

모델예측제어를 이용한 이족보행로봇의 계단을 오르기 위한 궤적생성

김미예*, 조재욱*, 황성욱*, 박종현†

*한양대학교 융합기계공학과

e-mail:jjinmeiyi218@hanyang.ac.kr

Trajectory Generation for Biped Robot for Climbing Stairs Using Model Predictive Control

MeiYi Jin*, Jae-Uk Cho*, Sung-Wook Hwang*, Jong-Hyeon Park†

*Dept. of Convergence Mechanical Engineering, HanYang University

요약

본 논문에서는 모델예측제어를 통하여 2족 보행로봇이 안정적으로 계단을 오르기 위한 궤적을 생성방법을 제안한다. 2족 로봇이 보행할 때 로봇의 두 다리가 지면에 고정되어 있지 않기에 로봇은 불안정한 시스템이다. 로봇의 안정적인 거동을 보장하기 위해 적절한 궤적을 생성해 주는 것은 매우 중요하다. 로봇이 계단을 오르는 동작은 비선형동작이기 때문에 일반적으로 비선형 모델예측제어가 사용 된다. 그러나 비선형 모델예측제어 방법은 많은 계산시간이 소요되고 지역 최적화(local minimum)와 같은 문제가 발생할 수 있다. 이러한 비선형 모델예측제어의 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 계단의 높이를 고려한 선형모델을 생성하였고 그 선형 모델을 적용하여 선형 모델예측제어를 사용하였다. 제안된 방법은 시뮬레이션을 통해 검증된다.

은 계산시간이 많이 소요 되고 지역 최적화 등의 문제가 발생할 수 있다. 이런 단점들을 극복하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔으며[4,5] 본 연구에서는 선형 모델예측제어 방법을 사용하여 계단을 오르는 방안을 제안한다.

1. 서론

로봇산업은 21세기 첨단 기술의 대표로 각종 생산과 사회 생활에 큰 영향을 미치고 있으며 다양한 분야에 대한 연구가 진행되고 있다. 그중에서 보행로봇은 지면에 대한 요구가 비교적 낮으며 장애물을 회피하는 능력이 우수하고 평지나 경사면, 계단 등을 보다 쉽게 오를 수 있다는 장점으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다.

여러 보행로봇에 중에서도 2족 로봇은 매우 불안정한 시스템으로 외부의 영향을 많이 받기 때문에 실생활에서 아직 활용되지 못하고 있으며, 2족 보행 로봇에 대한 연구는 사람과 같은 행동을 구현하기 위해 계속되고 있다[1,2].

이 논문에서는 외부 환경에 영향을 많이 받는 동작 중 하나인 계단을 오르는 동작을 구현하기 위해 모델예측제어를 기반으로 한 2족 보행로봇의 궤적 생성 방법을 제안한다. 모델예측제어는 로봇의 현재 상태를 반영할 수 있고 구속조건을 줄 수 있어 로봇이 계단을 오르는 연구에 많이 사용되는 최적화 방법 중의 하나이다.

일반적으로 계단을 오르기 위한 연구는 비선형 모델을 사용해야 하지만[3] 비선형 모델을 사용한 모델예측제어 방법

본 논문은 먼저 로봇의 동역학 모델과 계단을 오르기 위한 운동하는 좌표계를 설정해 주고 설정해준 모델과 모델예측제어를 통해 로봇이 운동하는 궤적을 생성하였다. 제안된 방법에 대한 성능은 시뮬레이션을 통해 검증 되었다.

이 논문은 2장에서 모델예측제어를 위한 2족 보행 로봇의 동역학 모델에 대하여 설명하며, 3장에서는 상기 모델을 이용한 모델예측제어에 대해 설명한다. 제안된 방법에 대한 검증이 4장에서 보여 지며, 5장의 결론을 통해 논문을 마무리 한다.

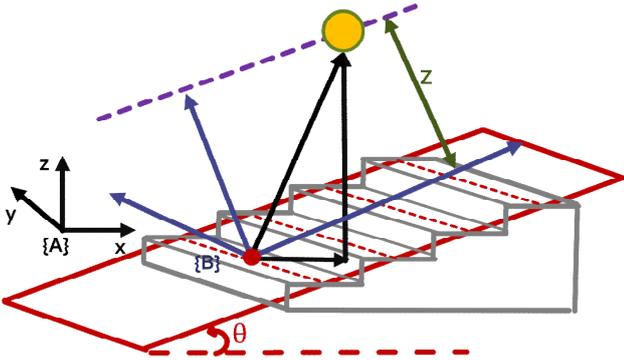
2. 2족 로봇의 동역학 모델

2.1 로봇이 운동하는 평면과 좌표계

로봇이 계단을 오르는 동작은 수평과 수직 방향이 모두 포함된 비선형 운동이다. 일반적으로 이러한 비선형 동작을 구현하기 위해서는 비선형 모델 예측 제어가 필요하지만, 비선형 모델예측제어는 많은 계산 양과 지역 최적화 등의 문제를

가지고 있다. 본 논문에서는 상기 문제를 해결하기 위해 로봇의 동역학 모델을 선형화하여 적용하는 방법을 제안한다.

본 논문에서는 선형모델을 이용하여 [그림 1]과 같이 경사면에 대하여 {B}좌표계를 만들었다. 로봇이 운동할 때 수평면에서의 x, y, z 좌표계를 {A}좌표계라고 한다. 계단의 중심을 연결한 직선이 놓이면서 y축을 지나는 평면을 평면 {B}라 하고 평면 {B}는 로봇이 운동하는 평면이다. 평면 {B}와 수평면사이의 각을 θ 라고 한다.

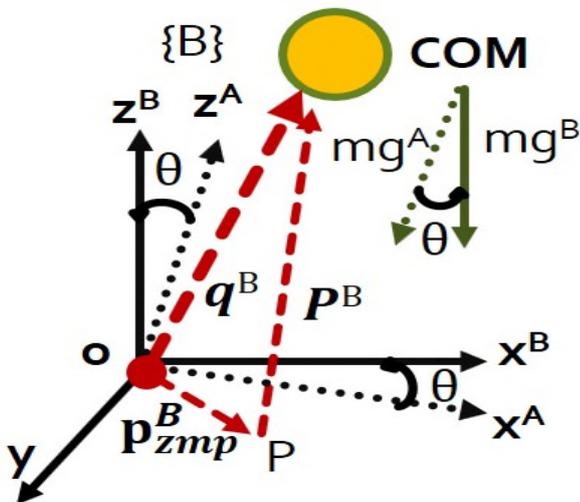


[그림 1] 로봇이 계단을 오르는 평면

{B}좌표계는 평면{B}에 있는 좌표계이다. 로봇은 평면 {B}와 언제나 일정한 높이 Z를 유지하면서 운동한다. {B}좌표계에서 로봇은 선형 역 진자 모델로 볼 수 있다. {B}좌표계는 {A}좌표계에 회전행렬을 곱해서 얻을 수 있다.

2.2 계단에서의 운동 역학 모델

모델예측제어를 사용하기 위하여 평면 {B}에서 로봇의 동역학모델을 아래와 같은 단순화된 역 진자 모델로 가정을 한다.



[그림 2] 역 진자 모델

역 진자 모델에서 P점은 로봇의 ZMP가 위치한 점이고 q^B 는 {B}좌표계에서 로봇의 지지점 o로부터 무게 중심까지의 위치 벡터, P^B_{zmp} 는 reference ZMP에 대한 위치 벡터이며 P^B 는 로봇의 reference ZMP에서 무게 중심까지의 위치 벡터이다. {B}좌표계를 기준으로 P점에 대하여 모멘트 평형식을 세우면 아래와 같다.

$$P^B \times (Mg^B) = P^B \times (M\dot{q}^B) \quad (1)$$

여기서

$$P^B = q^B - P^B_{zmp}$$

$$q^B = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, P^B_{zmp} = \begin{pmatrix} X_{zmp} \\ Y_{zmp} \\ Z_{zmp} \end{pmatrix}$$

{B}좌표계에서의 중력가속도 g^B 는 아래와 같이 표시될 수 있다.

$$g^B = {}^B_A R(\theta) g^A$$

여기서

$${}^B_A R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$g^A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix}$$

g 는 중력가속도를 의미한다.

(1)식으로부터 로봇이 운동하는 x방향 궤적에 대한 ZMP관련 식을 얻을 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$X_{zmp} = X - \frac{1}{w^2} \ddot{X} - \frac{g}{w^2} \sin\theta \quad (2)$$

여기서

$$w = \sqrt{\frac{g \cos\theta + \ddot{Z}}{Z - Z_{zmp}}}$$

로봇은 {B}좌표계에서 일정한 높이 Z를 유지하면서 앞으로 걷기 때문에 z축 가속도와 ZMP는 각각 0이다. 즉,

$$\ddot{Z} = 0, Z_{zmp} = 0$$

또한,

$$w = \sqrt{\frac{g \cos\theta}{Z}}$$

위에서 계산한 모델을 모델예측제어에 적용함으로써 계단을 오르르는 궤적을 생성한다. 이러한 기준 궤적을 이용하여 3장에서는 모델예측 제어방법에 적용한다.

3. 모델 예측 제어

모델예측제어란 예측모델을 이용하여 상태변수나 출력을 예측하고 이를 바탕으로 제약조건이나 목적함

수를 이용하여 최적화하는 방법이다. 이 논문에서는 로봇이 원하는 궤적에 따라 안정적으로 운동하기 위하여 로봇의 현재 상태를 반영한 궤적을 생성해 주어야 하며 그 제어기법으로 모델예측제어를 사용하게 된다.

3.1 시스템 이산화

모델예측제어(Model Predictive Control)를 사용하기 위하여 시스템의 예측모델을 이산화 된 형태로 표현하게 된다.[6] 이 논문에서는 시스템의 입력 u_x 를 x 방향 가속도에 대한 미분 값으로 정하면 샘플링 시간 T에 대하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_x$$

여기서

$$A = \begin{pmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{pmatrix}, x_k = \begin{pmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \\ \ddot{x}_k \end{pmatrix}$$

로봇의 안정적인 보행을 보장하기 위하여 로봇의 ZMP에 대한 정의가 필요하다. (2)식으로부터 ZMP는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$z_k = Cx_k + D$$

여기서

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{w^2} \end{bmatrix}, D = -\frac{g \sin \theta}{w^2}$$

이산 시스템에 대하여 예측구간 N까지의 예측모델 X_{k+1}, Z_{k+1} 을 구할 수 있으며 그 식은 아래와 같다.

$$X_{k+1} = [x_{k+1} \dots x_{k+N}]^T = \bar{A}x_k + \bar{B}u_k \quad (3)$$

$$Z_{k+1} = [z_{k+1} \dots z_{k+N}]^T = P_{zs}x_k + P_{zu}u_k \quad (4)$$

여기서

$$\bar{A} = [A \dots A^N]^T, \bar{B} = \begin{bmatrix} B & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N-1}B & \dots & B \end{bmatrix}$$

$$P_{zs} = [CA \dots CA^N]^T, P_{zu} = \begin{bmatrix} CB & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1}B & \dots & CB \end{bmatrix}$$

x_k 는 현재 상태를 의미하고 $u_k \in R^{N \times 1}$ 는 현재부터 예측구간내의 입력 값으로 x축 가속도에 대한 미분 값을 표시한다. 이 모델의 다음 스텝에서의 위치와 ZMP는 각각 현재 상태와 입력 값으로 구할 수 있다. 이 예측모델을 이용하여 최적화 하여 궤적을 구하기 위하여 모델예측제어가 사용되는데 그 목적함수는 다음 장에서 소개가 된다.

3.2 목적함수

모델예측제어 기반 최적화를 실행하기 위해 목적함수가 세워진다. 목적함수는 2차 계획법(Quadratic Program) 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\alpha}{2} \|u_k\|^2 + \frac{\beta}{2} \|x_{k+1} - x_{k+1}^{ref}\|^2 + \frac{\gamma}{2} \|z_{k+1} - z_{k+1}^{ref}\|^2$$

여기서 x에 대한 reference인 x_{k+1}^{ref} 는 계단에서의 COM의 최적의 위치로 설정하였고 ZMP에 대한 reference인 z_{k+1}^{ref} 는 계단을 오를 때 지지발이 놓인 계단의 위치로 설정하였다. 목적함수는 아래와 같이 일반 형태로 정리될 수 있다.

$$\min \frac{1}{2} u_k^T H u_k + f^T u_k$$

여기서

$$H = \alpha I + \beta P_{PU}^T P_{PU} + \gamma P_{ZU}^T P_{ZU}$$

$$f = \beta P_{PU}^T (P_{PS}x_k - x_{k+1}^{ref}) + \gamma P_{ZU}^T (P_{ZS}x_k - z_{k+1}^{ref})$$

α, β, γ 는 각각 계인 값이고 I는 단위행렬이다. $P_{PU}, P_{PS}, P_{ZU}, P_{ZS}$ 는 각각 (3)식과 (4)식을 현재 상태와 가속도의 미분 값으로 표기한 식의 계수이다. 이 최적화 기법을 통해 {B}좌표계에서 계단을 오르기 위한 안정적인 궤적이 생성되고 로봇이 계단을 오를 수 있게 된다.

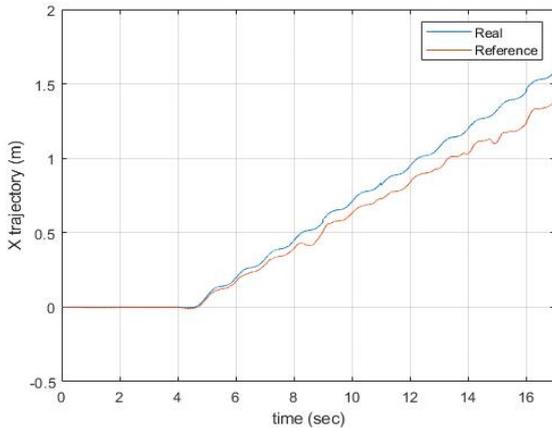
4. 시뮬레이션

2족 로봇의 운동 궤적과 모델예측제어의 성능을 검증하기 위하여 Matlab과 동역학 시뮬레이션 프로그램 Recurdyn을 통하여 시뮬레이션을 진행하였다. 2족 보행 모델로는 다윈모델을 사용하였다.

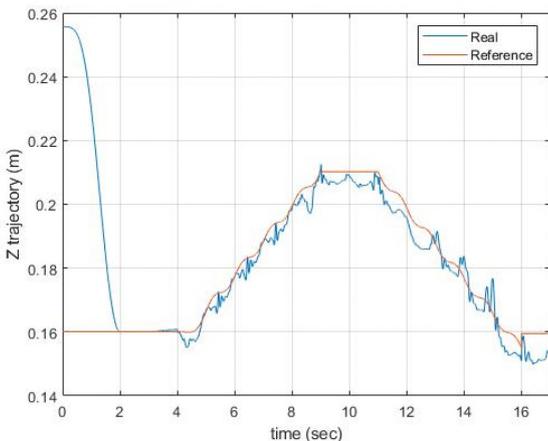


[그림 3] 다윈

설정된 계단의 경사각은 $\frac{\pi}{36}rad$ 이고 보행주기는 1초, 모델예측제어의 샘플링 시간 T는 0.05초, 설정된 α 값은 0.5, β 값은 2, γ 값은 5×10^{-5} 이다. 로봇이 1~2초까지 무릎을 굽히는 동작을 실행하고 2~4초까지 계단을 오르는 준비단계로 멈춰있으며 4초부터 9초에는 주기 1초로 계단4개를 오르다가 9초~11초에서는 평지를 걷고 다시 주기 1초로 계단 4개를 내린다.



[그림 4] x축 reference와 실제 값



[그림 5] z축 reference와 실제 값

시뮬레이션 결과 z축은 설정해준 reference를 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다. 반면 x축은 점차 편차를 보여주는데 이는 슬립현상의 영향으로 보이나 허용범위이므로 다윈 모델은 계단을 따라 잘 가는 양상을 보여준다. 향후 x축 슬립현상에 대한 보완이 필요 할 것으로 보인다.

5. 결론

본 논문에서는 2족 로봇이 계단을 오르는 궤적을 생성하는 방법에 대하여 연구하였다. 선형 모델 예측제어 사용을 위하여 계단에서의 선형 모델을 생성하였고 그것을 모델예측제어 기법에 적용하였다. 제안된 방법의 성능은 시뮬레이션을 통하여 검증하였으며 안정

적으로 계단을 오르는 궤적이 생성됨을 확인하였다. 향후 x축 슬립 현상에 대해 보완하고 계단의 높이가 변하는 상황에서도 로봇이 계단을 오를 수 있는 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

- [1] Andrei Herdt and et. al, "Online Walking Motion Generation with AutomaticFoot Step Placement" HAL, Advanced Robotics, Taylor & Francis, 24 (5-6), pp. 719-737, 2010.
- [2] Qiang Huang and et. al, "A High Stability, Smooth Walking Pattern for a Biped. Robot ", IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1999.
- [3] Reza Heydari and Mohammad Farrokhi, "Robust Model Predictive Control of Biped Robots with Adaptive On-lineGait Generation", International Journal of Control, Automation and Systems, pp. 329-344. 2017.
- [4] Andrei Herdtand Nicolas Perrin and Pierre-Brice Wieber, "LMPC based online generation of more efficient walking motions" IEEE International Conference on Humanoid Robots, pp. 390-395 Nov. 29-Dec. 1, 2012.
- [5] Caroline C. D. Silva, Marco R. O. A. Maximo and Luiz C. S. Goes, "Height Varying Humanoid Robot Walking through Model Predictive Control" IEEE Latin American Robotics Symposium, pp.49-54. 2019.
- [6] Shuuji Kajita and et, al, "Biped Walking Pattern Generation by using PreviewControl of Zero-Moment Point", IEEE International Conference on Robotics & Automation pp. 1620-1626, September 14-19, 2003.