

ELIPM을 이용한 이족보행로봇의 궤적생성[§]

박건우* · 최시명* · 박종현**

* 한양대학교 기계공학부

Trajectory Generation for a Biped Robot Using ELIPM

Goun-Woo Park*, See Myoung Choi* and Jong Hyeon Park**

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received December 15, 2010 ; Revised April 9, 2011 ; Accepted April 13, 2011)

Key Words: Biped Robot(이족보행로봇), Trajectory Generation(궤적생성), Inverted Pendulum Model(역진자모델)

초록: 궤적생성은 로봇보행의 안정성, 연속성 그리고 보행특성을 결정하는 가장 중요한 일이다. 보통 궤적생성법으로 LIPM을 많이 쓰지만 그것은 그것의 선형화 기법 때문에 수직방향으로의 동작생성을 할 수 없다는 단점이 있다. 이 논문에서는 ELIPM이라는 새로운 궤적생성법을 제안한다. 이 궤적생성법은 전진방향의 동작은 물론이고 수직방향의 동작을 간단하게 생성할 수 있다.

Abstract: Trajectory generation is important because it determines the walking stability, continuity, and performance of a body in motion. Generally, the Linear Inverted Pendulum Mode is used for trajectory generation; however, for the sake of simplicity, the trajectory in this mode does not allow vertical motions and pitching motions of the body. This paper proposes a new trajectory generation method called Extended Linear Inverted Pendulum Mode (ELIPM) that allows vertical motion as well as pitching motion. This method can also improve the performance of locomotion by controlling the stride and locomotion frequency of a body.

1. 서 론

이족보행로봇의 연구 중에서 궁극적인 목표 중 하나는 사람의 보행을 구현하는 것이다. 사람은 보통의 이동로봇과는 달리 바닥을 지지할 수 있는 두 다리를 이용한 매우 독특한 움직임을 통해 보행을 한다. 이러한 형태의 보행은 역학적으로 불안정한 형태를 가지고 있다. 때문에 이족보행로봇의 보행을 구현하는 것은 매우 어려운 일 중 하나라 할 수 있다.

일반적으로 로봇에 보행을 실행하기 위해 보행 궤적을 생성하는데 여기서 가장 중요한 것은 안정성, 연속성, 성능이다. 역학적으로 불안정한 상태에서 안정하게 움직여야 하고, 두 다리를 주기적으로 번갈아가며 서로가 연속성이 있어야하며, 이런 조건들에도 불구하고 사람과 같은 다양한

성능을 내주어야 한다.

보행로봇의 안정된 궤적을 생성하는 방법은 그것이 로봇의 다이내믹스(Dynamics)를 만족하도록 하는 것이다. 하지만 기본적으로 이족보행 로봇은 다관절 로봇이기 때문에 타당한 궤적을 구해 내기에 로봇 다이내믹스는 너무 복잡하고 어렵다.

따라서 이족보행로봇을 간소화하는 것이 중요하다. 이에 가장 대표적으로 사용되는 것이 역진자 모델이다(Inverted Pendulum Model). 인간의 보행은 지지발의 발목을 기준으로 몸이 넘어가는 움직임을 한다. 인간의 몸을 집중질량화된 질점으로 간소화한다면 질점이 지지점을 넘어가는 모션을 하는 역진자 모델은 타당하다.

이 역진자 모델의 다이내믹스는 간단하지만 비선형 방정식의 형태이므로 이를 보통 이를 선형화를 통해 이용하기 쉬운 형태로 바꾸게 되는데 그런 형태의 궤적생성법 중 가장 대표적인 방법이 LIPM(Linear Inverted Pendulum Mode)다.^(1,2)

하지만 LIPM은 보행성능에 있어 매우 제한적

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, jongpark@hanyang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

이다. constraint control은 보행의 높이가 일정하게 만들고 반복조건들은 보행의 움직임이 매번 같게 만든다. 때문에 이를 수정 보완하기 위한 연구들이 계속되고 있다. 연속조건들을 바꿔 보폭의 변화를 통해 속도변화가 가능하게 만들어주는 방법,⁽³⁾ 스텝사이에 양발지지구간(double support phase)를 두어 속도변화를 주는 방법,⁽⁴⁻⁶⁾ 보행중 지지점을 변화시켜 보폭을 증가시키는 방법,⁽⁷⁾ 역진자 모델에 공중발(Swing leg)의 다이내믹스를 추가해 선형화 함으로서 안정성을 증가시키는 방법^(8,9) 등이 바로 그런 연구들이다. 하지만 이런 방법들은 공통적으로 constraint control를 이용한 선형화 방법을 이용하기 때문에 수직방향으로 이동이 불가능하다.

본 논문에서는 기존방식들을 수정 보완한 ELIPM (Extended Linear Inverted Pendulum Mode)라는 궤적생성방식을 제안하여 수직방향으로도 선형미분 방정식의 형태로 궤적을 풀이할 수 있게 한다. ELIPM은 전진방향과 수직방향이 모두 선형미분 방정식의 형태로 궤적을 풀이할 수 있기 때문에 궤적설계자가 그 궤적들을 설계하기 쉽다는 장점이 있다. 이 장점은 다양한 형태의 워킹이나 러닝이 가능하게 할 뿐만 아니라 둘사이의 전환 또한 쉽게 해 줄 수 있다.

2장에서는 제안된 방법의 기본이 되는 역진자 모델을 설명하고, 역진자 모델을 선형화하는 방법을 기술하였다. 3장에서는 보폭과 보행진동수를 조절하여 보행성능을 바꾸는 방법과 역진자의 회전궤적생성에 관해 기술하였다. 4장에서는 제안된 방법을 검증하기위해 사용한 이족보행로봇을 설명하고 이를 시뮬레이션한 결과에 대해 논하였다. 5장에서는 결과를 바탕으로 제안된 방법에 대해 고찰하였다.

2. 역진자 모델과 ELIPM

2.1 역진자 모델의 다이내믹스

역진자 모델은 Fig. 1과 같이 로봇의 질량이 점 G에 집중되어 있고 점 O에서 지면과 접촉한다고 가정하여 로봇다이내믹스를 간단화한 모델이다. 이 모델은 이족보행 로봇을 근사화한 간단한 모델로 이용하기 쉽다는 장점 때문에 보행궤적생성법에 많이 이용되고 있다.

본 논문에서는 로봇이 2차원운동을 한다고 가정하고 궤적을 생성한다. Fig. 1에서 m 는 로봇의

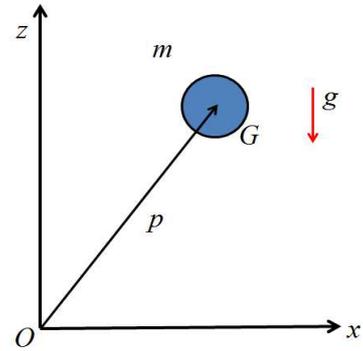


Fig. 1 Inverted pendulum model

총질량이며 위의 가정을 통해 \vec{p} 와 \vec{g} 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\vec{p} &= [x \quad z]' \\ \vec{g} &= [0 \quad -g]'\end{aligned}$$

이 시스템에서 점 O를 기준으로 모멘트 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\vec{p} \times m\ddot{\vec{p}} = \vec{p} \times m\vec{g}$$

또는,

$$m(z\ddot{x} - x\ddot{z}) = mxg \quad (1)$$

2.2 ELIPM

식 (1)은 두 개의 성분이 복합된 형태의 비선형 방정식이다. 때문에 궤적을 생성하기 위해선 한 개의 성분을 미리 결정해 줘야 한다. 역진자 모델을 이용한 일반적인 궤적생성법은 논문⁽¹⁾에서와 같이 식 (1)에서 수직방향의 동작을 구속하고 전진방향의 동작을 다음과 같이 구한다.

$$\ddot{x} - \omega^2 x = 0 \quad (2)$$

하지만 식 (1)에서 수직방향의 동작을 구속하지 않더라도 전진방향의 동작이 식 (2)와 같이 나올 수 있다. 식 (1)에서 전진방향의 동작이 식 (2)와 같다고 가정한다면 다음을 구할 수 있다.

$$mx(\ddot{z} - \omega^2 z + g) = 0 \quad (3)$$

식 (3)에서 x방향의 동작이 일반적으로 0이 아니므로 있으므로 다음과 같은 z방향의 선형미분

방정식이 세워짐을 알 수 있다.

$$\ddot{z} - \omega^2 z + g = 0 \quad (4)$$

식 (2)와 (3)은 2차 선형미분방정식으로서 다음과 같은 해를 갖는다.

$$x(t) = A_1 e^{\omega t} + A_2 e^{-\omega t} \quad (5)$$

$$z(t) = C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t} + \frac{g}{\omega^2} \quad (6)$$

여기서 A_1, A_2, C_1, C_2 는 임의의 상수다. 식 (5)와 (6)의 상수 $A_1, A_2, C_1, C_2, \omega$ 들은 보행연속조건에 관련된 상수로서 3장에서 결정한다.

3. 연속조건

3.1 연속조건

주기마다 보행이 연속이 되기 위해선 보행스텝의 시작시간에서의 위치와 속도가 전 보행스텝의 끝시간의 그것과 같아야 한다. 하지만 보행 동작의 특성상 전진방향의 위치는 같을 필요는 없다. 이러한 점을 이용해 다음의 조건을 만든다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(0) &= \dot{X}_0, \quad \dot{x}(T) = \dot{X}_T \\ z(0) &= Z_0, \quad \dot{z}(0) = \dot{Z}_0 \end{aligned}$$

그리고 식 (5)와 식 (6)의 계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\dot{X}_T - \dot{X}_0 e^{-\omega T}}{\omega(e^{\omega T} - e^{-\omega T})}, & A_2 &= \frac{\dot{X}_T - \dot{X}_0 e^{\omega T}}{\omega(e^{\omega T} - e^{-\omega T})} \\ C_1 &= \frac{1}{2} \left(Z_0 + \frac{\dot{Z}_0}{\omega} - \frac{g}{\omega^2} \right), & C_2 &= \frac{1}{2} \left(Z_0 - \frac{\dot{Z}_0}{\omega} - \frac{g}{\omega^2} \right) \end{aligned}$$

보행은 그것을 행하는 로봇의 구조상의 한정된 작업공간을 가진다. 따라서 보행설계자는 그 작업공간속에서 보행이 이루어 지도록 보행목표를 설계할 필요가 있다. 때문에 다음과 같은 구속조건을 만들 수 있다.

$$S_m < x_i(T) - x_{i+1}(0) < S_M \quad (7)$$

$$H_m < z(T) < H_M \quad (8)$$

여기서 i 는 i 번째 보행스텝을 말한다. 조건 (7)과 (8)에서 S_m 와 S_M 는 각각 보폭의 최소, 최대 거리이며 H_m 와 H_M 는 보행높이의 최소, 최대높이다. 조건 (7)과 (8)을 식 (5)와 (6)에 적용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$D S_m - \dot{X}_0 < \dot{X}_T < D S_M - \dot{X}_0 \quad (9)$$

$$H_m < C_1 e^{\omega T} + C_2 e^{-\omega T} + \frac{g}{\omega^2} < H_M \quad (10)$$

여기서, D 는 다음과 같다.

$$D = \frac{\omega(e^{\omega T} - e^{-\omega T})}{e^{\omega T} + e^{-\omega T} - 2}$$

3.2 보행진동수

식 (5)와 (6)에서 아직 결정되지 않은 상수는 보행진동수 ω 다. 우리는 ω 를 조절하여 조건(10)을 만족하는 ω_M 과 ω_m 을 구하고 그 사이에서 수직방향의 속도가 특정한 값을 가지도록 하였다. 하지만 조건(10)은 ω 에 대한 비선형 방정식이므로 해석적인 방법으로 해를 구할 수 없다. 따라서 비선형 solver를 통해 ω_M 과 ω_m 를 구해야 한다. 그리고 그 ω 의 범위를 이용해 $z_M(T)$ 과 $z_m(T)$ 혹은 $\dot{z}_M(T)$ 과 $\dot{z}_m(T)$ 구하고 보행설계자는 그 범위사이의 값을 택해야 한다. 이를 이용해 결정된 ω 를 이용해 보행에 이용한다. ω 가 결정되면 식 (9)의 범위 또한 결정이 된다. 궤적설계자는 그 범위 안의 $\dot{x}(T)$ 를 택하여 다음 스텝에 이용한다.

3.3 3차원에서의 알고리즘 적용

본 알고리즘을 실제 로봇에 적용하기 위해선 알고리즘이 3차원에서도 적용이 가능해야 한다. 이를 위해 2.1장에서 \vec{p}, \vec{g} 이 다음과 같다면

$$\begin{aligned} \vec{p} &= [x \quad y \quad z]' \\ \vec{g} &= [0 \quad 0 \quad -g]' \end{aligned}$$

식 (1)을 다음과 같이 다시 구할 수 있다.

$$\begin{cases} m(x\ddot{y} - y\ddot{x}) = 0 \\ m(y\ddot{z} - z\ddot{y}) = -m\gamma\gamma \\ m(z\ddot{x} - x\ddot{z}) = m\gamma\gamma \end{cases} \quad (11)$$

식 (11)에서 x 방향과 y 방향의 동작이 다음과 같다고 가정하면

$$\begin{aligned} \ddot{x} - \omega^2 x &= 0 \\ \ddot{y} - \omega^2 y &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

z 방향으로의 동작이 식 (4)와 같이 구해지고 식 (4)와 (12)은 식 (11)의 세가지 식을 모두 만족한

다. 따라서 식 (4)와 (12)을 이용해 다음의 해를 구할 수 있다.

$$x(t) = A_1 e^{\omega t} + A_2 e^{-\omega t}$$

$$y(t) = B_1 e^{\omega t} + B_2 e^{-\omega t}$$

$$z(t) = C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t} + \frac{g}{\omega^2}$$

4. 시뮬레이션

4.1 궤적설계를 위한 Flow Chart

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 순서를 다시 상기하자면 다음과 같다.

(1) 3.2장을 이용해 보행진동수 ω_M 과 ω_m 를 구하고 그 사이에서 보행에 이용할 ω , Z_T 와 \dot{Z}_T 를 결정한다.

(2) 결정된 ω 를 이용해 식 (9)를 구하고 로봇작업공간에 맞는 \dot{X}_T 를 결정한다.

(3) 결정된 상수들을 이용해 A_1 , A_2 , C_1 , C_2 를 구하고 식 (5)와 (6)을 이용해 궤적을 그린다.

본 논문에서는 제안된 알고리즘의 검토를 위한 시뮬레이션을 계획하였으며 (1)의 과정을 통해 z 방향의 동작을 Table 1과 같이 결정하였다.

그리고 (2)의 과정을 통해 모든 \dot{X}_T 가 0.2m/s의 속도를 갖도록 결정하였으며 (3)의 과정으로 A_1 , A_2 , C_1 , C_2 을 구해 Fig. 2와 Fig. 3의 궤적을 구했다.

Table 1 Variation of ω and Heigh in simulation

Time	ω	Heigh (m)	Velocity (m/s)
4.0s	5.021	0.389	0
5.0s	5.018	0.389	0
6.0s	5.586	0.350	-0.193
7.0s	5.652	0.311	-0.028
8.0s	5.654	0.307	0
9.0s	5.652	0.307	0

Table 2 Parameters of the biped robot

	Link length (m)	Link mass (kg)
Body	0.24	5.7
Thigh	0.16	2.4
Shin	0.16	1.9
Foot	0.08	0.5

4.2 이족보행로봇모델

Fig. 4은 4.1장에서 구한 궤적이 보행로봇에 적합한 것인지 검증하기 위해 사용한 RecurDyn의 모델이다. 로봇은 sagittal plane의 모델로서 각발에 3자유도씩 총 6자유도로 구성되어 있다. 로봇 링크의 길이와 질량은 Table 2와 같다.

4.3 시뮬레이션 결과

Fig. 2과 Fig. 3의 궤적을 Fig. 4의 모델에 적용하였으며 로봇은 Fig. 5와 같이 잘 보행하였다. Fig. 5에서 실선은 제안된 궤적이고 점선은 로봇 모델의 동작결과이다.

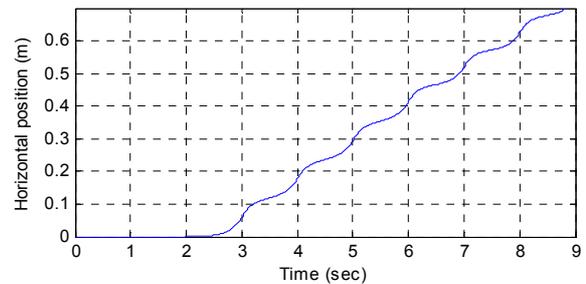


Fig. 2 Desired body trajectory in the horizontal direction

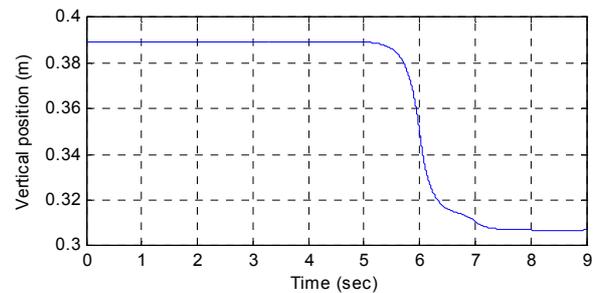


Fig. 3 Desired body trajectory in the vertical direction

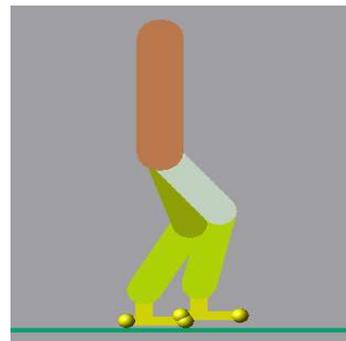


Fig. 4 2D Biped robot

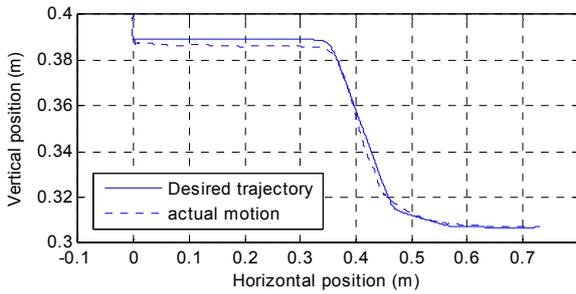


Fig. 5 Desired body trajectory in the vertical direction and actual motion

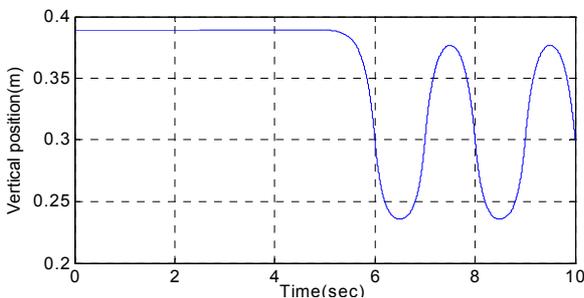


Fig. 6 Oscillatory trajectory in the vertical direction

하지만 제안된 보행궤적생성법은 아직 완성된 것은 아니며 몇가지 문제점이 있다. 제안된 이론을 이용해 한 보행스텝만에 로봇의 높이를 0.3 m로 줄일 수 있으나 그 결과 Fig. 6과 같이 로봇이 0.3 m를 기준으로 계속 진동하는 형상의 궤적이 만들어 졌다. 이는 5 s에서의 수직방향 속도가 -0.45 m/s가 되기 때문이며 제안된 이론으로는 끝 시간에서 z방향으로의 보행위치와 보행속도를 동시에 특정한 값으로 만들 수 없다.

이를 보완하기 위해선 여러 스텝에 걸쳐 로봇의 위치를 낮춰줘야 한다. 하지만 이 방법은 아직 정형화된 방법이 없다. 이에 대한 것은 추가적인 연구가 필요하다. Table 1은 보행목표를 맞추기 위해 경험적인 방법으로 보행진동수를 구한 결과 결과이고 Fig. 2와 Fig. 3은 그 결과궤적이다.

5. 결론

이 논문은 로봇의 공중제비 동작을 위한 연구를 수행하는 중에 로봇의 도약동작과 착지동작에 사용하기 위한 궤적을 생성하는 방법을 연구하는 중에 만들어진 결과다. 공중제비 동작을 위해선

기존 연구에서처럼 수직방향으로의 구속조건을 주는 방법은 적절하지 않았다. 때문에 수직방향으로의 움직임이 가능한 방법을 연구하게 되었다.

공중제비동작을 위해선 수직방향의 동작 뿐만 아니라 로봇자체의 총 회전모멘텀도 조절해야 한다. 이를 위해 본 논문에서 제안한 ELIPM을 변형한 알고리즘을 적용하고 있다. 3D환경에서는 그 알고리즘이 개선이 필요하기에 추가적인 연구가 필요하다.

제안된 ELIPM은 전진방향을 임의의 2차 선형미분방정식의 해로 가정하고 수직방향으로도 2차 선형미분방정식의 형태가 될 수 있도록 하는 방법이다. 보행궤적을 설계함에 있어 로봇의 기구적인 한계와 다이내믹스 식의 변수 갯수의 제한에 따라 보행 목표의 결정에 다소 제한적이다. 그리고 보행진동수를 비선형 방정식의 solver를 통해 구해야 하므로 해석적이지 못하며, 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

이러한 단점에도 불구하고 전진방향과 수직방향으로의 동작의 변화가 가능하고, 역진자 모델의 다이내믹스를 완벽하게 만족한다는 장점이 있다. 이 방법을 이용한다면 보행은 물론이고 러닝과 그 사이를 이어주는 전환동작의 설계를 궤적 설계만으로도 해볼 수 있다.

후 기

본 논문은 한국학술진흥재단의 연구과제로 수행됨.(과제번호:2008-000-0000-6736)

참고문헌

- (1) Kajita, S. and Tani, K., 1991, "Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1405~1411.
- (2) Kajita, S., Yamaura, T. and Kobayashi, A., 1992, "Dynamic Walking Control of a Biped Robot Along a Potential Energy Conserving Orbit," *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, pp. 431~438.
- (3) Park, J. H. and Son, B., 2008, "Speed Translation for Walking Biped Robots using LIPM," *Proc. IEEE Int. Conf. on Korea Society*

- of Mechanical Engineering*, pp. 876~881.
- (4) Hirabayasho, T., Ugurlu, B., Kawamura, A. and Zhu, C., 2008, "Yaw Moment Compensation of Biped Fast Walking Using 3D Inverted Pendulum," *IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 296~300.
- (5) Zhu, C. and Kawamura, A., 2007, "Bipedal Walking Pattern Design Considering the Effect of Double Support Phase," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 883~888.
- (6) Xiao-gang, R. and Zhi-qian, L., 2009, "A Bipedal Locomotion Planning with Double Support Phase Based on Linear Inverted Pendulum Mode," *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Systems*, pp. 73~77.
- (7) Motoi, N. and Suzuki, T., 2009, "A Biped Locomotion Planning Based on Virtual Linear Inverted Pendulum Mode," *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics*, pp. 56~61.
- (8) Park, J. H. and Kim, K. D., 1998, "Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed-Torque Control," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 3528~3533.
- (9) Erbatur, K. and Seven, E., 2007, "An Inverted Pendulum Based Approach to Biped Trajectory Generation with Swing Leg Dynamics," *Proc. IEEE Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 216~221.