

강인한 다리 구조 설계에 따른 사족 보행 로봇 제어 안정성 연구

Research on Stability of Control for Quadruped Robot with Robust Leg Structure Design

강호선¹·안재훈²·차현제²·안욱진²·송화영²·이인호[†]

Hosun Kang¹, Jaehoon An², Hyeonje Cha², Wookjin Ahn², Hwayoung Song², Inho Lee[†]

Abstract: This paper presents research on the stability of control for a quadruped robot with two different leg structure designs. The focus of the research is on the design and analysis of the leg structures in terms of their impact on the stability and robustness of the robot's motion. First, a static analysis was performed in the simulation to compare the structural strength of the legs when the same force was applied. Secondly, two quadruped robots were built, each equipped with differently designed legs, and performed trot gait walking in the real world. And the states of the robots and the torques of each joint were analyzed and compared. In conclusion, based on the results of structural analysis in simulation and the actual walking experiments with the robots, it was demonstrated that the legs designed to be structurally robust improved the control stability of the quadruped robot.

Keywords: Quadruped Robot, Robust Design, Static Analysis, Model Predictive Control, Balancing Control

1. 서론

사족 보행 로봇은 네 개의 다리를 이용하여 바퀴형 로봇이 이동하기 힘든 계단, 징검다리 등 다양한 환경에서 운용할 수 있으며, 이족 보행 로봇보다 많은 다리를 이용하여 안정적으로 제어할 수 있는 장점이 있는 로봇이다. 이러한 이유로 최근 다양한 산업 현장에 사족 보행 로봇이 활용되고 있으며, 더욱 폭넓고 안정적인 운용을 위하여 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다.

사족 보행 로봇이 보행하는 상황에서 자세를 안정적으로 유지할 수 있도록 제어 시스템을 구축하는 것은 매우 어려운 과제이다. 여러 가지 이유 중 첫 번째로 사족 보행 로봇은 로봇의 기저(Base)가 지면에 부착되어 있지 않고 공중에 떠 있는 형태인 Floating base system으로써 로봇이 보행과 같은 동작을 수행할 때마다 로봇의 기저 혹은 무게 중심(Center of Mass, CoM)이 움직이게 되어 자세가 불안정해진다. 이러한 특징은 로봇의 기저가 지면 혹은 특정 표면에 부착된 Fixed base system과 비교하여, 사족 보행 로봇이 다양한 활동을 할 때 자세의 불안정성을 일으킨다. 두 번째는 다양한 환경을 보행할 때 속도, 각속도 등 로봇의 상태를 예측하는 것이 매우 어렵다. 로봇의 상태를 예측하기 위해서 다양한 센서를 로봇에 부착하고 그 정보를 이용하게 되며, 대표적으로 이용되는 센서에는 Global Position System (GPS), Inertial Measurement Unit (IMU), Encoder, Depth camera 그리고 LiDAR 등이 있다^{1,2}. 하지만 센서마다 오차 값이 존재하며, 이를 제거하고 필요한 정보를 추정하기 위하여 칼만 필터(Kalman Filter, KF)와 같은 다양한 센서 융합 알고리즘과 로봇 기구학 등을 사용하게 된다^{3,4}. 하지만, 미끄러운 표면이나 모래 사장과 같은 지형에서 내딛는 다리의 갑작스러운 외란에 의해 추정 값이 부정확해진다⁵. 로봇 상태 정보의

Received : Jan. 27. 2023; Revised : Feb. 24. 2023; Accepted : Mar. 16. 2023

* This research was supported by 2021 BK21 FOUR Program of Pusan National University

* This work was supported by Police-Lab 2.0 Program (www.kipot.or.kr) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT, Korea) & Korean National Police Agency (No. 210121M05)

* This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2021R1C1C1009989)

1. PhD Student, Department of Electrical and Electronics Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (hosun7379@pusan.ac.kr)

2. MS Student, Department of Electrical and Electronics Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (dkswogns46, chahyun9823, wookjinahn5, dasdas12002@pusan.ac.kr)

† Assistant Professor, Corresponding author: Department of Electronics Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (inholee8@pusan.ac.kr)

부정확성은 제어 안정성을 하락시킨다. 마지막으로 가볍고 충격에 강인한 다리를 설계하는 것이다. 보행 로봇에게 있어 다리는 자세를 유지하거나 다양한 동적 움직임을 수행하기 위한 모든 제어가 이루어지는 핵심적인 부분이다. 본 논문에서 적용한 제어 시스템인 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)는 사족 보행 로봇의 다리 무게가 없고 몸체의 무게만 존재하는 단순 강체 모델(Single Rigid Body Model, SRBM)의 동역학 식을 바탕으로 제어를 수행한다^[6]. 따라서, 몸체와 비교하여 다리의 무게를 가볍게 할수록 단순 강체 모델과의 차이가 줄어들어 정확성을 증대시킬 수 있다. 따라서, 사족 보행 로봇을 제작할 때 필요성에 맞춰 적절하게 로봇 다리를 설계하는 것은 매우 중요하며, 이를 위해서 다양한 형태의 다리와 그에 따른 구동 방법들이 연구되었다.

M. Raibert et al.은 선형 관절 다리(prismatic leg)를 이용한 다양한 보행 로봇을 제작하여 자세 제어 및 hopping과 같은 동적 움직임 제어 등과 같은 연구를 수행하였으며^[7], 이를 바탕으로 다양한 선형 관절 사족 보행 로봇이 파생됐다^[8,9]. 최근에는 선형 관절 다리를 가진 사족 보행 로봇보다는 다관절 다리(articulated leg)를 가진 보행 로봇에 관한 연구가 많이 진행되었다. H. Kimura et al.은 넓은 support polygon과 낮은 무게 중심을 통해 안정성이 높은 sprawling-type의 사족 보행 로봇인 TITAN 시리즈에 관한 연구를 수행하였다^[10]. 또 다른 다리 형태인 mammal-type의 사족 보행 로봇은 sprawling-type의 사족 보행 로봇과 비교하여 빠른 속도, 적은 필요 토크 그리고 보다 좁은 지형에서도 운용이 가능한 장점 덕분에 가장 많이 연구가 진행되었으며, 다양한 종류의 mammal-type 사족 보행 로봇이 제작되었다^[11]. 첫 번째는 모든 무릎이 무게 중심 바깥쪽으로 구부러지는 형태로서, Shandong University (SDU)에서 개발한 Scaff-III가 있다^[12]. 두 번째는 모든 무릎이 무게 중심 안쪽으로 구부러지는 형태로서, Italian Institute of Technology (IIT)의 HyQ^[13], Zurich Federal Institute of Technology (ETH)의 ANYmal이 있다^[14]. 마지막으로 모든 무릎이 같은 방향으로 구부러지는 형태로서, Massachusetts University of Technology (MIT)의 Mini Cheetah가 있으며^[15], 본 논문을 위해 제작된 사족 보행 로봇인 CANINE은 해당 형태를 바탕으로 설계되었다.

본 논문에서는 제작된 다리에 대한 구조적 안정성과 그에 따른 사족 보행 로봇의 제어 안정성을 비교분석하고, 이를 바탕으로 사족 보행 로봇에서 안정적인 다리 설계의 중요성을 설명한다. 비교 분석하는 다리를 설계함에 있어 중요한 요소는 무릎 관절(knee)로의 동력 전달 방식이다. CANINE 사족 보행 로봇은 기본적으로 모터를 몸체에 최대한 가까이 위치하기 위하여 무릎이 아닌 각 대퇴부(hip)에 3개의 모터를 배치시켜 대퇴부 관절의 roll과 pitch 운동에 대해서는 직접적인 동력 전달이 가능하지만, 무릎 관절로의 동력 전달은 간접적으로 수

행하여야 한다. 따라서, 본 논문에서는 four-bar linkage 방식과 timing belt 방식의 무릎 동력 전달부를 바탕으로 두 가지 구조의 다리를 설계하였다. 또한, 설계된 다리는 유한 요소 해석(Finite Elemental Analysis, FEA)을 바탕으로 구조 해석을 수행하였고, 이를 통해 두 다리의 구조적 안정성을 비교 분석하였다. 실제 로봇의 제어 안정성을 평가하기 위하여 MPC 기반의 제어를 적용한 두 형태의 사족보행 로봇에 대하여, 보행 상황에서의 로봇과 다리 상태를 비교 분석한다. 이를 바탕으로 사족 보행 로봇의 안정적 제어를 위하여 구조적으로 강인한 다리 설계의 중요성을 보여준다.

2장에서는 설계한 사족 보행 로봇의 제어 시스템을 stand leg와 swing leg 측면으로 나누어 설명한다. 3장에서는 두 가지 형태의 로봇 다리의 시뮬레이션에서의 구조해석과 이에 따른 안정성을 비교하여 다리 최적 설계의 중요성을 설명한다. 4장에서는 두 형태의 다리를 각각 부착한 사족 보행 로봇들이 제자리 보행하는 상황에서의 자세 안정성을 비교 검증하는 실험 및 결과를 보여준다. 5장에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구 계획을 제시한다.

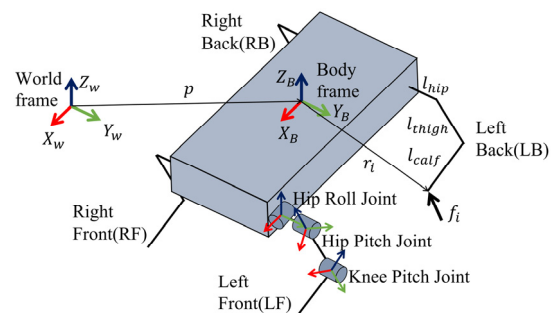
2. 제어 시스템

2.1 Single Rigid Body 동역학

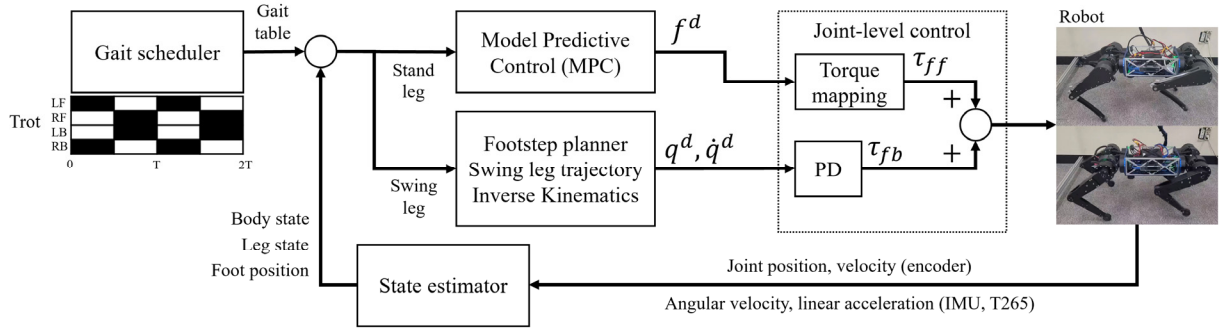
본 논문에서 설계한 사족 보행 로봇을 제어하기 위해 적용한 모델 예측 제어의 계산 시간 단축과 비선형 모델인 사족 보행 로봇을 single rigid body로 단순화한 모델을 사용한다. 이때 다리 무게는 고려되지 않으며, 각 다리마다 hip roll, hip pitch 그리고 knee pitch 총 12개의 joint를 비롯한 좌표계와 로봇 모델은 [Fig. 1]에서 볼 수 있다. 이를 바탕으로 아래 식 (1)과 식 (2)의 단순화된 동역학 식으로 표현한다.

$$m\ddot{p} = \sum_{i=1}^c f_i - mg \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} (I\dot{w}) = \sum_{i=1}^c (r_i \times f_i) \quad (2)$$



[Fig. 1] Our single rigid body robot model coordinate systems



[Fig. 2] Overall control framework

여기서, $m \in \mathbb{R}$ 은 SRBM을 통해 단순화시킨 로봇의 무게, $p \in \mathbb{R}^3$ 는 전역 좌표계 기준 로봇의 위치, $c \in \mathbb{R}$ 는 지면과 닿은 stand leg의 개수, $f_i \in \mathbb{R}^3$ 는 i 번째 다리에 가해지는 지면 반력(Ground Reaction Force, GRF), $g \in \mathbb{R}^3$ 는 중력 가속도, $I \in \mathbb{R}^3$ 는 로봇의 관성 모멘트, $w \in \mathbb{R}^3$ 는 로봇의 각속도 그리고 $r_i \in \mathbb{R}^3$ 는 로봇 좌표계 기준 i 번째 stand leg의 발끝 위치를 의미한다.

단순화한 동역학식을 바탕으로 [Fig. 2]의 보행 제어 시스템을 구성한다. 먼저, 사족 보행 로봇의 보행을 위하여 gait scheduler에서 보행 패턴을 생성하고, 이에 따라 각 다리의 지면 접촉 여부가 판단된다. 여기서, 지면 접촉 중인 다리를 stand leg라고 하며 보행 중 자세를 흔들림없이 안정적으로 유지하도록 하고, 지면에서 발을 떼어내어 목표 위치로 이동하기 위해 움직이는 다리를 swing leg라고 한다. 이어지는 2.2장과 2.3장에서는 각각 stand leg와 swing leg 측면에서 CANINE의 제어 시스템을 설명한다.

2.2 Stand leg 제어 시스템

CANINE의 stand leg를 제어하기 위하여 MPC를 적용하여, 로봇이 현재 시간 t 의 위치부터 $t+h\Delta t$ 시간의 목표 위치까지의 경로를 기반으로 현재 stand leg에 가해져야 할 최적의 지면 반력을 계산한다. 여기서 h 는 MPC horizon을 의미한다.

2.2.1 모델 예측 제어 기반 지면 반력 추정

MPC를 이용하여 지면 반력을 추정하고, 이를 이용하여 stand leg를 제어하는 전반적인 시스템은 기본적으로 MIT Cheetah에 적용된 MPC 제어를 바탕으로 구축되었다^[16]. 먼저, SRB를 통해 단순화한 동역학 식에서 로봇 자세의 roll과 pitch 각도와 각속도가 매우 작아서 무시 가능하다는 추가적인 가정을 통하여, 아래의 식 (3)-(8)과 같이 더욱 간단한 행렬 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}X = AX + Bu + g \quad (3)$$

$$X = [\theta^\top \quad p^\top \quad w^\top \quad \dot{p}^\top]^\top \quad (4)$$

$$u = [f_1^\top \quad \dots \quad f_c^\top]^\top \quad (5)$$

$$g = [0_{1 \times 3} \quad 0_{1 \times 3} \quad 0_{1 \times 3} \quad g^\top]^\top \quad (6)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & R_z(\psi) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & \dots & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \dots & 0_{3 \times 3} \\ I^{-1}[r_1]_\times & \dots & I^{-1}[r_n]_\times \\ 1_{3 \times 3}/m & \dots & 1_{3 \times 3}/m \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $X \in \mathbb{R}^{12}$ 는 로봇 몸체의 현재 상태를 의미하고 세부적으로 orientation, global position, angular velocity와 linear velocity를 나타낸다. $[r_i]_\times$ 는 cross product를 skew-symmetric matrices로 표현하여 행렬식을 계산하였다. 식 (3)은 continuous-time의 동역학 식이므로, MPC 적용을 위하여 discrete-time의 동역학 식으로 변환하면 아래 식 (9)-(11)과 같다.

$$X(k+1) = AX(k) + Bu(k) \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & R_z(\psi)\Delta t & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3}\Delta t \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & \dots & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \dots & 0_{3 \times 3} \\ I^{-1}[r_1]_\times \Delta t & \dots & I^{-1}[r_n]_\times \Delta t \\ 1_{3 \times 3}\Delta t/m & \dots & 1_{3 \times 3}\Delta t/m \end{bmatrix} \quad (11)$$

Discrete-time으로 표현된 동역학 행렬식을 MPC에 적용하여 최적의 지면 반력을 추정하기 위하여 quadratic program (QP)을

이용한다. 이를 위해 MPC horizon, k 까지의 추정 상태 벡터 $X \in \mathbb{R}^{12k}$ 와 목표 상태 벡터 $X_{ref} \in \mathbb{R}^{12k}$ 를 weighted least squared (WLS)에 적용하여 오차를 최소화하기 위한 목적 함수(objective function)를 식 (12)-(13)과 같이 나타낸다.

$$J(U) = \|X - X_{ref}\|_L + \|U\|_K \quad (12)$$

$$X = A_{QP}X_0 + B_{QP}U \quad (13)$$

여기서, $L \in \mathbb{R}^{12k \times 12k}$ 와 $K \in \mathbb{R}^{3ck \times 3ck}$ 는 각각 상태에 대한 가중치 행렬과 지면 반력 힘 $U \in \mathbb{R}^{3ck}$ 에 대한 가중치 행렬을 의미한다. 또한, $X_0 \in \mathbb{R}^{12}$ 는 로봇의 현재 상태 벡터를 의미하며, $A_{QP} \in \mathbb{R}^{12k \times 12k}$ 와 $B_{QP} \in \mathbb{R}^{12k \times 3ck}$ 는 식(10)과 식(11)을 MPC horizon인 k 와 지면에 접촉 중인 stand leg 개수인 c 에 맞춰 확장한 행렬로써, 식 (9)를 초기 상태 벡터를 바탕으로 식 (14)-(17)과 같이 MPC horizon 0부터 k 까지 전개하여 계산된다.

$$X[k] = D_k X_0 + D_{k-1} B_0 u_0 + \dots + B_{k-1} u_{k-1} \quad (14)$$

$$D_k = A_0 A_1 \dots A_{k-2} A_{k-1} \quad (15)$$

$$A_{QP} = [D_1 \quad D_2 \quad \dots \quad D_k]^\top \quad (16)$$

$$B_{QP} = \begin{bmatrix} B_0 & 0_{12 \times 3c} & \dots & 0_{12 \times 3c} \\ D_1 B_0 & B_1 & \dots & B_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_k B_0 & D_{k-1} B_1 & \dots & B_{k-1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

수식화 한 목적 함수 식 (12)는 qpOASES open source를 활용하여 QP를 계산하여 최적의 힘을 추정한다^[17]. 이때 목적 함수를 식 (18)-(21)과 같은 QP standard form으로 변형하여 사용한다.

$$\min_U \frac{1}{2} U^\top H U + U^\top g \quad (18)$$

$$\text{subject to } \underline{c} \leq C U \leq \bar{c} \quad (19)$$

$$H = 2(B_{QP}^\top L B_{QP} + K) \quad (20)$$

$$g = 2B_{QP}^\top L (A_{QP} X_0 - X_{ref}) \quad (21)$$

여기서, C 는 friction cone 형태로 계산된 최소/최대 힘에 대한 부등식 제약 조건을 가지는 제약 행렬(constraint matrix)이다.

2.2.2 지면 반력을 이용한 목표 관절 토크 계산

MPC를 통해 예측한 요구 지면 반력은 로봇 다리 자코비안을 이용해 feedforward 토크 값으로 변환하여 각 joint를 제어한다. 또한, 제어 안정성 향상을 위해 PD 제어기를 추가하여 joint

상태 값에 대한 feedback을 수행한다. 이는 식 (22)와 같다.

$$\tau_j^{d, st} = J_j^\top f^d + K_{P, st} (q_j^d - q_j) + K_{D, st} (\dot{q}_j^d - \dot{q}_j) \quad (22)$$

여기서, j 는 stand leg 번호, $\tau_j^{d, st} \in \mathbb{R}^3$ 는 stand leg의 각 joint에 대한 요구 토크, $J_j \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 는 자코비안, $f^d \in \mathbb{R}^3$ 는 MPC를 통해 획득한 요구 지면 반력, $q_j \in \mathbb{R}^3$ 와 $\dot{q}_j \in \mathbb{R}^3$ 는 모터 encoder 센서로 획득한 관절의 위치와 속도, $q_j^d \in \mathbb{R}^3$ 와 $\dot{q}_j^d \in \mathbb{R}^3$ 는 각 관절의 요구 위치와 속도 그리고 $K_{P, st} \in \mathbb{R}^3$ 와 $K_{D, st} \in \mathbb{R}^3$ 는 각각 stand leg에 대한 P gain과 D gain이다.

2.3 Swing leg 제어 시스템

Swing leg는 현재 위치에서 다음 위치로 이동하기 위하여 실질적으로 걸음을 하는 다리이므로, 지면과 맞닿아 있지 않다. 따라서, stand leg와는 다르게 지면 반력의 추정을 통한 제어를 적용할 수 없으므로, 아래의 PD 제어 식 (23)을 적용하여 swing leg 경로를 따르도록 제어한다.

$$\tau_j^{d, sw} = K_{P, sw} (q_j^d - q_j) + K_{D, sw} (\dot{q}_j^d - \dot{q}_j) \quad (23)$$

여기서, j 는 swing leg 번호, $\tau_j^{d, sw}$ 는 swing leg의 각 joint에 대한 요구 토크 그리고 $K_{P, sw}$ 와 $K_{D, sw}$ 는 각각 swing leg에 대한 P gain과 D gain이다.

2.3.1 Swing leg의 Footstep 생성

Swing leg의 PD 제어를 수행하기 위하여 먼저 목표 footstep 위치를 생성한다. Footstep 위치는 매 time step마다 갱신되어 자세의 불균형이 발생했을 때 이를 보상할 수 있도록 한다. Footstep 생성 수식은 Raibert heuristic과 회전에 의한 원심력을 바탕으로 아래 식 (24)와 같이 전개한다^[18].

$$p_{foot}^{next} = p_{shoulder} + \frac{T}{2} v + k(v - v^{cmd}) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h}{g}} v \times w^{cmd} \quad (24)$$

여기서, T 는 swing phase의 시간, v 와 v^{cmd} 는 로봇 몸체의 현재 선속도와 목표 선속도, w^{cmd} 는 로봇 몸체의 각속도 그리고 k 는 선속도의 feedback gain 상수 값이다.

2.3.2 베지에 곡선 기반 swing leg 경로 생성

계산된 footstep의 위치로 swing leg를 움직이기 위한 경로를 생성하기 위하여 아래 식 (25)의 4차 베지에 곡선을 이용한다. 이는 2차 곡선과 유사하지만 시작점과 도착점을 지정하면

간단한 수식으로 시간에 따른 경로를 생성하기 용이하며, 조절점(control points)을 조정하여 간단하게 발을 내딛고 떼는 각도를 조절할 수 있는 장점이 있다.

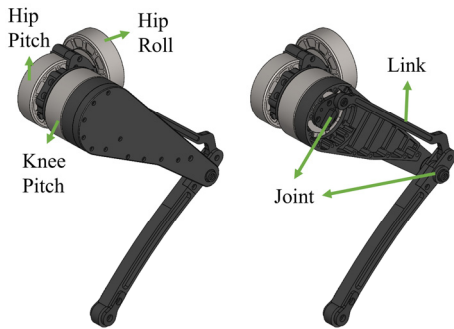
$$p_{foot}(t) = \sum_{i=0}^3 B_i \binom{3}{i} t^i (1-t)^{3-i} \quad (25)$$

여기서, B_i 는 조절점으로 4차 베지에 곡선에서는 4개의 조절점을 가지고 있으며, $0 \leq t \leq 1$ 은 기존 footstep 위치에서 다음 footstep 위치까지 이동하는데 걸리는 시간을 최소화해 정규화 한 시간을 이용한다.

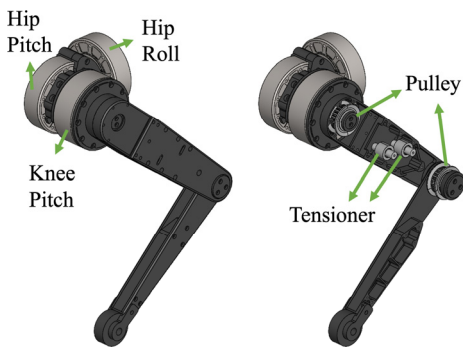
3. 다리 구조 설계 및 해석

3.1 사족 보행 로봇 다리 설계

SRB로 단순화하여 MPC 기반의 제어를 사족 보행 로봇에 적용하기 위하여, 전체 무게에서 다리가 차지하는 무게를 최대한 줄여야 한다. 이를 위해서 CANINE은 모든 모터를 각 다리의 대퇴부에 배치시켰다. 따라서, 대퇴부 관절의 움직임은 모터가 직접적으로 동력을 전달할 수 있지만, 무릎 관절의 동력은 간접적으로 전달해야 한다. 이를 위해서 [Fig. 3]의 four-bar linkage 형태와 [Fig. 4]의 timing belt 형태의 동력 전달



[Fig. 3] Leg structure of leg-F



[Fig. 4] Leg structure of leg-T

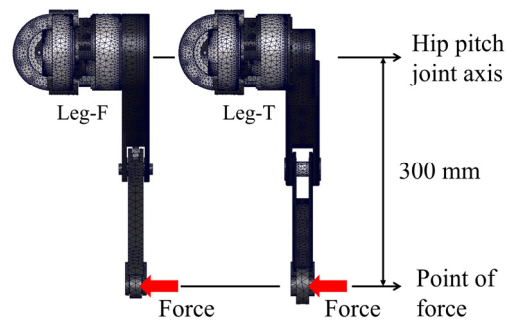
방식을 가진 두 종류의 다리 구조를 설계하였다. Timing belt 구조 측면에서 four-bar linkage 구조와 비교하여 일반적으로 폴리 벨트가 링크보다 가벼워 보행 시 swing leg의 흔들림이 적으며, 알맞은 폴리 벨트가 있다면 설계하기 용이하다. 또한, 360도 회전이 가능하여 가동 범위가 넓은 장점이 있다. 하지만, 마모로 인한 낮은 내구성에 의해 장기간 사용 시 일정하지 않은 장력으로부터의 오차가 발생할 가능성이 있다. 또한 모래, 먼지 등과 같은 외부 이물질에 대해 민감하여 이를 보호하는 적절한 대처가 요구된다. 본 논문에서 표현의 용이성과 전달성을 높이기 위하여 두 다리를 각각 leg-F (Four-bar linkage based leg)과 leg-T (Timing belt based leg)로 표현한다.

첫 번째 버전의 CANINE은 leg-F를 바탕으로 제작하여 2장의 제어시스템을 바탕으로 보행 실험을 하였으나, 지면과의 물리적 상호작용에 의한 구조적 취약적으로 인하여 충분한 보행 안정성을 확보하기 어려웠다. 반면, 이를 보완하여 leg-T를 바탕으로 제작한 두 번째 버전의 CANINE은 충분한 보행 안정성을 확보하였다. 따라서, 이어지는 내용을 통해 두 가지 동력 전달 방식의 차이점보다는 설계된 두 다리를 구조적인 안정성 관점에서 비교하여 보행 안정성의 차이가 발생한 원인을 분석한다.

3.2 다리 구조 해석 결과 비교

3.2.1 정적 해석을 위한 전제 조건

다리의 구조적 조건을 보았을 때 [Fig. 5]와 같이 위/아래보다는 측면으로 힘이 가해졌을 때 가장 큰 응력을 받게 된다. 따라서 동일한 다리 길이에서 일정한 측면 힘이 가해지는 정적 구조 해석을 수행하였다. 각 부품에 대해 재료적 관점이 아닌, 다리의 구조적 차이에서 발생하는 강인함을 비교하기 위하여 모든 부품들은 [Table 1]의 물성치를 가지는 6061-T6 알루미늄이라고 가정하였다¹⁹⁾. 가해지는 힘은 20 ~ 200 N 사이에서 20 N 간격으로 힘의 크기를 변화시키며 변위와 응력을 분석하였다.



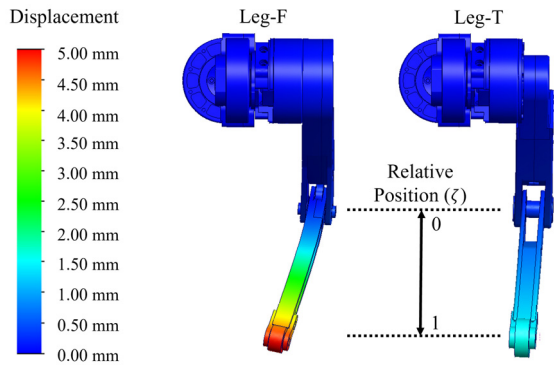
[Fig. 5] Static analysis setting

[Table 1] Mechanical Properties aluminum 6061-T6

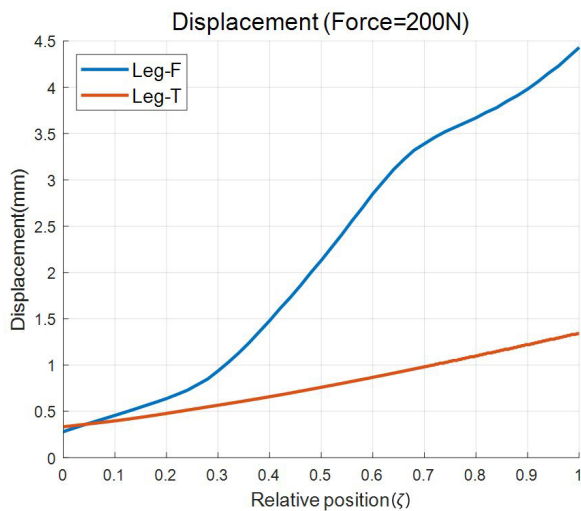
Property	Value
Density	2.7 g/cm ³
Modulus of Elasticity	68.9 GPa
Yield stress	276 MPa
Poisson's Ratio	0.33

3.2.2 변위 비교 분석

설정된 전제 조건에서의 정적 해석 결과 중 가해진 힘에 의해 발생한 변위를 비교 분석하였다. 먼저, [Fig. 6]과 [Fig. 7]은 힘의 크기가 200 N인 경우에 두 다리의 변위를 시각화 및 그래프를 통해 비교한 결과이다. 시각화 이미지는 실제 변위에 대해 10배 확대하여 표현하였으며, 그래프는 가장 변위가 크게 발생한 종아리의 상대적 위치를 따라 나타내었다. 동일한 조건에서 leg-T보다 leg-F가 상대적 위치 1인 다리 끝 지점에서 약 3배 더 큰 변위가 발생하였다. 이를 바탕으로 [Fig. 8]은 외력의 크기를 20 ~ 200 N 사이에서 20 N 간격으로 변화시



[Fig. 6] Displacement visual comparison on 200 N force

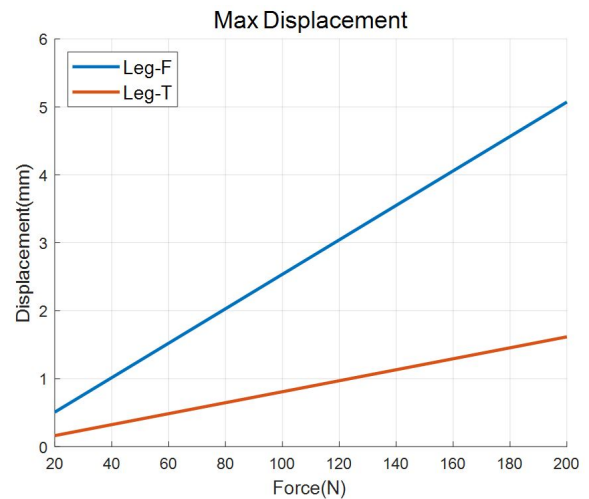


[Fig. 7] Displacement comparison at calf on 200 N force

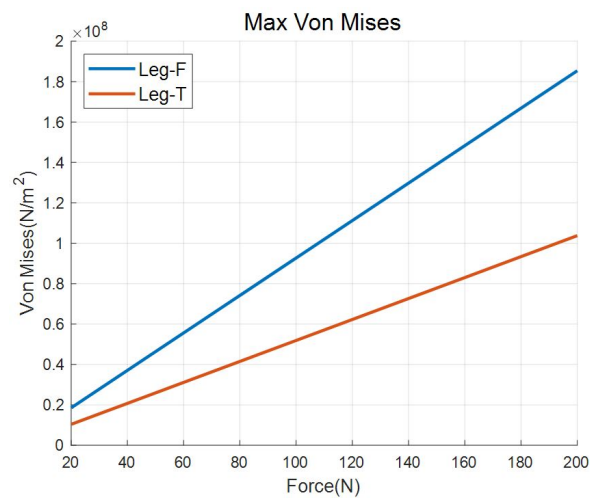
키며, 상대적 위치 1에서의 변위 값을 그래프로 나타내고 각 다리를 비교하였다. [Fig. 7]의 결과와 마찬가지로 leg-F의 최대 변위 값이 leg-T보다 모든 힘의 경우에서 약 3배 더 큰 변위를 가지는 결과를 보였다. 이는 leg-T보다 leg-F가 보행 시 발생하는 발바닥과 지면의 충격에 의해 더 큰 변위 및 진동이 발생하며, 이로 인해 낮은 제어 안정성을 가질 확률이 높다는 것을 의미한다.

3.2.3 응력 비교 분석

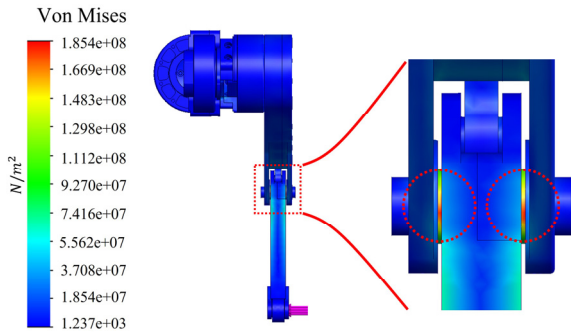
정적 해석에서 응력은 가해진 하중 혹은 힘에 의한 물체의 파손(Failure) 여부를 확인하기 위해 필요하다. 계산된 응력이 재료의 항복 응력(Yield stress)을 초과하게 되면 파손이 발생하므로 재료의 설정이 중요하지만, 본 논문에서는 다리의 모든 재료를 6061-T6 알루미늄으로 가정하여 다리의 구조적 차이만으로 발생하는 응력을 비교하였다. [Fig. 9]는 20 N 간격으



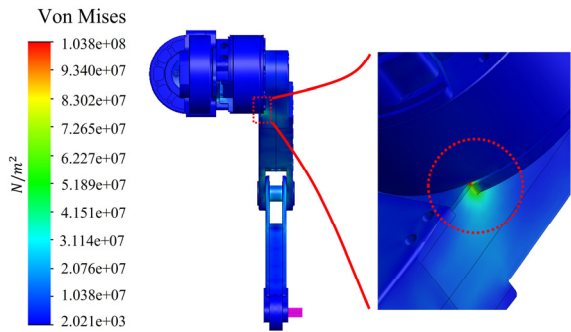
[Fig. 8] Max displacement comparison each force



[Fig. 9] Max von mises comparison each force



[Fig. 10] Stress visualization of the leg-F on 200 N force



[Fig. 11] Stress visualization of the leg-T on 200 N force

로 변화하며 가해지는 힘에 대해 각 다리의 최대 응력을 비교 하였으며, leg-F의 값이 약 2배 더 큰 최대 응력이 발생하는 것을 볼 수 있다.

[Fig. 10]과 [Fig. 11]은 가해진 힘이 200 N 일 때 각 다리의 응력 분포를 시각화 하여 표현한 것이다. [Fig. 10]의 leg-F의 경우 무릎 부분에서 가장 큰 응력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 leg-F의 경우 횡 방향의 큰 힘이 발생할 때 무릎 부분에서 파손이 발생할 확률이 매우 높다는 것을 의미한다. 반면에 수 치상 구조적으로 더 강인한 결과를 보이는 [Fig. 11]의 leg-T의 붉은색 영역을 보면, hip pitch 모터와 허벅지가 만나는 모서리 지점에서 압축되어 최대 응력이 발생하였다. 이는 leg-T의 경우 설계된 다리 전반적으로 힘이 가해졌을 때 파손 가능성이 매우 낮고, 구조적으로 안정하다는 것을 의미한다.

4. 보행 실험 및 결과 비교

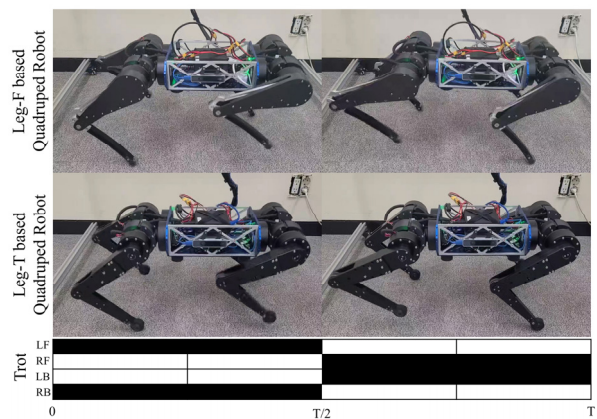
두 가지 다리 설계에 맞춰 제작한 사족 보행 로봇은 [Table 2]의 로봇 parameter를 가진다. 이 때 inertia는 로봇을 SRB로 단 순화하였을 때 수치이다. 제어를 위해 설정한 parameter는 [Table 3]에 정리되어 있으며, 정확한 비교를 위해 두 로봇 모두 동일한 값을 적용하였다. 이에 따라 [Fig. 12]와 같이 trot 보행 실험을 수행하여 각 로봇의 자세 안정성을 비교하였다.

[Table 2] Robot parameter

Robot	Parameter	Value
Leg-F based Quadruped robot	m	14.2 kg
	I_{xx}	0.085609 kg·m ²
	I_{yy}	0.11548 kg·m ²
	I_{zz}	0.17193 kg·m ²
Leg-T based Quadruped robot	m	16.0 kg
	I_{xx}	0.096811 kg·m ²
	I_{yy}	0.13058 kg·m ²
	I_{zz}	0.19442 kg·m ²

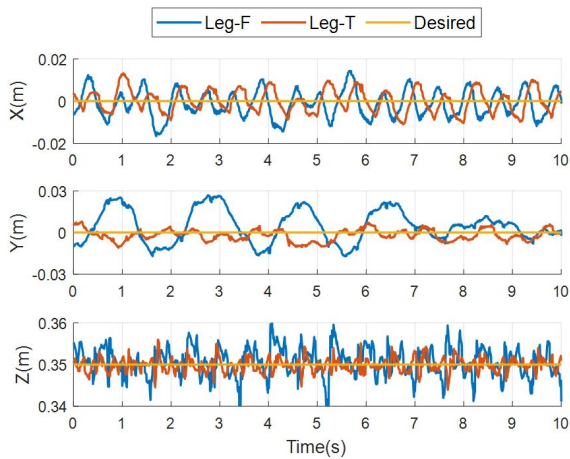
[Table 3] Control parameter

Parameter	Value
T_{Gait}	0.6 s
F_{max}	100 N
μ	0.5
τ_{max}	30 Nm
T_{MPC}	0.02 s
T_{PD}	0.005 s
Swing PD gain (K_p, K_D)	50, 2
Stand PD gain (K_p, K_D)	10, 1
MPC orientation weight	30, 30, 30
MPC position weight	30, 30, 50
MPC angular velocity weight	0.1, 0.1, 0.1
MPC linear velocity weight	0.1, 0.1, 0.1
MPC force weight	0.00001

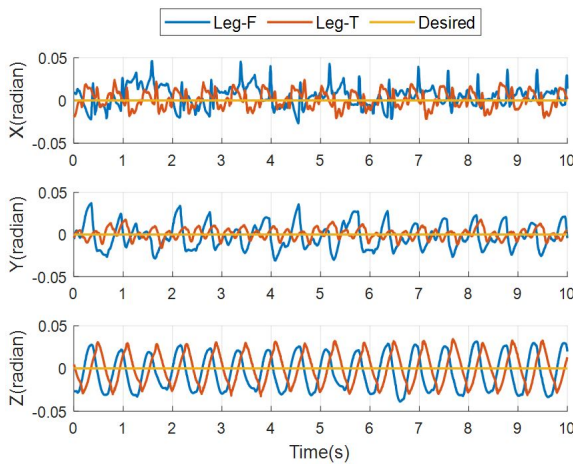


[Fig. 12] Quadruped robot trotting experiment

[Fig. 13]과 [Fig. 14]는 로봇 몸체의 position과 orientation을 비교한 그래프이다. 로봇의 Z축 position에 대해서만 일어나 있는 상태를 유지하기 위해 0.35 m의 일정한 값을 입력하였다. 그래프를 보면 전반적으로 leg-T로 제작한 사족 보행 로봇의



[Fig. 13] Body position comparison with each robot



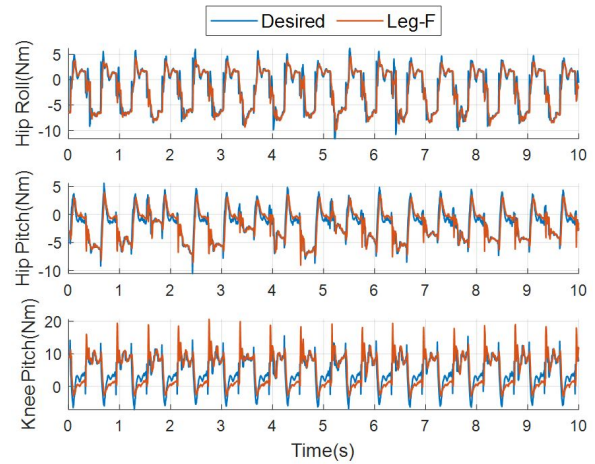
[Fig. 14] Body orientation comparison with each robot

[Table 4] Error result on the Y axis

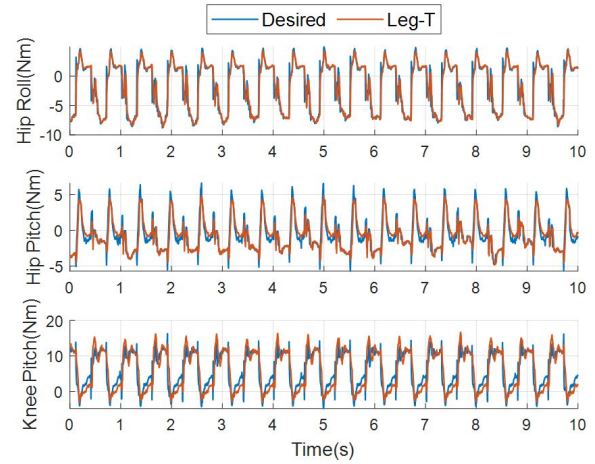
	Leg-F	Leg-T
Average error	10.3 mm	3.7 mm
Max error	26.9 mm	10.9 mm

자세가 적은 오차폭을 가지며 입력한 값에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 특히, [Fig. 13]의 Y축 그래프에서 많은 진동이 발생하는 것은 구조 해석을 통해 로봇의 Y축 방향인 횡방향 힘이 가해질 때 leg-F가 leg-T보다 많은 변위가 발생하는 것과 같은 의미를 가진다. 또한, 구조 해석 결과에서 Leg-F의 변위가 약 3배 정도 크게 나타난 것과 유사하게 [Table 4]의 오차 값을 비교하였을 때 Leg-F의 오차가 2~3배 크게 발생하였다. 그래프와 오차 값을 바탕으로 leg-T로 제작한 로봇의 자세가 leg-F로 제작한 로봇의 자세보다 더 안정적으로 제어가 된 것을 알 수 있다.

[Fig. 15]와 [Fig. 16]은 각 로봇의 left front 위치에 있는 다리의 토크 값을 요구 토크 값과 비교한 그래프이며, [Table 5]는



[Fig. 15] Leg-F leg torque (Left Front leg)



[Fig. 16] Leg-T torque (Left Front leg)

[Table 5] Average error result on the Y axis

Average error	Leg-F	Leg-T
Hip Roll torque	0.8699 Nm	0.6131 Nm
Hip Pitch torque	0.8480 Nm	0.6863 Nm
Knee Pitch torque	2.2301 Nm	2.0402 Nm

이에 대한 평균 오차 값을 나타낸 표이다. 그래프와 평균 오차를 바탕으로 leg-T가 요구 토크 값에 맞추어 더 안정적인 토크 제어를 수행한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 보행 안정성이 낮았던 사족 보행 로봇을 구조적으로 강인하게 설계된 다리로 변경하여 보행 안정성을 높이고, 변경 전/후 각 다리에 대한 구조 해석을 바탕으로 다리의 구조적 안정성이 사족 보행 로봇의 보행 안정성에 끼치는 영

향을 비교 분석하였다. 설계된 다리는 정적 해석을 통해 응력과 변위를 비교하여 구조적 안정성을 평가하였다. 또한, 설계된 다리들을 바탕으로 제작된 두 형태의 사족 보행 로봇에 대해 제자리 보행을 수행하고, 로봇 및 다리의 상태 값을 비교하였다. 결과적으로 시뮬레이션에서 수행한 정적 구조해석 결과에서 더 강인하게 설계된 다리는 실제 환경에서 이를 부착하여 제작한 사족 보행 로봇으로 수행한 보행 실험에서도 더 강인하게 제어가 되었다. 이러한 비교 분석 결과를 토대로 사족 보행 로봇을 안정적으로 운용하기 위하여 구조적으로 강인하게 설계된 다리가 가지는 중요성을 알 수 있다. 향후 연구에서는 안정적으로 설계된 로봇을 바탕으로 다양한 환경에서 강인하게 자세를 유지하는 제어 시스템에 대한 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] Y. Ock, H. Kang, and J. Lee, "Modified ORB-SLAM Algorithm for Precise Indoor Navigation of a Mobile Robot," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 15, no. 3, pp. 205-211, 2020, DOI: 10.7746/jkros.2020.15.3.205.
- [2] B. Choi, G. Kang, Y. Roh, and Y. Cho, "Loosely Coupled LiDAR-visual Mapping and Navigation of AMR in Logistic Environments," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 17, no. 4, pp. 397-406, 2022, DOI: 10.7746/jkros.2022.17.4.397.
- [3] M. Bloesch, M. Hutter, M. A. Hoepflinger, S. Leutenegger, C. Gehring, C. D. Remy and R. Siegwart, "State Estimation for Legged Robots: Consistent Fusion of Leg Kinematics and IMU," *Robotics: Science and Systems VIII*, pp. 17-24, 2013, DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/9816.003.0008>
- [4] M.-K. Jung and J.-B. Song, "Robust Global Localization based on Environment map through Sensor Fusion," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 9, no. 2, pp. 96-103, Jun., 2014, DOI: 10.7746/jkros.2014.9.2.096.
- [5] F. Jenelten, J. Hwangbo, F. Tresoldi, C. D. Bellicoso, and M. Hutter, "Dynamic Locomotion on Slippery Ground," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 4170-4176, Oct., 2019, DOI: 10.1109/LRA.2019.2931284.
- [6] M. Focchi, A. D. Prete, J. 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, May, 2017, DOI: 10.1007/s10514-016-9573-1.
- [7] M. H. Raibert, "Hopping in legged systems - Modeling and simulation for the two-dimensional one-legged case," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-14, no. 3, pp. 451-463, May-Jun., 1984, DOI: 10.1109/TSMC.1984.6313238.
- [8] M. Ahmadi and M. Buehler, "The ARL monopod II running robot: control and energetics," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Detroit, USA, 1999, DOI: 10.1109/ROBOT.1999.770352.
- [9] I. Poulakakis, J. A. Smith, and M. Buehler, "Modeling and experiments of untethered quadrupedal running with a bounding gait: The Scout II robot," *The International Journal of Robotics*, vol. 24, no. 4, pp. 239-256, Apr., 2005, DOI: 10.1177/0278364904050917.
- [10] S. Kitano, S. Hirose, A. Horigome, and G. Endo, "TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking," *Robomech*, vol. 3, no. 8, Mar., 2016, DOI: 10.1186/s40648-016-0047-1.
- [11] H. Chai, Y. Li, R. Song, G. Zhang, Q. Zhang, S. Liu, J. Hou, Y. Xin, M. Yuan, G. Zhang, and Z. Yang, "A survey of the development of quadruped robots: Joint configuration, dynamic locomotion control method and mobile manipulation approach," *Biomimetic Intelligence and Robotics*, vol. 2, no. 1, pp. 1-13, Mar., 2022, DOI: 10.1016/j.birob.2021.100029.
- [12] T. Chen, X. Sun, Z. Xu, Y. Li, X. Rong, and L. Zhou, "A Trot and Flying Trot Control Method for Quadruped Robot Based on Optimal Foot Force Distribution," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 16, pp. 621-632, Jul., 2019, DOI: 10.1007/s42235-019-0050-3.
- [13] C. Semini, V. Barasuol, J. Goldsmith, M. Frigerio, M. Focchi, Y. Gao, and D. G. Caldwell, "Design of the Hydraulically Actuated, Torque-Controlled Quadruped Robot HyQ2Max," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 2, pp. 635-646, Apr., 2016, DOI: 10.1109/TMECH.2016.2616284.
- [14] M. Hutter, C. Gehring, D. Jud, A. Lauber, C. D. 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," *IEEE/RSJ international Workshop on intelligent robots and systems (IROS)*, Daejeon, Korea, 2016, DOI: 10.1109/IROS.2016.7758092.
- [15] B. Katz, J. D. Carlo, and S. Kim, "Mini Cheetah: A Platform for Pushing the Limits of Dynamic Quadruped Control," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, Canada, 2019, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793865.
- [16] J. D. Carlo, P. M. Wensing, B. Katz, G. Bleidt, and S. Kim, "Dynamic Locomotion in the MIT Cheetah 3 Through Convex Model-Predictive Control," *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain, 2018, DOI: 10.1109/IROS.2018.8594448.
- [17] H. J. Ferreau, C. Kirches, A. Potschka, H. G. Bock and M. Diehl, "qpOASES: A parametric active-set algorithm for quadratic programming," *Mathematical Programming Computation*, vol. 6, pp. 327-363, Apr., 2014, DOI: 10.1007/s12532-014-0071-1.
- [18] D. Kim, J. D. Carlo, B. Katz, G. Bleidt, and S. Kim, "Highly Dynamic Quadruped Locomotion via Whole-Body Impulse Control and Model Predictive Control," *Robotics*, 2019, DOI: 10.48550/arXiv.1909.06586.
- [19] G. V. Ferreira, F. L. Neto, and M. Silva Pestana, "Analysis of the mechanical behavior of a composite blade used in hydrokinetic turbines," *23rd ABCM international congress of mechanical engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 2015, DOI: 10.20906/CPS/COB-2015-0385.



강 호 선

2017 부산대학교 항공우주공학과(학사)
2019 부산대학교 전기전자공학과(석사)
2019~현재 부산대학교 전자전기공학과(박사)

관심분야: 로봇틱스, 보행로봇, 딥러닝, 환경 인식



안 옥 진

2022 부산대학교 전자공학과(학사)
2022~현재 부산대학교 전기전자공학과(석사)

관심분야: 로봇틱스, 환경 인식, 보행로봇



안 재 훈

2022 부산대학교 전자공학과(학사)
2022~현재 부산대학교 전기전자공학과(석사)

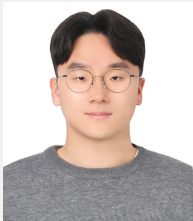
관심분야: 로봇틱스, 기계 학습, 보행로봇



송 화 영

2022 부산대학교 전자공학과(학사)
2023~현재 부산대학교 전기전자공학과(석사)

관심분야: 로봇틱스, 보행로봇



차 현 제

2022 부산대학교 전자공학과(학사)
2022~현재 부산대학교 전기전자공학과(석사)

관심분야: 로봇틱스, 보행로봇, 컴퓨터 구조



이 인 호

2009 한국과학기술원 기계공학과(학사)
2011 한국과학기술원 기계공학과(석사)
2016 한국과학기술원 기계공학과(박사)
2020~현재 부산대학교 전자공학과 조교수

관심분야: 로봇틱스, 기계시스템 자동화, 보행로봇