

이족보행 로봇의 안정적인 보행을 위한 MPC 기반 전신 제어 프레임워크

MPC-based Whole-Body Control Framework for Stable Walking of Bipedal Robots

○이 중 환¹, 김 현 주¹, 이 재 흥¹, Dat Thanh Truong¹, 남 성 원², 최 혁 렬^{2*}

¹⁾ 성균관대학교 지능형로봇학과 (TEL: 010-9944-8776; E-mail: bornagainljh@naver.com)

²⁾ 성균관대학교 기계공학부 (TEL: 010-3320-3747; E-mail: sholybest@g.skku.edu)

Abstract Various gait control techniques for legged robots have been researched to enhance walking. Among these, studies on quadrupedal locomotion using single rigid body dynamics and model predictive control have shown excellent performance, and this approach has also been applied to bipedal robots, achieving stable walking. However, limitations arise from the relatively larger leg mass in bipedal robots. To address this, we designed a whole-body controller based on a multi-body dynamics model to generate precise torque commands. Additionally, we established a task hierarchy through prioritized task execution, enhancing walking stability. As a result, the accumulated yaw error issue observed when using only single rigid body dynamics was resolved, enabling the robot's center of mass to accurately follow the desired trajectory, with pitch error maintained within 0.05 rad.

Keywords Bipedal Robots, Model Predictive Control(MPC), Whole-Body Control, Null-space projection, QP

1. 서론

다리를 가진 족형 로봇의 보행을 위한 다양한 보행 제어 기법들이 활발히 연구되고 있다. 그중 하나로, 로봇을 단일 강체로 간주하고 모델 예측 제어(MPC)를 활용한 사족보행 연구는 우수한 보행 성능을 보여 다양한 성과를 이루어 냈다. 이러한 기법은 사족보행 로봇 플랫폼에 국한되지 않고 이족보행 로봇의 보행 제어 연구에도 적용되어 안정적인 보행을 구현하는 데 성공했다 [1]. 그러나 해당 방법은 로봇을 단일 강체로 간주한다는 점에서 한계가 존재한다. 이는 이족보행 로봇의 다리 무게가 사족보행 로봇에 비해 전체 무게에서 차지하는 비중이 비교적 크기 때문이다. 이에 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 전신 제어기(WBC)를 추가하여 이족보행 로봇의 안정적인 보행이 가능한 제어 프레임워크를 제안하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 모델 예측 제어

로봇을 단일 강체로 간주한 단순화된 동역학 모델은 식 (1), (2)로 표현되며 f_i 와 m_i 는 각각 3-D 힘과 Roll을 제외한 2-D 모멘트를 의미한다. 또한, r_i 는 로봇의 CoM에서 각 발까지의 위치 벡터를 나타낸다.

$$m(\ddot{p}_{com} + g) = \sum_{i=1}^2 f_i \quad (1)$$

$$I_G \dot{\omega} \simeq \sum_{i=1}^2 (r_i \times f_i + m_i) \quad (2)$$

위 식을 Space-state form으로 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_{com} \\ \dot{p}_{com} \\ \Theta \\ \omega \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} p_{com} \\ \dot{p}_{com} \\ \Theta \\ \omega \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & R_z^T(\psi) \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} \\ 1_{3 \times 3}/m & 1_{3 \times 3}/m & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} \\ I_G^{-1}[r_1] \times & I_G^{-1}[r_2] \times & I_G^{-1}H & I_G^{-1}H \end{bmatrix}$$

선형화된 동역학 수식은 식 (4)와 같이 이산 시간 형태로 표현할 수 있게 되고 이를 식 (5)와 같은 convex MPC에 대입하면 최적화된 힘과 모멘트가 구해진다.

$$x[i+1] = A_d[i]x[i] + B_d[i]u[i] \quad (4)$$

$$\min_{x,u} \sum_{i=0}^{N-1} \|x[i+1] - x_{ref}[i+1]\|_{Q[i]} + \|u[i]\|_{R[i]} \quad (5)$$

2.2 전신 제어기

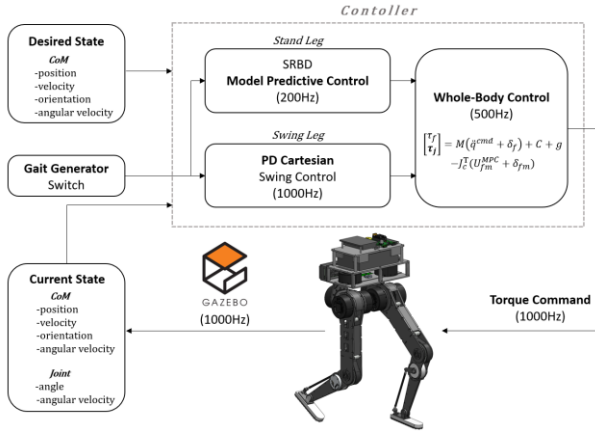


그림 1. 이족보행 로봇 제어 프레임워크

전체 제어 프레임워크는 그림 1과 같으며 전신 제어기는 모델 예측 제어 뒤에 설계된다. 전신 동역학 모델은 단순화된 동역학 모델보다 정교한 모델이므로 식 (5)에서 구한 지면 반력과 모멘트를 활용하여 보다 정확한 토크 명령을 생성할 수 있다.

$$M(\ddot{q}_f) + C + g = \begin{pmatrix} \tau_f \\ \tau_j \end{pmatrix} + J_c^T U_{fm} \quad (6)$$

전신 동역학 모델을 수식으로 표현한 식 (6)을 구성하기 위해, Prioritized Task Execution을 통해 \ddot{q}^{cmd} 를 계산한다. 이때 Null-space projection 기법을 활용하여 1순위와 2순위 Task를 각각 Orientation과 Position으로 설정하고, 이를 바탕으로 식 (7)을 통해 \ddot{q}^{cmd} 를 계산하였다. 각 Task에 대해 \ddot{x}_i^{cmd} 는 식 (8)에 따라 계산되며, 여기서 $\{\cdot\}$ 은 dynamically consistent pseudo-inverse를 의미한다.

$$\ddot{q}_i^{cmd} = \ddot{q}_{i-1}^{cmd} + J_{i|pre}^{dyn}(\ddot{x}_i^{cmd} - \dot{J}_i \dot{q} - J_i \ddot{q}_{i-1}^{cmd}) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{where} \quad J_{i|pre} &= J_i N_{i-1} \\ N_{i-1} &= N_0 N_{1|0} \cdots N_{i-1|i-2} \\ N_0 &= I - J_c^\dagger J_c \\ N_{i|i-1} &= I - J_{i|i-1}^\dagger J_{i|i-1} \end{aligned}$$

$$\ddot{x}_i^{cmd} = \ddot{x}_i^{des} + K_p^{wbc}(\ddot{x}_i^{des} - \ddot{x}_i) + K_d^{wbc}(\dot{x}_i^{des} - \dot{x}_i) \quad (8)$$

Floating Base Dynamics를 유연하게 만족시키기 위해, 식 (9)과 같은 QP 문제를 통해 지면 반력 및 모멘트 보정값과 가속도 명령 보정값을 최적화한다.

$$\min_{\delta_{fm}, \delta_f} \|\delta_{fm}\|_{K_1} + \|\delta_f\|_{K_2} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad S_f \{M(\ddot{q}^{cmd} + \delta_f) + C + g\} &= S_f J_c^T (U_{fm}^{MPC} + \delta_{fm}) \\ lb \leq W(U_{fm}^{MPC} + \delta_{fm}) &\leq ub \end{aligned}$$

최종적으로, qpOASES 솔버를 통해 구한 최적화된 값을 식 (10)에 대입하여 전신 동역학 모델을 반영한 각 관절 토크 명령을 계산한다.

$$\begin{bmatrix} \tau_f \\ \tau_j \end{bmatrix} = M(\ddot{q}^{cmd} + \delta_f) + C + g - J_c^T (U_{fm}^{MPC} + \delta_{fm}) \quad (10)$$

3. 실험 결과

현재 연구실에서 개발 중인 이족보행 로봇 플랫폼을 활용하여, Gazebo 시뮬레이터를 통해 보행 제어 성능을 실험하였다. 실험은 로봇이 전진 방향으로 0.75 m/s의 속도로 보행할 때, 몸통의 Orientation과 Position을 확인하여 제어 성능을 평가하였다.

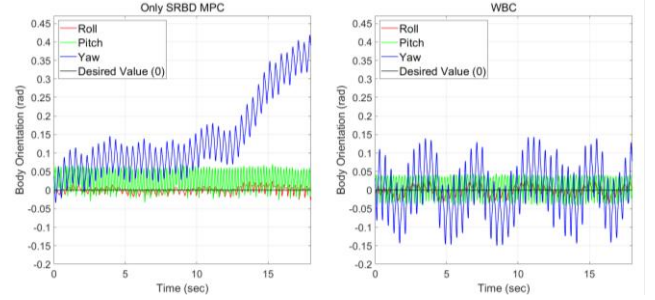


그림 2. 전진 보행 시 몸통의 자세(Orientation)

먼저 Orientation은 그림 2를 통해 Yaw 오차의 누적 문제가 해결되었고, Pitch 역시 0.05 rad 이하로 유지되어 성능 향상이 확인된다.

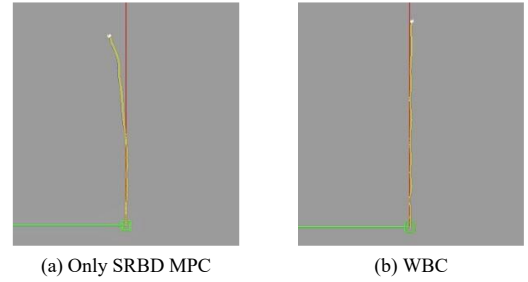


그림 3. 위에서 바라본 전진 보행 시 이동 궤적

마지막으로 Position은 그림 3을 통해 Y축 방향으로의 드리프트 현상이 개선되어, 안정적으로 전진 보행을 수행하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 MPC 기반 전신 제어 프레임워크를 통해 기존 단일 강체 모델의 한계를 극복하고, Null-space projection 기법으로 자세 및 위치 제어 성능을 개선하였다. 실험 결과, 전진 보행 시 몸통의 Orientation과 Position 모두 향상된 결과를 보였다. 향후 실제 하드웨어에 적용하여 성능을 검증할 예정이다.

참고문헌

- [1] J. Li and Q. Nguyen, "Force-and-moment-based Model Predictive Control for Achieving Highly Dynamic Locomotion on Bipedal Robots," 2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Austin, TX, USA, 2021, pp. 1024-1030.