여서 사용하게 된다. 기존의 LIPM 거동을 토대로 사용하기 때문에 속도변화 구간에서 자연스럽게 속도와 보폭을 변화 시켜 줄 수 있다. 원하는 구간에서 원하는 만큼의 속도변화를 할 수 있으며, 손쉽게 사용자가 원하는 만큼의 속도까지 변화시켜 줄 수 있는 장점이 있다.

후 기

이 연구(논문)는 지식경제부 지원으로 수행하는 21 세기 프론티어 연구개발사업(인간기능 생활지원 지능로봇 기술개발사업)의 일환으로 수행 되었습니다.

이 논문은 2008 년도 2 단계 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

(1) S. Kajita and K. Tani, 1991, “Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1405-1411

(2) S. Kajita, T. Yamaura, and A. Kobayashi, 1992, “Dynamic Walking Control of a Biped Robot Along a Potential Energy Conserving Orbit,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation,* pp. 431-438

(3) S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, and H. Hirukawa, 2002, “A Realtime Pattern Generator for Biped Walking,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,* pp. 31-37

(4) H. Yussof, M. Ohka, M. Yamano, and Y. Nasu, 2007, “Biped Locomotion Strategy in Humanoid Robot Navigation: A Case of Speed-Up Walk,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*

(5) K. Kondak and G. Hommel, 2004, “Online Generation of Stable Gait for Biped Robots with Feedback Loop Algorithm,” *Proc. IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics,* pp. 710-715

(6) F. Asano and Z.-W. Luo, 2007, “The Effect of Semicircular Feet on Energy Dissipation by Heel-strike in Dynamic Biped Locomotion,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,* pp. 3976-3981

(7) R. Sellaouti, O. Stasse, S. Kajita, K. Yokoi, and A. Kheddar, 2006, “Faster and Smoother Walking of Humanoid HRP-2 with Passive Toe Joints,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems,* pp. 4909-4914

(8) T. Hirabayasho, B. Ugurlu, A. Kawamura, and C. Zhu, 2008, “Yaw Moment Compensation of Biped Fast Walking Using 3D Inverted Pendulum,” *IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control,* pp. 296-300

(9) C. Zhu and A. Kawamura, 2007, “Bipedal Walking Pattern Design Considering the Effect of Double Support Phase,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics,* pp. 883-888