

힘지 극복을 위한 4족 보행 로봇의 입력 보폭 기반 보행 전략

Input Stride-based Walking Strategy of a Quadruped Robot for Overcoming Uneven Terrain

지 원 석¹, 김 현 석², 조 백 규^{3,*}

(Won-Suk Ji¹, Hyun Seok Kim², and Baek-Kyu Cho^{3,*})

¹Department of Mechanics and Design, Kookmin University

²Hyundai-Rotem

³School of Mechanical Engineering, Kookmin University

Abstract: This study presents a walking strategy based on stride input for a quadruped walking robot to navigate uneven terrain. Most quadruped walking robots operate by setting a target walking speed, which may make it difficult to overcome rough terrain such as stepping stones. Therefore, we present a walking strategy that takes one step at a time, focusing on the target stride instead of the target speed. We also present the trajectories of the four legs and body, confirming through simulation that a large 350 kg quadruped walking robot can cross the stepping stones.

Keywords: quadruped, stride-based walking strategy, uneven terrain

1. 서론

최근에는 휴머노이드와 같은 이족 보행 로봇, 견마형 로봇과 같은 사족 보행 로봇 등 다양한 족형 로봇(Legged Robot) 등이 연구되고 있다. 특히, 사족 보행 로봇의 경우 타 보행 로봇보다 다양하게 연구되며 상용화 또한 활발하다[1-4].

많은 수의 사족 보행 로봇들은 사용자가 조이스틱과 같은 별도의 조종장치를 통하여 조종한다. 조종장치를 통해 로봇에 전후좌우 및 회전 방향에 대한 목표 속도 지령이 인가되어 전후좌우 이동 및 방향 전환이 가능하다. 트롯(trotting), 프롱킹(pronking), 갤롭(galloping)과 같은 보행 종류에 목표 속도 지령이 더해져서 기본적인 보행 궤적이 만들어진다. 마크 레이버트는 Raibert heuristic이라고 불리는 다리의 목표 변위를 제시했으며[5,6], 이 역시 목표 속도를 매개변수로 가진다. Raibert heuristic은 다양한 사족 로봇의 기본적인 보행 궤적에 목표 변위로서 사용되고 있으며[7,8,9], 이를 사용하지 않는 로봇들의 보행 궤적들 또한 목표 속도를 매개변수로 가질 것으로 생각한다.



그림 1. 사족 보행 로봇.
Fig. 1. Quadruped robots.

보행 궤적뿐만 아니라, 힘지를 잘 걸기 위해 사족 보행 로봇들에 맞는 다양한 자세 제어기가 연구되어 왔다. 모델 기반의 자세 제어기들을 예로 들면, 이탈리아 IIT는 지면 반력을 계산하기 위해 QP (Quadratic Programming) 기반의 자세 제어기를 설계하였으며, 이는 사족 보행 로봇 HyQ에 적용되어 50도의 V자 횡경사 보행을 성공하였다[10]. 미국 MIT는 최대 0.5초의 미래를 예측하여 지면 반력을 계산할 수 있는 선형 MPC (Model Predictive Control) 기반의 자세 제어기를 설계하여 Cheetah 3에 적용하여 트롯, 갤롭 등 다양한 보행을 수행하였다[11]. 그 외에도, 다양한 자세 제어기들이 연구되어 보행 로봇들에 적용되었다[19, 20].

일반적으로, 사족 보행 로봇들이 걷는 힘지 환경은 그림 2-a와 같이 자갈 등으로 구성된 비평탄 지형과, 그림 2-b처럼 계단 등으로 나타나는 단차 환경이다. 이러한 환경들은, 로봇의 다리가 지면의 어느 부분을 짚더라도, 로봇의 안정성이 크게 훼손되지 않는다. 그렇기 때문에, 이러한 힘지 환경은 앞서 언급한 목표 속도로 생성되는 연속적인 걸음새 궤적과 자세 제어기를 사용하여 극복하는 것이 가능하다. 하지만, 그림 2-c와 같이 특정 지면만을 밟아야 하는 경우는, 목표 속도를 인가하여 보행하기 어렵다. 이런 환경에서는 로봇에게 목표 속도를 인가하며 다리를 연속해서 닫는 것 보다는, 특정 위치에 안정적으로 다리를 뺄면서 한 발자국씩 천천히 보행하는 전략이 안전하다.

본 논문에서 우리의 기여는 다음과 같다. 1. 견마형 로봇이 한 발자국씩 보행하는 방법에 대해 제안하며, 특히 제안된

* Corresponding Author

Manuscript received November 14, 2024; revised December 9, 2024; accepted February 1, 2025

지원석: 국민대학교 기계시스템공학부 대학원생(wonsukpl@kookmin.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-3121-1911)

김현석: 현대로템㈜ 연구원(hyunseok0427@hyundai-rotem.co.kr, ORCID[®] 0000-0003-0024-3240)

조백규: 국민대학교 기계공학부 교수(swano421@gmail.com, ORCID[®] 0000-0001-5138-580X)

※ '이 논문은 2024년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No.20-107-C00-007-02(KRIT-CT-22-001)), 보행 + 주행 복합 이동 제어 기술).



그림 2. 다양한 험지 환경의 종류.
Fig. 2. Different types of uneven terrain environments.

방법에서 보폭에 대한 발 궤적 및 몸체의 궤적을 설계하였다. 2. 동역학 시뮬레이터를 사용한 징검다리 보행 실험을 통해, 설계한 보행 방법이 적합한 것을 확인하였다.

2장에서는 본 논문에서 사용된 로봇 및 시뮬레이션 환경에 대해 소개하며, 3장에서는 입력한 보폭에 대한 다리의 궤적 및 몸체의 궤적 설계에 대하여 다룬다. 4장에서는 시뮬레이션을 통한 징검다리 보행 시나리오의 결과에 대해 다루며, 5장은 결론으로 구성된다.

II. 실험에 사용된 사족 보행 로봇 소개

본 연구에서 사용된 로봇은 군용 목적을 수행하기 위한 대형 견마형 로봇으로 그림 3의 좌측과 같다. 다리는 Hip Roll, Hip Pitch, Knee Pitch의 3자유도로 구성되어 총 12개의 자유도를 가지고 있다. 험지 환경을 보행 모드로 극복하기 위한 네 개의 다리뿐만 아니라, 포장된 길을 빠른 속도로 이동하기 위한 두 개의 바퀴를 갖추고 있으며, 리니어 가이드로 바퀴 축의 수평 위치를 조절할 수 있다. 따라서, 총 15자유도를 가지고 있다. 로봇 다리에 충분한 힘을 제공하기 위해 전기 모터 대신 유압 액추에이터를 동력원으로 사용한다.

로봇의 크기가 일반적인 견마형 로봇들에 비해 훨씬 크며, 동력원인 유압 액추에이터 또한 전기 모터에 비해 구동하기 어렵다. 따라서, 설계한 걸음새 궤적을 검증하기 위해 동역학 시뮬레이터를 사용하였다. 시뮬레이터는 Raisim [12]을 사용하였으며, 시뮬레이션 모델을 그림 3의 우측에 나타내었다. 또한, 로봇의 자세를 제어하기 위해서 지면 반력을 실시간으로 계산할 수 있는 QP 기반의 자세 제어기[10]를 설계하여 적용하였다.

III. 보행 궤적 생성 전략

목표 보폭을 입력받아 한 걸음씩 걷기 위해서, 로봇 다리와 몸체 궤적을 각각 설계하였다. 한 걸음씩 걷는 보행 방식에서, 보행 페이즈는 스탠스 페이즈와 스윙 페이즈로 나뉜다.



그림 3. (좌) 실물 로봇. (우) 시뮬레이션 로봇.
Fig. 3. (Left) Quadruped robot. (Right) Simulation robot.

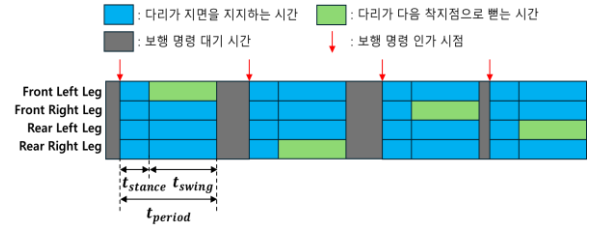


그림 4. Walk 보행 흐름도.
Fig. 4. Sequence of the walk gait.

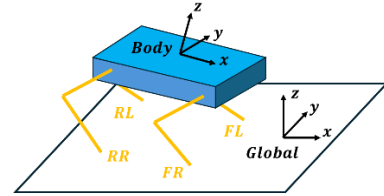


그림 5. Global 좌표계와 Body 좌표계.
Fig. 5. Global and body coordinate systems.

스탠스 페이즈동안에는 로봇의 네 다리가 모두 지면을 밟은 상태로 몸체를 지지하며, 스윙 페이즈동안에는 로봇이 특정 다리를 들어올려 다음 착지점까지 뻗는다. 따라서 스윙 페이즈에서는 로봇이 세 다리로 몸체를 지지한다. 두 페이즈의 길이는 각각 t_{stance} 와 t_{swing} 이며, 둘을 합친 보행 페이즈의 길이는 t_{period} 이다. 한 걸음씩 걸을 때 다리를 움직이는 순서는 왼쪽 앞다리, 오른쪽 뒷다리, 오른쪽 앞다리, 왼쪽 뒷다리 순으로 구성하였다. 보행 페이즈를 완전히 마친 다음에는, 사용자가 목표 보폭을 로봇에 인가할 수 있도록 대기 시간을 두었다. 대기 시간 동안에는 로봇의 네 다리가 지면을 밟은 상태로 자세를 유지한다. 이 내용을 그림 4에 나타내었다.

그림 5는 Global 좌표계와 Body 좌표계를 나타낸다. 이 연구에서 몸체와 다리의 목표 궤적, 그리고 입력 받는 보폭은 Global 좌표계 상에서 입력 받는다.

1. 다리 궤적 생성 전략

궤적을 생성하기 위해서, 목표 위치에 대해 정의하였다. 보행 명령 대기 시간에, 사용자는 보행 명령과 함께 보폭 p^{step} 을 로봇에 인가하게 된다. 따라서, 다리의 보행 전 목표 위치 p^{ref} 와 보행 후 목표 위치 p^{des} 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_{i,x}^{des} \\ p_{i,y}^{des} \\ p_{i,z}^{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{i,x}^{ref} \\ p_{i,y}^{ref} \\ p_{i,z}^{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{i,x}^{step} \\ p_{i,y}^{step} \\ p_{i,z}^{step} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서, 밀첨자 $i = 1,2,3,4$ 는 공중에 들어올려지는 다리를 번호로 표기한 것이다. $p_i^{des} = [p_{i,x}^{des}, p_{i,y}^{des}, p_{i,z}^{des}]^T$ 는 글로벌 좌표계에서 바라봤을 때 공중에 들어올려지는 다리의 목표 위치이며, $p_i^{ref} = [p_{i,x}^{ref}, p_{i,y}^{ref}, p_{i,z}^{ref}]^T$ 는 목표 위치가 갱신되기 전의 글로벌 좌표계에서 바라본 목표 위치이다. 사용자의 목표 입력인 $p_i^{step} = [p_{i,x}^{step}, p_{i,y}^{step}, p_{i,z}^{step}]^T$ 은 몸체 좌표계에서 바라본 목표 보폭을 의미한다.

목표 위치를 정의하였으므로, 다음으로는 목표 위치까지 도달하기 위한 궤적에 대해 설계하였다. 로봇이 다리를 들어 올릴 때, 다리 바로 앞에 장애물이 놓여있는 경우가 있을 수 있다. 다리가 장애물에 걸리지 않으면서 보행하기 위해서는, 다리를 살짝 뒤를 향해 들어올린 뒤 보행해야 한다. 그런 궤적을 생성하기 위한 방법 중, 8차 베지에 곡선(Bezier curve)을 적용하였다. 8차 베지에 곡선은 9개의 제어점(Control point)들을 가지는데, 제어점들의 설정에 따라 다른 곡선이 생성되는 것이 특징이다. 본 연구에서는 다리 바로 앞에 놓이는 장애물을 회피할 수 있도록, 제어점들을 다리의 가동 범위보다 멀리 분포시켰다. 8차 베지에 곡선의 수식을 식 (2)에 나타내었다.

$$\mathbf{p}(t) = \sum_{i=0}^{n=8} \mathbf{P}_i b_{i,n}(t), t \in [0, t_{swing}] \quad (2)$$

식에서 $b_{i,n}(t) = \binom{n}{i} \left(1 - \frac{t}{t_{swing}}\right)^i \left(\frac{t}{t_{swing}}\right)^{n-i}$ 이며, 제어점 $\mathbf{P}_i = [P_{i,x}, P_{i,y}, P_{i,z}]^T$ 이다. 아홉 제어점들의 정보는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{i=0,1,2} &= [p_{i,x}^{ref}, p_{i,y}^{ref}, p_{i,z}^{ref}]^T \\ \mathbf{P}_{i=3} &= [p_{i,x}^{ref}, p_{i,y}^{ref}, h_{swing}]^T + \mathbf{R}_z(\psi)[-0.4, 0, 0.05]^T \\ \mathbf{P}_{i=4} &= \left[\frac{p_{i,x}^{ref} + p_{i,x}^{des}}{2}, \frac{p_{i,y}^{ref} + p_{i,y}^{des}}{2}, h_{swing} \right]^T + \mathbf{R}_z(\psi)[0, 0, 0.1]^T \\ \mathbf{P}_{i=5} &= [p_{i,x}^{des}, p_{i,y}^{des}, h_{swing}]^T + \mathbf{R}_z(\psi)[0.2, 0, 0.1]^T \\ \mathbf{P}_{i=6,7,8} &= [p_{i,x}^{des}, p_{i,y}^{des}, p_{i,z}^{des}]^T \end{aligned}$$

여기에서 h_{swing} 은 다리를 들어올리는 높이이며, \mathbf{R}_z 는 z축에 대한 회전 행렬이고, 매개변수로 사용된 ψ 는 z축에 대한 로봇의 목표 회전 각도이다. Global 좌표계에서 바라보는 스윙 다리의 궤적에 베지에 곡선을 적용한 결과를 그림 6에 $x-z$ 평면 상에서 나타내었다. 비교군은 사인파형 곡선을 선정하였으며, 두 곡선의 시작점과 종료점, 다리의 높이는 모두 $\mathbf{p}^{ref}(0,0)$, $\mathbf{p}^{des}(0.4,0)$ 와 $h_{swing}(0.2)$ 으로 동일하다. 그림 6과 같이 8cm 높이의 장애물을 스윙 다리의 바로 앞에 설치하였을 때, 사인파형 곡선은 장애물과 바로 충돌하는 반면, 베지에 곡선이 적용된 다리 궤적은 장애물에 걸리지 않는 것을 확인할 수 있다. 베지에 곡선 생성에 사용된 제어점들을 같이 표시하였으며, 점선으로 제어점들 사이를 이어 표시하였다.

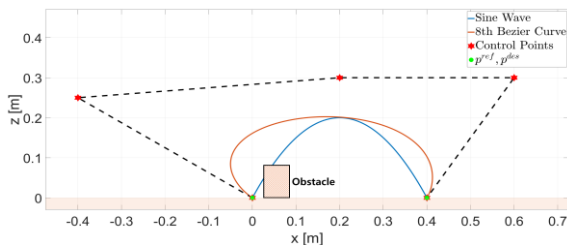


그림 6. 사인파형 곡선과 베지에 곡선의 장애물 극복 비교.
Fig. 6. Comparison of overcoming obstacles in Sine-wave and Bezier curves.

2. 몸체 궤적 생성 전략

보행 로봇의 동적 안정성을 평가할 때, ZMP (Zero Moment Point) [13]가 주로 사용된다. ZMP는 보행 로봇이 지면에 접촉하고 있는 발의 바닥 면에서, 그 면적 내에서 외부 힘의 모멘트가 0이 되는 지점을 의미한다. 이족 보행 로봇의 경우, ZMP를 사용하여 동적 보행의 안정성을 얻은 연구들이 다양하며 Preview Controller [14-17]가 대표적이다. 제어기의 설계를 위해, x 축과 y 축에 대한 ZMP 레퍼런스 궤적 $\mathbf{p}_{zmp}^{ref}(t)$, ZMP 궤적 $\mathbf{p}_{zmp}(t)$, 그리고 CoM의 궤적 $\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t)$ 의 관계를 그림 7에 블록 선도로 나타내었다.

그림 7의 Dynamic ZMP equation을 이산화한 뒤, 수식으로 표현하면 식 (3)과 같다. 아래 설명에서는, 몸체의 x 축 궤적 $\mathbf{x}(k)$ 을 고려하였으며, y 축 궤적 또한 동일하게 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{p}_{zmp,x}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (3)$$

이 때,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= [x(k\Delta t), \dot{x}(k\Delta t), \ddot{x}(k\Delta t)]^T, \\ \mathbf{u}(k) &= u_x(k\Delta t), \\ \mathbf{p}_{zmp,x}(k) &= p_{zmp,x}(k\Delta t) \end{aligned}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^3}{6} \\ \frac{\Delta t^2}{2} \\ \Delta t \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{z}{g} \end{bmatrix}$$

이다. 상태값 $\mathbf{x}(k)$ 는 몸체의 x 축에 대한 위치, 속도, 가속도를 나타낸다. $\mathbf{u}(k)$ 는 시스템의 입력이자 저크(jerk)를 나타낸다. $\mathbf{p}_{zmp,x}(k)$ 는 몸체의 x 축에 대한 ZMP 궤적을 나타낸다. z 는 몸체의 높이를, g 는 중력가속도 상수를 나타낸다. 이산화 시스템의 미소 시간 Δt 는 6ms로 정하였다. 상태공간 방정식의 업데이트를 위해, 입력 $\mathbf{u}(k)$ 를 식 (4)로 정의한다.

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{G}_i \sum_{i=0}^k \mathbf{e}(k) - \mathbf{G}_x \mathbf{x}(k) - \sum_{j=1}^{N_L} \mathbf{G}_p(j) \mathbf{p}_{zmp,x}^{ref}(k+j) \quad (4)$$

이 때, \mathbf{G}_i 와 \mathbf{G}_x , \mathbf{G}_p 는 게인으로서, 계산하기 위한 상세한 내용이 참고문헌[18]에 제시되어 있으므로, 별도의 설명은 생략한다. 게인의 계산에 필요한 변수들인 $I_p = 1, Q_e = 1, Q_x = [0_{3 \times 3}], R = 1.0 \times 10^{-6}$ 으로 정하였다. 오차 $\mathbf{e}(k) = \mathbf{p}_{zmp,x}(k) - \mathbf{p}_{zmp,x}^{ref}(k)$ 로 표현할 수 있으며, N_L 은 Preview

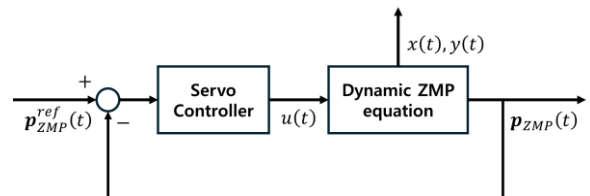


그림 7. ZMP 트래킹 제어를 통한 CoM 궤적 생성 블록 선도.
Fig. 7. CoM Traj. Generator Block diagram as ZMP tracking control.

Controller에 사용할 미래 ZMP 레퍼런스 궤적 $p_{zmp,x}^{ref}$ 의 개수를 의미한다. 본 연구에서 $N_l = 200$ 이다. 몸체의 질량 분포가 균일하다는 가정 하에, ZMP 레퍼런스 궤적 $p_{zmp}^{ref}(k)$ 는 식 (5)와 같다.

$$p_{zmp,x}^{ref}(k) = \frac{\sum_{i=0}^4 C_i(k)p_{i,x}(k)}{\sum_{i=0}^4 C_i(k)} \quad (5)$$

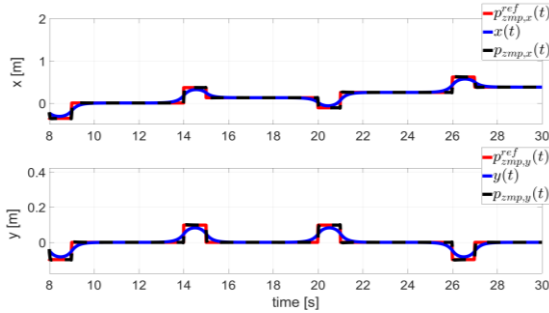


그림 8. Preview Controller를 통해 얻은 몸체 궤적.
Fig. 8. CoM trajectory obtained by Preview Controller.

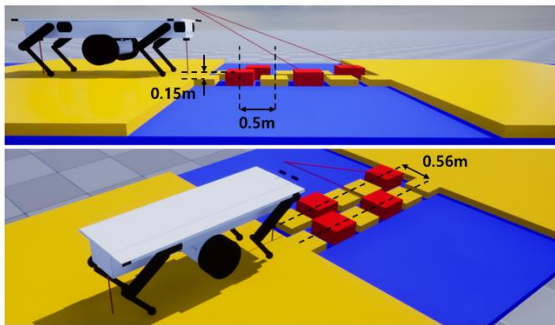


그림 9. 보행 전략 검증을 위한 징검다리 환경.
Fig. 9. Stepping stones environment for walking strategy verification.

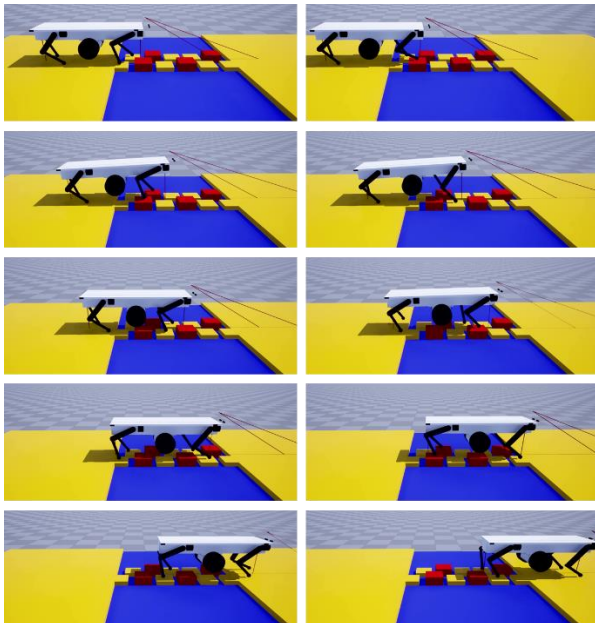


그림 10. 징검다리 위를 걷는 시뮬레이션 스냅샷.
Fig. 10. Successful simulation snapshot of walking on a stepping stones.

$C_i(k)$ 는 i 번째 다리가 계획된 궤적 상 지면에 닿았다면 1을, 닿지 않았다면 0을 나타낸다. $p_{i,x}(k)$ 는 Global 좌표계에서 바라보는 네 다리의 x 축 궤적이다. 우리의 보행 전략에서는 매번 하나의 다리를 목표 지점으로 들어올린 뒤에 다음 보행 명령 전까지 쪽 네 다리가 지면에 닿아 있는 상태를 유지한다. 따라서, ZMP 레퍼런스 궤적 $p_{zmp,x}^{ref}$ 을 미리 만들어줄 수 있다. 설계한 Preview Controller의 ZMP 레퍼런스 궤적, ZMP 궤적과 몸체의 궤적을 그림 8에 나타내었다. 각 다리에 0.5m의 목표 보폭을 인가하였으며, 제어기의 ZMP 궤적이 미리 생성한 ZMP 레퍼런스 궤적을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. ZMP 궤적과 함께 제어기의 결과로서 출력되는 몸체의 궤적 $x(t), y(t)$ 또한 부드러운 곡선으로 출력되어 로봇의 CoM이 지면 접촉 다리들의 면적(지지 폴리곤) 내에 놓이도록 한다. 이에 대한 분석은 다음 장에서 더 자세히 나타내었다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

설계한 보행 궤적 생성기를 검증하기 위해서, 시뮬레이션 상에서 로봇이 징검다리 환경을 건도록 하였다. 징검다리의 단면은 길이 0.4m의 노란색 정사각형으로 정하였다. 징검다리의 보행 방향 간격은 0.5m이며, 징검다리의 좌우 방향 간격은 0.6m로 두었고, 0.15m의 높이를 가지는 붉은 색 징검다리를 중간에 배치하였다. 구성한 실험 환경을 그림 9에 자세히 나타내었다. 실험 방법은, 조종자가 보행 버튼을 클릭 할 때마다 로봇이 한 걸음씩 건도록 하여 징검다리를 끝까지 건널 수 있는지 살펴보는 것으로 하였다. 실험 결과는 그림 10와 같이, 로봇이 한 걸음씩 징검다리를 무사히 건너는 것을 확인하였다.

징검다리를 건널 때 로봇의 안정성을 판단하기 위해서, 그림 11에서 그림 4의 보행 흐름도에 나타낸 세 구간들 각각에 대한 CoM의 궤적과 보행 구간 별 지지 폴리곤을 비교하였다. CoM이 지지 폴리곤의 중심 부근에 있으면서, 연속적인 궤적을 그리며 보행한다면, 로봇이 안정적으로 보행한다고 판단할 수 있다. 그림 11의 첫 번째 그래프는 그림 4의 스탠스 페이즈에 해당하며, 두 번째 그래프는 오른쪽 앞다리(FR)의 스윙 페이즈, 마지막으로 세 번째 그래프는 다음 보행 명령을 대기 하는 시간에 해당한다. 각 페이즈 별 CoM의 시작점과 끝 점은 별도로 표기하였다.

그림 11의 스탠스 페이즈를 먼저 보면, 지면을 딛고 있는 네 다리가 만드는 지지 폴리곤의 형상이 사다리꼴이며, CoM은 지지 폴리곤의 중앙에 위치한 것을 볼 수 있다. 스탠스 페이즈 동안, CoM이 지지 폴리곤의 중앙에서 왼쪽 뒷다리의 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있는데, 다음 페이즈에서 오른쪽 앞다리를 들기 때문에 미리 몸체를 왼쪽 뒤로 이동 시킴으로써 안정적인 자세를 확보하기 위한 점에서 자연스럽다. 두 번째로, 스윙 페이즈에선 오른쪽 앞다리가 공중에 들리기 때문에 지지 폴리곤의 모양이 삼각형으로 바뀌게 된다. CoM은 지지 폴리곤의 중앙 근처에 위치해 있으며, 오른쪽 앞다리가 착지할 때 바뀔 지지 폴리곤의 중심을 향해 계속 움직이는 것을 알 수 있다. 마지막으로, 스윙 페이즈를 마친 뒤 다음 번 보행 명령을 대기하는 동안, CoM은 완전히

지지 폴리곤의 중심으로 이동하는 것을 알 수 있다. 오른쪽 앞다리에 대해서 뿐만이 아니라, 나머지 다리들의 보행 시에도 CoM은 지지 폴리곤 위를 유지하면서 입력받은 보폭에 대한 보행을 수행하였다. 이를 통해, 징검다리와 같은 형지를 극복하기 위한 입력 보폭 기반 보행 전략이 잘 설계되었음을 알 수 있다.

V. 결론

이 연구에서는, 징검다리와 같이 특정 지면만을 밟아야 하는 환경을 극복하기 위해, 속도 대신 보폭을 입력하여 걷는 보행 전략을 제시하였다. 다리의 목표 궤적에는 8차 베지에 곡선을 적용함으로써, 그림 6과 같이 다리의 바로 앞에 놓인 장애물을 극복할 수 있음을 확인하였다. 보행 전략 상 한 발자국씩 걷기 때문에 미래의 ZMP 레퍼런스 궤적을 정확하게 아는 것이 가능하며, Preview Controller를 통해 CoM의 목표 궤적을 생성하였다. 동역학 시뮬레이션 상에서 징검다리 보행 실험을 수행하였으며, 스탠스 페이즈와 스윙 페이즈, 보행 명령 대기 시간 동안 CoM의 목표 궤적과 지지 폴리곤의 관계를 살펴보았다. 세 페이즈 모두에서, CoM은 지지 폴리곤의 중심 근처에서 움직이며, 안정적인 자세를 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

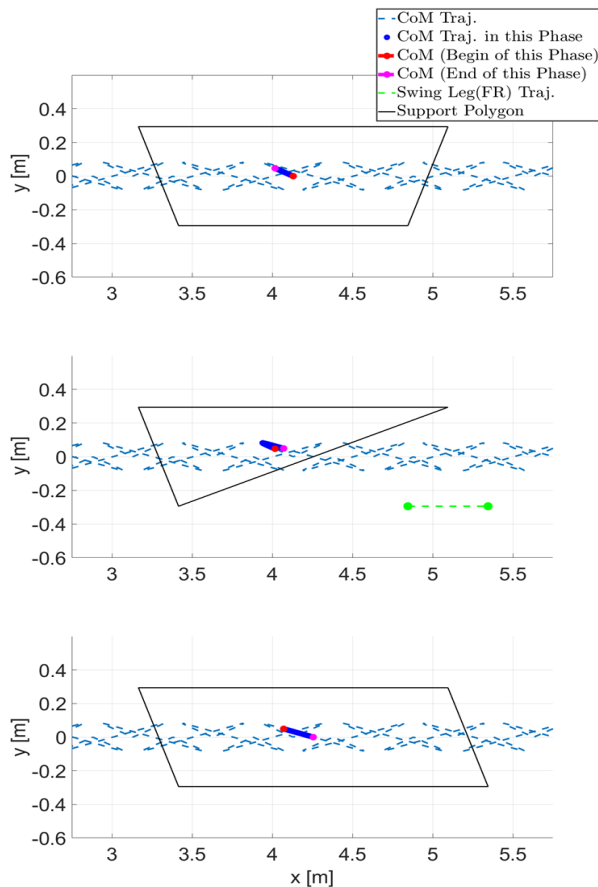


그림 11. 스탠스 페이즈와 스윙 페이즈, 명령 대기 시간 동안의 CoM 궤적과 지지 폴리곤.

Fig. 11. CoM trajectory and support polygon at stance phase, swing phase and command stand-by phase.



그림 12. 실제 로봇에 입력 보폭 보행 전략을 적용하여 징검다리 환경을 극복.

Fig. 12. Applying the walking strategy to real robots to overcome stepping stones environment.

시뮬레이션에서 검증을 마친 뒤, 설계한 보행 전략을 실제 로봇에 적용해보았다. 높이 20cm 이내의 벽돌들을 보행 방향으로 40-50cm 간격으로 배치하여 징검다리 환경을 구성하였다. 사용자가 보폭을 입력하는 대신, 환경 인식 센서를 통해 계산되는 착지점을 사용하여 다리와 CoM의 궤적을 설계하였다. CoM 궤적 설계 시, Preview Controller에서 사용한 미래 ZMP 레퍼런스의 개수 N_L 은 200개이며, 레퍼런스들의 간격은 6ms로 시뮬레이션과 동일하게 진행하였다. 실험 결과, 실제 로봇은 그림 12와 같이 징검다리 환경을 한 발자국씩 걸으며 극복하였다.

향후에는 징검다리 환경에서의 보행 속도를 더 향상시키기 위해서, 사용자의 보행 명령 대기 시간을 최소화하도록 알고리즘을 개선하고자 한다. 또한, 실제 로봇의 경우 시뮬레이션과 다르게, 목표 지점과 다른 곳에 다리를 딛는 경우가 생길 수 있으며, 이 경우 로봇이 징검다리에서 이탈하는 문제를 유발할 수 있다. 로봇이 다리를 잘못 딛는 상황을 방지할 수 있도록 알고리즘을 개선하고자 한다.

REFERENCES

- [1] M. Hutter, C. Gehring, D. Jud, A. Lauber, C. Dario Bellicoso, V. Tsounis, J. Hwangbo, K. Bodie, P. Fankhauser, M. Bloesch, R. Diethelm, S. Bachmann, A. Melzer, and M. Hoepflinger, "Anymal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7758092>
- [2] B. Katz, J. Di Carlo, and S. Kim, "Mini cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control," *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2019.
- [3] <https://shop.unitree.com/products/unitreeyushutechnologydog-artificial-intelligence-companion-bionic-companion-intelligent-robot-go1-quadruped-robot-dog>
- [4] <https://bostondynamics.com/products/spot/>
- [5] M. H. Raibert, *Legged Robots That Balance*. MIT press, 1986.
- [6] M. H. Raibert, "Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot," *Journal of Biomechanics*, vol. 23, pp. 79-98, 1990.
- [7] F. Risbourg, T. Corbères, P.-A. Léziart, T. Flayols, N. Mansard, and S. Tonneau, "Real-time footstep planning and control of the solo quadruped robot in 3d environments," *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2022.
- [8] G. Bleedt, M. J. Powell, B. Katz, J. D. Carlo, P. M. Wensing, and

- S. Kim, "Mit cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot," *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2018.
- [9] D. Kim, J. D. Carlo, B. Katz, G. Bleedt, and S. Kim, "Highly dynamic quadruped locomotion via whole-body impulse control and model predictive control," arXiv preprint arXiv:1909.06586, 2019.
- [10] M. Focchi, A. del Prete, I. Havoutis, R. Featherstone, D. G. Caldwell, and C. Semini, "High-slope terrain locomotion for torque-controlled quadruped robots," *Autonomous Robots*, vol. 41, pp. 259-272, 2017.
- [11] J. D. Carlo, P. M. Wensing, B. Katz, G. Bleedt, and S. Kim, "Dynamic locomotion in the mit cheetah 3 through convex model-predictive control," *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2018.
- [12] <https://github.com/raisimTech/raisimLib>
- [13] M. Vukobratović and B. A. Borovac, "Zero-moment point—thirty five years of its life," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, no. 01, pp. 157-173, 2004.
- [14] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, and K. Yokoi, "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point," *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422)*, vol. 2, 2003.
- [15] S. Shimmyo, T. Sato, and K. Ohnishi, "Biped walking pattern generation by using preview control based on three-mass model," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 11, pp. 5137-5147, 2012.
- [16] K. Yoshida, S. Kunimatsu, and M. Ishitobi, "Biped walking with stretched knee based on inverse kinematics via virtual prismatic joint and ∞ preview control," *2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, IEEE, 2012.
- [17] K. Nishiwaki and S. Kagami, "Simultaneous planning of coM and ZMP based on the preview control method for online walking control," *2011 11th Ieee-Ras International Conference on Humanoid Robots*, IEEE, 2011.
- [18] T. Katayama, T. Ohki, T. Inoue, and T. Kato, "Design of an optimal controller for a discrete-time system subject to previewable demand," *International Journal of Control*, vol. 41, no. 3, pp. 677-699, 1985.
- [19] M.-J. Kim, D. Lim, D. Kim, J. Cha, J. Shin, W. Cha, G. Park, K. Lee, and J. Park, "Advances in humanoid robot walking technologies: A review," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 4, pp. 412-422, 2024.
- [20] Y.-L. Cho and B.-K. Cho, "Hybrid control of wheeled quadruped robot for enhanced mobility and efficiency in diverse terrains," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 8, pp. 863-870, 2024.



지 원 석

2014년 국민대학교 기계시스템공학부 (공학사). 2016년 국민대학교 기계설계학과(공학석사). 2022년~현재 국민대학교 기계시스템공학부 박사과정. 관심분야는 족형 로봇의 보행 궤적 설계 및 최적제어.



김 현 석

2019년 국민대학교 기계시스템공학부 (공학사). 2021년 국민대학교 기계설계학과(공학석사). 2022년~현재 현대로템(주) 무인체계팀 연구원 재직 중. 관심분야는 족형 로봇, 무인 체계.



조 백 규

2002년 KAIST 기계공학 (공학사). 2004년 KAIST 기계공학 (공학석사). 2009년 KAIST 기계공학 (공학박사). 2011년~현재 국민대학교 기계공학부 교수 재직 중. 관심분야는 족형 로봇의 설계 및 제어, 패턴생성 알고리즘.