

두발 로봇의 계단 보행 궤적 생성 방법

Trajectory generation method for bipedal walking on the stairs

*박찬수, **최중호, ***하태신

*Chansoo Park, **Chong-Ho Choi, ***Taesin Ha

Abstract - In this paper, we propose the trajectory generation method for bipedal walking on the stairs. This method is based on multi-masses inverted pendulum mode (MMIPM). MMIPM can effectively reduce the ZMP error but it is only applied to walking on the flat ground. In order to reduce ZMP error when a robot walks on the stairs, we generate the walking motion by MMIPM and modify that motion using parametric functions. We determine the values of the parameters by the simulations. Simulation results show that the robot can walk more stable on the stairs.

Key Words : bipedal walking, ZMP, stairs.

1. 서론

오늘날 많은 곳에서 인간형 로봇에 관심을 가지고 연구를 진행하고 있다[1][2][3][4][5]. 현재 두발 로봇에서 평지 보행에 대해서는 많이 연구되고 있지만, 경사면이나 계단 및 평평하지 못한 지면 등 다른 형태의 지면에 대한 보행은 상대적으로 연구가 부족한 편이다. 그러나 로봇이 좀 더 실생활에 가깝게 적용되기 위해서는 이러한 연구들이 반드시 필요하다.

이와 관련한 기존 연구 결과들을 살펴보면, 먼저 S. Kajita [6] 는 로봇을 one mass로 가정하여 inverted pendulum mode (IPM)에서 궤적을 생성하고, 실시간으로는 ultrasonic sensor에서 측정된 지면의 상태를 이용하여 상하 궤적을 새롭게 생성함으로써 계단을 걷는 보행을 구현하였다. YF.Zheng [7] 은 발가락과 뒷꿈치에 force sensor를 부착하고 기울기를 측정하여 기울기를 알지 못하는 지면에서 정적 보행을 구현하였다. Yamaguchi [8] 는 충격을 흡수할 수 있도록 발바닥에 damper와 거리 및 기울기 센서 등을 부착하여 고르지 못한 지면에서의 보행을 구현하였다. Ching-Long Shih [9] 는 계단 및 비탈면에 관한 보행을 구현하기 위해서 보행 궤적을 cubic polynomial로 정의하는 방법을 제안하였다. Sagittal 평면에서의 계단 보행궤적을 생성하기 위해서 Genetic Algorithm을 사용하는 연구도 있다 [10].

일반적으로 많이 사용되는 평지 보행의 궤적생성 방법에는 IPM과 MMIPM이 있다[11,12]. IPM은 간단하지만 모델링 에러로 인하여 보행이 불안정하고, MMIPM은 많은 point mass를 이용하기 때문에 정확한 모델링과 안정적인 보행이 가능하지만, 계산량이 늘어나는 단점이 있다.

이 논문에서는 평지에서만 적용되는 MMIPM을 계단보행으로 확장하는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 MMIPM으로 생성된 보행궤적에 매개변수로 정의된 보상궤적을 더하여 계단 보행에서 ZMP error를 줄임으로써 보행을 안정하게 만든다. 시뮬레이션을 통하여 계단 높이에 적합한 매개변수의 값을 설정하였고 다른 계단보행 연구의 결과와 비교하여 그 성능의 우수성을 보였다.

2. 로봇 모델

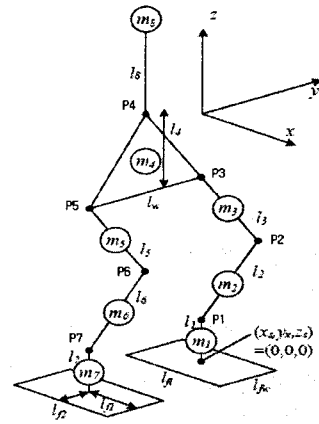


그림 1 3D robot model and 12 DOFs

표 1. parameters of the biped robot

Parameter	Value	Parameter	Value
m_1, m_7	0.18kg	l_3, l_5	15.5cm
m_2, m_6	0.59kg	l_4	7.7cm
m_3, m_5	0.68kg	l_8	15cm
m_4	1.53kg	l_{f1}	12cm
m_8	0.87kg	l_{fw}	7cm
l_1, l_7	5cm	l_{f1}	8.5cm
l_2, l_6	12.5cm	l_{f2}	3.5cm

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g)} \quad (1)$$

$$Y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g)} \quad (2)$$

저자 소개

- * 박찬수: 서울대학교 전기공학부 박사과정
- ** 최중호: 서울대학교 전기공학부 교수
- *** 하태신: 서울대학교 전기공학부 박사과정

연구에 사용한 로봇 모델은 그림 1과 같다 [13]. P1, P3, P4, P5, P7 위치의 관절들은 pitch와 roll의 2자유도를 가지고

있고, P2와 P6위치의 관절들은 pitch의 1자유도만 가지고 있어 로봇은 총 12 자유도를 갖게되고 이렇게 point mass로 모델링된다. 로봇의 ZMP equation은 (1),(2)와 같다 [14]. 그리고 발과 지면 사이의 접촉 모델로는 spring-damper 모델을 사용하였다 [13]. 이 때의 스프링계수는 $5000N/m$, 댐핑계수는 $75000Ns/m$ 로 설정하였다.

3. 궤적 생성

보행은 발을 바꾸면서 발을 내딛는 같은 동작의 반복으로 이루어진다. 본 논문에서는 한발 내딛음의 반복으로 보행을 나타내고 발 바뀔 순간 일어난다고 가정하였다. 이 때의 발 궤적은 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} x_f(t) &= 2S\cos\left(\frac{\pi}{T}t\right), y_f(t) = y_0, \\ z_f(t) &= \frac{h}{2}\left(1 - \cos\left(2\frac{\pi}{T}t\right)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 S는 보폭, y_0 는 초기 발의위치, T는 보행주기, h는 발이 올려지는 최대 높이이다. 그리고 발바닥은 모든 주기에 걸쳐 지면과 평행하게 유지된다. 우리는 로봇의 허리부분이 그림1의 m_4 에 해당한다고 보고 m_4 의 궤적을 허리 궤적 $(x_h(t), y_h(t), z_h(t))$ 로 설정하였다. 그리고 $(x_h(t), y_h(t))$ 를 결정하기 위하여 IPM으로 Center Of Gravity(COG)궤적을 계산한다. 이렇게 얻어진 COG궤적으로부터 로봇 kinematics를 계산하면 허리 궤적을 얻을 수 있지만, 계산을 간단하게 하기 위해 (4)와 같이 COG궤적을 상수 c_x, c_y 로 scaling하여 $(x_h(t), y_h(t))$ 로 사용하였다.

$$x_h(t) = c_x x_{cog}(t), y_h(t) = c_y y_{cog}(t) \quad (4)$$

그밖에 계단 보행을 표현하기 위해서는 $z_h(t)$ 가 필요하고, $z_h(t)$ 는 (5)와 같이 정의하였다.

$$z_h(t) = H + r_h \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \pi a_h\right) + h_{ground}\left(\frac{t}{T} - 0.5\right) \quad (5)$$

H는 초기 m_4 의 위치, h_{ground} 는 계단의 높이, r_h, a_h 는 변수이다. $(x_f(t), y_f(t), z_f(t))$, $(x_h(t), y_h(t), z_h(t))$ 는 (3), (4), (5)를 통go 결정하였으므로 m_8 을 제외한 모든 point mass의 궤적이 결정된다. (x_i, y_i, z_i) 를 i 번째 point mass의 궤적이라고 정의하고 이를 (1)에 대입하면 m_8 의 궤적에 해당하는 $x_8(t)$ 에 관한 식 (6)을 얻을 수 있는데, 이는 numerical한 방법으로 계산하였다[13,14]. (x_i, y_i, z_i) 를 (2)에 대입하여 $y_8(t)$ 도 같은 방법으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} m_8(z_8 + g)x_8 - m_8\ddot{x}_8 \\ = X_{ZMP} \sum_{i=1}^8 m_i(z_i + g) - \sum_{i=1}^7 m_i(z_i + g)x_i + \sum_{i=1}^7 m_i\ddot{x}_i \end{aligned} \quad (6)$$

계단 보행에서 좀 더 나은 성능을 보이기 위하여 $(x_h(t), y_h(t))$ 역시 (7)과 같이 보상궤적을 정의하였다.

$$x_{h,comp}(t) = x_h + r_{xh} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (7)$$

$$y_{h,comp}(t) = y_h + r_{yh} \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)$$

$(x_{h,comp}(t), y_{h,comp}(t))$ 를 (7)과 같이 정의하여 사용하면

계단을 보다 안정하게 보행하는 r_{xg}, r_{yh} 를 구할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

앞서 구한 궤적을 MATLAB을 사용하여 시뮬레이션을 구현해 보았다. 그림 2는 시뮬레이션을 통해 r_{xg}, r_{yh}, a_g 의 값을 결정한 후, r_h 를 변화시켰을 때의 ZMP를 나타낸다. 이 보행의 주기는 0.8s, 보폭은 12cm, 계단 높이는 4cm 이다.

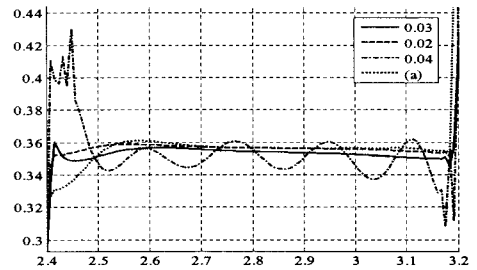
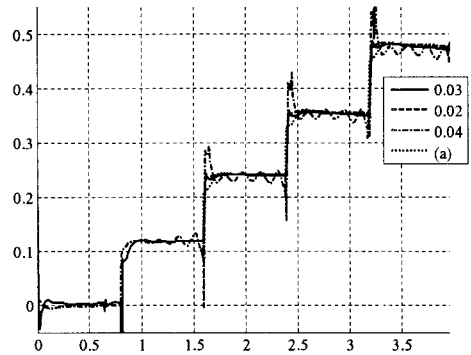


그림 2 r_h 를 변경시킬 때의 sagittal ZMP

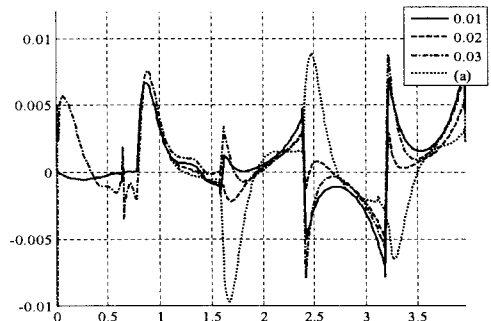


그림 3 r_h 를 변경시킬 때의 frontal ZMP error

그림 2에서 첫 걸음은 평지보행이고 두 번째 걸음은 평지에서 계단을 오르는 보행, 그 이후부터 계단보행이다. sagittal plane의 경우 $r_h=0.02$ 일때 가장 좋은 결과가 나온다. 다른 연구와 비교하기 위하여 S. Kajita [6]가 제시한 방법으로 현재 로봇 모델에 대해 계단 보행 궤적을 생성하고

시뮬레이션 하였다. 그 결과는 그림2와 그림3에서 (a)로 표시하였다. 그림 3은 frontal plane에서의 ZMP error를 표시하였다. Frontal plane에서도 $r_h=0.02$ 일 경우에 가장 좋은 결과가 나올 수 있다. 또한 비교대상으로 삼은 궤적에 비해 안정적인 계단 보행을 하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

이 논문은 계단 보행 궤적을 생성하는 방법에 관한 것이다. 로봇 모델에 큰 영향을 받지 않고 평지에서 안정적으로 보행할 수 있는 MMIPM궤적을 활용하여 ZMP error를 최소화하는 계단 보행 궤적을 생성하였다. 시뮬레이션을 통해 보상궤적을 적절하게 매개변수화 하고 그 값을 찾음으로 동적 보행이 가능한 계단 궤적을 찾을 수 있었다. 이 방법을 통한 연구에서는 현 로봇 모델에서 계단높이 8cm까지 안정적으로 걸을 수 있는 궤적을 생성할 수가 있다. 향후 연구과제로서 본 연구를 통해 구현된 계단 궤적을 실제 로봇에 적용하고 경사면에서의 보행에 적용해 보고자 한다.

참 고 문 헌

[1] Kazuo Hirai & Masato Hirose "The Development of Honda Humanoid Robot", Proc. of International Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp. 1321-1326, May 1998

[2] Yamaguchi, J., Soga, E., Inoue, S. & Takanishi, A. "Development of a Biped Humanoid Robot Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking", IEEE International Conference on Robotics and Automation pp. 368-374, May 1999

[3] Bryan Adams & Cynthia Breazeal "Humanoid Robots:A New Kind of Tool.", IEEE Intelligent Systems, vol.15, pp. 25-31, July-Aug. 2000

[4] Munsang Kim & Sungchul Kang "Development of a humanoid Robot CENTAUR-design, human interface, planning and control of its upper-body.", Proc. of Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, vol.4, pp. 948-953, Oct. 1999

[5] 서영진, "보행로봇의 강인한 동적 걸음새 설계에 대한 연구", 한국과학기술원 박사학위 논문, 1995

[6] Shuuji Kajita & Kazuo Tani "Adaptive Gait Control of a Biped Robot Based on Realtime Sensing of the Ground Profile", Autonomous Robots 4, pp. 297-305, 1996

[7] Y. F. Zheng & J. Shen, "Gait synthesis for the SD-2 biped robot to climb sloping surface" IEEE trans. on Robotics and Automation, 6(1):86-96, 1990.

[8] J. Yamaguchi, A. Takanishi & I. Kato "Experimental development of a foot mechanism with shock absorbing material for acquisition of landing surface position information and stabilization of dynamic biped walking" Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 2892-2899, 1995.

[9] Ching-Long Shih "Gait Synthesis for a biped robot" Robotica, vol 15, pp 599-607, 1997.

[10] Kweon Soo Jeon, Ohung Kwon & Jong Hyeon Park "Optimal Trajectory Generation for a Biped Robot

Walking a Staircase based on Genetic Algorithm" IEEE/RSJ International Conf. on IROS, pp 2837-2842, Sept 28, 2004.

[11] Shuuji Kajita, Osamu Matsumoto & Muneharu Saigo "Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs" Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, pp. 2299-2306, May 2001.

[12] Amos Albert & Wilfried Gerth "Analytic Path Planning Algorithms for Bipedal Robots without a Trunk" Journal of Intelligent and Robotic Systems 36 109-127, 2003.

[13] Taesin Ha, Joo Hyung Kim & Chong-ho Choi "Frontal Plane Motion with Pelvis and Waist Joint Rotations in Bipedal Walking" International Conf. on Control, Automation and Systems, June2-5, 2005.

[14] Atsuo Takanishi, Mamoru Tochizawa, Hideyuki Karaki & Ichiro Kato "Dynamoc Biped Walking Stabilized with Optimal Trunk and Waist Motion" IEEE/RSJ International Workshop in IROS, Sept 4-6, 1989.