

시각장애인 안내를 위한 사족 보행 로봇의 보행 상태를 고려한 고유수용 감각 기반 사용자 외력 추정 기법

Proprioception-Based Estimation of User-Applied External Forces for a Quadruped Guide Robot Assisting Visually Impaired Users

최영수^{1,2} · 김지윤³ · 이동영³ · 박가성¹ · 김민성⁴ · 정우성⁵ · 이인호[†]
Yeongsu Choi^{1,2}, Jiyeun Kim³, Dongyoung Lee³, Gaseong Park¹, Minseong Kim⁴,
Woo-Sung Jung⁵, Inho Lee[†]

Abstract: For quadruped guide robots assisting visually impaired users, accurate estimation of the user's applied force is essential for safe navigation. However, precise force estimation is hindered by periodic noise induced by robot locomotion. Conventional filtering methods, such as Low-Pass Filters (LPF), often fail to separate these signals effectively. These methods tend to over-smooth the signal, resulting in significant distortion or attenuation of interaction forces. To address this problem, this paper proposes a proprioception-based external force estimation method that utilizes gait phase and contact information. By synchronizing the estimation with the robot's stepping cycle, the proposed approach selectively mitigates locomotion-induced disturbances without compromising signal fidelity. Experimental results demonstrate that the proposed method effectively removes gait-induced noise while preserving the magnitude of user interactions. Consequently, the proposed approach exhibits superior estimation accuracy compared to conventional baselines.

Keywords: Quadruped Robot, Guide Robot, Proprioceptive Sensing, Force Estimation, Physical-Human Robot Interaction

Received : Dec. 24. 2025; Revised : Feb. 13. 2026; Accepted : Feb. 25. 2026

※ This research was partially supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (No.RS-2024-00507091, Development of autonomous process operation technology based on humanoid robots for autonomous manufacturing of major manufacturing industries).

※ This work was partially supported by the Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2023-00215760, Guide Dog: Development of Navigation AI Technology of a Guidance Robot for the Visually Impaired Person).

※ This work was also partially supported by the Ulsan City & Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) grant funded by the Ulsan City [25AB1600, the development of intelligization technology for the main industry for manufacturing innovation and Human-mobile-space autonomous collaboration intelligence technology development in industrial sites].

1. MS Student, Department of Electrical and Electronics Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (woosud1763, seolmary@pusan.ac.kr)

2. Joint Program Student, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, Korea (yschoi98@etri.re.kr)

3. PhD Student, Department of Electrical and Electronics Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (wldbs2385, ask1814@pusan.ac.kr)

4. Undergraduate Student, Department of Electrical and Electronics Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (dkqksep1115@naver.com)

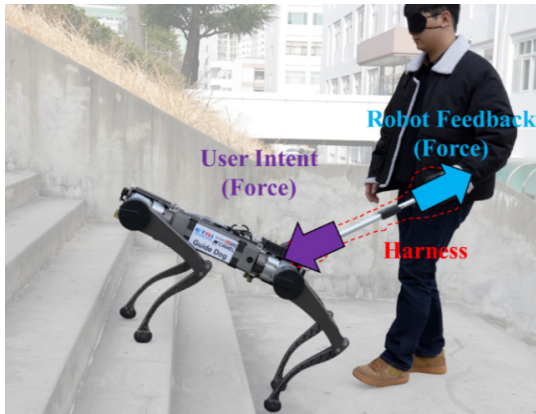
5. Principal Researcher, Co-Corresponding author: Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, Korea (woosung@etri.re.kr)

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

1. 서 론

시각장애인의 독립적인 보행을 돕는 보조 수단 중 안내견 (Guide Dog)은 사용자와 교감하며 안전하게 경로를 유도하는 가장 효과적인 역할을 수행해 왔다. 하지만 안내견은 양성 비용이 높고 공급이 수요에 비해 부족하여, 이를 기술적으로 보완할 수 있는 로봇 안내견에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 사족 보행 로봇(Quadruped Robot)은 계단이나 턱과 같은 비정형 환경에서도 높은 이동성을 가져 실제 안내견의 역할을 대체할 차세대 플랫폼으로 주목받고 있다. 시각장애인과 안내 로봇은 하네스(Harness) 또는 리드줄을 매개로 물리적으로 연결된 상태에서 보행하며, 이 물리적 상호작용의 개념도는 [Fig. 1]과 같다.

기존 연구들에서 하네스(Harness)는 주로 로봇이 사용자를 견인하거나 고정된 경로로 이끄는 물리적 연결 수단으로만 간주되어 왔다. 그러나 실제 보행 보조 상황에서 하네스는 단순한 견인 도구를 넘어, 능동적인 의지를 가진 사용자와 로봇이 수행



[Fig. 1] Conceptual diagram of bidirectional physical interaction between the user and the quadruped guide robot via a harness. The harness serves as a communication channel through which the user's navigational intent (purple arrow) is conveyed as applied forces, while the robot provides environmental feedback (blue arrow) through reaction forces

정보를 실시간으로 교환하는 핵심적인 ‘양방향 의사소통 채널’로 기능해야 한다. 하네스 접점에는 사용자의 보행 페이스 및 가·감속에 대한 ‘조작 의도’가 힘(Force)의 형태로 포함되어 있으며, 로봇은 그 반력을 통해 자신의 주행 상태를 사용자에게 피드백하기 때문이다.

특히 계단이나 경사로와 같은 비정형 지형에서 하네스를 통해 유입되는 ‘의도 신호’를 정밀하게 해석하는 것은 시스템의 안전을 결정짓는 핵심 요소다. 로봇이 사용자의 의도를 오인하여 일방적인 견인력을 유지할 경우, 급격한 속도 불일치로 인한 사용자의 전도 사고를 초래할 수 있기 때문이다. 따라서 복잡한 힘 정보에서 보행 노이즈를 제거하고 순수한 조작 의도만을 추출하는 기법은, 로봇과 사용자 간의 일방적 관계를 넘어 ‘안전한 동기화’를 달성하기 위한 필수 조건이다.

이러한 조작력을 측정하기 위해 기존 연구들은 하네스나 리드줄에 별도의 힘 센서를 부착하는 방식을 주로 사용하였다^[1-3]. 그러나 이러한 센서 부착 방식은 시스템의 하드웨어 복잡도를 높이고, 야외 환경에서의 내구성을 저하시킨다. 이에 대안으로 로봇에 내장된 모터 엔코더와 IMU센서만 이용하고 추가 센서를 설치하지 않는 센서리스(Sensorless) 외력 추정 기법들이 연구되고 있다. 대표적으로 운동량 관측기(Momentum Observer)를 활용하는 방법이 있으나^[4,5], 사족 보행 로봇의 경우 보행 시 발바닥에서 발생하는 지면 반력(Ground Reaction Force, GRF)과 기구학적 진동(Chattering)이 외력 추정 값에 섞여 들어오기 때문에, 순수한 사용자의 조작 의도만을 분리해내는 데 어려움이 있었다.

이에 본 논문에서는 별도의 F/T (Force/Torque) 센서 없이, 로봇이 내장 센서(관절 엔코더, IMU)와, 모션 플래너의 접촉스

케줄 정보만을 활용하여 사용자 외력을 강인하게 추정할 수 있는 신호 처리 프레임워크를 제안한다. 먼저, 로봇의 동역학 모델 기반의 운동량 관측기(Momentum Observer)를 통해 시스템 전체에 작용하는 외란 토크를 1차적으로 추정한다. 이후, 보행 로봇 특유의 불연속적인 지면 반력 성분과 센서 노이즈를 효과적으로 제거하고 사용자의 의도적 힘 성분만을 추출하기 위해, 적응형 칼만 필터(Adaptive Kalman Filter, AKF)와 이동 평균 필터(Moving Average Filter, MAF)를 결합한 2단계 필터링 기법을 적용한다.

제안하는 알고리즘은 보행 중 발생하는 고주파 충격 성분을 억제하고 저주파 대역의 사용자 조작 힘을 정밀하게 산출함으로써, 고가의 센서 없이도 안정적인 안내 주행이 가능한 기초를 제공한다. 이렇게 확보된 고정밀 외력 데이터는 비정형 지형에서도 사용자의 보행 의도를 왜곡 없이 반영할 수 있는 핵심 지표가 되며, 본 연구는 사례 연구를 통해 제안 기법이 실제 환경에서 안전한 속도 동기화를 달성하는 데 유효하게 기여할 수 있음을 실증하고자 한다.

2. 사용자 외력 추정 및 안내 주행 제어 전략

본 장에서는 사족 보행 로봇의 동역학을 기반으로 외력 관측기를 설계한다. 이를 토대로 보행 위상을 고려한 적응형 칼만 필터와 이동 평균 필터 프레임워크를 제안한다.

2.1 Momentum Observer 기반 외란 토크 추정

본 연구에서는 별도의 가속도 센서 없이 외란 토크를 추정하기 위해, 참고문헌^[5]의 운동량 관측기를 적용하였다. 일반적인 n자유도 로봇의 동역학 모델은 다음 식 (1)과 같이 정의된다^[6].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + \tau_{ext} \quad (1)$$

여기서 q 는 관절 각도 벡터, $M(q)$ 관성 행렬, $C(q, \dot{q})$ 는 코리올리 및 원심력 행렬, $G(q)$ 는 중력 벡터이다. τ 는 제어 입력 토크이며, τ_{ext} 는 추정하고자 하는 외란 토크이다. 로봇의 일반화된 운동량 $p = M(q)\dot{q}$ 을 이용하여 식 (1)을 적분 형태로 변환하면, 가속도항 없이 외란을 추정할 수 있는 잔차(Residual) 벡터 r 을 다음 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$r(t) = K_0 \left(p(t) - \int_0^t (\tau - \beta(q, \dot{q}) + r) dt \right) \quad (2)$$

여기서 K_0 는 관측기의 이득 행렬, $\beta(q, \dot{q}) = G(q) - C^T(q, \dot{q})\dot{q}$ 이다. 식 (2)를 통해 계산된 r 은 1차 저역 통과 필터를 거친 외란

토크와 동등한 동특성을 가지므로($r \cong \tau_{ext}$), 본 연구에서는 이를 1차적인 외력 추정치로 사용한다.

2.2 외란 토크로부터 지면 반력 및 사용자 외력 계산

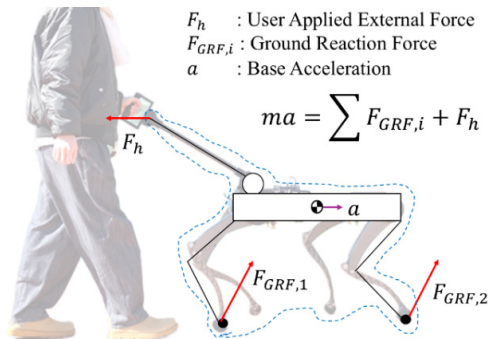
운동량 관측기를 통해 추정된 외란 토크는 지면 반력을 포함한 모든 외력 성분을 포괄한다. 본 연구의 핵심은 이 중에서 하네스를 통해 전달되는 순수한 ‘사용자 외력(User Applied External Force, F_h)’만을 추출하는 데 있으나, 관절 토크 정보만으로는 지면 반력과 사용자 외력이 혼재되어 있어 직접적인 분리가 불가능하다. 이에 본 논문에서는 Zhu et al.^[4]의 프레임 워크를 도입하여, 시스템 전체의 관성력과 지면 반력과의 관계로부터 사용자 외력을 간접적으로 도출한다.

먼저, 관절 토크로부터 로봇의 발 끝에 발생하는 지면 반력을 1차적으로 추산한다. 가상 일의 원리(Principle of Virtual Work)에 따르면 $\tau = J^T F$ 관계가 성립하므로, i 번째 다리의 자코비안을 $J_{leg,i}$ 라 할 때, 지면과 접촉한 각 다리에서 발생하는 지면 반력($\hat{F}_{GRF,i}$)은 다음 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\hat{F}_{GRF,i} = (J_{leg,i}^T)^{-1} \hat{\tau}_{ext,i} \quad (3)$$

한편, 로봇의 몸체(Base)에는 지면 반력 뿐만 아니라 하네스를 통한 사용자 외력 F_h 이 동시에 작용한다. 로봇 본체에 부착된 IMU를 통해 실제 가속도 a_{base} 를 계측할 수 있다. [Fig. 2]의 자유물체도(Free Body Diagram)를 바탕으로 로봇의 운동방정식을 세우면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$ma_{base} = F_h + \sum_{i=1}^N \hat{F}_{GRF,i} \quad (4)$$



[Fig. 2] Free Body Diagram for external force estimation. the robot's base is accelerated by the sum of ground reaction forces (F_{GRF}) and the user applied external force (F_h), the proposed method estimates F_h by utilizing the equilibrium of these forces without additional force sensors

최종적으로 식 (4)를 정리하여, 우리가 구하고자 하는 순수 사용자 외력 F_h 을 다음 식 (5)와 같이 도출할 수 있다.

$$F_h = ma_{base} - \sum_{i=1}^N \hat{F}_{GRF,i} \quad (5)$$

이 방식을 통해 별도의 힘 센서 없이도 F_h 를 추정할 수 있으나, 그대로 사용하기에는 한계가 존재한다. $\hat{F}_{GRF,i}$ 항에는 보행 시 발생하는 충격 성분, a_{base} 항에는 센서 노이즈가 포함되어 있어 추정된 F_h 신호에 심각한 왜곡을 초래하기 때문이다. 기존 연구^[4]에서는 저역 통과 필터와 이동 평균 필터의 조합을 통해 이를 보상하려 하였으나, 시각장애인 안내와 같이 부드러운 상호작용이 필수적인 어플리케이션에서는 더욱 정제된 신호가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 2.3절에서 제안하는 2단계 필터링 기법을 통해 이러한 노이즈 성분을 효과적으로 제거한다.

2.3 보행 위상 기반 AKF 및 MAF 활용 노이즈 제거

2.2절에서 도출된 사용자 외력 F_h 은 물리적 충돌이 없는 이상적인 상황에서는 정확한 값을 가지나, 실제 보행 환경에서는 다리가 지면에 닿는 순간 발생하는 강한 지면 반력 충격이 노이즈로 유입된다. 이러한 충격 잡음은 일반적인 가우시안 백색 잡음(Gaussian White Noise)과 달리 순간적으로 큰 값을 가지는 임펄스성 외란(Impulsive Disturbance) 형태를 띠므로, 고정된 공분산을 사용하는 일반적인 칼만 필터로는 효과적으로 제거하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 보행 로봇의 모션 계획(Motion Planning) 정보를 활용하여^[7] 필터의 매개변수를 실시간으로 조절하는 적응형 칼만 필터 기법을 제안한다^[8].

2.3.1 보행 위상 기반 적응형 칼만 필터 설계

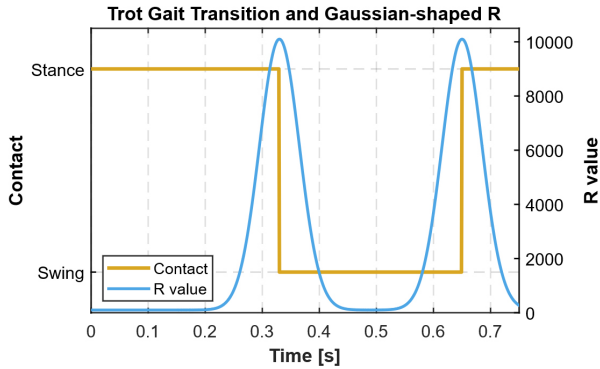
우선, 사용자의 주행 의도에 의한 외력 변화는 명확한 동역학적 모델로 기술하기 어려우므로, 본 연구에서는 이를 확률적인 랜덤 워크(Random Walk) 과정으로 가정한다. 즉, 현재 시점의 외력 $F_{h,k}$ 은 이전 시각의 값에서 불확실한 시스템 노이즈만 큼 변하는 상수 모델을 따른다고 보고, 상태 변수 x_k 를 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$x_k = F_{h,k}, \quad z_k = F_{h,raw} \quad (6)$$

이에 따른 시스템 모델과 관측 모델은 식 (7)과 같다.

$$x_{k+1} = x_k + w_k, \quad z_k = x_k + v_k \quad (7)$$

여기서 w_k 와 v_k 는 각각 시스템 잡음과 측정 잡음을 나타낸다.



[Fig. 3] Profile of adaptive measurement noise covariance (R_k) relative to gait phase transitions. the orange line represents the gait phase, and the blue line shows the variable R value

식 (7)의 시스템 모델은 $A = I_{3 \times 3}$ 인 선형 시스템이다. 일반적인 칼만 필터에서 측정 잡음 공분산 R 은 상수로 고정되지만, 본 연구에서는 모션 계획 단계에서 미리 정의된 접촉 스케줄을 활용하여 R_k 를 시변(Time-varying) 파라미터로 설계하였다. 모션 계획 단계에서 사전에 계획된 다리의 접촉 발생 시각(Event Time)을 t_{evt} 라 할 때, 특정 시점 t 에서의 측정 잡음 공분산 R_k 는 다음의 가우시안 함수 형태를 따르도록 설계했다. 보행 위상 변화에 따른 R 값의 스케줄링 전략은 [Fig. 3]에 도시하였다.

$$R_k = R_{base} + A \cdot \exp\left(-\frac{(t - t_{evt})^2}{2\sigma(t)^2}\right) \quad (8)$$

여기서 R_{base} 는 평상시(안정적 지지구간)의 기본 측정 잡음 공분산이며, A 는 충격 발생 시점에서 증가시킬 공분산의 최대 진폭(Amplitude)을 의미한다. $\sigma(t)$ 는 충격 잡음이 유효한 시간적 범위를 결정하는 표준 편차 파라미터이다. 식 (8)에 따라, 로봇은 예측된 접촉 시점 t_{evt} 에 다가올수록 R_k 값을 증가시켜 해당 구간의 관측값 z_k 에 대한 신뢰도를 낮춘다. 이는 예측된 접촉 이벤트 주변에서 R_k 를 증가시킴으로써, 필터는 과도한 위상 지연을 발생시키지 않고도 충격적인 외란을 효과적으로 제거하는 것으로 지지발이 불연속적으로 바뀌어서 발생하는 외란을 효과적으로 억제하는 역할을 수행한다. 측정 잡음 공분산의 가우시안 프로필을 형성하는 파라미터 A 와 $\sigma(t)$ 는 실험을 통해 도출된 경험적 값(Empirical values)을 사용하였다. $A = 9900$ 로 설정하였으며, σ 는 0.04로 설정하였다.

2.3.2 이동 평균 필터(MAF)를 이용한 Trot 보행의 횡방향 진동 억제

AKF를 통해 지면 충격 노이즈는 억제되었으나, 추정된 외력 신호에는 여전히 주기적인 진동 성분이 존재한다. 이는 본

연구에서 채택한 Trot 보행의 구조적 특성에 기인한다. Trot 보행은 대각선상의 두 다리가 한 쌍을 이뤄 교차하며 지지하는 방식으로, 보행 시 무게 중심이 좌우로 이동하며 순간적으로 옆으로 쏠리는 물리적 현상이 반복된다. 이로 인해 로봇의 몸체에는 사용자의 의도와 무관한 주기적인 횡방향 진동이 발생하게 된다.

이 진동은 주기적인 특성을 가지며 보행 주기와 강한 상관관계를 가지므로, 보행 주기와 동기화된 이동 평균 필터를 적용하는 것이 효과적이다. 이에 본 연구에서는 보행 주기 크기(N)의 윈도우 크기를 갖는 이동 평균 필터를 추가 적용하였다. 이동 평균 필터는 저역 통과 필터의 특성을 가지므로, Trot 보행 주파수 대역에서 발생하는 횡방향 진동 성분을 효과적으로 상쇄하는 동시에, 사용자의 저주파 대역 조작 의도만을 선택적으로 추출하는 역할을 수행한다⁹⁾. 최종적으로, 제안된 AKF와 MAF의 결합 구조를 통해 충격성 노이즈와 보행 유발 진동이 모두 제거된 사용자 외력 $\hat{F}_h$ 를 안정적으로 추정할 수 있다.

2.4 가상 댐퍼 모델 기반의 사용자 주행 의도 추정

2.3절을 통해 정밀하게 추정된 사용자 외력 $\hat{F}_h$ 이 실제 안내 주행에서 어떻게 효과적으로 활용될 수 있는지 확인하기 위한 사례 연구(Case Study)로서, 사용자의 주행 의도 속도(v_{intent})를 실시간으로 산출하는 가상 댐퍼 모델(Virtual Damper Model)을 제안한다¹⁰⁾.

사람이 로봇의 핸들을 잡고 주행하는 환경에서, 외력 $\hat{F}_h$ 은 사용자의 의도 속도 v_{intent} 와 로봇의 현재 속도 v_{robot} 간의 상대 속도 차이에 비례하는 가상 저항력으로 모델링할 수 있으며, 이는 다음 식 (9)와 같다.

$$\hat{F}_h = b(v_{intent} - v_{robot}) \quad (9)$$

여기서 b 는 시스템의 가상 댐핑 계수로 사용자가 가하는 힘에 대한 로봇의 민감도를 결정하며, 반응성과 안정성의 균형을 맞추도록 조정할 수 있다. 식 (9)를 v_{intent} 에 대해 정리하면, 로봇은 현재 자신의 주행 속도와 하네스를 통해 인가되는 외력 정보를 결합하여 다음과 같이 사용자 주행 의도 속도 v_{intent} 를 실시간으로 추정할 수 있게 된다.

$$v_{intent} = v_{robot} + \frac{1}{b}\hat{F}_h \quad (10)$$

식 (10)은 로봇이 고정된 명령에 따르는 것이 아니라, 정밀하게 추정된 외력 $\hat{F}_h$ 에 비례하여 자신의 속도를 유연하게 조절함으로써 사용자의 의도 속도에 동기화함을 의미한다. 이러한 설계는 계

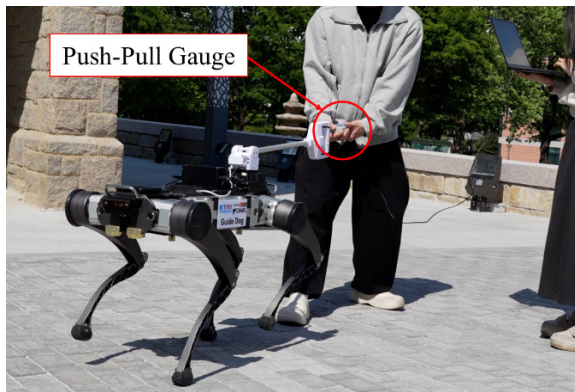
단과 같은 비정형 지형에서 로봇과 사용자의 보행 페이스 불일치로 인해 발생할 수 있는 전도 위험을 방지하고, 사용자 의도에 부합하는 유연한 속도 동기화를 달성하기 위한 목적을 갖는다.

또한, 가상 댐퍼 모델은 시스템의 에너지를 소산(Dissipation)시키는 구조적 특성을 가진다. 이는 보행 로봇의 발 구름 등에서 발생하는 불필요한 고주파 진동이 속도 명령으로 전이되어 증폭되는 것을 억제함으로써, 동적 환경에서도 시스템의 제어 안정성을 보장하는 역할을 수행한다. 결과적으로 본 모델은 복잡한 파라미터 튜닝 없이 댐핑 계수 b 의 조절만으로 사용자와 로봇 간의 부드러운 동기화가 가능함을 보여주며^[11], 이는 제안된 외력 추정 기법의 실용적 유효성을 확인하는 주요한 기제로 활용된다.

3. 실험 및 결과 검증

3.1 실험 환경 및 구성

본 연구의 실험 검증을 위해 사족 보행 로봇 RBQ10 (Rainbow Robotics) 플랫폼을 활용하였다. 사용자 인터페이스로는 커스텀 하네스를 장착하였다. 해당 하네스는 견고한 형태(Solid Type)로 제작되어 사용자의 전·후진력을 로봇 본체에 직접적으로 전달할 수 있도록 설계되었다. 또한, 보행 시 발생하는 충격을 물리적으로 완화하기 위해 하네스 연결부에 수동 피칭(Pitching) 조인트를 활용하였다. 이러한 구조적 특징은 가상 댐퍼 모델과 결합하여, 사용자의 조작 의도를 지연없이 반영함과 동시에 안정적인 상호작용을 가능하게 하게 한다. 실제 인가된 외력을 계측하기 위해 [Fig. 4]와 같이 손잡이 연결부에 디지털 푸시풀 게이지(Push-pull Gauge)를 부착하여 실제 인가된 외력(Ground Truth, GT)을 계측하였다. 제안된 알고리즘은 C++로 구현되어 500 Hz의 제어 주기로 실시간 동작한다. 제안된 필터링 프레임워크에 필요한 보행 안내 단계 및 접촉 스케줄링 정보



[Fig. 4] Experimental setup for validation. a digital push-pull gauge (red circle) attached to the custom rigid harness is used to measure the ground truth force

를 활용하기 위해, 제조사에서 제공하는 기본 제어기를 사용하지 않고 자체 개발한 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)^[12] 및 전신 제어(Whole-body Control, WBC)^[13] 기반의 보행 제어 프레임워크를 적용하였다. 제안된 알고리즘 검증을 위한 실험 환경을 [Fig. 4]와 같이 구성하였다.

실험은 크게 두 단계로 진행되었다. 첫 번째는 2.3장에서 제안한 필터 구조의 노이즈 제거 성능을 검증하기 위한 외력 추정 실험이며, 두 번째는 추정된 외력을 실제 제어에 안정적으로 반영할 수 있는지를 검증하기 위한 2.4장의 가상 댐퍼 모델을 이용하여 실제 계단 등반을 포함한 안내 주행 실험이다.

3.2 사용자 외력 추정 성능 검증

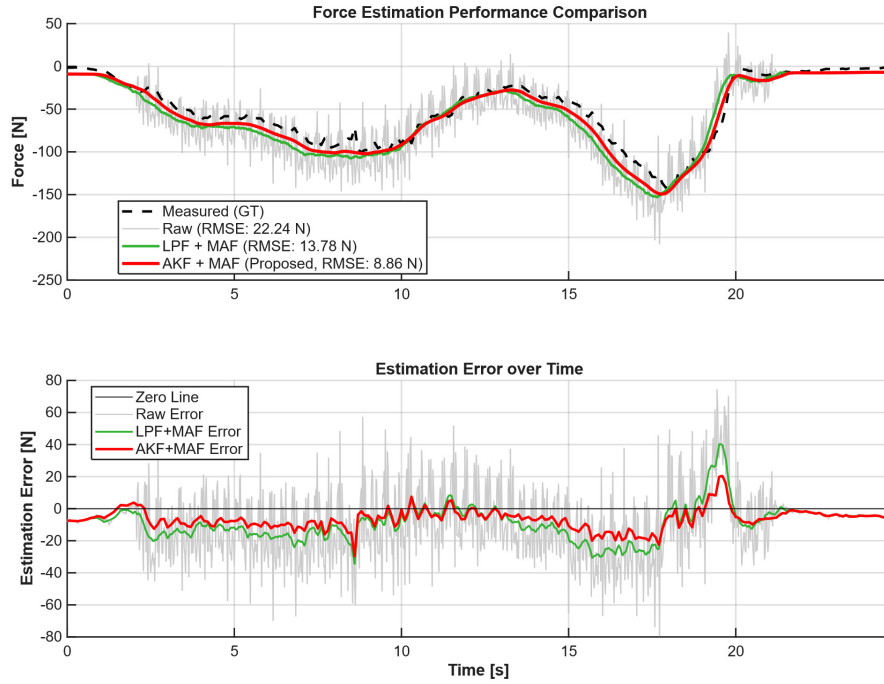
[Fig. 5]의 실험 결과를 살펴보면, 운동량 관측기만 거친 원시 데이터(Raw)는 보행 시 발이 지면에 닿는 순간 발생하는 충격으로 심한 스파이크 노이즈가 포함되어 있어, 이를 제어 입력으로 직접 사용하기에는 한계가 있음을 알 수 있다. 반면, 제안하는 알고리즘(적색 실선)은 이러한 충격 성분을 효과적으로 억제하면서도 참값(점선)을 안정적으로 추종하였다. 이는 보행 위상에 기반한 AKF가 충격 시점의 이상치를 선별적으로 걸러내고, 이어지는 MAF가 잔여 진동을 부드럽게 평활화한 결과이다.

특히 비교군인 저역 통과 필터(LPF) 기반 방식(녹색 실선)과의 성능 차이에 주목할 필요가 있다. 본 실험에서는 로봇 보행으로 인해 약 3 Hz 대역의 주기성 잡음이 외력 신호에 중첩되는 현상이 관측되었으며, 이를 억제하기 위해 LPF의 차단 주파수를 2.5 Hz로 설정하였다. 이와 같은 설정은 보행 유발 잡음을 효과적으로 감소시키는 데에는 유리하지만, 필터링 과정에서 외력 신호의 진폭이 함께 감쇠 되는 경향을 보인다. 그 결과, 시간 응답의 위상 지연은 크지 않음에도 불구하고, 실제 외력 크기에 비해 추정 값이 전반적으로 과소 추정되며 오차 분산이 증가하는 한계가 나타난다. 반면, 제안하는 기법은 충격 구간과 비충격 구간을 구분하여 처리함으로써, 보행 주기성 잡음은 억제하면서도 외력 변화의 크기와 추세를 보다 정확하게 반영하여 추정 오차를 유의미하게 감소시키는 성능을 보였다.

이러한 특성은 [Table 1]의 정량적 분석 결과에서도 확인할 수 있다. 제안 기법의 RMSE는 8.86 N으로, LPF 방식(13.78 N) 대비 약 35.7% 감소한 오차를 기록하며 개선된 추정 정확도를 보

[Table 1] Comparison of force estimation performance

Method	RMSE	PCC(r)
Raw	22.24N	0.895
LPF + MAF	13.78N	0.969
AKF + MAF(Proposed)	8.86N	0.990



[Fig. 5] Experimental results of user external force estimation during walking. (top) comparison between the ground truth (black dashed line) and the estimated forces from each algorithm. (bottom) time-series estimation error relative to the ground truth

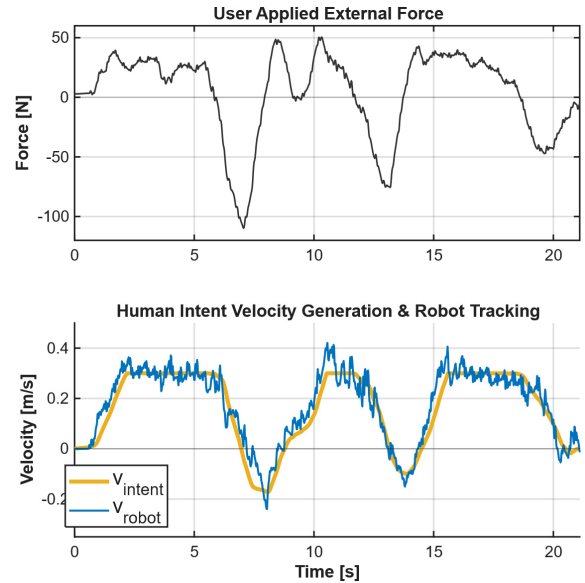
였다. 또한, 추정 신호의 선형성을 나타내는 피어슨 상관 계수 (PCC, r)를 비교해 보면, 제안 기법은 0.990의 수치를 나타내었다. 이는 LPF 방식($r=0.969$)이나 원시 데이터($r=0.895$)에 비해 참 값과의 상관관계가 상대적으로 높음을 의미하며, 제안된 필터 구조가 노이즈 제거와 신호 보존 사이의 트레이드오프를 적절히 보완하여 외력 추정의 신뢰성을 높이는 데 기여했음을 시사한다.

3.3 계단 보행 상황에서 의도 추정 실험

본 절에서는 앞서 제안한 외력 추정 알고리즘의 효용성을 검증하기 위해, 추정된 외력을 실제 로봇의 안내 주행 제어 입력으로 활용하는 응용실험을 수행하였다. 실험은 [Fig. 1]에 제시된 바와 같이 계단 환경에서 수행되었으며, 실험자가 시각 정보를 완전히 차단한 상태로 실험에 참여하였다.

[Fig. 6]은 시각이 차단된 사용자가 로봇을 조작하여 계단을 등반하는 동안 측정된 데이터를 보여준다. 상단 그래프는 사용자 외력 F_h 을, 하단 그래프는 이에 따른 의도 속도 v_{intent} 와 로봇의 실제 속도 v_{robot} 을 나타낸다.

실험결과, 로봇은 계단을 걷는 동안에도 사용자의 의도를 명확히 분리해내었으며, 하단 그래프와 같이 로봇의 속도가 사용자의 조작 의도에 지체 없이 동기화됨을 확인하였다. 계단 오르기 중 가해지는 힘이 급격하게 변하는 상황에서도 생성된 의도 속도는 부드럽게 유지되었고, 로봇은 안정적인 추적 동작을 보였다. 이를 통해 사용자는 시각 정보가 없는 상황에서도 로봇의



[Fig. 6] Experimental results of velocity intent generation during stair climbing. (Top) User applied external force (F_h). (Bottom) comparison between the generated human intent velocity (v_{intent}) and the robot's actual velocity (v_{robot}). The intent velocity is saturated at 0.3 m/s for safety, and the robot tracks it stably

안내에 따라 안전하게 계단 등반을 완수하였으며, 이는 제안하는 시스템이 거친 지형에서도 시각장애인에게 신뢰성 있는 보행 보조를 제공할 수 있음을 실증한다.

4. 결 론

본 논문에서는 사족 보행 로봇을 활용한 시각장애인 안내 시스템에서, 보행 시 필연적으로 발생하는 지면 충격과 기구학적 진동 환경에서도 사용자의 조작 외력을 정밀하게 파악할 수 있는 보행 위상 기반의 적응형 외력 추정 기법을 제안하였다.

사족 보행 로봇은 불연속적인 지면 접촉 보행 특성으로 고주파 충격 외란이 반복적으로 발생하며, 이는 물리적 인간-로봇 상호작용의 품질과 안전성을 저하시키는 주된 원인이 된다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 보행 위상과 접촉 시점을 활용하여 칼만 필터의 공분산 R_k 을 실시간으로 가변 하는 적응형 칼만 필터와 잔여 보행 진동을 평활화하는 이동 평균 필터를 결합하여, 충격 노이즈는 제거하면서도 신호의 반응성을 유지하는 2단계 외력 추정 프레임워크를 설계하였다. 이를 통해 충격성 외란은 효과적으로 억제하면서도, 사용자 의도에 대한 빠른 반응성을 유지할 수 있었다.

본 연구의 주요 성과와 기여는 다음과 같다.

첫째, 제안된 알고리즘은 보행 충격으로 인한 고주파 외란을 선별적으로 제거하여 외력 추정의 정밀도를 크게 향상시켰다. 정량적 분석 결과, 제안 기법은 신호의 과도한 감쇠나 왜곡 없이 스파이크성 충격 외란만을 효과적으로 억제하였으며, 이를 통해 LPF 대비 RMSE를 약 35.7% ($13.78\text{ N} \rightarrow 8.86\text{ N}$) 감소시켰다. 또한, 0.990의 높은 상관 계수를 확보하여, 실제 사용자 외력과의 높은 일치율과 신뢰성을 입증하였다.

둘째, 계단 등반과 같은 비정형 환경에서의 실험을 통해 제안된 추정 기법의 강인성과 실용성을 검증하였다. 시각 정보가 차단된 사용자가 오직 로봇의 햅틱 피드백에 의존하여 계단을 등반하는 실험에서, 추정된 외력은 제어 입력으로 즉각 활용 가능할 만큼 안정적이었으며, 이를 통해 거친 지형에서도 사용자의 의도를 부드럽게 추종하는 직관적인 상호작용이 가능함을 확인하였다.

향후 연구에서는 현재의 전진 방향 외력 추정을 넘어 회전 및 횡방향 조작 의도까지 인식할 수 있도록 모델을 확장할 계획이다. 특히 사용자의 보행 특성에 맞춰 가상 댐핑 계수 b 를 실시간으로 최적화하는 개인화 알고리즘을 도입하고, 비전 센서 기반의 자율 주행 기술과 통합하여 복잡한 도심 환경에서도 안전하게 작동하는 완전 자율 안내 시스템을 완성하고자 한다.

References

- [1] A. Xiao, W. Tong, L. Yang, J. Zeng, Z. Li, and K. Sreenath, "Robotic Guide Dog: Leading a Human with Leash-Guided Hybrid Physical Interaction," *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Xi'an, China, pp. 11470-11476, 2021, DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9561786.
- [2] Y. Chen et al., "Quadruped Guidance Robot for the Visually Impaired: A Comfort-Based Approach," *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, London, United Kingdom, pp. 12078-12084, 2023, DOI: 10.1109/ICRA48891.2023.10160854.
- [3] J. T. Kim et al., "Transforming a Quadruped into a Guide Robot for the Visually Impaired: Formalizing Wayfinding, Interaction Modeling, and Safety Mechanism," *Proceedings of the 7th Conference on Robot Learning*, pp. 2288-2303, 2023, [Online], <https://proceedings.mlr.press/v229/kim23c.html>.
- [4] Z. Zhu et al., "Proprioceptive-Based Whole-Body Disturbance Rejection Control for Dynamic Motions in Legged Robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 8, no. 11, pp. 7703-7710, Nov., 2023, DOI: 10.1109/LRA.2023.3322081.
- [5] H. Cha and I. Lee, "Implementation of a Gait Phase Informed Sensorless Collision Detector for Legged Robots," *2023 20th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, Honolulu, HI, USA, pp. 245-249, 2023, DOI: 10.1109/UR57808.2023.10202467.
- [6] K. M. Lynch and F. C. Park, *Modern Robotics*, [Online], <https://www.modernrobotics.org>, Accessed: Dec., 24, 2025
- [7] R. K. Mehra, "On the identification of variances and adaptive Kalman filtering," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 15, no. 2, pp. 175-184, DOI: 10.1109/TAC.1970.1099422.
- [8] G. Bledt, P. M. Wensing, S. Chignoli, and S. Kim, "Contact Model Fusion for Event-Based Locomotion in Unstructured Terrain," *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, Australia, pp. 4399-4406, 2018, DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460904.
- [9] D. A. Winter, 2009, Sep., 17, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* (4th ed.), DOI: 10.1002/9780470549148.
- [10] Y. S. Shao, T. Li, S. Keyvanian, P. Chaudhari, V. Kumar, and N. Figueroa, "Constraint-Aware Intent Estimation for Dynamic Human-Robot Object Co-Manipulation," *arXiv.2409.00215*, 2024, DOI: 10.48550/arXiv.2409.00215.
- [11] A. Q. Keenink, H. Kooij, and A. H. Stienen, "Admittance control for physical human-robot interaction," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 37, no. 11, pp. 1421-1444, DOI: 10.1177/0278364918768950.
- [12] J. D. Carlo, P. M. Wensing, B. Katz, G. Bledt 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)*, Madrid, Spain, pp. 1-9, 2018, DOI: 10.1109/IROS.2018.8594448.
- [13] C. D. Bellicoso, F. Jenelten, P. Fankhauser, C. Gehring, J. Hwangbo, and M. Hutter, "Dynamic locomotion and whole-body control for quadrupedal robots," *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 3359-3365, 2017, DOI: 10.1109/IROS.2017.8206174.



최 영 수

2024 부산대학교 기계공학부(학사)
2024~현재 부산대학교 전기전자공학과(석사)
2024~현재 한국전자통신연구원 학연연수생

관심분야: 로봇틱스, 보행 제어



김 민 성

2019~현재 부산대학교 전자공학과(학사)

관심분야: 모델 기반 보행 제어, 궤적 최적화



김 지 윤

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

관심분야: 로봇틱스, 센서



정 우 성

2007 아주대학교 전자공학/정보 및 컴퓨터
공학(학사)
2009 아주대학교 정보통신공학(석사)
2015 아주대학교 컴퓨터공학(박사)
2015~현재 한국전자통신연구원 책임연구원,
기술 총괄

관심분야: 네트워크, 로봇틱스, 인공지능, 모빌리티



이 동 영

2023 부산외국어대학교 전자로봇공학과(학사)
2023~현재 부산대학교 전기전자공학과
(석박통합과정)

관심분야: 로봇틱스, 기계 설계, 소프트 로봇틱스



이 인 호

2009 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
2011 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)
2016 한국과학기술원 기계공학과(공학박사)
2020~현재 부산대학교 전자공학과 부교수

관심분야: 로봇틱스, 기계시스템 자동화, 보행로봇



박 가 성

2025 부산대학교 전자공학과(학사)
2025~현재 부산대학교 전기전자공학과(석사)

관심분야: 로봇틱스, 보행 로봇 제어