

# LSTM 기반 보행 속도 변화에 강인한 웨어러블 로봇의 보행 위상 추정 방법

김호빈<sup>1,2</sup>, 이종복<sup>1,2</sup>, 김선우<sup>1,3</sup>, 김상도<sup>1</sup>, 박신석<sup>2</sup>, 김강진<sup>1</sup>, 이종원<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술연구원(KIST) 지능로봇연구단

<sup>2</sup>고려대학교 기계공학과

<sup>3</sup>고려대학교 전기전자공학과

msbc7085@kist.re.kr, ljb920615@kist.re.kr, 122008@kist.re.kr, sangdo322@kist.re.kr,  
drsspark@korea.ac.kr, danny@kist.re.kr, jwlee@kist.re.kr

## LSTM based Gait Phase Estimation Method Robust to Changes in Gait Speed

Ho-Bin Kim<sup>1,2</sup>, Jong-Bok Lee<sup>1,2</sup>, Sun-Woo Kim<sup>1,3</sup>, Sang-Do Kim<sup>1</sup>,

Shin-Suk Park<sup>2</sup>, KangGeon Kim<sup>1</sup>, Jongwon Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Intelligent and Interactive Robotics, KIST

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Korea University

<sup>3</sup>Dept. of Electrical Engineering, Korea University

### 요 약

하지 웨어러블 로봇의 근력 보조 성능을 극대화하기 위해서는 착용자의 보행 상태를 인식하는 보행 위상 추정 기술이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 착용자의 보행 속도 변화 및 착용자 간 보행 특성 차이에도 강인하게 보행 위상을 추정할 수 있는 LSTM 기반 보행 위상 강건 인식 기술을 개발하였다. 웨어러블 고관절 보조 로봇을 착용한 총 5명의 트레드밀 및 실외 overground의 보행 센서 정보를 바탕으로 학습을 수행하였다. 저속 및 고속 보행을 포함한 다양한 보행 속도에서 정밀한 보행 위상 추정이 가능한 웨어러블 센서 조합을 도출하였고, 보행 위상 인식 정밀성은 5-Fold Cross Validation 기준 RMSE 약 1.68% 수준의 결과를 얻을 수 있었다.

### 1. 서론

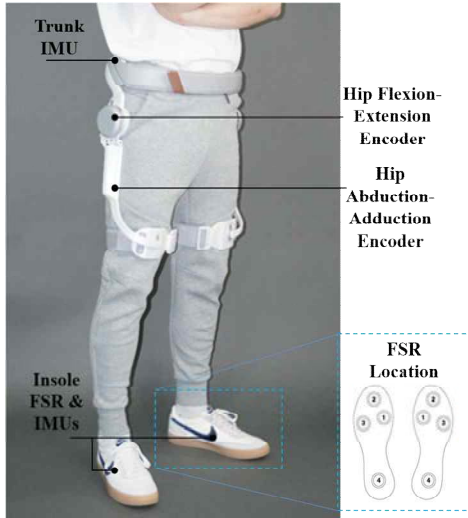
최근 근력 증강 및 보행 재활을 위한 하지 외골격 로봇 및 소프트 슈트 등 하지 웨어러블 근력 보조 로봇의 연구가 활발히 진행되고 있다. 건강한 고령자에서 보행 장애를 지닌 사람까지 착용자별 근력 및 건강 특성에 따른 보행 특성의 차이가 존재하고, 단일 착용자에 대해서도 보행 속도의 변화가 존재한다. 하지 웨어러블 로봇의 보행 위상 추정 기술의 정확성 증대는 근력 보조 성능 극대화의 가장 중요한 요소 중 하나이다.

사람의 보행 모션은 주기적으로 반복되고, 보행의 위상은 특정 이벤트를 기준으로 하나의 보행 주기 내에서 0~100% 사이의 값을 갖는 시간 함수로 표현된다. 기존의 보행 위상 추정 기술로는 이전 여러 걸음의 특징을 평균하여 현재의 보행 위상을 결정하는 Time Based Estimation (TBE) 방법 [1] 및 고관절 각도의 주기성을 추정하여 현재의 보행 위상을 결정하는 adaptive oscillator (AO) 방법 [2], [3] 등이 널리 활용되고 있다. 하지만 착용자별 보행 특

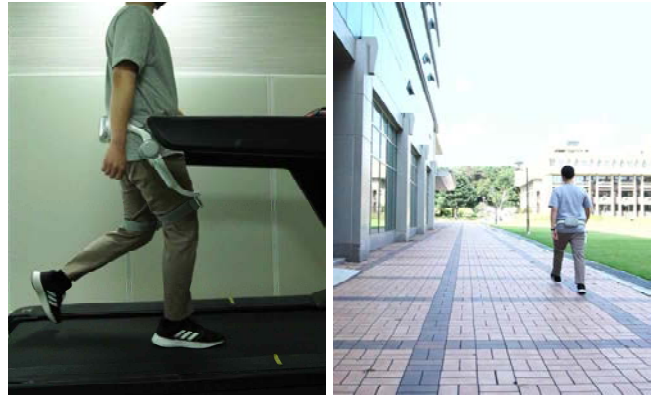
성에 맞게 파라미터 조정이 필요하거나, 보행 중 보행 속도가 변화 시 위상 추정에 오차가 생기고, 재수렴하는 데까지 시간이 소요되는 문제점이 있다.

보행 속도의 급격한 변화 시에도 보행 위상 추정의 신뢰성을 확보하기 위해, 최근 심층 학습 기법을 활용한 추정 기법들이 연구되고 있다. Georgia Tech에서는 MLP, CNN 기법들을 활용하여 트레드밀 또는 실내 공간에서 hip 각도, trunk IMU, thigh IMU 센서 정보에 기반한 보행 위상 추정 기술을 개발하였다 [4], [5].

본 논문에서는 RNN 계열 LSTM 기법을 활용하여 트레드밀 환경과 실외 over ground 환경에서 획득한 보행 데이터를 바탕으로 보행 속도 변화에 강인한 보행 위상 추정 기술을 개발하였다. 웨어러블 로봇의 hip flexion-extension (FE) 각도, hip abduction-adduction (AbAd) 각도, trunk IMU, foot IMU, foot FSR 정보를 포함한 더욱 다양한 정보에 기반하여, 보행 위상 추정에 최적의 성능을 나타내는 센서 조합을 도출하였다.



(그림 1) 웨어러블 Hip Complex 보조 로봇 시스템 및 센서 정보



(그림 2) 트레드밀(왼쪽)과 overground(오른쪽) 실험 환경

험을 수행하였다. 이때 로봇은 구동기의 마찰 보상 제어 토크만 인가한 조건에서 실험을 진행했다.

## 2. 하지 웨어러블 로봇 시스템

그림 1은 한국과학기술연구원의 웨어러블 고관절 복합체 보조 로봇이다. 총 4 자유도의 능동 관절 보조 로봇으로, 좌/우 고관절의 FE 및 AbAd 관절에 보조력을 생성시킨다. 로봇에는 착용자의 보행 의도를 감지하기 위한 고관절 각도 센서(FE, AbAd 관절) 및 상체 자세 측정을 위하여 등 부위에 IMU 센서가 장착되어 있다. 착용자의 양발에는 각기 4개의 압력센서와 6축 IMU 센서가 포함된 스마트 인솔이 장착되어 BLE 무선 통신을 통해 로봇과 연동된다. 인솔을 제외한 모든 센서 데이터는 100Hz로 수집/저장되며, 인솔 데이터는 30Hz BLE 통신을 통해 로봇과 연동된다.

## 3. 학습 데이터 수집

딥러닝 학습을 위한 데이터를 수집하기 위해 총 5명의 건강한 성인 남성을 대상으로 로봇을 착용 후 그림 2와 같이 실내 트레드밀 보행과 실외 overground 보행 시 로봇의 센서를 통해 획득되는 착용자의 보행 정보를 수집하였다.

트레드밀에서는 보행 속도를 저속(0.6~0.9m/s), 평속(1.0~1.3m/s), 고속(1.4~1.7m/s) 보행 3가지 세션으로 나누고 각 세션은 속도 범위 안에서 3분마다 0.1m/s 씩 속도를 증가시키며 각 세션당 12분(=총 36분) 동안 실험을 진행하였다. Overground 환경에서는 실험자의 보행 속도를 정량적으로 제한하기 어려워, 본인에게 맞는 편한 보행 속도를 포함, 그보다 느린 걸음, 빠른 걸음을 추가 요청하여 총 3번의 실

## 4. LSTM 모델링

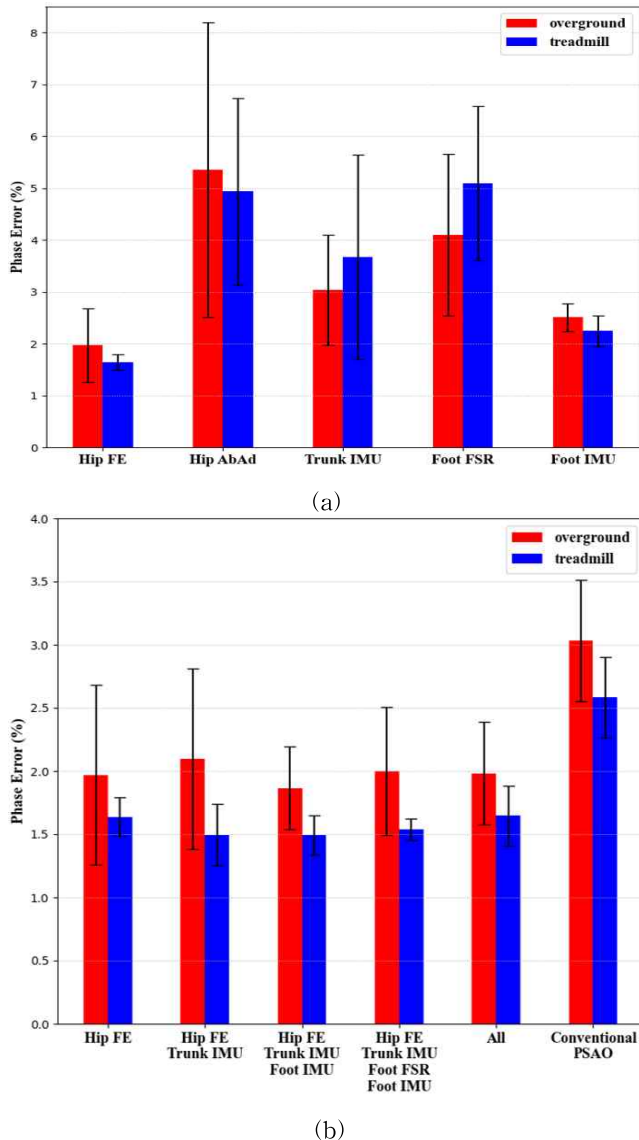
LSTM 기반 모델을 학습하기 위해 반복 학습 주기(epoch)는 100, 슬라이딩 윈도우 크기(sliding window size)는 60, 배치 크기(batch size)는 512, 초기 학습률(learning rate)은 0.001로 설정하고, validation-loss 기준 10 patience를 갖는 early-stopping을 적용했다. 실험을 통해 얻은 데이터에서 학습 모델에 사용될 ground truth 정보는 hip FE 각도에서 hip extension이 최대로 일어나는 지점을 기준으로 각 보행 주기마다 기준을 정의했다.

## 5. 센서 융합법을 통한 보행위상추정 성능 최적화

입력값들은 센서 융합에 따른 최적의 결과를 얻기 위해 hip FE 관절 각도/각속도(4data), hip AbAd 관절 각도/각속도(4data), trunk IMU(6data), foot IMU(12data), foot FSR(8data)의 각 센서 데이터의 조합에 따라 달리 학습을 진행했다. 학습 결과는 5-fold cross validation 방법을 사용하여 예측값과 ground truth 값의 비교를 통해 RMSE를 계산해 사용했다.

각 센서 데이터를 하나씩 입력값으로 사용해 학습한 결과(그림 3a), Hip FE 데이터를 사용했을 때 overground에서  $1.97 \pm 0.71\%$ , 트레드밀에서  $1.64 \pm 0.15\%$ 의 RMSE 값으로 가장 좋은 결과가 나타났다.

이후 2가지 이상의 센서 데이터를 조합하여 학습시킬 때 모든 조합에 Hip FE 데이터를 포함했고, 학습 결과(그림 3b) Hip FE + Trunk IMU + Foot



(a)

(b)

(그림 3) 센서 조합에 따른 LSTM 기반 보행 위상 추정 학습 결과, (a) 단일 센서 활용 시, (b) 복합 센서 활용 시

IMU를 사용했을 때 overground에서  $1.87 \pm 0.33\%$ , 트레드밀에서  $1.49 \pm 0.15\%$ 로 평균 1.68%의 가장 좋은 결과를 보였다.

## 6. 결론 및 향후 연구 계획

이번 연구에서 실내 트레드밀에서 수집한 데이터 뿐만 아니라 실생활과 유사한 실외 환경에서 데이터를 수집한 후 보행 위상 추정 결과를 검증함으로써 본 논문에서 제시한 보행 위상 추정 알고리즘의 일상 환경에서 적용 가능성을 증명하고자 하였다. 그리고 하지 보행 보조 웨어러블 로봇에 적용할 수 있는 각 센서 데이터를 이용하여 보행 위상 추정 알고리즘의 성능을 평가하였고, 여러 센서를 동시에 사용하는 센서 융합 기법을 활용할 때 최적의 위상 인

식 성능을 보이는 센서 데이터 조합을 얻을 수 있었다.

그림 3(b)에서 보듯 기존 보행 위상 추정 기법으로 많이 활용되고 있는 Adaptive Oscillator 기반 PSAO 기법에 비해 딥러닝 기반 본 제안 기술을 적용 시 위상 추정 오차 값이 평균적으로 40% 감소하였다.

추후 진행될 연구에서는 경사로와 계단 등 좀 더 다양한 환경에서의 데이터 수집을 통해 제안 기술의 실생활 적용 가능성을 높일 것이고, 걷는 중 멈추거나 걷는 중 달리기를 하는 등 움직임의 급격한 변화가 일어나는 상황에서 보행 위상 추정 알고리즘의 평가가 필요할 것이다. 그리고 저장된 데이터만을 사용한 성능 검증뿐만 아니라 학습된 모델을 로봇에 적용해 실시간 데이터를 사용했을 때의 성능을 파악할 예정이다.

## 사사표기

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-혁신도전프로젝트사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2020M3H8A1115027)

## 참고문헌

- [1] Lewis, Cara L., and Daniel P. Ferris. "Invariant hip moment pattern while walking with a robotic hip exoskeleton." *Journal of biomechanics* 44.5, 789-793, 2011
- [2] Seo, Keehong, et al, "Fully autonomous hip exoskeleton saves metabolic cost of walking," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 4628-4635, 2016
- [3] Seo, Keehong, et al., "Adaptive oscillator-based control for active lower-limb exoskeleton and its metabolic impact," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 6752-6758, 2018
- [4] Kang, Inseung, et al., "Real-time neural network-based gait phase estimation using a robotic hip exoskeleton," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics* 2.1, 28-37, 2019
- [5] Kang, Inseung, et al., "Real-time gait phase estimation for robotic hip exoskeleton control during multimodal locomotion," *IEEE robotics and automation letters* 6.2, 3491-3497, 2021