

IMU 센서 및 강건 제어 기반 실시간 궤적 보정을 통한 사족보행 로봇의 Yaw 안정성 향상 연구

서지덕 · 정대이*

군산대학교 기계공학과

Yaw Stability Improvement of a Quadruped Robot Using IMU-Based Robust Real-Time Trajectory Correction

Jideok Seo · Daeyi Jung*

Department of Mechanical Engineering, Kunsan University, Jeonbuk 54150, Korea

(Received 5 August 2025 / Revised 20 October 2025 / Accepted 20 October 2025)

Abstract : This study presented a design and experimental validation of a quadruped walking robot equipped with a real-time trajectory-correction controller. The designed platform is lightweight and uses eight motors driven via ODrive S1 units, commanded over CAN by a Teensy 4.1. Using only an on-board IMU, roll, pitch, and yaw were estimated to generate correction inputs. A saturated correction law with a boundary layer was formulated, and Lyapunov stability of the closed-loop system was analyzed. Experimental results under a trot gait demonstrate that the proposed method significantly improves straight-path tracking performance and effectively suppresses yaw deviation under external disturbances. Time-series analyses of velocity, yaw, and yaw-rate responses validate the system's performance. The findings verify that the proposed approach offers a practical and cost-effective solution for enhancing straight-line walking stability in quadruped robots.

Key words : Quadruped robot(사족보행 로봇), Yaw stabilization(Yaw 안정화), IMU-based state estimation(IMU 기반 상태추정), Real-time trajectory correction(실시간 궤적 보정), Lyapunov stability(Lyapunov 안정성), Trot gait(대각보행)

Nomenclature

A	: upper-link length, m	ΔF	: corrective propulsive force, N
B	: lower-link length, m	F	: propulsive ground-reaction force, N
R	: distance from hip origin to foot, m	ψ	: yaw angle, rad
X_e, Y_e	: foot (end-effect) coordinates, m	$\dot{\psi}$: yaw rate, rad/s
θ_{hip}	: hip joint angle, rad	$\ddot{\psi}$: yaw acceleration, rad/s^2
α_0	: knee initial offset angle, rad	W	: lateral stance width, m
α_1, α_2	: auxiliary angles for hip computation, rad	I	: moment of inertia about vertical axis, $kg \cdot m^2$
θ_d	: desired joint angle, rad	k_1	: yaw angle gain, N/rad
θ	: measured joint angle, rad	k_2	: yaw rate gain, $N \cdot s/rad$
t	: time, s	k_3	: saturation gain, N
$e(t)$: tracking error, rad	Φ	: boundary layer width for saturation, rad
$u(t)$: control input, rad	SAT	: saturation function with boundary layer, —
k_p, k_i, k_d	: proportional-integral-derivative, —, s^{-1} , s	V	: lyapunov function candidate, —
		\dot{V}	: time derivative of V , —

*Corresponding author, E-mail: [dyjung@kunsan.ac.kr](mailto:djung@kunsan.ac.kr)*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

δ	: bound on force difference, N
k	: discrete time step index, $-$
$\hat{\psi}$: exponentially filtered yaw at step k , rad
$\hat{\dot{\psi}}$: exponentially filtered yaw rate at step k , rad/s
N	: window length for moving average, $-$
$\bar{\psi}$: N -sample moving average of $\hat{\psi}$, rad
$\bar{\dot{\psi}}$: N -sample moving average of $\hat{\dot{\psi}}$, rad/s
β	: exponential smoothing factor, $-$

1. 서론

재난 구조, 탐사, 군사 등 사람이 직접 접근하기 어려운 환경에서 임무를 수행할 이동 로봇의 수요가 증가하고 있다. 바퀴형·케도형 플랫폼은 평탄 지형에서는 빠르고 안정적이지만, 계단이나 자갈길과 같은 불규칙 지형에서는 접지 한계로 기동성이 저하된다. 이러한 한계를 보완하기 위해 다양한 지형을 안정적으로 주파할 수 있는 사족보행 로봇이 차세대 이동 플랫폼으로 주목받고 있다. 예컨대 오리발형(Duck-foot) 구동을 적용한 양서형 사족보행 로봇은 수중과 지상에서의 동시 기동 가능성을 보여주었고,¹⁾ BigDog은 눈·진흙·경사면 등 험지에서 외란을 견디며 보행 가능함을 입증하였다.²⁾

이러한 연구를 바탕으로 사족보행 로봇의 보행 패턴 생성과 제어에 대한 관심이 꾸준히 이어져 왔다. Gehring 등³⁾은 토크 기반 제어에 궤적 최적화를 결합하여 동적 보행을 구현했고, Bellicoso 등⁴⁾은 온라인 비선형 최적화를 통해 보행 계획을 실시간으로 갱신하는 방법을 제시하였다. 복잡 지형에서는 돌발 외란과 접촉 변화를 즉시 반영하는 반응형 제어 프레임워크가 기동 안정성을 높였다.⁵⁾ 한편 상태 추정 측면에서도 고도화가 이루어졌다. 관성·접촉·비전 정보를 결합한 불변 필터링·스무딩은 실시간 추정의 정확도를 끌어올렸고,⁶⁾ 접촉 이벤트를 명시적으로 활용하는 실시간 다중센서 추정기(MUSE)는 보행 중 강건한 추정을 가능하게 하였다.⁷⁾

에너지 효율성 또한 중요한 과제로 다루어졌다. MIT Cheetah 계열 연구는 고효율 구동과 회생 제동을 활용해 고속 보행을 구현하며 설계-제어의 상호작용을 보여주었다.⁸⁾ 최근에는 학습·최적화 기반 접근이 빠르게 확산 중이다. 잠재공간을 활용해 다중 보행 패턴을 학습·전환하는 방법,⁹⁾ Adaptive dynamic programming을 적용한 적응 제어,¹⁰⁾ 유전자 알고리즘(GA)에 기반한 Proportional-Integral-Derivative(PID) 최적화¹¹⁾ 등이 보고되고 있으며, 외란 조건에서의 자세 안정화에 관한 이론적 연구도 병행되고 있다.¹²⁾

국내 연구에서도 시뮬레이터 기반 실증을 통해 시뮬레이션-실험 연계를 확보하고,¹³⁾ HD 맵 기반 Vehicle-in-the-Loop Simulation(VILS) 절차를 도입하여 재현 가능한 평가 파이프라인을 구축한 바 있다.¹⁴⁾ 본 연구는 이러한 절차적 설계 원리를 보행 로봇 환경에 맞게 참조·변형하여 시스템 구성 및 평가 흐름을 설계하였다.

기존 연구는 보행 패턴, 센서 융합, 에너지 효율, 학습·최적화 등에서 많은 성과를 보였지만, 자체 탑재(On-board) 관성 정보만으로 Yaw 축 편차의 누적을 체계적으로 억제하고 안정성을 이론적으로 보장하는 경량 보정기에 대해서는 상대적으로 논의가 부족하다. 특히 링크 기반 다리 구조는 빠른 응답과 높은 속도 특성을 제공하나, 장시간 보행 시 좌·우 추진력 비대칭과 Inertial Measurement Unit(IMU) 바이어스·노이즈 등이 겹치며 Yaw 편차가 누적되어 직선 궤적 유지가 어려워지는 한계를 갖는다.

이에 본 연구는 8 자유도 링크형 사족보행 로봇을 대상으로 다음을 수행한다.

- 1) 기동 성능 검증: 보행 속도 측정 실험으로 링크 구조의 기동 성능을 정량 평가하고, 역기구학(Inverse kinematics) 기반 궤적 계산과 대각보행(Trot gait) 제어의 정상 동작을 확인한다.
- 2) Yaw 안정화 보정기 설계: IMU 기반 Yaw·Yaw-rate를 이용해 좌·우 구동 명령에 보정 오프셋을 주입하고, 포화(Saturation)와 경계층(Boundary layer)을 도입하여 채터링을 억제하는 경량 보정기를 제안한다.
- 3) 안정성 해석 및 실증: 제안 보정기를 포함한 폐루프 제어기(Closed-loop system)에 대해 Lyapunov 기반 안정성 조건을 유도하고, 실제 플랫폼에 적용하여 보정 전·후 궤적 및 Yaw·Yaw-rate 응답을 비교·분석함으로써 직진성 향상과 외란 저항성 개선을 입증한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 역기구학 기반 관절 궤적 계산과 PID 제어 구조를, 3장에서는 시스템 하드웨어와 대각보행 전략을 설명한다. 4장에서는 제안 보정기의 설계와 Lyapunov 안정성 조건을 유도한다. 5장에서는 실험 결과와 분석을 통해 제어기의 효과를 검증하며, 6장에서 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 다리 모듈의 역기구학과 PID 추종 제어

2.1 2 자유도 다리 모듈의 역기구학

본 장에서는 발끝 목표 좌표 $E(X_e, Y_e)$ 가 주어졌을 때 각 관절 각도($\theta_{knee}, \theta_{hip}$)를 구하는 역기구학 계산 절차를 설명한다.^{3,8)} Fig. 1은 계산에 필요한 기하학적 정의와 초기 자세를 요약한다.

Fig. 1의 (a)는 고정 원점 $O(0,0)$ 을 기준으로 상부 링크 길이 A , 하부 링크 길이 B 를 갖는 2자유도 평면 모델을 제

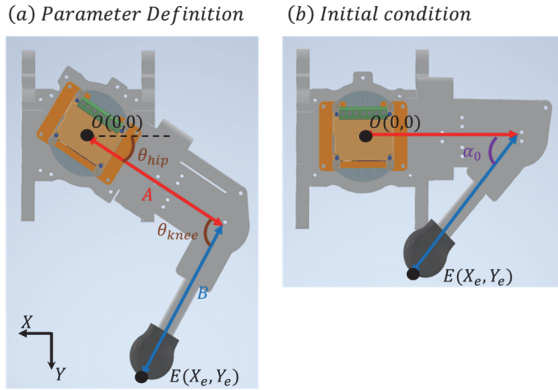


Fig. 1 Parameter definition and initial condition of leg module

시한다. 관절각은 고관절 θ_{hip} 과 무릎관절 θ_{knee} 로 정의하며, 전역 좌표계 $\{X, Y\}$ 에서 발끝 위치 $E(X_e, Y_e)$ 를 사용한다. 이 파라미터화는 이후 코사인 법칙 기반의 해 유도 시 공통의 부호와 기준을 제공한다.

(b)는 초기 자세를 나타낸다. 고관절 각도는 0° 에서 시작하고, 무릎관절 각도는 α_0 로 설정한다. 여기서 α_0 는 선택한 초기 발끝 좌표 $E(X_e, Y_e)$ 와 링크 길이 (A, B) 에 의해 기하학적으로 결정되며, 역기구학 해의 초기 추정치이자 자세 기준으로 활용된다.

Fig. 2는 역기구학 계산에 사용되는 기하학적 모델을 나타낸다. Fig. 2의 (a)는 링크 길이 A, B 와 발끝-원점 거리 R 의 관계를 이용해 무릎 관절 θ_{knee} 를 구하는 삼각 기하 구성을 보여준다. (b)는 고관절 θ_{hip} 계산에 필요한 보조각 α_1, α_2 의 정의와 관련 기하 구조를 제시한다.

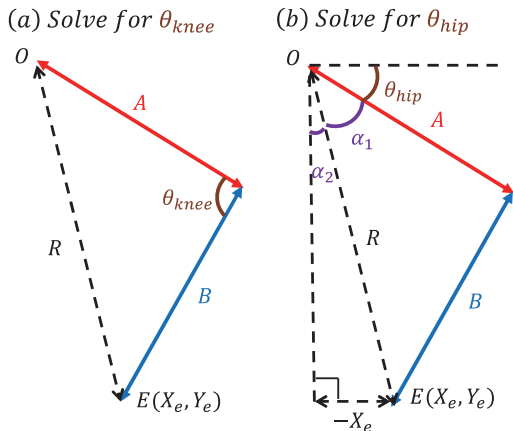


Fig. 2 Geometric models for inverse kinematics

무릎관절 θ_{knee} 는 다음 세 단계로 계산한다. 먼저 발끝 좌표 E 로부터 원점-발끝 거리 R 을 식 (1)과 같이 구한다. 다음으로 삼각형 (A, B, R) 에 코사인 법칙을 적용하여 무릎의 내각을 식 (2)로 얻는다. 마지막으로 Fig. 1의 (b)에서

정의한 초기 각도 α_0 을 기준에 맞추어 보정하면, 최종 무릎관절 θ_{knee} 은 식 (3)과 같다.

$$R = \sqrt{X_e^2 + Y_e^2} \quad (1)$$

$$\theta_{knee} = \cos^{-1}\left(\frac{A^2+B^2-R^2}{2AB}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{A^2+B^2-X_e^2-Y_e^2}{2AB}\right) \quad (2)$$

$$\theta_{knee} = \cos^{-1}\left(\frac{A^2+B^2-X_e^2-Y_e^2}{2AB}\right) - \alpha_0 \quad (3)$$

고관절 θ_{hip} 는 다음 세 단계로 계산한다. 먼저 삼각형 (A, B, R) 에 코사인 법칙을 적용하여 보조각 α_1 을 식 (4)와 같이 구한다. 다음으로 발끝 좌표의 X 성분과 R 의 관계로부터 보조각 α_2 를 식 (5)로 산출한다. 마지막으로 90° 에서 두 보조각을 차감하면 고관절 θ_{hip} 는 식 (6)과 같다. 본 기구학에서 고관절의 초기 조건은 0° 이므로 별도의 오프셋 보정은 필요하지 않다.

$$\alpha_1 = \cos^{-1}\left(\frac{A^2+R^2-B^2}{2AR}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{A^2+X_e^2+Y_e^2-B^2}{2A\sqrt{X_e^2+Y_e^2}}\right) \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \sin^{-1}\left(\frac{-X_e}{R}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{-X_e}{\sqrt{X_e^2+Y_e^2}}\right) \quad (5)$$

$$\theta_{hip} = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{A^2+X_e^2+Y_e^2-B^2}{2A\sqrt{X_e^2+Y_e^2}}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{-X_e}{\sqrt{X_e^2+Y_e^2}}\right) \quad (6)$$

2.2 PID 제어기 설계 및 추종 성능

앞서 유도한 역기구학 궤적이 실제 로봇에서 구현되도록, 관절 제어 단계에 PID 제어기를 적용하였다.^{11,12} PID는 비례(K_p), 적분(K_i), 미분(K_d) 이득을 통해 추종 오차를 최소화하는 고전 제어 기법으로, 사족보행 로봇의 안정적인 궤적 추종에 널리 사용된다. 추종 오차와 제어 입력의 시간영역 표현은 식 (7), (8)과 같다. 여기서 θ_d 는 목표 관절각, θ 는 측정 관절각, u 는 관절 구동 명령이다. 본 연구에서는 문헌의 사례를 참고하여 초기 이득을 정하고, 외란 환경에서의 자세 안정화 관점을 반영해 실험적으로 미세 조정하였다.

$$e(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \quad (7)$$

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Fig. 3은 초기 발끝 궤적에 대해 작업공간 $\{X, Y\}$ 에서의 추종 결과를 제시한다. 검은 점선은 목표 궤적, 색상 점들

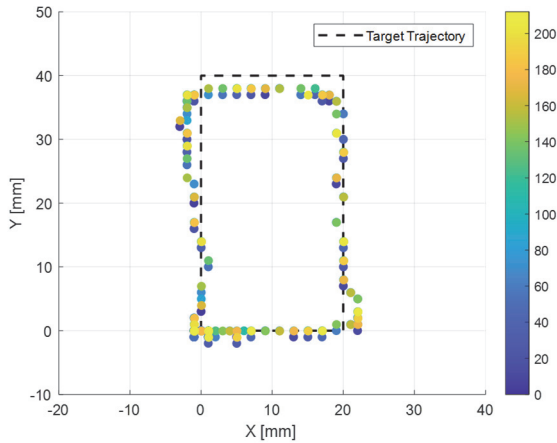


Fig. 3 Task space foot trajectory tracking with PID

은 반복 실험에서 계획된 실제 궤적이며, 색상 막대는 시간의 변화를 의미한다. PID 제어를 적용한 결과, 측정 궤적은 목표 궤적을 안정적으로 추종하였고, 이는 기하기반 역기구학과 PID 추종 조합의 유효성을 뒷받침한다.

3. 시스템 하드웨어·제어 구성과 대각보행 전략

본 장에서는 연구에 사용된 사족보행 로봇의 하드웨어 구성과 보행 전략을 설명한다. 로봇은 탄소섬유 튜브 프레임에 기반으로 제작되었으며, 각 관절은 Brushless DC(BLDC) 모터·감속기 조합으로 구동되며, 독립 제어가 가능하도록 설계하였다. 요구 토크 범위에서 낮은 기어비를 우선 적용해 에너지 효율을 확보하였다.⁸⁾

3.1 하드웨어 플랫폼 개요 및 다리 모듈 조립

제어 시스템은 Teensy 4.1 마이크로 컨트롤러를 중심으로 구성하였고, 각 관절 모터는 ODrive S1 모터 드라이버로 구동한다. Teensy와 ODrive 간 통신은 Controller Area Network(CAN)를 사용하여 높은 실시간성과 안정성을 확보하였다. 이러한 구성은 고속 제어 연산과 통신 효율을 동시에 달성하기 위해 최근 다양한 로봇 플랫폼에서 널리 채택되는 접근과 맥락을 같이한다.^{1,2)}

Fig. 4는 실제 제작된 사족보행 로봇과 이에 대응하는 3D Computer Aided Design(CAD) 모델을 좌·우로 제시하여, 전체 하드웨어 구성과 외형을 직관적으로 비교할 수 있도록 한 것이다. 탄소섬유 튜브 프레임, 관절 모듈, 구동기 배치 등 핵심 요소를 한 시야에서 확인할 수 있다.

Fig. 5는 다리 모듈의 조립 과정을 순차적으로 나타낸 그림으로, 기어 감속기 어셈블리부터 링크 구조 조립, 그리고 최종 다리 모듈 형성에 이르는 단계를 시각적으로 보여준다. 각 구성 요소는 모듈화 설계를 기반으로 제작되어 유지보수와 조립이 용이하도록 고려되었다.

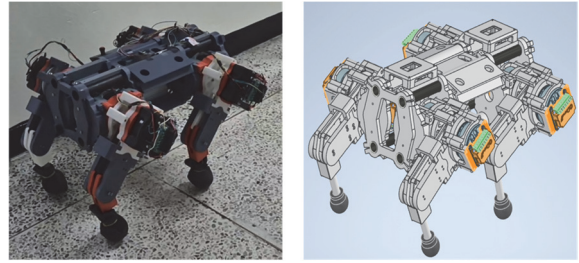


Fig. 4 Prototype and 3D CAD model of the quadruped robot

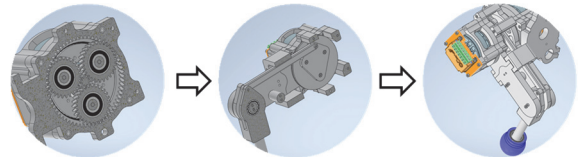


Fig. 5 Assembly sequence of the leg module

3.2 제어 시스템 구성 및 데이터 흐름

Fig. 6은 본 연구의 제어 시스템 블록 다이어그램으로, 중앙 제어기(Teensy)를 중심으로 Bluetooth, IMU, NodeMCU (Wi-Fi module)간 데이터 흐름을 나타낸다. Teensy는 IMU의 가속도와 각속도를 수집·필터링하여 자세를 추정하고, 이를 기반으로 제어법칙과 역기구학을 통해 관절 명령을 생성한다. 생성된 명령은 CAN을 통해 ODrive S1로 전달되며, 상태·오류·자세 정보는 NodeMCU로 외부 모니터링 시스템에 전송된다. 이러한 센서융합-제어-구동 파이프라인은 사족보행 로봇에서 널리 사용되는 일반적인 아키텍처와 일치한다.^{4,6)}

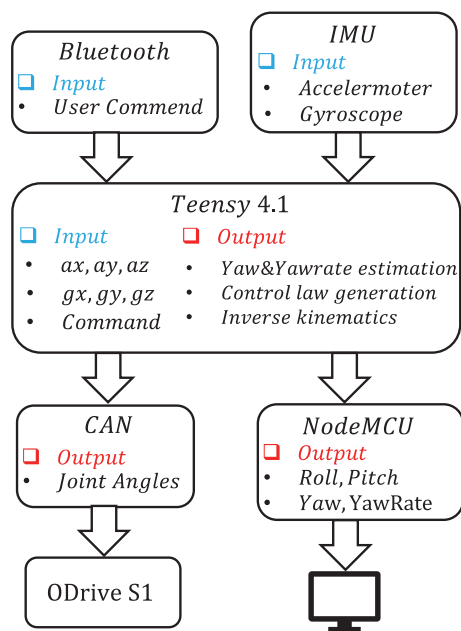


Fig. 6 Control system block diagram and data flow

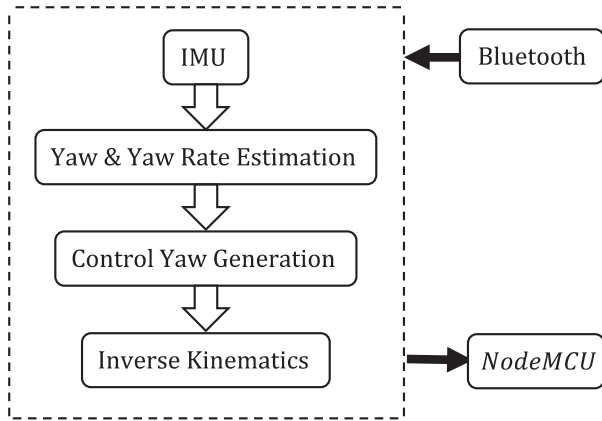


Fig. 7 Internal control flow of teensy 4.1

또한 본 연구의 로깅-리플레이 체계는 오픈소스 시뮬레이터 환경에서 제시된 모듈식 노드-토픽 구조와 오프라인 로그 재생 절차를 준용하였다. IMU와 CAN 데이터는 각각 독립 스트림(토픽)으로 발행·구독하며, 이를 구독하는 전용 시각화 노드에서 궤적을 출력하도록 구성하였다.¹³⁾

Fig. 7은 Teensy 내부의 제어 흐름과 외부 통신 모듈 연계를 나타낸다. Teensy는 IMU의 가속도와 각속도를 입력으로 받아 Yaw 및 Yaw rate를 추정하고,⁶⁾ 이를 바탕으로 Yaw 안정화를 위한 제어법칙을 생성한다. 제어법칙은 Lyapunov 함수 기반으로 설계하여 외란이나 초기 자세 편차에 대해서도 안정성을 보장한다.¹²⁾ 이후, 역기구학을 통해 각 다리의 목표 관절각을 산출한다. 외부 통신 측면에서는 Bluetooth로 사용자가 명령을 입력하고, NodeMCU로 자세·상태 로그를 실시간 전송하여 모니터링과 데이터 로깅이 가능하다.

3.3 대각보행 전략과 단계별 위상 구성

보행 전략은 대각보행(Trot gait)을 기반으로 수립하였다. 대각보행은 대각선 다리 쌍(FL-BR, FR-BL)이 교대로 지면을 지지하는 방식으로, 속도와 안정성의 균형이 우수하고 제어 구조가 비교적 단순하다는 장점이 있다. 다양한 지형에서의 이동 성능이 입증되어 다수의 사족보행 로봇 연구에서 널리 채택되어 왔다.²⁻⁵⁾

Fig. 8은 대각보행 주기를 6단계로 분할해 각 다리의 상태를 시각화한 위상표로, 회색은 공중 이동, 파란색은 지면 접촉, 검정색은 정지를 의미한다. 대각선 다리쌍이 교대로 지면 접촉 구간을 갖도록 위상을 배치해 동기화된 추진력을 생성하며, 이는 안정적인 전진을 위한 핵심 요소이다. 각 다리는 공중 이동·지면 접촉·정지를 시간에 따라 순차 반복하며, 정지 구간은 다리 간 간섭 방지와 안정적인 전환을 위한 완충 역할을 한다.

Step	1	2	3	4	5	6
FL	Swing	Swing	Swing	Stance	Idle	Idle
FR	Stance	Idle	Idle	Swing	Swing	Swing
RL	Stance	Idle	Idle	Swing	Swing	Swing
RR	Swing	Swing	Swing	Stance	Idle	Idle

Fig. 8 Trot gait phase diagram

본 연구의 초기 보행 전략은 보정 알고리즘 적용 이전 단계로서, 네 다리에 동일한 기준 궤적을 제공하여 대각보행의 대칭성과 반복성을 활용해 기본적인 직진성을 확보한다. 그러나 미세한 보폭 차이, 마찰 계수 불균일, 하중 편차 등으로 Yaw 편차가 누적될 수 있으므로, 이후에는 추정된 Yaw 편차를 이용해 각 다리 궤적을 실시간으로 미세 조정하는 보정 알고리즘을 적용한다. 이 과정은 외란이나 초기 자세 불균형으로 인한 직진성 저하를 효과적으로 억제하는 데 기여한다.¹²⁾

4. Yaw 모멘트 모델링과 강건 제어 설계

본 장에서는 사족보행 로봇의 Yaw 회전 안정성을 다루기 위해 평면 보행을 가정하고, 대각 다리쌍의 지면반력에 의해 생성되는 Yaw 모멘트를 모델링한다. 이어서 Lyapunov 기반으로 강건 제어법칙을 설계하고, 포화함수를 포함해 채터링을 억제한 페루프 동역학을 유도하여 안정성 조건을 제시한다.

4.1 회전 운동 모델과 Yaw 모멘트 유도

Fig. 9는 평면에서 대각보행을 수행할 때 대각선 다리쌍(FR-RL, FL-RR)의 수평 추진력 차이로 인해 Yaw 회전이 발생하는 메커니즘을 개념적으로 나타낸 것이다.^{3,4)} 좌표계는 차체 중심(CG)기준으로 전방 +X, 좌측 +Y이며, Yaw(ψ)는 Z축에 대한 회전으로 정의한다. 도식의 W는 좌우 지지선 사이의 간격(차체 폭)을 의미한다. 기본 궤적 제어로 생성되는 각 다리의 전방향 지면반력($F_{FR}, F_{RL}, F_{FL}, F_{RR}$)에 보정 제어에 따른 미소 변화량($\Delta F_{FR}, \Delta F_{RL}, \Delta F_{FL}, \Delta F_{RR}$)이 더해져 Yaw 모멘트가 형성된다. 상단 그림은 좌향(+ ψ), 하단 그림은 우향(- ψ) 사례를 보여준다.

로봇의 발끝-지면 사이 전방향 지면반력 F_i ($i=FR, RL, FL, RR$)는 2장에서 정의한 기준 궤적(역기구학)을 통해 형성되며, 보정 제어에 의해 ΔF_i ($i=FR, RL, FL, RR$) 만큼 미세 조정된다. 대각보행의 한 위상에서 하중을 지지하는 대각쌍(FR-RL)만 고려하면, 두 힘이 차체 중심(CG)에서 $\pm \frac{W}{2}$ 의 모멘트암(Lever arm)으로 만들어내는 Yaw 모멘트가 회전을 유도한다. 뉴턴-오일러 방정식을 적용하

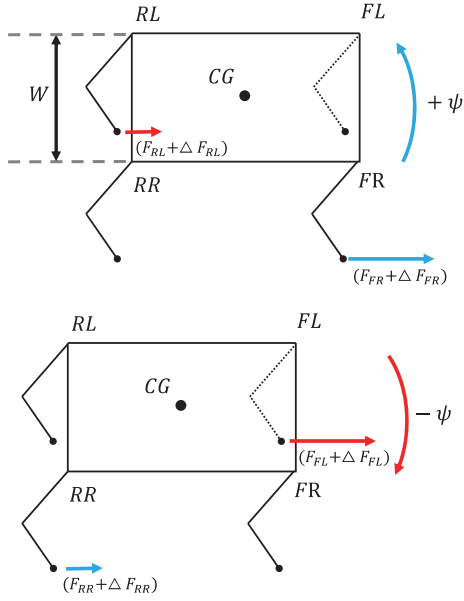


Fig. 9 Yaw moment generation mechanism in quadruped robot

면 식 (9)가 되며, 이는 식 (10)과 같이 표현될 수 있다.

$$I\ddot{\psi} = (F_{FR} + \Delta F_{FR})\frac{W}{2} - (F_{RL} + \Delta F_{RL})\frac{W}{2} \quad (9)$$

$$\ddot{\psi} = (F_{FR} - F_{RL})\frac{W}{2I} + (\Delta F_{FR} - \Delta F_{RL})\frac{W}{2I} \quad (10)$$

4.2 Lyapunov 기반 Yaw 안정화 제어기 설계

Yaw 안정화를 위해 Lyapunov 기반의 강건 제어기를 설계하였다. 제어 입력은 Yaw 각도 (ψ)와 각속도 ($\dot{\psi}$)를 사용하며, 포화함수 (SAT)를 적용해 과도한 입력 변화를 억제한다.^{5,12)} Yaw 안정성을 위해 제안된 제어기는 식(11), (12)와 같다. 식 (10)의 Yaw 운동 방정식에 제어입력을 대입하면 페루프 동역학(closed-loop dynamics)은 식 (13)으로 정리된다.

$$\Delta F_{FR} = -k_1\psi - k_2\dot{\psi} - k_3SAT\left(\frac{\dot{\psi}}{\phi}\right) \quad (11)$$

$$\Delta F_{RL} = +k_1\psi + k_2\dot{\psi} + k_3SAT\left(\frac{\dot{\psi}}{\phi}\right) \quad (12)$$

여기서 $k_1, k_2, k_3 > 0$ 는 제어 변수들이며, $\phi > 0$ 은 정계층 두께이다.

$$\ddot{\psi} = (F_{FR} - F_{RL})\frac{W}{2I} + \left(-2k_1\psi - 2k_2\dot{\psi} - 2k_3\frac{\dot{\psi}}{|\dot{\psi}|}\right)\frac{W}{2I} \quad (13)$$

Lyapunov 함수 $V(\psi, \dot{\psi})$ 를 식 (14)와 같이 정의한다. 이 함수는 $\psi = \dot{\psi} = 0$ 에서만 $V = 0$ 이고 그 외에서는 $V >$

0 이며, 시간 미분 $\dot{V} \leq 0$ 이면 평형점은 Lyapunov 의미에서 안정이다. 따라서 \dot{V} 은 식 (15)와 같이 계산된다.

$$V = \frac{1}{2}\left(\frac{2I}{W}\right)\dot{\psi}^2 + k_1\psi^2 \quad (14)$$

$$\dot{V} = \left(\frac{2I}{W}\right)\dot{\psi}\ddot{\psi} + 2k_1\psi\dot{\psi} \quad (15)$$

각가속도에 관한 식 (13)을 Lyapunov 함수의 시간 미분 식 (15)에 대입하면, 식 (16)과 같이 정리된다. 여기서 $-2k_1\psi\dot{\psi}$ 와 $+2k_1\psi\dot{\psi}$ 가 상쇄되어, 식 (17)과 같이 간결하게 표현된다.

$$\dot{V} = \dot{\psi} \left[(F_{FR} - F_{RL}) + \left(-2k_1\psi - 2k_2\dot{\psi} - 2k_3\frac{\dot{\psi}}{|\dot{\psi}|}\right) \right] + 2k_1\psi\dot{\psi} \quad (16)$$

$$\dot{V} = \dot{\psi}(F_{FR} - F_{RL}) - 2k_2\dot{\psi}^2 - 2k_3|\dot{\psi}| \quad (17)$$

식 (17)의 둘째 항은 항상 $-2k_2\dot{\psi}^2 \leq 0$ 이므로, Lyapunov 함수의 안정성 조건 유도를 위해 \dot{V} 을 식 (18)과 같이 부등식 형태로 정리한다. 여기서 외란 항은 $|F_{FR} - F_{RL}|$ 은 δ 이하로 제한되는 유계 외란(Bounded disturbance)이라 가정한다. 그 이유는 로봇 보행 시 좌우의 수직 항력과 마찰력의 미세한 차이로 외란 $|F_{FR} - F_{RL}|$ 이 발생하기 때문이다. 이를 이용하면 \dot{V} 의 상한은 식 (19)와 같이 정리된다.

$$\dot{V} \leq \dot{\psi}(F_{FR} - F_{RL}) - 2k_3|\dot{\psi}| \quad (18)$$

$$\dot{V} \leq |\dot{\psi}|\delta - 2k_3|\dot{\psi}| = (\delta - 2k_3)|\dot{\psi}| \quad (19)$$

따라서 $\dot{V} < 0$ 가 항상 성립하려면, 식 (20)의 충분조건을 만족하도록 설계한다. 즉, 제어기 이득 k_3 를 외란 상한 δ 의 절반보다 크게 선택하면, \dot{V} 가 모든 $\dot{\psi} \neq 0$ 에서 음이 되어 페루프 시스템이 안정함을 의미한다.

$$(\delta - 2k_3) < 0 \implies k_3 > \frac{\delta}{2} \quad (20)$$

동일한 원리를 (FL-RR) 지지 위상에도 적용하면, 제어 입력은 식 (21), (22)와 같이 정의된다.

$$\Delta F_{FL} = +k_1\psi + k_2\dot{\psi} + k_3SAT\left(\frac{\dot{\psi}}{\phi}\right) \quad (21)$$

$$\Delta F_{RR} = -k_1\psi - k_2\dot{\psi} - k_3SAT\left(\frac{\dot{\psi}}{\phi}\right) \quad (22)$$

4.3 Yaw 신호 전처리와 최종 제어 입력

본 연구에서는 앞서 도출한 안정성 조건을 참고해 제어 이득을 설정하고, IMU로부터 획득한 Yaw 데이터를 기반으로 실시간 보정을 수행하였다. 이때 Yaw 신호는 1차 저역통과 필터로 노이즈를 완화하여 안정화하였다. 필터는 식 (23), (24)와 같이 정의한다. 여기서 $\beta \in (0,1)$ 는 필터 계수이며, β 가 1에 가까울수록 평활화가 강해지고 응답이 느려진다. $\hat{\psi}, \hat{\dot{\psi}}$ 는 필터링된 Yaw 각도와 각속도를 의미한다.

$$\hat{\psi}(k) = \beta\hat{\psi}(k-1) + (1-\beta)\psi(k) \quad (23)$$

$$\hat{\dot{\psi}}(k) = \beta\hat{\dot{\psi}}(k-1) + (1-\beta)\dot{\psi}(k) \quad (24)$$

이후 순간 변동성을 줄이기 위해 최근 N 개의 샘플을 이용한 이동평균을 적용하였다. 평균 값은 식 (25)와 같이 정의한다. Yaw 안정화를 위한 최종 제어 입력은 평균화된 $\bar{\psi}, \bar{\dot{\psi}}$ 를 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{\psi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\psi}(i), \quad \bar{\dot{\psi}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\dot{\psi}}(i) \quad (25)$$

$$\Delta F_{FR} = \Delta F_{RR} = -k_1\bar{\psi} - k_2\bar{\dot{\psi}} - k_3SAT(\frac{\bar{\dot{\psi}}}{\phi}) \quad (26)$$

$$\Delta F_{FL} = \Delta F_{RL} = +k_1\bar{\psi} + k_2\bar{\dot{\psi}} + k_3SAT(\frac{\bar{\dot{\psi}}}{\phi}) \quad (27)$$

Fig. 10은 제안한 Yaw 보정 알고리즘의 전체 동작 흐름을 나타낸다. IMU로부터 획득한 $\psi, \dot{\psi}$ 는 저역통과 필터(식 (23), (24))와 이동평균(식 (25))을 거쳐 $\bar{\psi}, \bar{\dot{\psi}}$ 로 정규화된다. 이렇게 얻은 상태값은 Lyapunov 기반 제어기(식 (26), (27))에 입력되어 대각쌍별 보정 힘 ΔF_i 를 생성하고, 해당 보정은 역기구학(inverse kinematics) 모듈에서 각 다리의 기준 궤적에 합산되어 최종 관절 명령으로 변환된다. 이러한 ‘상태추정 → 제어입력 생성 → 궤적 보정’의 주기적 파이프라인을 통해 실시간 Yaw 안정화가 이루어진다.^{5,6,12)}

본 필터링-평균화-제어-역기구학 순환 파이프라인은

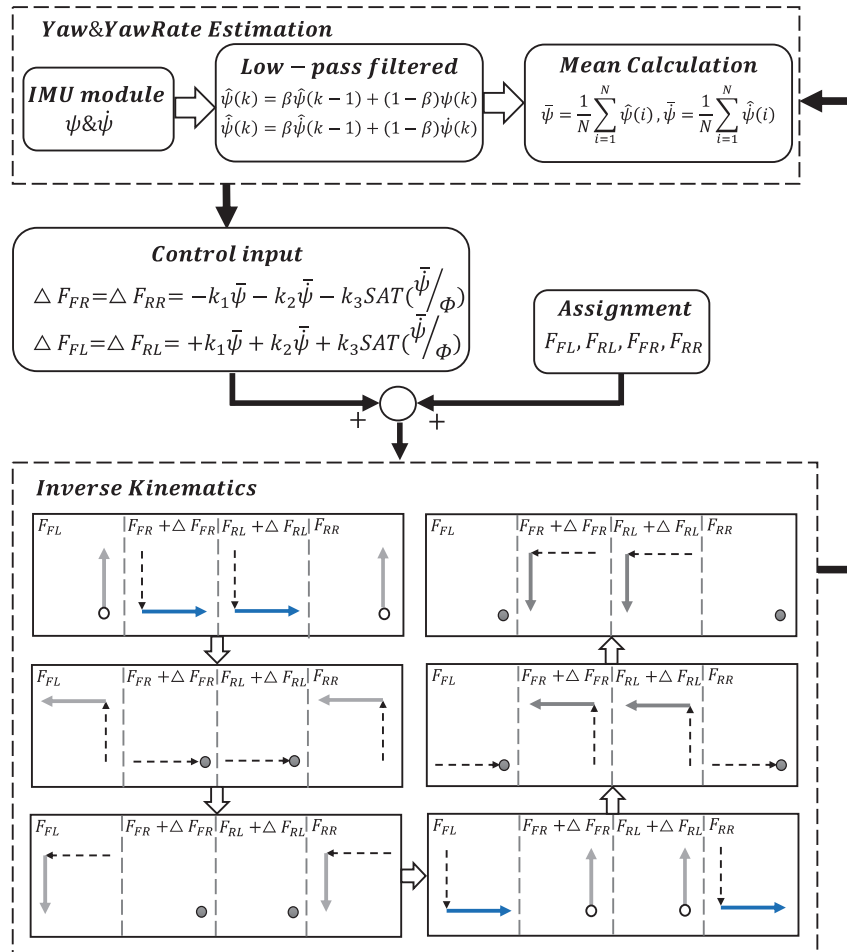


Fig. 10 Flowchart of yaw stabilization algorithm

VILS 기반 시험체계의 시나리오 정의→실험/주행→로그 재현→지표 평가→파라미터 갱신 절차를 보행 환경에 맞게 축소 적용한 것으로, 각 주기마다 로그로 계산한 지표에 따라 보정 상수를 업데이트하도록 설계하였다.¹⁴⁾

5. 실험적 검증 및 결과 분석

본 장에서는 제안한 보정 알고리즘의 성능을 실험적으로 검증하기 위해 두 가지 실험을 수행하였다. 먼저 역기구학 기반의 대각보행에서 속도 응답을 계측해 플랫폼의 기본 주행 성능을 확인하였다. 다음으로 Yaw 안정화 보정의 ON/OFF에 따른 직진성 및 자세 응답을 비교하였다.

5.1 대각보행 성능 속도 응답과 직진성 관찰

플랫폼의 기본 주행 특성을 파악하기 위해, 역기구학 기반 대각보행에서 전진 속도 응답을 계측하였다. Fig. 11은 시간에 따른 속도 이력을 나타낸다. 실험은 기본 보행 조건에서 2.40 m 직선 주행으로 수행되었다. 속도-시간 응답은 가속(0~2 s), 정속(2~6 s), 감속(6~8 s)으로 구

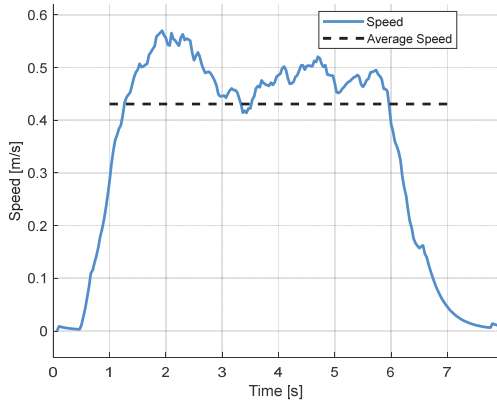


Fig. 11 Forward speed response during trot gait with IK control



Fig. 12 Snapshots of trot gait during speed measurement

분되며, 정속 구간의 평균 속도는 약 0.43 m/s였다. 이는 역기구학 기반 보행 제어기가 안정적으로 동작함을 보여준다. 이러한 속도 응답과 평균 속도는 보행 성능 평가의 기본 지표로 널리 활용된다.^{2,4)}

Fig. 12는 대각보행 실험을 촬영한 스냅샷으로, 빨간 궤적선은 추정된 이동 경로를 나타낸다. 근거리에서는 안정적인 직진 보행이 확인되지만, 연속 주행 거리가 길어질수록 Yaw 편차가 누적되어 미세한 직진성 저하가 관찰되었다. 이 관찰 결과는 보행 중 Yaw 안정화의 필요성을 뒷받침한다. 이에 따라 다음 절에서는 Yaw 보정 ON/OFF 비교 실험을 통해 직진성 개선 효과를 정량적으로 평가한다.

5.2 Yaw 응답 및 직진성 비교 실험

이에 앞서 제안한 Yaw 안정성 보정 알고리즘의 성능을 실험적으로 검증한다. 알고리즘의 동작 과정은 4장에서 제시하였으며, 동일 보행 조건에서 제어기 비활성화(OFF)와 Lyapunov 기반 제어기 적용(ON)을 비교·분석하였다. 실험은 대각보행 하에서 수행되었고 로봇은 동일한 직선 이동 명령을 반복 실행하였다.^{2,4)} IMU로부터 Yaw 각도와 Yaw 각속도를 실시간 취득하여 Teensy 4.1에서 전처리한 뒤, NodeMCU(Wi-Fi)로 외부 환경(Python)에 스트리밍하여 기록·분석하였다.⁶⁾ 본 실험의 목적은 보정 제어기의 Yaw 편차 누적 억제 효과와 외란 발생 시 복원 성능을 정량적으로 확인하는 데 있다.

Fig. 13은 보정 알고리즘 적용 전후의 Yaw 각도 응답을 비교한 결과이다. 무보정(적색)에서는 실험 초기에 편차가 빠르게 누적되어 좌향으로 약 30.00°까지 증가했으며, 연속 측정을 위해 $t \approx 20$ s에서 Yaw 각도를 0°로 수동 초기화(Yaw reset)한 뒤 실험을 이어갔다. 반면 Lyapunov 기반 보정(청색)을 적용한 경우에는 동일 조건에서 Yaw 각도가 ±5.00° 이내로 유지되어 누적 편차가

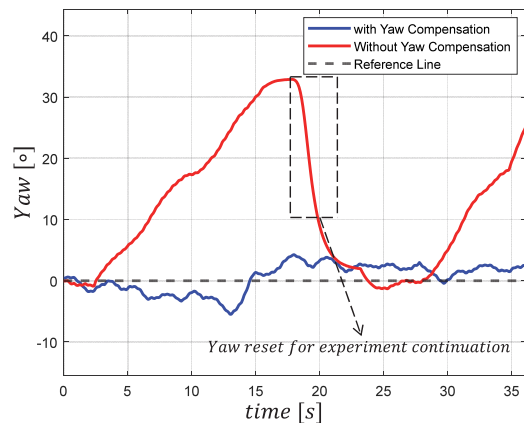


Fig. 13 Yaw angle response with and without compensation

억제되었다. 이 결과는 제안 제어가 직진 안정성 향상에 기여함을 시사한다.

Fig. 14는 보정 알고리즘 적용 후 Yaw 각속도 응답을 나타낸다. 응답은 $0^\circ/s$ 근방에서 안정적으로 유지되었고, 변동 폭은 대략 $\pm 2.00^\circ/s$ 이하였다(접선은 $0^\circ/s$ 기준선). 약 $t \approx 15\text{ s}$ 부근에서 외란에 의해 일시적 상승이 관

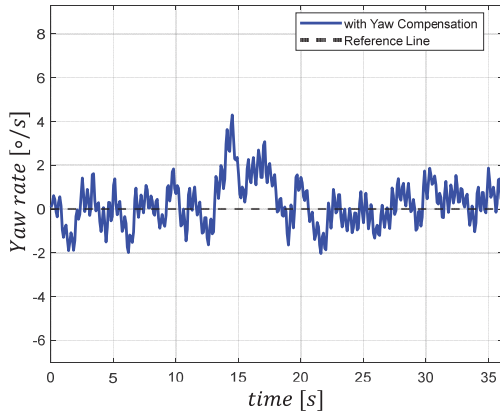


Fig. 14 Yaw rate response with compensation

찰되었으나, 제어가 빠르게 작동하여 약 2 s 이내에 기준 근방으로 복원되었다. 이는 Lyapunov 조건을 반영한 제어 설계가 급격한 변동 억제와 외란 후 신속한 복원에 기여함을 시사한다.

Fig. 15와 Fig. 16은 각각 제어기 미적용과 적용 조건에서의 보행 스냅샷이다. 두 그림에는 진행 방향(화살표), 10 m 기준선(흰색 실선), 보행 경로(점선), 각 프레임의 Yaw 각도를 함께 표기하여 보정 전·후의 진행 방향 유지와 편향 누적 양상을 시각적으로 비교하였다. 미적용 시에는 직진 명령에도 불구하고 Yaw 편차가 누적되어 궤적이 점차 좌측으로 이탈했으며, 실험 연속성 유지를 위해 중간 지점에서 수동 Yaw 초기화(흰색 사각형)를 수행하였다. 반면 적용 시에는 보정기가 Yaw 편차를 실시간으로 억제해 기준선 부근의 직진 궤적을 안정적으로 유지하였다. 이러한 관찰은 제안 제어가 실제 환경의 외란 하에서도 직진 안정성 향상에 기여함을 시사한다.

다음 실험은 Fig. 16과 동일한 조건(실내 대리석 바닥, 대각 보행, 10 m 직선 구간)에서 제어기를 적용한 채 15회 반복으로 수행하였다. 먼저 Fig. 17은 Yaw, Fig. 18은 Yaw

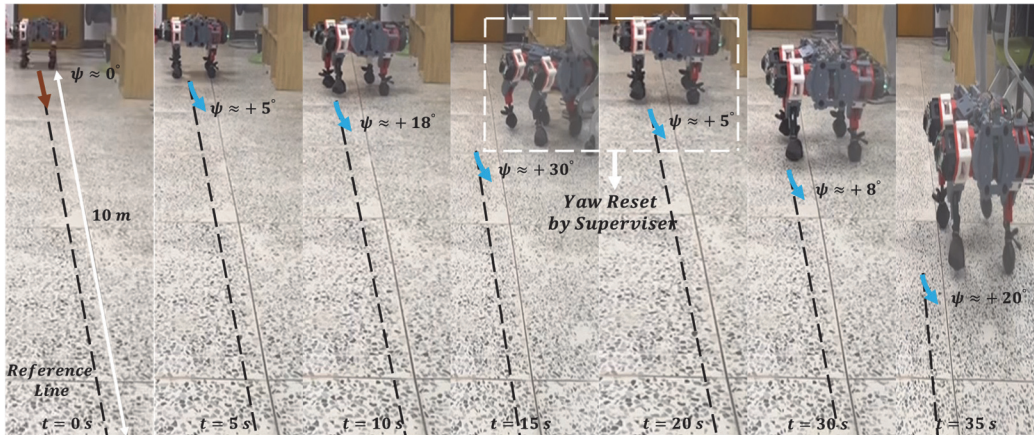


Fig. 15 Snapshots of trot gait without yaw compensation

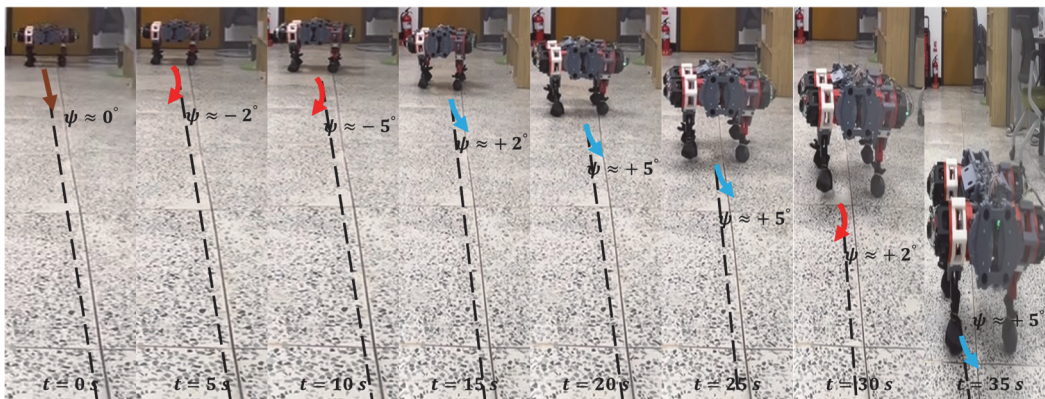


Fig. 16 Snapshots of trot gait with yaw compensation

rate의 응답을 각각 중첩하여 제시한다. Fig. 17에서 각 궤적은 전 구간에서 대체로 $\pm 5.00^\circ$ 범위에 머물며 기준선 부근으로 수렴·유지되는 경향을 보인다. 초기 과도 이후에는 궤적들이 기준선 주변으로 밀집하여 반복 간 변동이 작아지고, 기준 방위를 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있다. Fig. 18의 Yaw rate 응답은 기준선을 중심으로 진동하며, 대부분의 진폭이 $\pm 3.00^\circ/s$ 내에 분포하고 간헐적 피크도 $\pm 6.00^\circ/s$ 이내로 제한된다. 과도 구간 이후

에는 진폭이 감소하고 파형의 형태가 서로 유사해져 반복성이 확보된다.

Fig. 19와 Fig. 20은 15개 궤적의 시각별 산술평균으로 얻은 Yaw와 Yaw rate의 평균 응답을 각각 나타낸다. Fig. 19의 평균 Yaw 궤적은 전 구간에서 기준선 부근을 따라 움직이며, $\pm 2.50^\circ$ 이내에 제한된다. 평균값은 약간 음(-) 쪽으로 치우쳐 있으나 시간에 따른 드리프트는 미미하여 기준 방위의 지속적 유지·복원 경향이 확인된다. Fig. 20

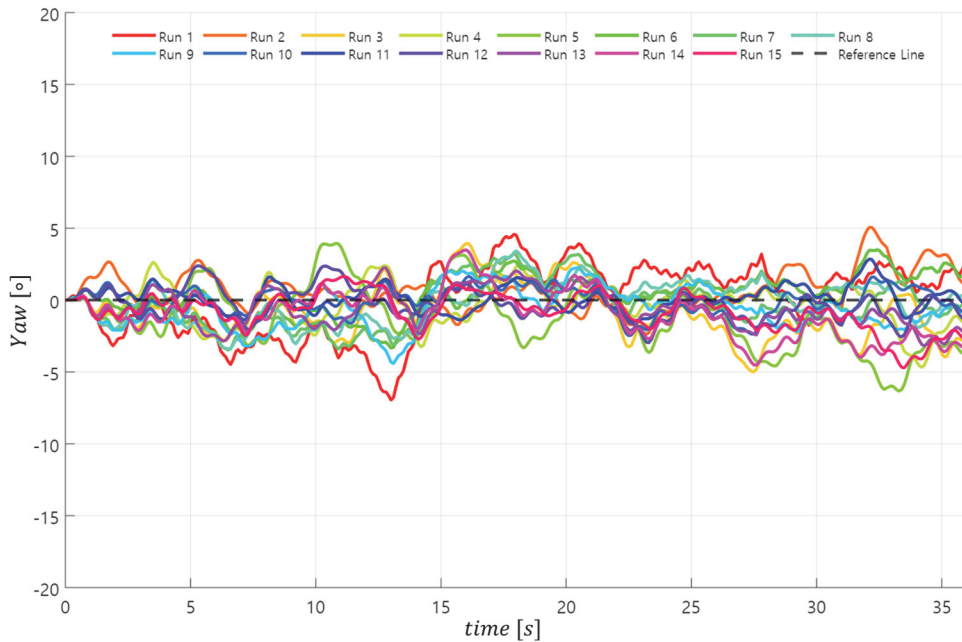


Fig. 17 Yaw responses with the controller 15-run overlay

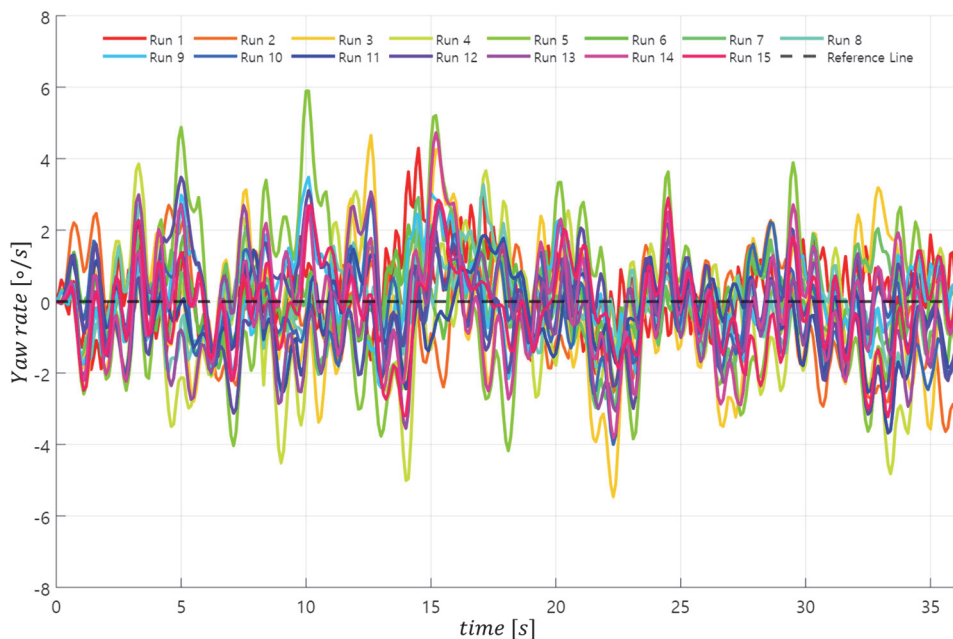


Fig. 18 Snapshots of trot gait without yaw compensation

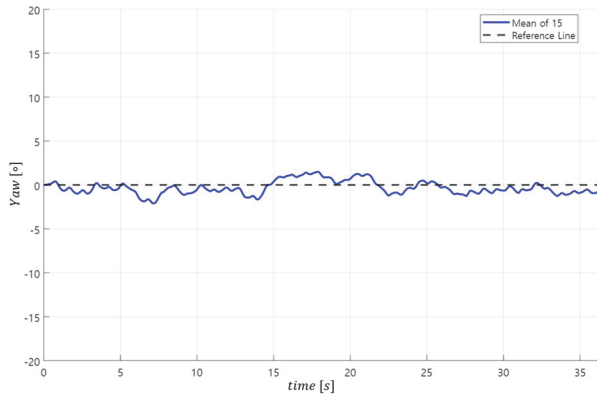


Fig. 19 Yaw mean of 15 runs with the controller

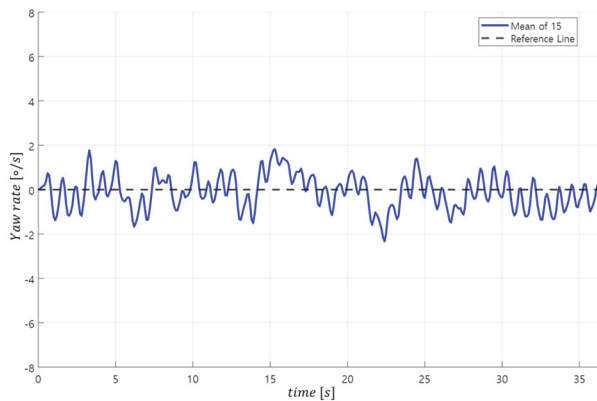


Fig. 20 Yaw rate mean of 15 runs with the controller

의 평균 Yaw rate 는 기준선을 중심으로 비교적 대칭적인 진동을 보이며, 통상 진폭은 ± 2.00 $^{\circ}/s$ 수준이다.

평균 응답 신호(Mean of 15)의 분포 특성을 확인하기 위해, 히스토그램을 제시하고 정규분포 적합 곡선을 함께 표시하였다. Fig. 21의 Yaw 분포는 단봉형이며 중심이 0° 보다 약간 음 방향으로 치우쳐 있다. 평균은 -0.33° 이고 표준편차는 0.77 이다. 이는 소폭의 음의 오프셋이 존재하지만 분산은 크지 않음을 시사한다. Fig. 22의 Yaw rate 분포는 기준선을 중심으로 비교적 대칭적이며, 평균은 $-0.13^{\circ}/s$ 로 $0^{\circ}/s$ 에 매우 가깝고 표준편차는 $0.77^{\circ}/s$ 이다. 밀도는 주로 $\pm 1.50^{\circ}/s$ 범위에 집중되어, 각속도 관점에서도 평균 응답의 폭이 제한적임을 확인할 수 있다.

이 분포 해석을 수치로 요약하면 Table 1과 같다. 본 표에는 Mean(평균), Std(Standard deviation, 표준편차), P2P(Peak-to-Peak, 최대변화폭)을 제시하였다. 세 지표는 Fig. 21와 Fig. 22의 히스토그램에서 관찰된 분포 특성과 일관되며, 평균 응답 기준으로 Yaw는 소폭의 음의 오프셋을 보이는 반면 Yaw rate는 사실상 무편향에 가깝고 전체 변동성도 제한적임을 확인할 수 있다.

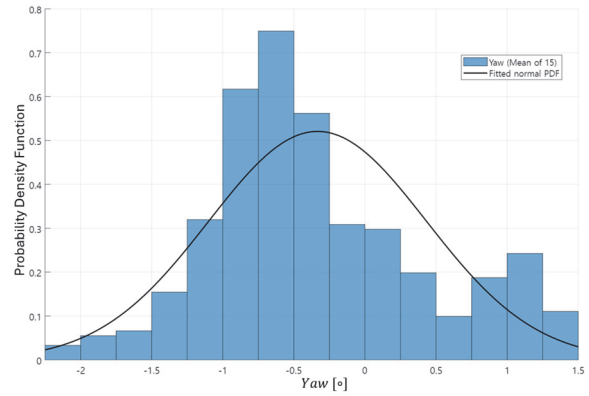


Fig. 21 Mean yaw distribution over 15 runs

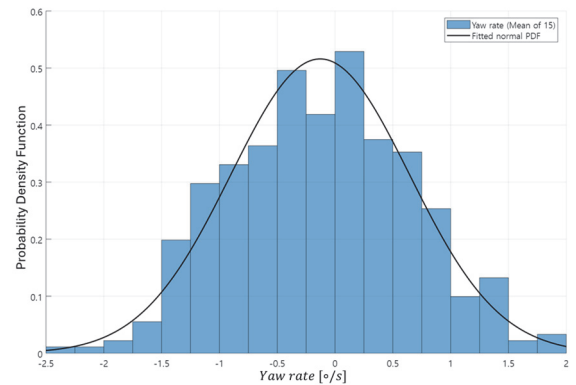


Fig. 22 Mean yaw rate distribution over 15 runs

Table 1 Summary statistics for mean-of-15 yaw and yaw-rate

	Mean	Std	P2P
Yaw[$^{\circ}$]	-0.33	0.77	3.60
Yaw rate [$^{\circ}/s$]	-0.13	0.77	4.16

6. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 2자유도 링크 다리 모델에 역기구학과 PID 제어를 적용해 대각보행을 구현하고, Lyapunov 안정성 조건에 기반한 Yaw 안정화 제어기의 성능을 실험으로 검증하였다. 실내 대리석 바닥·대각보행·10 m 직선 구간이라는 동일 조건에서 15회 반복 실험을 수행하였고, Yaw와 Yaw rate 응답을 중첩·평균하여 분석하였다. 평균·표준편차·최대변화폭(P2P)을 표로 요약하고, 히스토그램과 정규분포 적합 곡선을 통해 분포 특성을 제시하였다. 그 결과 Yaw는 외란 후 0° 기준선 부근으로 신속히 복원되었고, Yaw rate 역시 $0^{\circ}/s$ 근방에서 제한된 진폭으로 유지되어 제어기의 안정화 효과가 확인되었다. 이는 보행 패턴,^{3,4)} 반응형 제어,⁵⁾ 에너지 최적화⁸⁾에 집중해 온 기존 연구와 달리, 본 연구는 Yaw 안정성을 실험적으로 규

명하고 Lyapunov 기반 안정화 제어를 제시했다는 점에서 분명한 차별성을 보인다.

그럼에도 불구하고 본 연구에는 몇 가지 한계가 있다. 실험은 실내 평탄(대리석·건조)인 통제된 조건에서 수행 되었으므로 결과의 일반화에는 제약이 있다. 실외 환경(마찰·거칠기 변화), 불규칙 지형/경사, 정·동적 장애물, 속도 가·감속 또는 주기적 변화가 존재하는 상황에 대한 검증은 향후 과제로 남아 있다. 더불어 센서 융합 기반 상태추정⁶⁾과 비교하면 다양한 외란·센서 노이즈 하에서의 강건성 검증이 충분하지 않고, 온라인 최적화⁴⁾나 GA 기반 최적화 제어¹⁾에 비해 데이터 기반 튜닝·개인 스케줄링 등 실시간 최적화 측면에서도 개선 여지가 있다.

이에 따라 향후 연구로는 다음을 목표로 수행하고자 한다.

- 1) 3자유도 다리 구조 확장: 어깨 관절을 추가하여 다리를 3자유도(어깨-고관절-무릎)로 확장하고, 확장된 좌표계 및 파라미터를 반영해 역기구학 모델을 재정의한다. 성능 평가는 본 논문과 동일한 조건에서 Yaw, Yaw rate, 직선 경로 이탈 지표에 대해 Mean/Std/P2P와 감소율(%) 통계적 유의성을 병기해 정량화한다.
- 2) 센서 융합 기반 실외·장애물 대응 검증: 초음파·비전과 IMU를 융합해 헤딩/장애물 인지의 강건성을 높이고, 아스팔트·콘크리트·잔디·자갈 등 다양한 지면과 상·하향/횡경사 조건에서 성능을 평가한다. 정적·동적 장애물 회피 시나리오를 구성해 궤적 이탈, 복원시간, 성공률, 충돌/정지 횟수, 센서 드리프트 등을 보고함으로써 실사용 환경에서의 신뢰성을 검증한다.
- 3) 학습 기반 최적화 및 개인 스케줄링: 실험 로그를 활용해 베이지안 최적화/ADP로 PID·보상 계수를 자동 탐색하고, 환경 변화에 따라 강화학습 기반 보행 학습⁹⁾과 ADP 기반 제어¹⁰⁾를 이용한 온라인 개인 스케줄링을 적용한다.

마지막으로, 모든 확장 실험은 본 논문과 동일한 지표 그림 체계를 유지해 재현성과 비교 가능성을 확보하고, 실내 평탄을 넘어 실외·장애물 환경까지 일반화된 성능을 단계적으로 입증하는 것을 목표로 한다.

후 기

본 연구는 2025년도 교육부 및 전북특별자치도의 지원으로 전북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-13-KSU). 또한 한국 기초과학 지원 연구원(국가연구 시설장비 진흥센터)이 수행하는 과제(과제번호: 2023RIA6C101B042)와 군산시의 지역맞춤형 전기차 클러스터 전문

인력양성사업으로 지원되었습니다.

References

- 1) S. B. A. Kashem, S. Jawed, J. Ahmed and U. Qidwai, "Design and Implementation of a Quadruped Amphibious Robot Using Duck Feet," *Robotics*, Vol.8, No.3, Paper No.77, 2019.
- 2) M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson and R. Playter, "BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot," *IFAC Proceedings Volumes*, Vol.41, No.2, pp.10822-10825, 2008.
- 3) C. Gehring, M. Hutter, C. D. Remy and R. Siegwart, "Controlling Dynamic Gaits for a Quadrupedal Robot," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.3287-3292, 2013.
- 4) C. D. Bellicoso, F. Jenelten, C. Gehring and M. Hutter, "Dynamic Locomotion through Online Nonlinear Motion Optimization for Quadrupedal Robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.3, No.3, pp.2261-2268, 2018.
- 5) V. Barasuol, C. Semini, M. Focchi and D. G. Caldwell, "A Reactive Controller Framework for Quadrupedal Locomotion on Challenging Terrain," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.2554-2561, 2013.
- 6) Y. Nisticò, H. Kim, J. C. V. Soares, G. Fink, H.-W. Park and C. Semini, "Multi-Sensor Fusion for Quadruped Robot State Estimation Using Invariant Filtering and Smoothing," *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.10, No.6, pp.6296-6303, 2025.
- 7) Y. Nisticò, J. C. V. Soares, L. Amatucci, G. Fink and C. Semini, "MUSE: A Real-Time Multi-Sensor State Estimator for Quadruped Robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.10, No.5, pp.4620-4627, 2025.
- 8) S. Seok, A. Wang, M. Y. M. Chuah, D. J. Hyun, J. W. Lee, D. M. Otten, J. H. Lang and S. Kim, "Design Principles for Energy-Efficient Legged Locomotion and Implementation on the MIT Cheetah Robot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.20, No.3, pp.1117-1129, 2015.
- 9) J. Wu, Y. Xue and C. Qi, "Learning Multiple Gaits within Latent Space for Quadruped Robots," *arXiv Preprint*, arXiv:2308.03014, 2023.
- 10) J. Liang, S. Tang and B. Jia, "Control of Parallel Quadruped Robots Based on Adaptive Dynamic Programming Control," *Machines*, Vol.12, No.12, Paper No.875, 2024.
- 11) H. Meng, S. Zhang, W. Zhang and Y. Ren, "Optimizing Actual PID Control for Walking Quadruped Soft Robots Using Genetic Algorithms," *Scientific Reports*, Vol.14, Paper No.25946, 2024.
- 12) M. J. Kim and J. Y. Kim, "Posture Stabilization Algorithm

- of Quadruped Walking Robot in the Presence of Disturbances,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.42, No.7, pp.657-667, 2018.
- 13) H.-H. Lee, H. Kim and S.-C. Kee, “Implementation of a Simulator Environment Based on an Open-Source Autonomous Driving Platform,” Transactions of KSAE, Vol.33, No.5, pp.353-363, 2025.
- 14) W. J. Lee and S.-C. Kee, “Implementation of VILS Systems for Autonomous Driving Testbed Based on HD Map,” Transactions of KSAE, Vol.31, No.7, pp.503-511, 2023.