

# 보행속도에 따른 보행위상추정에 몸통 운동학의 영향

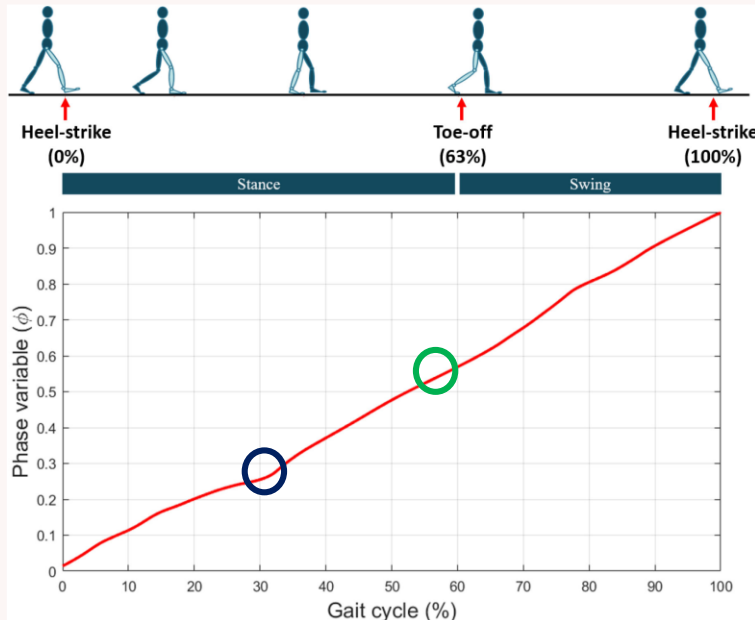
## Effect of Torso Kinematics on Gait Phase Estimation at Different Walking Speeds

류형석, 홍우림, 이진원, 허필원

발표자 : 류형석

## ❖ 보행위상추정(Gait Phase Estimation)

- 정의 : 한 번의 gait cycle 내에 walking state를 추정하는 것
- 사용자와 동기화되는 웨어러블 로봇(예: 로봇 의족, 외골격)을 제어하는데 꼭 필요한 요소
- 최근 학습을 기반으로 한 보행위상추정이 많이 시도되고 있음



엑소슈트



로봇 의족

## ❖ 선행연구

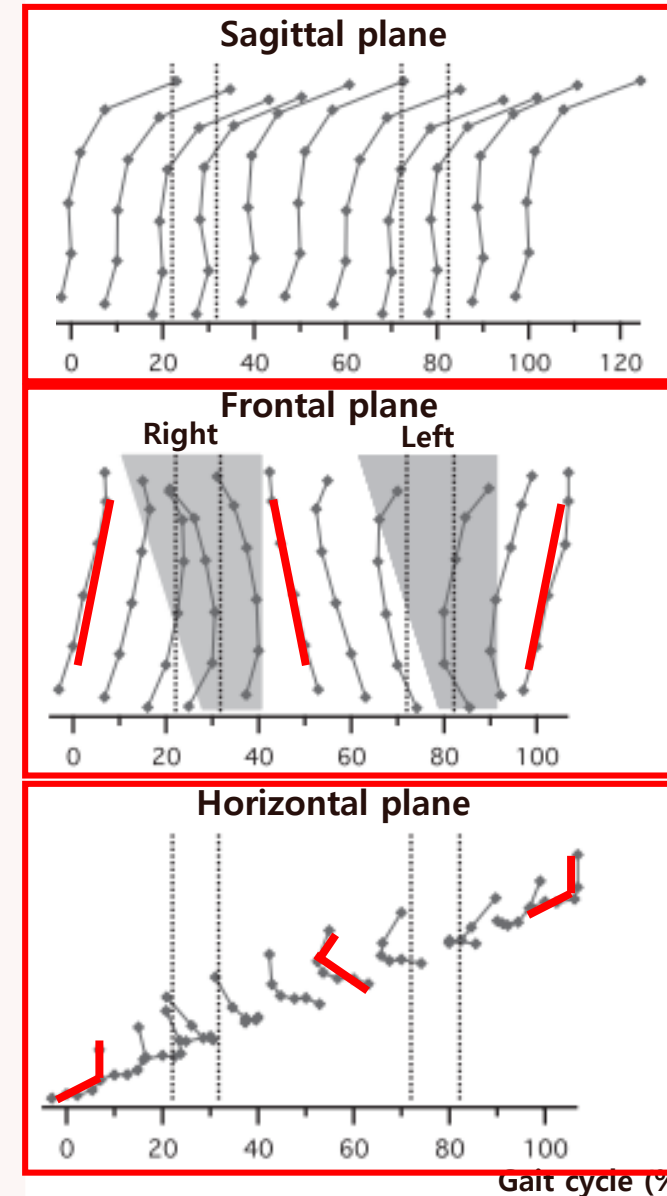
- Kang et al. (2019)
  - Neural network 기반
  - 다양한 센서 이용 : Hip joint(엔코더), 허벅지와 몸통(IMUs)
- Seo et al. (2019)
  - Recurrent neural network(RNN) 모델 기반
  - 정강이에 부착된 IMU 센서, 발바닥에 작용하는 압력 측정

## ❖ 한계

- 보행속도에 따라 오차가 바뀜(보행속도에 따라 오차의 변동이 존재)
- 몸통부의 높은 변동성이 보행위상추정에 영향을 주는지 확인하지 못함.

## ❖ 연구 진행 이유

- 몸통부는 보행동안 특정한 패턴의 움직임을 보임
- 몸통부 변동성의 보행위상추정에 영향에 대한 연구 x

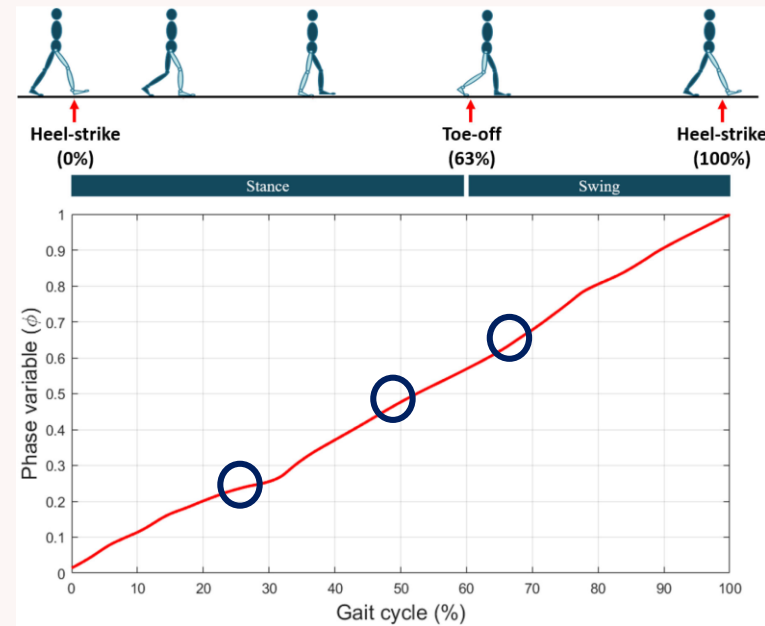
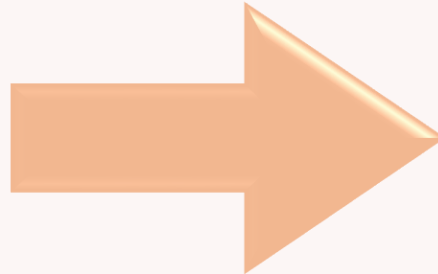


Gait cycle에  
대한 척추의  
움직임

- 다양한 속도에서 몸통 운동학 정보의 보행위상추정에 끼치는 영향
- 높은 변동성을 갖는다고 알려진 몸통부의 변동성을 측정

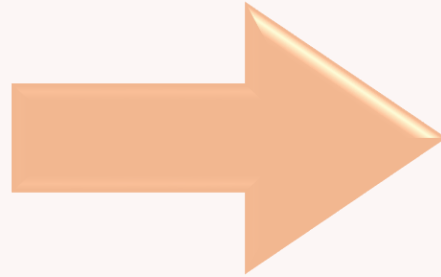
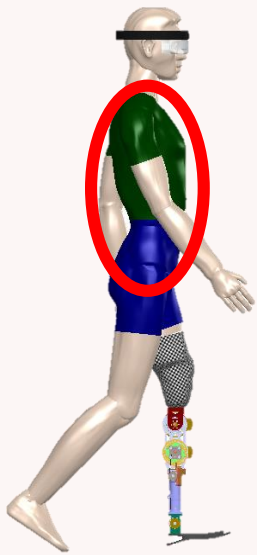


몸통 운동학 정보  
(각도, 각속도)

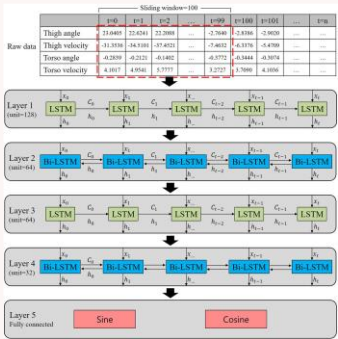
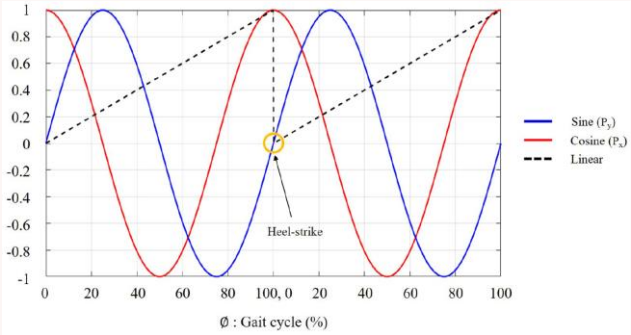
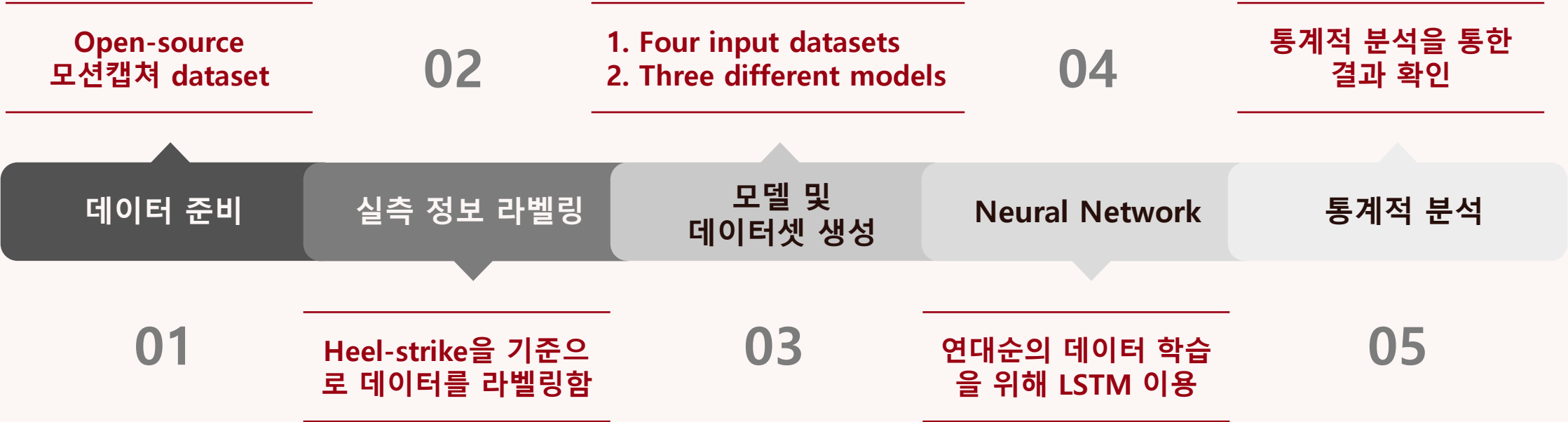


Estimation accuracy ↑ ?

- 다양한 속도에서 몸통 운동학 정보의 보행위상 추정에 끼치는 영향
- 높은 변동성을 갖는다고 알려진 몸통부의 변동성을 측정



❖ Framework



## ❖ 데이터 준비

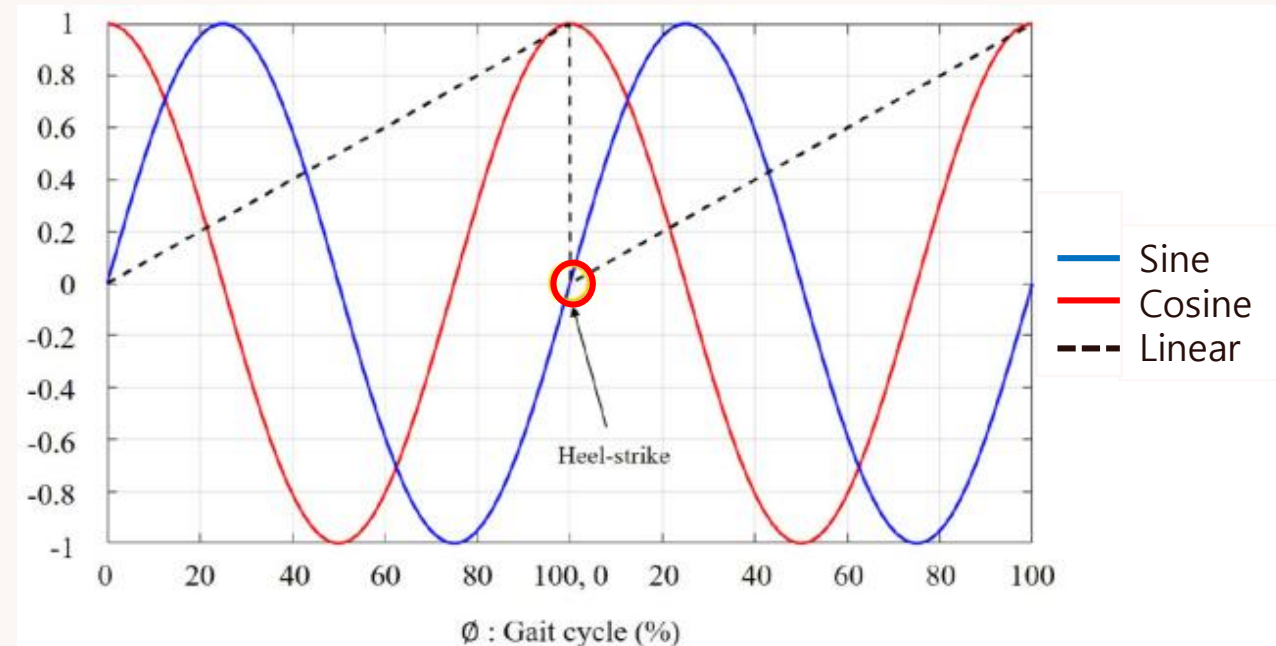
- 3D motion capture Dataset (건강한 피험자 50명)
  - 5 different speed conditions
  - Training and validation : 42명의 데이터
  - Prediction : 8명의 데이터

| $C_1$       | $C_2$       | $C_3$       | $C_4$       | $C_5$       |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.0-0.4 m/s | 0.4-0.8 m/s | 0.8-1.2 m/s | 1.0-1.4 m/s | 1.4-1.8 m/s |

- 학습을 위한 데이터 가공
  - Sagittal plane의 허벅지와 몸통부의 각도와 각속도 계산
  - GRF를 이용해 heel-strike, toe-off 정보 획득

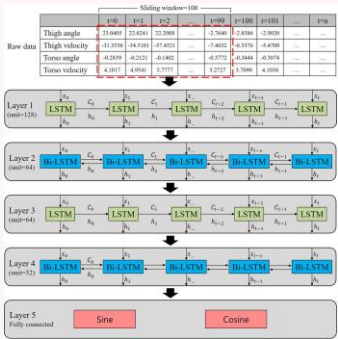
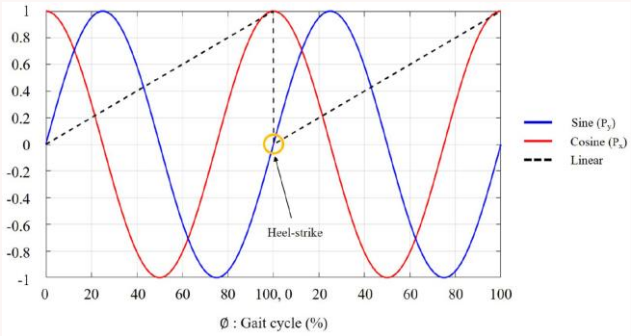
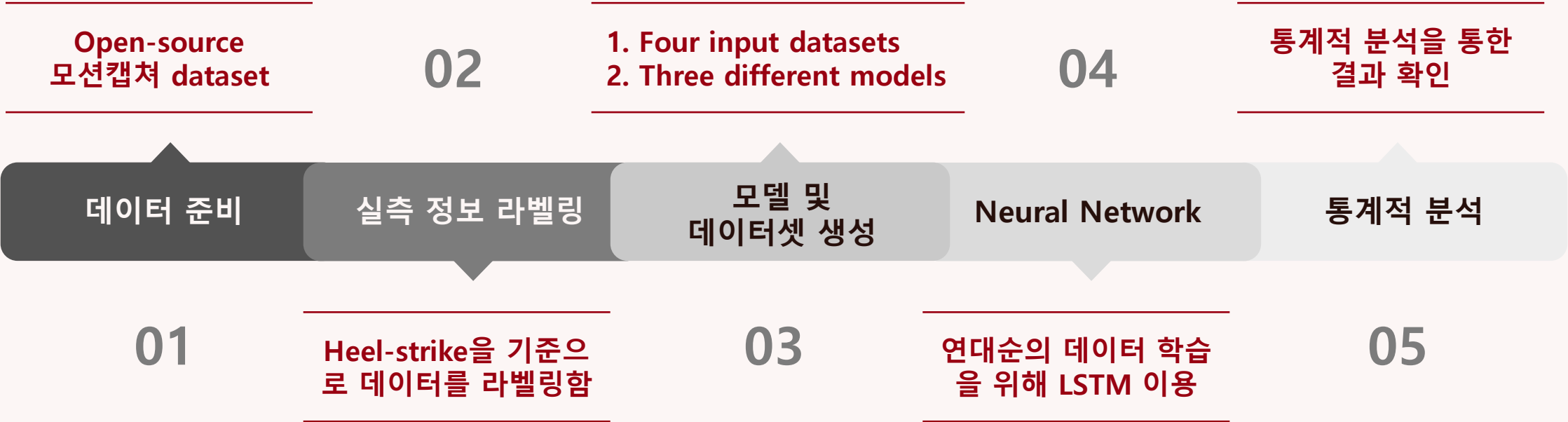
## ❖ 실측 정보 라벨링

- 같은 발의 Heel-strike를 기준으로 데이터를 라벨링함
- 선형적인 라벨은 불연속성이 존재하기 때문에 극좌표계를 이용





❖ Framework



## ❖ 모델 및 데이터셋 생성

### ➤ 4 Input datasets

- 1) 허벅지와 몸통부의 각도와 각속도
- 2) 허벅지부의 각도와 각속도 및 몸통부의 각속도
- 3) 허벅지부의 각도와 각속도 및 몸통부의 각도
- 4) 허벅지부의 각도와 각속도

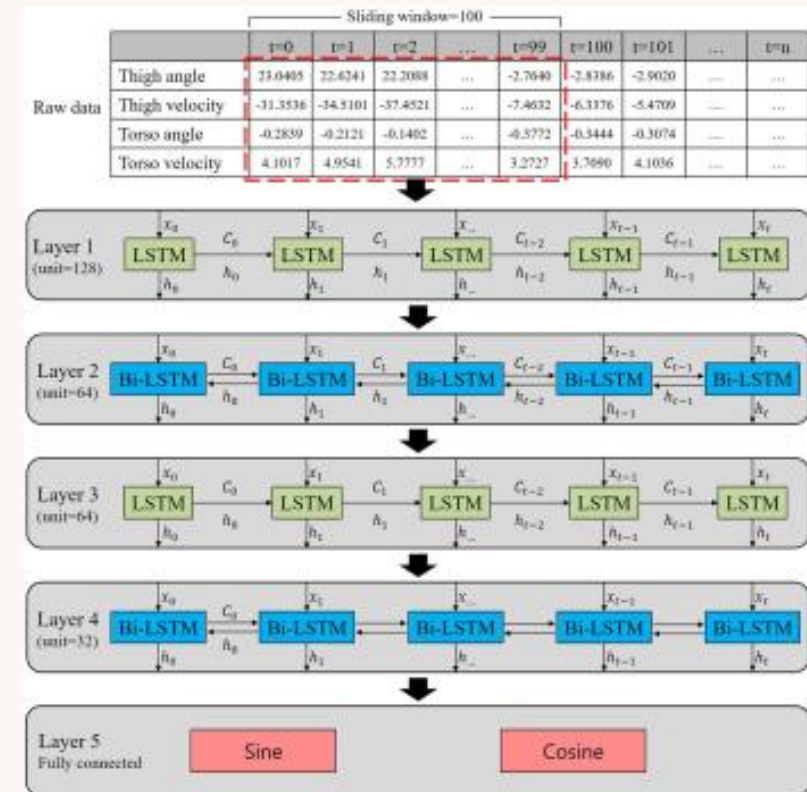
| Dataset | Information  |
|---------|--|
| 1)      | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}, \theta_{torso}, \omega_{torso}$ |
| 2)      | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}, \omega_{torso}$                 |
| 3)      | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}, \theta_{torso}$                 |
| 4)      | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}$                                 |

### ➤ 3 different speed conditions

- 1) Slow model( $C_2$ )
- 2) General model( $C_2 - C_5$ )
- 3) Normal-fast model( $C_3 - C_5$ )

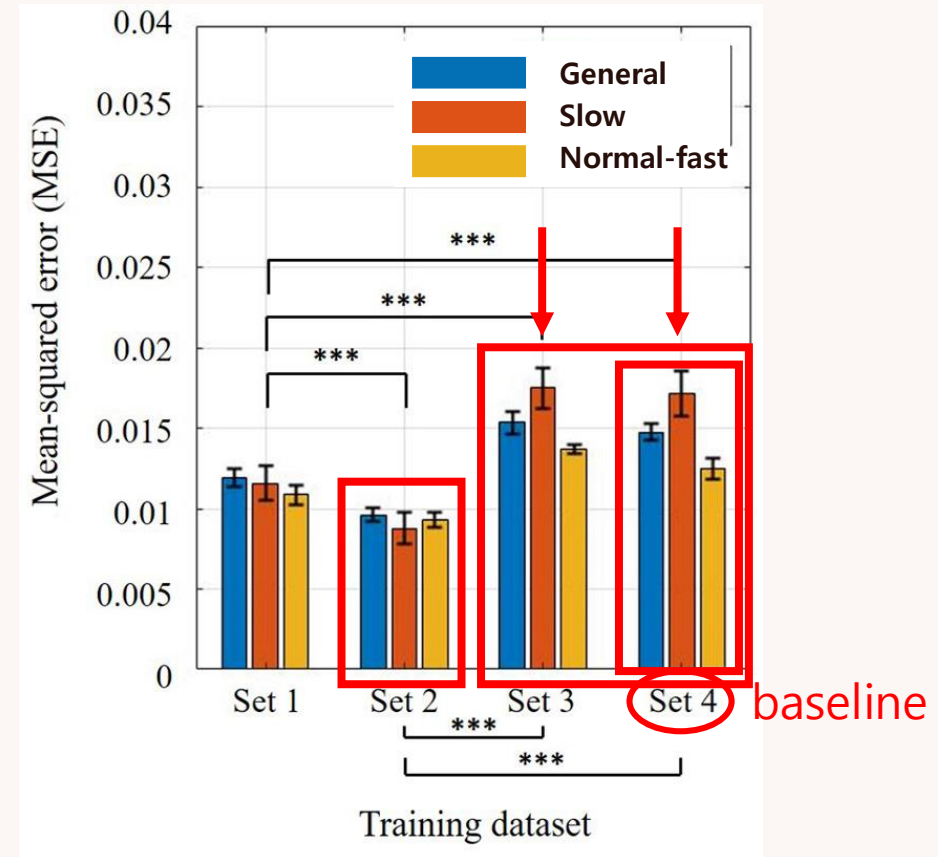
## ❖ Neural Network

- 시간순의 데이터에 대한 높은 성능을 갖는 LSTM 사용
- 학습 과정에서 양방향 학습을 하기위해 Bidirectional LSTM 활용



## ❖ 학습 결과

- 4개의 다른 학습 데이터셋에 대한 학습
  - 몸통부의 각도는 MSE 감소에 영향 x
  - 몸통부의 각속도 정보가 더 유용함
  - Set 3, 4에서 slow 모델의 MSE가 가장 큼



|       |  |
|-------|--|
| Set 1 | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}, \theta_{torso}, \omega_{torso}$ |
| Set 2 | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}, \omega_{torso}$                 |
| Set 3 | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}, \theta_{torso}$                 |
| Set 4 | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}$                                 |

## ❖ 상관관계 비교

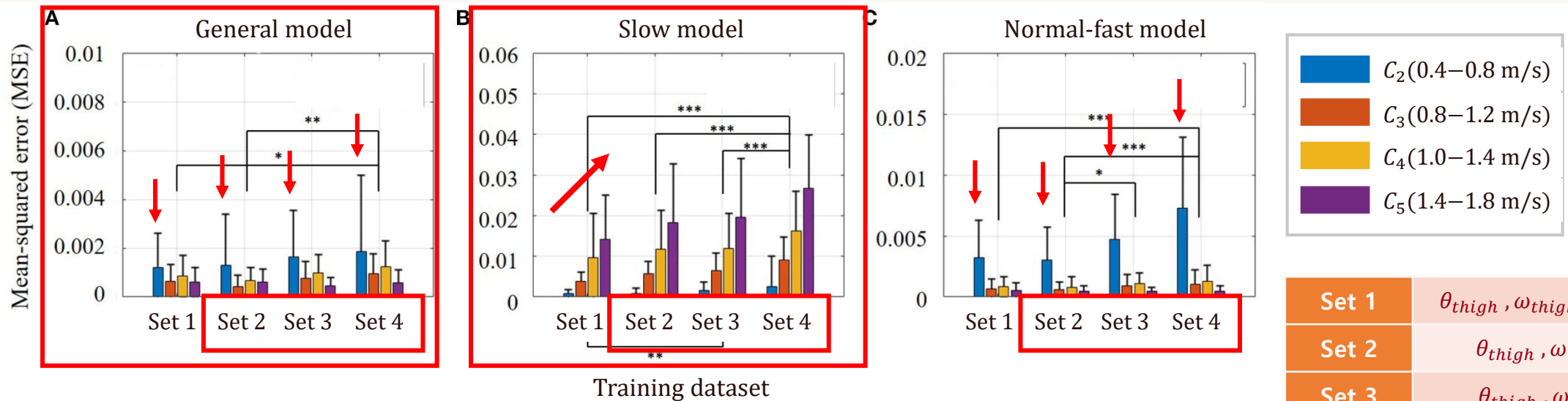
- 허벅지와 몸통부의 상관관계의 평균과 표준편차
  - 상관관계는 피험자의 trajectory와 모든 피험자의 평균 trajectory에 대해 계산
  - 느린 속도( $C_1, C_2$ )에서 허벅지와 몸통 모두 가장 높은 변동성을 가짐
  - 몸통부의 상관관계가 허벅지보다 더 작음
  - 몸통부의 각속도가 몸통부의 각도보다 더 큰 상관관계를 보임

| Walking speed              | 허벅지 각도<br>( <i>mean</i> ± 1SD) | 허벅지 각속도<br>( <i>mean</i> ± 1SD) | 몸통 각도<br>( <i>mean</i> ± 1SD) | 몸통 각속도<br>( <i>mean</i> ± 1SD) |
|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| $C_1(0.0-0.4 \text{ m/s})$ | 0.9663 ± 0.0382                | 0.9059 ± 0.0656                 | 0.1259 ± 0.3269               | 0.2222 ± 0.2817                |
| $C_2(0.4-0.8 \text{ m/s})$ | 0.9892 ± 0.0074                | 0.9726 ± 0.0169                 | 0.4092 ± 0.5476               | 0.4936 ± 0.5278                |
| $C_3(0.8-1.2 \text{ m/s})$ | 0.9925 ± 0.0057                | 0.9835 ± 0.0085                 | 0.7032 ± 0.2546               | 0.7996 ± 0.2011                |
| $C_4(1.0-1.4 \text{ m/s})$ | 0.9917 ± 0.0096                | 0.9824 ± 0.0063                 | 0.6638 ± 0.3098               | 0.7630 ± 0.2857                |
| $C_5(1.4-1.8 \text{ m/s})$ | 0.9941 ± 0.0047                | 0.9876 ± 0.0063                 | 0.5643 ± 0.3098               | 0.6999 ± 0.2857                |

## ❖ 추정 결과 (8명의 피험자 데이터 이용)

### ➤ 보행위상추정 오차

- Slow model 에서 속도가 빨라질수록 추정 오차가 커짐
- General model, normal-fast model 에서는 속도가 가장 느릴 때 추정 오차가 가장 큼
- General model 에서 데이터셋과 보행 속도사이의 상호작용 효과(interaction)가 존재하지 않음

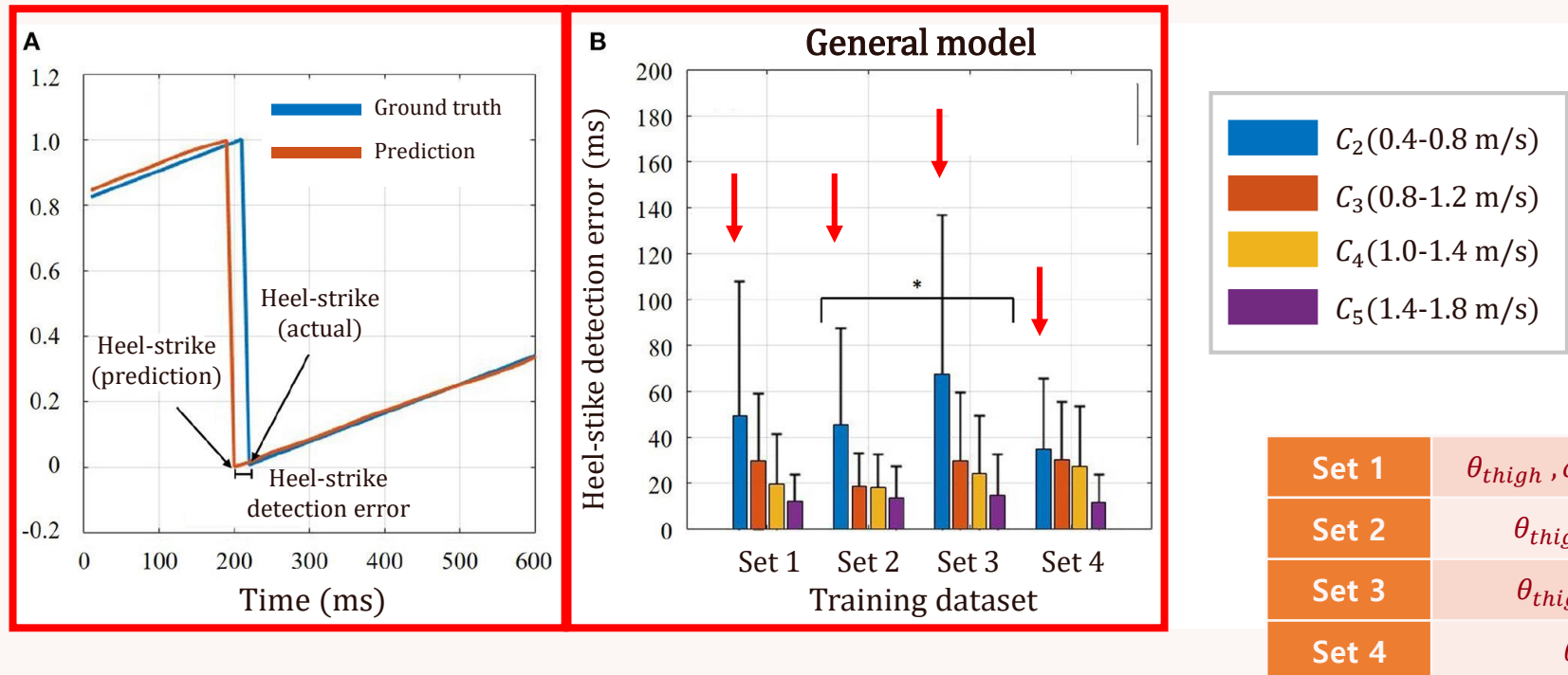


|       |  |
|-------|--|
| Set 1 | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}, \theta_{torso}, \omega_{torso}$ |
| Set 2 | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}, \omega_{torso}$                 |
| Set 3 | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}, \theta_{torso}$                 |
| Set 4 | $\theta_{thigh}, \omega_{thigh}$                                 |

## ❖ 추정 결과 (8명의 피험자 데이터 이용)

### ➤ Heel-strike 추정 오차

- 가장 느린 보행 속도에서 추정 오차가 가장 큼
- 사후검정을 통해 Set 2와 3에서만 유의미한 차이가 존재 ( $p = 0.044$ )



## ❖ 결론

- 몸통부의 각속도 정보는 모든 보행 속도에서 보행위상추정의 정확도를 높임
- 하지만, 몸통부의 각도 정보는 정확도에 영향을 주지 못함
- 보행 속도가 느려지면 몸통부의 변동성은 커지고 추정의 정확도가 낮아짐

## ❖ 추후계획

- 개인의 보행 특성 적응성을 향상시키기 위한 보행 위상 추정기 개발
- 더 빠른 추정을 하기 위해 CNN을 기반으로 한 LSTM에 적용

- 1) Anil Kumar, N., Hong, W., and Hur, P., 2020, “Impedance control of a transfemoral prosthesis using continuously varying ankle impedances and multiple equilibria,” *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (Paris), 1755-1761.
- 2) Hong, W., Anil Kumar, N., and Hur, P., 2021, “A phase-shifting based human gait phase estimation for powered transfemoral prostheses,” *IEEE Robot. Autom.Lett.* 6, 5113–5120.
- 3) Lee, J., Hong, W., and Hur, P., 2021, “Continuous gait phase estimation using LSTM for robotic transfemoral prosthesis across walking speeds,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 29, 1470–1477.
- 4) Kang, I., Kunapuli, P., and Young, A. J., 2019, “Real-time neural network-based gait phase estimation using a robotic hip exoskeleton,” *IEEE Trans. Med. Robot. Bionics* 2, 28–37.
- 5) Schreiber, C., and Moissenet, F., 2019, “A multimodal dataset of human gait at different walking speeds established on injury-free adult participants,” *Sci. Data* 6, 1–7.
- 6) Ceccato, J.-C., De Sèze, M., Azevedo, C., and Cazalets, J., 2009, “Comparison of trunk activity during gait initiation and walking in humans,” *PLoS ONE* 4, e8193.



# Q&A