

방호-임무 수행을 위한 하지 외골격로봇의 자세 안정 제어 운용 프레임워크

Posture Stabilization Control Framework for Lower Extremity Exoskeletons Operation in Protective-mission-oriented Tasks

이 동 규¹, 김 회 진², 최 유 신³, 하 성 민⁴, 노 준 규⁵, 황 순 웅⁵, 유 재 관⁵, 김 완 수⁵
(Dong-gyu Lee¹, Hoi Jin Kim², Yushin Choi², Seongmin Ha³, Joonkyu No⁴, Soonwoong Hwang⁴, Jae-kwan Ryu^{2,5},
and Wansoo Kim⁴)

¹Department of Robotics, Hanyang University

²Robotics and Control systems R&D, LIG Nex1

³Department of Mechatronics Engineering, Hanyang University

⁴Department of Robotics, Hanyang University ERICA

⁵Department of Artificial Intelligence and Robotics, Sejong University

Abstract: Protective-mission tasks involve heavy equipment handling, prolonged static postures, and unexpected disturbances, which lead to biomechanical stress on the lower limbs. While most lower-limb exoskeletons focus on mobility assistance, few address postural stability, and those that do often lack robustness under static or unpredictable conditions. To address this, we propose a variable stiffness virtual spring system-based control framework that enhances postural stability in military-use exoskeletons. The framework estimates the relationship between the CoM and the BOS to monitor balance status, and applies a virtual spring system to the torso when the CoM approaches the BOS boundary. To handle external perturbations, a frequency domain disturbance classification method is employed based on IMU data. A spectral norm derivative of disturbance magnitude, obtained via fast Fourier transform is subsequently used to distinguish involuntary collisions from voluntary user actions. When a collision is detected, the gain of virtual spring system is adjusted to reinforce stabilization. Experiments with an exoskeleton prototype demonstrated improved postural recovery, validating the proposed method's robustness in mission-oriented task scenarios.

Keywords: lower extremity exoskeleton, posture stability, disturbance classification, protective-mission operation

1. 서론

방호 및 임무 수행 환경에서는 고하중 장비 운반, 장시간 고정 자세 유지, 예측 불가한 상황 대응 등 복합적인 신체 활동이 요구된다. 이러한 반복적이거나 지속적인 부하 조건은 관절의 과사용을 유발하며, 특히 하지 관절과 척추에 생체역학적 스트레스를 집중시켜 피로 누적 및 손상 위험을 높인다. 미국 육군의 2021년 부상 감시 보고서에 따르면, 전체 군 의료 진료 중 42%가 부상 관련이며, 이 중 70%가 근골격계 외상이며, 그 가운데 25.2%가 관절 과사용에 의한 손상, 19.7%가

낙상으로 인한 손상으로 보고되었다[1]. 이러한 배경에서 하지 착용형 외골격로봇은 피로 누적 및 부담을 완화하고, 작전 수행 능력의 지속성 및 안전성을 확보하기 위해 적합한 애플리케이션이다. 외골격로봇은 착용자의 움직임을 실시간으로 추종하고, 그 의도에 기반한 보조 토크를 생성함으로써 생체역학적 부담을 감소시킨다. 특히, BLEEX [2], HUMA [3], HAL [4], HEXAR [5] 등과 같은 외골격로봇은 방호 및 임무 수행 환경을 고려한 외골격로봇으로, 이를 기반으로 한 근력 증강 제어 전략들이 다수 제안되어 왔다[6].

*Corresponding Author

Manuscript received November 3, 2025; revised November 18, 2025; accepted November 18, 2025

이동규: 한양대학교 로봇공학과 대학원생(dong2391@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0009-0004-6059-7854)

김회진: LIG Nex1 무인체계/로봇연구소 선임연구원(hoejin.kim@lignex1.com, ORCID[®] 0009-0002-2555-8791)

최유신: LIG Nex1 무인체계/로봇연구소 연구원(yushin.choi@lignex1.com, ORCID[®] 0009-0001-6593-1186)

하성민: 한양대학교 메카트로닉스공학과 대학원생(gktjdals9416@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0009-0006-9348-1131)

노준규: 한양대학교 ERICA 로봇공학과 연구조교수(njkonly@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0009-0006-6601-1548)

황순웅: 한양대학교 ERICA 로봇공학과 연구부교수(hswfile@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-4845-7416)

유재관: LIG Nex1 무인체계/로봇연구소 연구소장, 세종대학교 AI 로봇학과 부교수(jackwan.ryu@lignex1.com, ORCID[®] 0000-0003-4176-3867)

김완수: 한양대학교 ERICA 로봇공학과 부교수(wansookim@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-3254-3929)

※ 본 논문은 2021년부터 대한민국 방위사업청의 재원으로 국방기술진흥연구소에서 수행하는 핵심기술 연구개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: KRIT-CT-21-039-00, 방호/임무장비 연동 상하지 착용로봇 설계 및 운용기술 개발(참여율: 100%)).

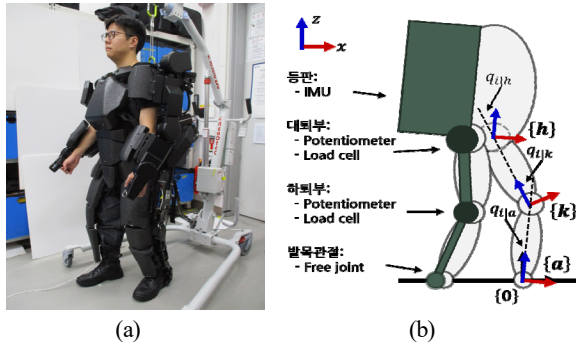


그림 1. (a) 본 연구에서 사용된 하지 외골격로봇 착용 사진. (b) 하지 외골격 시스템의 센서 배치 및 각 관절에 설정된 시스템 좌표계 구성.

Fig. 1. (a) Picture of wearing the lower-limb exoskeleton used in this study. (b) Sensor placement and joint coordinate configuration of the exoskeleton.

기존 하지 외골격로봇의 제어 연구는 유압 시스템을 이용한 보행 부하 저감[7], DME (Dynamic Manipulability Ellipsoid) 기반의 에너지 효율적 보행 패턴 생성[8], 또는 virtual model을 활용한 지면반력 보상[9] 등 착용자의 의도를 기반으로 한 모빌리티 향상과 근력 보조에 집중되어 왔다. 그러나 이와 같은 제어 전략들은 대부분 보행 중심의 이동성 향상에 초점을 맞추고 있어, 정적 자세 유지나 외란 발생 상황에서의 안정성 확보에는 적용이 제한적이다. 특히, 방호-임무 환경에서는 관절 과사용 등으로 사용자의 자세가 스스로 불안정해지는 내부 요인과, 낙상-충격 등 외부 간섭에 의한 비자발적으로 자세가 불안정해지는 외부 요인이 빈번히 발생하므로, 기존의 보조 토크 기반 제어만으로는 충분한 안정성을 확보하기 어렵다.

하지 외골격로봇 제어 분야에서 착용자의 균형 유지에 관한 연구는 제한적으로 수행되어 왔으며[10], 주로 CoM (Center of Mass)와 BOS (Base of Support)의 관계를 활용한 자세 안정성 판별 및 Virtual Model Control 등의 방법이 시도되었다. 최신 연구에서는 stance 상태에서 Centroidal momentum과 CoM 위치를 동시에 제어하여 외란에 대응하거나[11], 인간-로봇 결합계를 Flywheel Inverted Pendulum으로 모델링하여 Orbit Energy 지표를 기반으로 한 제어 전략을 제시하였다[12]. 그러나 이러한 접근법들은 정밀한 동역학 모델과 지면반력 측정이 필요하므로, 장비 하중이 수시로 변하는 실제 방호-임무 환경에서는 모델 불확실성 문제를 야기하여 적용에 한계가 있다. 한편, Virtual Spring Damper System 기반의 VG (Virtual Guard)는 착용자의 CoM이 BOS의 임계 범위에 도달했을 때 몸통부에 가상의 힘을 전달하여 자세 안정성을 보장하는 전략을 제안하였다[13]. 해당 연구에서는 자세 불안정 상태를 CoM이 BOS의 경계로부터 사전 정의된 임계 범위 이내로 진입하는 상황으로 간주하였다. 이는 착용자의 자율적인 움직임을 방해하지 않으면서도 자세 불안정이 임박한 상황에서만 개입하도록 설계되었다. 그러나 실제 임무 환경에서는 갑작스러운 외란이나 제3 요인에 의한 충격 가능성이 존재하므로, 이를 판별하고 적절히 대응할 수 있는 보완적 제어 전략이 요구된다.

외란 추정 기술은 로봇 제어 분야에서 오랫동안 연구되어 왔으며, 플랜트 모델, 제어 입력, 출력값을 기반으로 구성된

관측기가 다양한 시스템에 적용되어 왔다[14,15]. DOB (Disturbance Observer)와 MOB (Momentum-based Observer)는 시스템 모델을 기반으로 외란을 추정하는 대표적인 방식이다[16,17]. 이를 활용하여 한 연구에서는 MOB를 이용한 센서리스 충돌 검출 기법을 구현하여 높은 민감도와 낮은 오검출률을 입증하였다[18]. 그러나 이러한 모델 기반 관측기는 외란의 크기와 방향을 추정하는 데에는 유리하지만, 인간-로봇 결합 시스템에서 발생하는 부정확한 모델링과 파라미터 변화에 취약하다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 최근 인간-로봇 협업 분야에서는 작업공간에서 mass-damper system을 통해 외란을 추정 후, FFT (Fast Fourier Transform)를 이용하여 관심 주파수 영역의 진폭을 측정하고 SND (Spectral Norm Derivative) 지표를 통해 충격과 의도를 구분하는 방법을 제안하였다[19, 20]. 이 방법을 통해 인간-로봇 결합 환경에서도 모델 의존성을 줄이고 외부 충격을 직접 판별하는 것이 가능하다.

모델에 기반하여 외란의 특성을 구분하지 않고 동일한 제어 전략을 적용한 기존 연구들과 대비하여, 본 연구는 방호-임무 중 빈번하게 발생하는 순간적인 외부 충격에 의한 자세 불안정 문제에 집중한다. 이를 위해 IMU (Inertial Measurement Unit) 신호를 사용하여 주파수 분석을 활용한 SND 지표를 통해 별도의 모델 없이 충격을 판별하고, CoM과 BOS를 통해 자세 안정성을 실시간으로 판별한다. 가변 강성 가상 스프링 시스템을 통해 착용자의 자세가 불안정 영역에 도달 시 자세 안정 제어를 실행한다. 충격이 판별될 경우, 가상 스프링 시스템(virtual spring system)의 파라미터를 조정하여 보조력을 즉각 증대시키고, 충격에 의한 자세 불안정을 대응할 수 있도록 하였다. 이러한 통합 전략은 착용자의 자발적 움직임과 예기치 못한 외부 충격이 혼재된 상황에서 원인에 따른 차별적 대응을 가능하게 함으로써, 임무의 지속성과 착용자의 안정성을 동시에 확보할 수 있도록 한다.

II. 시스템 구성

본 연구에서 사용한 그림 1 (a)의 하지 외골격로봇 시스템은 시상면에서만 움직임이 발생하여 그림 1 (b)와 같이 x-z 평면에서 구성하였다. 시스템은 좌우 대칭의 두 개의 half-body model (이하 모델)로 구성된다. 각 모델은 발목(a), 무릎(k), 고관절(h)의 3 자유도 매니퓰레이터로 간주한다. 본 연구는 착용자가 제자리에 선 상태에서 정적 임무를 수행하는 상황을 가정한다. 따라서 시스템은 양발이 항상 지면에 닿아있는 double stance 상태로 설정된다. 그림 1 (b)의 센서를 통해 각 모델의 관절 각도와 관절 토크를 각각 $q_i = [q_{i|a} \ q_{i|k} \ q_{i|h}]^T$, $\tau_i = [\tau_{i|a} \ \tau_{i|k} \ \tau_{i|h}]^T$ 로 추정한다. 그림 2의 q_T 는 등관부의 IMU에서 측정된 pitch 각도이며, $i \in \{1, 2\}$ 는 왼쪽/오른쪽 모델을 의미한다. 각 모델은 발목 관절을 기준 좌표계로 설정하며, 이를 중심으로 기구학을 통해 Jacobian 및 CoM 위치를 계산한다.

III. 자세 안정 및 충격 판별

1. 자세 안정 판별

로봇과 착용자의 자세 안정성 판별을 위해 BOS와 CoM 간의 관계를 이용한다. BOS는 사람과 로봇 모두 같게 형성되지만,

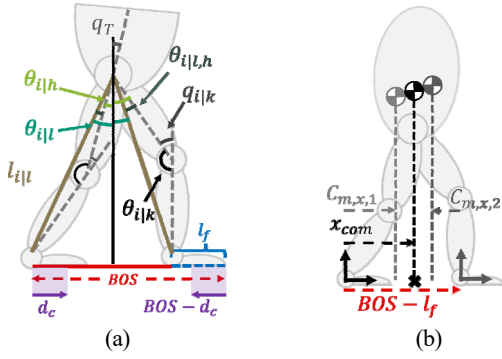


그림 2. (a) BOS 계산을 위한 시스템 구성. (b) body 모델로부터 생성된 CoM을 활용한 전체 CoM 추정.

Fig. 2. (a) System model for calculating the Base of Support (BOS). (b) Estimation of total Center of Mass (CoM) using CoM data from body models (a).

CoM은 서로 다르므로 각 CoM이 BOS의 임계 범위 내에 위치하는지를 기준으로 안정성을 판별한다. BOS는 그림 2 (a)와 같이 관절 각과 링크 길이를 기반으로 구한다:

$$\begin{aligned} l_{i|l}^2 &= l_{th}^2 + l_{sh}^2 - 2l_{th}l_{sh}\cos(\theta_{i|k}), \\ \theta_{i|l,hip} &= \sin^{-1}\left(\frac{l_{sh}}{l_{i|l}}\sin(\theta_{i|k})\right), \\ \theta_{i|l} &= q_{i|h} - \theta_{i|l,hip}, \\ BOS &= \sum_{i=1}^2 l_{i|l}\sin(\theta_{i|l}) + l_f. \end{aligned} \quad (1)$$

이때, $\theta_{i|k} = \pi - q_{i|k}$ 로 대퇴와 하퇴 사이의 내각이며, $\theta_{i|h} = q_{i|h} - q_T$ 로 기준 좌표계의 z축과 대퇴 간의 각도이다. l_{th} 와 l_{sh} , l_f 는 각각 대퇴와 하퇴, 발 링크의 길이이다. BOS는 스칼라로 정의되며, 뒷발 기준으로 계산된다.

CoM은 각 모델의 발목을 기준으로 계산하며, 이때 x축 성분만 고려한다. 각 모델의 CoM 계산과 식 (1)을 통해 그림 2 (b)와 같이 전체 CoM의 위치를 계산한다:

$$\begin{aligned} C_{m,i} &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N (m_j \cdot {}^0p_{i|j_c}), \\ x_{com} &= \frac{1}{2} \sum_i c_{m,i} + (BOS - l_f). \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 j 는 1번부터 순서대로 발목, 무릎, 고관절 프레임의 순서이며, j_c 는 프레임 j 에서의 CoM의 위치이다. m_j , M 은 각각 링크 j 의 질량 및 모델의 질량이며, ${}^0p_{i|j_c}$ 는 모델 i 의 기준 좌표에서 본 j_c 까지 위치이다. 로봇과 사람의 CoM 모두 동일한 방식으로 half-body model을 사용하여 구하며, 각각 $x_{r,com}$, $x_{h,com}$ 로 표기한다.

식 (1)과 (2)를 바탕으로, CoM의 위치가 BOS 내에서 임계 거리 d_c 를 초과한 경우를 “불안정(unsafe)”, 그렇지 않은 경우를 “안정(stable)”으로 다음과 같이 영역을 구분한다:

$$stance = \begin{cases} stable & , d_c \leq x_{com} \leq BOS - d_c \\ unstable & , otherwise. \end{cases} \quad (3)$$

2. 충격 판별

자세 안정성 강화를 위해, 로봇 등판 IMU 센서의 x축 선형 가속도 값을 통해 외란($\hat{d} = acc_x$)을 실시간 추정한다. 추정된 외란 $\hat{d}$ 을 매 스텝 L 개의 sample과 half-Hann window ω_n 을 사용하여 m 번째 주파수 성분의 진폭을 이산 푸리에 변환 기반 FFT를 사용하여 계산한다:

$$\hat{d}_w^m = \left\| \sum_{n=1}^{L-1} \omega_n \hat{d}_n e^{\frac{-2\pi i}{N} mn} \right\|, m = 0, \dots, L-1. \quad (4)$$

식 (4)에서 분석된 외란의 진폭은 [15]에서 제안한 지표 I_{SND} 를 기반으로 충격을 판별하며, 관심 주파수 대역 $[\omega_{min} : \omega_{max}]$ 에 대한 지표는 다음과 같이 산출할 수 있다:

$$I_{SND} = \frac{d}{dt} \left\| \hat{d}_{\omega_{min} : \omega_{max}} \right\|_1. \quad (5)$$

식 (5)의 지표를 활용하여 각 관절에서의 외란이 상호작용인지 ($d=0$), 충돌에 의한 것인지 ($d=1$)는 다음의 조건에 따라 판별한다:

$$d = \begin{cases} 1, & I_{SND} \geq d_{th}, \\ 0, & I_{SND} < d_{th}. \end{cases} \quad (6)$$

IV. 자세 안정 제어

로봇 몸통의 CoM 위치에 사람 또는 로봇의 CoM이 임계 범위를 초과한 만큼 virtual spring system을 적용하며, 식 (3)을 기반으로 아래와 같이 힘을 생성한다:

$$F_{VG} = \begin{cases} K_x e_r, & \text{if } x_{r,com} \leq d_c \\ K_x e_h, & \text{if } x_{h,com} \geq BOS - d_c \end{cases} \quad (7)$$

여기서 $e_r = d_c - x_{r,com}$, $e_h = (BOS - d_c) - x_{h,com}$ 이며, 로봇의 CoM이 항상 사람의 CoM보다 뒤에 형성되는 구조로 설계되어 있기 때문에, 로봇의 CoM은 BOS 뒤, 사람의 CoM은 BOS 앞쪽만 고려한다. 이때 K 는 stiffness 변수로, 식 (6)에서 collision으로 판별된 시점에는 ($K_x = K_c$), 의도도 판별됐을 때는 ($K_x = K_n$)이 적용된다. 이때 생성되는 F_{VG} 는 최대 100N으로 제한하며 그 외의 상황에 대해서는 0N을 출력한다.

식 (7)에서 몸통에 생성되는 힘을 각 관절 토크로 변환하여 제어 입력을 생성하기 위해 먼저, 각 모델의 몸통에 생성되는 힘 F_i 로 분배한다. 전체 F_{VG} 를 BOS에서 로봇 CoM의 위치에 따라 분배한다:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x_{r,com}}{BOS}, \quad \eta = 0.8(1 + e^{-10(\xi - 0.5)})^{-1} + 0.1, \\ F_f &= \eta \cdot F_{VG}, \quad F_r = (1 - \eta) \cdot F_{VG}. \end{aligned} \quad (8)$$

F_f 와 F_r 는 각각 앞/뒷다리의 모델에 대한 힘이며, 앞/뒤 구분은 각 모델의 기준 좌표에서 바라본 고관절까지 x성분 길이를 비교하여 더 큰 값을 가진 모델을 뒷다리로 설정한다. η 를 구성하는 sigmoid 함수는 양다리 중 한 발에 가해지는 힘의 비율이 최소 0.1은 될 수 있도록 제한하였다.

각 모델로 분배한 힘을 제어 입력으로 적용하기 위한 관절 토크는 Jacobian을 통해 변환한다:

표 1. 각 관절 프레임 신체의 분절의 질량, 길이 및 질량 중심의 위치. $j = 1, 2, 3$ 은 발목, 무릎, 고관절을 의미한다. f 는 발 길이에 대한 데이터.

Table 1. Body segment mass, length, and center of mass location for each lower-limb joint frame. j denotes the frame indices, where $j = 1, 2, 3$ correspond to the ankle, knee, and hip, respectively. The row labeled f includes supplementary data on foot length.

j	관절 위치	m_j [kg]	l_j [m]	$j p_{jc}$ [m]
f	발	-	0.026	-
1	발목/하퇴	3.441	0.390	0.169
2	무릎/대퇴	7.400	0.460	0.169
3	고관절/몸통	50.172	0.215	0.246

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(q_1) & 0_3 \\ 0_3 & J_2(q_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

V. 실험 및 결과

1. 실험 설계

본 연구에서 제안하는 프레임워크를 검증하기 위해 외골격 시스템을 착용하여 실험을 진행하였다. 본 실험에서 사용하는 외골격 시스템은 그림 1 (b)와 같이 센서 구성이 되어있으며, 관절 각도 및 토크를 활용하기 위해 선형 정보를 측정하는 potentiometer와 load cell의 측정값을 활용하여 추정하였다. 자세 안정 판별을 위한 사람의 정보는 Winter, D. A.가 제안한 anthropometric data를 참고하였으며[20], 이때 착용자(172cm, 74kg)에 대한 정보는 표 1과 같다. 자세 안정 범위의 임계값 $d_c = 0.05m$ 로 설정하였으며, 이는 기존 Virtual Guard에서 설정한 값과 동일하다[11].

virtual spring system의 파라미터는 $K_n = 100 N/m$ 로, 충격으로 판별될 시 $K_c = 600 N/m$ 로 변경되도록 설정하였다. 한 번 충격으로 판별되면, 약 3초간 변경된 파라미터를 적용하도록 구성했다.

방호-임무 장비 상황을 고려하여 그림 1 (a)와 같이 방호 장갑을 장착한 외골격 장비 몸통부의 방호 장갑에 망치와 같은 단단한 물건으로 가격하여 충격을 발생시켰다. 이때 착용자가 충격이 발생하는 것을 인지하여 미리 방어 행동을 하는 것을 막기 위해 시야를 차단한 후 진행하였다. 충격 판별을 위해 사용한 FFT에 입력한 샘플 수 L 은 128개로 설정하였으며, 관심 주파수 대역 $[\omega_{\min} : \omega_{\max}]$ 은 로봇과 착용자 간의 상호작용과 센서 노이즈로 인해 나타나는 주파수 대역을 구분할 수 있도록 설정하였다. 임계값 d_{th} 은 착용자가 의도적으로 움직였을 때 발생하는 I_{SND} 와 로봇의 제어 입력으로 인해 발생하는 I_{SND} 를 구분할 수 있도록 설정하였다.

본 연구에서 전체 프레임워크에 대한 실험에 앞서 충격과 상호작용을 판별하기 위한 임계값 d_{th} 를 설정하는 실험을 진행하였다. 설정된 d_{th} 를 적용하여 위에서 가정한 방호-임무 장비 상황에서 virtual spring system이 상호작용일 때와 충격이 발생했을 때 파라미터를 변경하여 자세 안정성을 강화할 수 있는지 확인하였으며, 자세 안정제어와 충격 판별 모두 미적

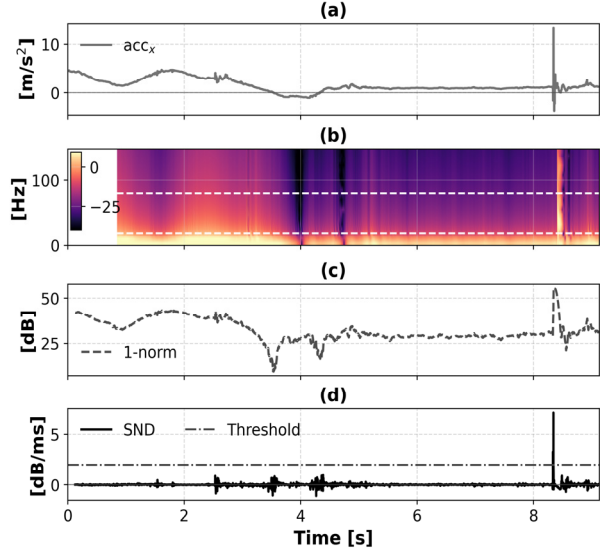


그림 3. 제안된 충격 판별 알고리즘의 흐름. IMU 기반 외란 신호를 주파수 영역으로 변환하여 관심 대역의 스펙트럼 변화율을 I_{SND} 로 계산하고, 실험적으로 설정된 임계값과 비교하여 충격 여부를 판별하는 과정을 나타낸다.

Fig. 3. Procedure of the proposed collision detection algorithm. IMU-based disturbance signals are transformed into the frequency domain, and the spectral variation in the selected band is quantified as I_{SND} , which is then compared against an experimentally defined threshold to determine collision.

용, 자세 안정제어만 적용, 제안하는 프레임워크 3가지 경우에 대한 실험군을 구성하여 제안하는 프레임워크의 자세 안정성을 검증하였다.

2. 실험 결과

그림 3 (a)에서 상호작용 중 외골격 시스템에 충격이 발생했을 때 IMU의 x축 가속도 데이터를 확인할 수 있으며, 이때의 데이터를 기반으로 충격 판별을 진행하였다. 착용자가 외골격 시스템과 상호작용 중 8초 이후에 충격이 발생하였으며, 이때의 데이터를 시간의 흐름에 따라 FFT 분석한 결과를 그림 3 (b)에서 확인할 수 있다.(이때 좌측 컬러바의 단위는 [dB]이다.) 관심 주파수 대역은 [15]와 유사하게 $\omega_{\min} = 10$ Hz, $\omega_{\max} = 80$ Hz로 설정하였다. 설정한 관심 주파수 대역에서의 진폭에 1-norm을 취한 값은 그림 3 (c)에서 확인할 수 있다. 이때의 값을 미분하여 산출된 I_{SND} 를 그림 3 (d)에서 확인할 수 있으며, 상호작용 중에는 I_{SND} 가 2.0 dB/ms에 미치지 않았으나, 충격 발생 시 임계값을 초과하며 급격히 증가하는 양상을 확인할 수 있었다.

그림 3에서 설정한 변수들을 적용하여 전체 프레임워크에 대한 검증은 그림 4를 통해 확인할 수 있다. 25초 전까지는 착용자가 자의로 움직이며 외골격 시스템과 상호작용을 하였으며, 이때 그림 4 (a)에서 로봇 또는 사람의 CoM이 자세가 불안정 영역에 도달 시 자세 안정 제어를 위해 Virtual Guard가 실행되는 것을 그림 4 (d)에서 확인할 수 있다. 등판 IMU를 활용한 I_{SND} 가 충격을 판별하면, 약 3초간 Virtual Guard의 파라

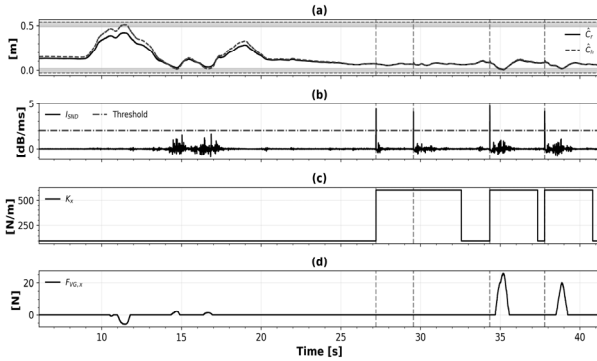


그림 4. 제안된 프레임워크의 실험 결과. 충격 판별 지표 I_{SVD} 가 임계값을 초과하는 지점 (세로 점선)에서 Virtual Guard의 강성이 증가하여 더 강한 보조력을 생성하여 자세 안정성을 강화하는 과정을 보여준다.

Fig. 4. Experimental results of the proposed framework. When the shock index I_{SVD} exceeds the threshold (vertical dashed line), the Virtual Guard stiffness temporarily increases, producing stronger corrective forces that enhance postural stability.

미터가 변경되는 것을 그림 4 (b) 와 (c)에서 확인할 수 있다. 그림 4 (a)의 충격으로 판별한 구간에서 자세가 불안정 영역에 도달 시 변경된 파라미터를 적용한 virtual spring system이 실행됨을 그림 4 (d)에서 확인하여 본 연구에서 제안하는 프레임워크가 작동함을 확인할 수 있다.

제안하는 프레임워크가 자세 안정성 회복에 유리한지 검증하기 위하여, 자세 안정제어와 충격 판별 모두 미적용 (off/off), 자세 안정제어만 적용(on/off), 자세 안정제어와 충격 판별 모두 적용(proposed) 세 가지 조건에서 그림 4와 동일한 종류의 충격을 가했을 때 CoM의 움직임을 확인하였다. 각 조건에 대해 26회씩 실험을 수행하였으며, 이때 CoM이 자세 안정 영역을 벗어난 시간의 분석은 그림 5 (a)에, 각 시도 별 CoM 움직임은 그림 5 (b)에 나타난다. 그림 5 (a)에 따르면, off/off에서는 CoM이 불안정 영역에 머무는 시간이 평균 1.608초로 가장 길었으며, proposed에서는 평균 0.972초로 off/off 대비 약 0.63초 단축되었다. on/off 조건은 평균 1.464초로 나타났다. 그림 5 (b)의 대표 궤적에서도 동일한 경향을 확인할 수 있는데, proposed 조건에서는 충돌 직후 충격 판별과 자세 안정제어가 동시에 작동하여 빠른 복귀가 이루어진 반면, off/off 및 on/off 조건에서는 충격 발생 후 CoM이 불안정 영역에서 상대적으로 완만하게 변화하였다. 이는 착용자가 넘어지지 않기 위해 의도적으로 버티는 힘의 영향으로 해석된다.

VI. 결론

본 연구에서는 외골격 시스템 착용자의 방호-임무 수행이라는 특수한 환경에서 발생할 수 있는 착용자의 행동 또는 외부 충격에 따른 자세 불안정 상황에 대응하기 위한 자세 안정 제어 프레임워크를 제안하였다. 제안된 프레임워크는 착용자의 CoM-BOS 관계를 기반으로 한 자세 안정성 판별과 주파수

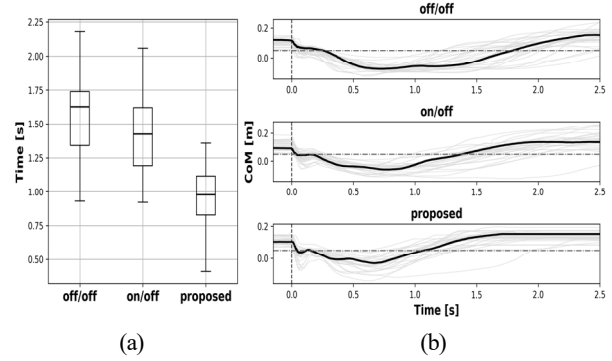


그림 5. 실험군 간 자세 안정성 비교. (a) CoM이 불안정 영역 (BOS+0.05)에 머무른 시간의 분포. 세 가지 조건은 off/off (자세 안정제어와 충격 판별 모두 미적용), on/off (자세 안정제어만 적용, 충격 판별 미적용), proposed (자세 안정제어와 충격 판별 모두 적용)이다. 박스는 중앙값과 사분위 범위를 나타낸다. (b) 충돌 발생 시점($t = 0$ s)에 정렬한 대표적인 CoM 움직임. 얇은 회색 선은 개별 실험 데이터를, 검은 굵은 선은 중앙값에 해당하는 대표 궤적을 나타낸다.

Fig. 5. Comparison of postural stability across experimental groups. (a) Distribution of the time during which the CoM remained in the instability region (BOS+0.05). The three conditions were off/off (both stabilization and collision distinction disabled), on/off (only stabilization enabled, collision distinction disabled), and proposed (both stabilization and collision distinction enabled). Boxes indicate the median and interquartile range. (b) Representative CoM trajectories aligned at the collision instant ($t = 0$ s). Thin gray lines represent individual trials, while the bold black line shows the representative trajectory corresponding to the median in (a).

영역 기반의 충격 판별을 통합하였으며, 불안정의 원인을 구분하여 그 결과에 따라 virtual spring system을 차별적으로 적용하였다. 실험을 통해 CoM이 불안정 영역에 도달할 경우, 방향별 안정 제어가 적절히 수행됨을 확인하였고, 충격 발생 시 IMU 기반 I_{SVD} 지표를 통해 충격을 빠르게 검출하여 제어 파라미터를 일시적으로 변경함으로써, 고정된 제어를 적용한 비교 실험군에 대비하여 보다 빠른 자세 안정성 회복을 확인할 수 있었다.

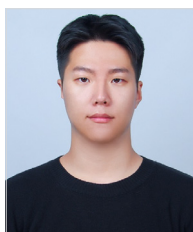
하지만, 본 연구에서 CoM 속도 추정 과정에서 샘플링 간격 불균형성과 노이즈 증폭으로 인해 추정 안정성이 부족하여 damping 파라미터를 제외한 virtual spring system을 사용하여 under-damped 상태로 구현하였다. 본 연구의 실험 검증은 착용자의 안전을 고려하여 저강도의 단일한 충격 조건에서만 수행되었다. 이는 실제 임무 환경에서 발생할 수 있는 다양한 충격 상황을 충분히 반영하지는 못할 수 있다는 한계를 가진다.

향후 연구에서는 이러한 제약을 개선하고자 CoM 속도 추정의 정밀도를 개선하여 critically damped 조건을 만족하는 virtual spring damper system으로 구현할 것이며, 현재 double stance 구간으로 한정된 프레임워크 적용을 single stance 및 전

보행 주기까지 확장하여 다양한 환경에서의 적용 가능성을 검증할 것이다[22]. 또한, 충격 발생 시 제어 파라미터를 단계적으로 변경하는 방식에서 나아가 충격 크기와 착용자의 반응에 따라 연속적으로 이득을 조정하는 방식과, 다양한 착용자 및 장비 하중 조건에서 일관된 성능을 보장하기 위한 제어 파라미터 정규화 방법론을 통해 개인화를 고려한 유연한 대응이 가능하도록 연구를 확장할 것이다.

REFERENCES

- [1] O. Manhlmann, A. Schuh-Renner, and M. Canham- Chervak, "Annual Injury Surveillance Report 2021 Summary," report., No. TIP No. 121230123, 2023.
- [2] A. Zoss, H. Kazerooni, and A. Chu, "On the mechanical design of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX)," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, AB, Canada*, pp. 3465-3472, Aug. 2005.
- [3] D. J. Hyun, H. Park, T. Ha, S. Park, and K. Jung, "Biomechanical design of an agile, electricity-powered lower-limb exoskeleton for weight-bearing assistance," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 95, pp. 181-195, 2017.
- [4] Y. Sankai, "HAL: Hybrid assistive limb based on cybernics," *Robotics Research Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol 66, pp. 25-34, 2010.
- [5] W. Kim, H. Lee, D. Kim, J. Han, and C. Han, "Mechanical design of the Hanyang exoskeleton assistive robot (HEXAR)," *2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea (South)*, pp. 479-484, 2014.
- [6] H. F. N. Al-Shuka, M. H. Rahman, S. Leonhardt, and I. Ciobanu, "Biomechanics, actuation, and multi-level control strategies of power-augmentation lower extremity exoskeletons: an overview," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 7, pp. 1462-1488, 2019.
- [7] H. Kim, Y. Shin, and J. Kim, "Design and locomotion control of a hydraulic lower extremity exoskeleton for mobility augmentation," *Mechatronics*, vol. 46, pp. 32-45, 2017.
- [8] W. Kim, S. Lee, M. Kang, J. Han, and C. Han, "Energy-efficient gait pattern generation of the powered robotic exoskeleton using DME," *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan*, pp. 2475-2480, 2010.
- [9] J. Lee, H. Kim, J. Jang, and S. Park, "Virtual model control of lower extremity exoskeleton for load carriage inspired by human behavior," *Autonomous Robots*, vol. 38, no. 2, pp. 211-223, 2015.
- [10] M. F. Hamza, R. A. R. Ghazilla, B. B. Muhammad, and H. J. Yap, "Balance and stability issues in lower extremity exoskeletons: A systematic review," *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 40, no. 4, pp. 1666-1679, 2010.
- [11] A. Vallinas, A. Keemink, C. Bayón, E. van Asseldonk, and H. van der Kooij, "Momentum-based balance control of a lower-limb exoskeleton during stance," *2023 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, Singapore, Singapore, pp. 1-6, 2010.
- [12] M. Li, B. Zhang, L. Liu, X. Tan, N. Li, and X. Zhao, "Balance recovery for lower limb exoskeleton in standing posture based on orbit energy analysis," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 12, 2024.
- [13] Racine and J. Charles, "Control of a lower extremity exoskeleton for human performance amplification," *University of California, Berkeley*, 2003.
- [14] A. Radke and Z. Gao, "A survey of state and disturbance observers for practitioners," *2006 American Control Conference*, Minneapolis, MN, USA, pp. 6-, 2006.
- [15] G. Park and J. Back, "Survey of disturbance observer-based controller and related challenging problems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 4, pp. 363-372, 2024.
- [16] W.-H. Chen, D. J. Ballance, P. J. Gawthrop, and J. O'Reilly, "A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 4, pp. 932-938, 2000.
- [17] J. Back and W. Ha, "Robust tracking of robot manipulators via momentum-based disturbance observer and passivity-based controller," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 976-985, 2019.
- [18] J. Wu, Z. Liao, Y. Han, and Z. Xiong, "An integral design for high performance sensor-less collision detection of serial robots," *2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Sapporo, Japan, pp. 1714-1721, 2022.
- [19] G. Cortigiani, M. Malvezzi, D. Prattichizzo, and M. Pozzi, "Human-robot collaborative cable-suspended manipulation with contact distinction," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 10, no. 1, pp. 740-747, 2025.
- [20] A. Kouris, F. Dimeas, and N. Aspragathos, "A frequency domain approach for contact type distinction in human-robot collaboration," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 720-727, 2018.
- [21] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, Wiley, Inc., New York, NY, pp. 51-74.
- [22] Y. Kim, S. Ha, J. No, S. Hwang, and W. Kim, "Development of a terrain-specific modified gait index using the anybody modeling system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 31, no. 8, pp. 900-905, 2025.



이 동 규

2023년 한양대학교 ERICA 로봇공학과 졸업(공학사). 2023년~현재 한양대학교 대학원 로봇공학과 석박사통합과정. 관심분야는 인간중심 인간-로봇 협업, 협업 제어.



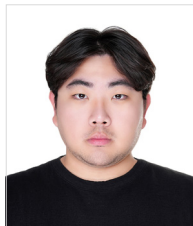
김 회 진

2014년 숭실대학교 기계공학과 졸업(공학사). 2017년 연세대학교 기계공학과 석사. 2017년~2020년 티로보틱스 기술연구소 선임연구원. 2020년~현재 LIG넥스원 무인체계/로봇연구소 선임연구원. 관심분야는 다물체 동역학 모델 기반 제어, 비선형 제어, 강화학습.



최 유 신

2023년 한양대학교 ERICA 로봇공학과 졸업(공학사). 2025년 한양대학교 지능정보융합공학과 석사. 2025년~현재 LIG넥스원 무인체계/로봇연구소 연구원. 관심분야는 다리형 로봇의 이동-조작 통합 제어, 최적제어 및 강화학습.



하 성 민

2020년 평생교육진흥원 공학사 취득. 2023년 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 석사. 2023년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 외골격로봇 제어, 인간-로봇 협업.



노 준 규

2013년 강원대 메카트로닉스공학과 졸업(공학사). 2022년 한양대 메카트로닉스공학과 졸업(공학박사, 석박사 통합). 2022년~2025년 한양대학교 ERICA 로봇공학과 박사후연구원. 2025.10~현재 한양대학교 ERICA 로봇공학과 연구조교수.

관심분야는 인간-로봇 상호작용, 외골격로봇, 힘 제어, 보행 분석.



황 순 응

2007.02 한양대학교 ERICA 기계공학과 졸업(공학사). 2009.02 한양대학교 메카트로닉스공학과 석사. 2016.02 메카트로닉스공학과 박사. 2025.08~현재 한양대학교 ERICA 로봇공학과 연구부교수. 관심분야 인간-로봇 상호작용 기술.



유 재 관

2002년 경희대학교 원자력공학과 졸업. 2004년 경희대학교 기계공학과 석사. 2009년 JAIST 기계공학과 박사. 2009년~현재 LIG넥스원 무인체계/로봇연구소 연구소장. 2025년~현재 세종대학교 AI 로봇학과 부교수. 관심분야는 웨어러블 로봇, 휴머노이드 로봇, 무인체계(USV, UGV), physical AI.



김 완 수

2008년 한양대학교 ERICA 기계공학과 졸업(공학사). 2015 한양대학교 기계공학과 박사(공학박사, 석박사 통합). 2015~2016 한양대학교 ERICA 공학기술연구소 박사후연구원. 2016~2021 Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) 박사후연구원. 2021~2024 한양대학교 ERICA 로봇공학과 조교수. 2024~현재 한양대학교 ERICA 로봇공학과 부교수. 2025~현재 한양대학교 대학원 로봇공학과 학과장. 관심분야는 인간-로봇 협업, 협업 제어, 외골격로봇.