

## 데이터 기반 모델링을 이용한 2-Link 인간 모델의 균형 제어

안해원<sup>1</sup>, 허필원<sup>2\*</sup>

광주과학기술원 기계공학부



### 1. 서론

#### □ 필요성

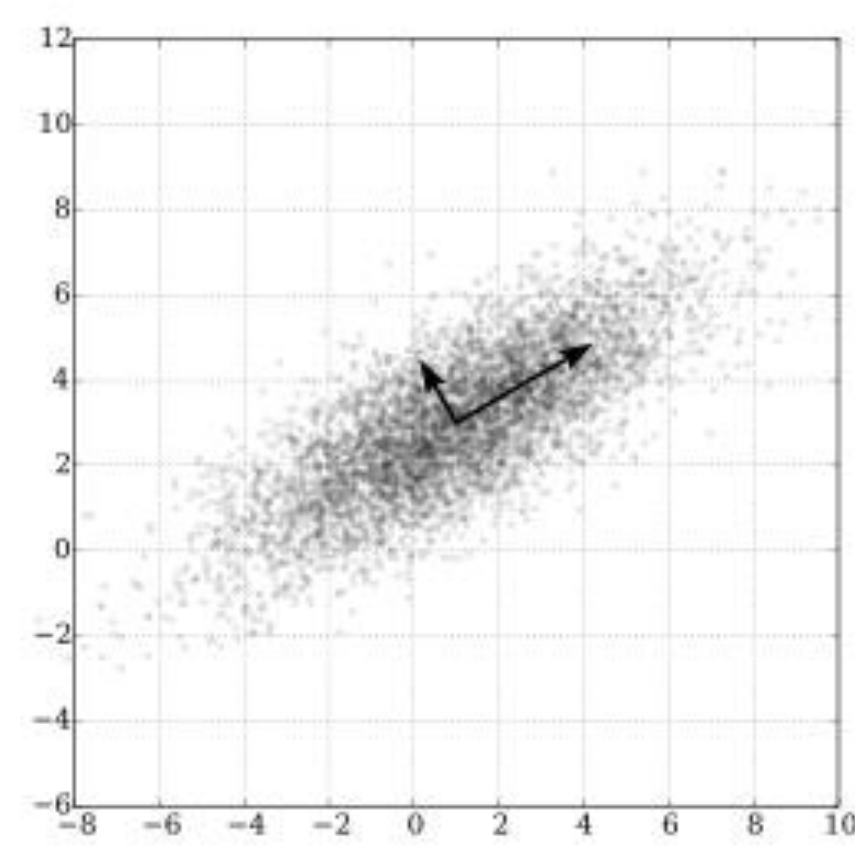
- 외골격의 사용자는 사람의 자연스러운 움직임에서 벗어나는 일이 발생했을 때 불편함을 크게 겪음
- 외골격이 사람과 유사하게 움직이도록 제어하는 것이 중요

#### □ 목적

- 1) 2-Link 모델이 외력 후 균형을 잡는 과정에 인간의 움직임을 적용
  - 특정 상황에서 인간의 반응은 에너지 관점에서 효율적인 방향으로 develop됨 [1]
- 2) Principal Component(주성분)을 구해 제어 parameter로 사용
  - PC는 여러 데이터의 behavior를 더 적은 parameter로 설명할 수 있게 하므로, 다양한 사용자에게 대해 적용이 가능한 직관적이고 효율적인 제어 방식을 제공함

#### □ 적용 이론

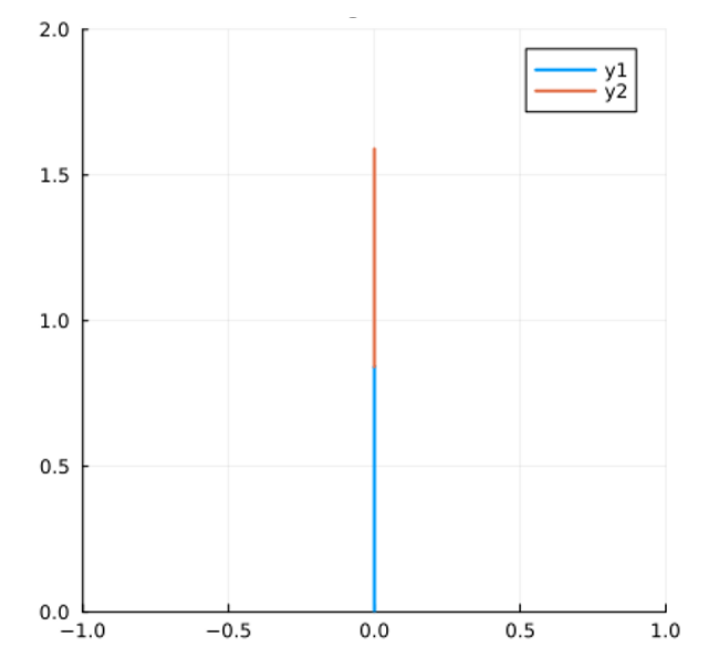
- 1) FPCA(Functional Principal Component Analysis) [2]
  - 함수 형태 데이터의 차원을 감소시키는 기법
  - 데이터를 한 개 축으로 mapping 할 때 분산이 n번째로 커지는 축이 n번째 PC(주성분)가 되어, 새로운 좌표계로 데이터를 선형 변환할 수 있게 함



- 2) Direct Collocation [3]
  - Trajectory optimization의 한 종류로, trajectory에 대한 constraint 설정이 쉬움
  - 전사(Transcription)를 통해 trajectory를 이산화함

#### □ 2-Link 모델에 FPCA-based 토크 적용

- 피험자와 동일한 물리적 특성을 가진 model을 구성하여 외력과  $ap_1 + bp_2$  형태의 토크를 적용
- 2-Link 모델의  $q_1, q_2$  확인 후 실제 피험자의 평균  $q_1, q_2$ 와 비교



### 3. 결과

#### □ 각 피험자 별 ankle 각 및 hip joint 각을 획득

#### □ 최적화 결과

- 각 피험자 별 최적화된 관절 토크를 획득함

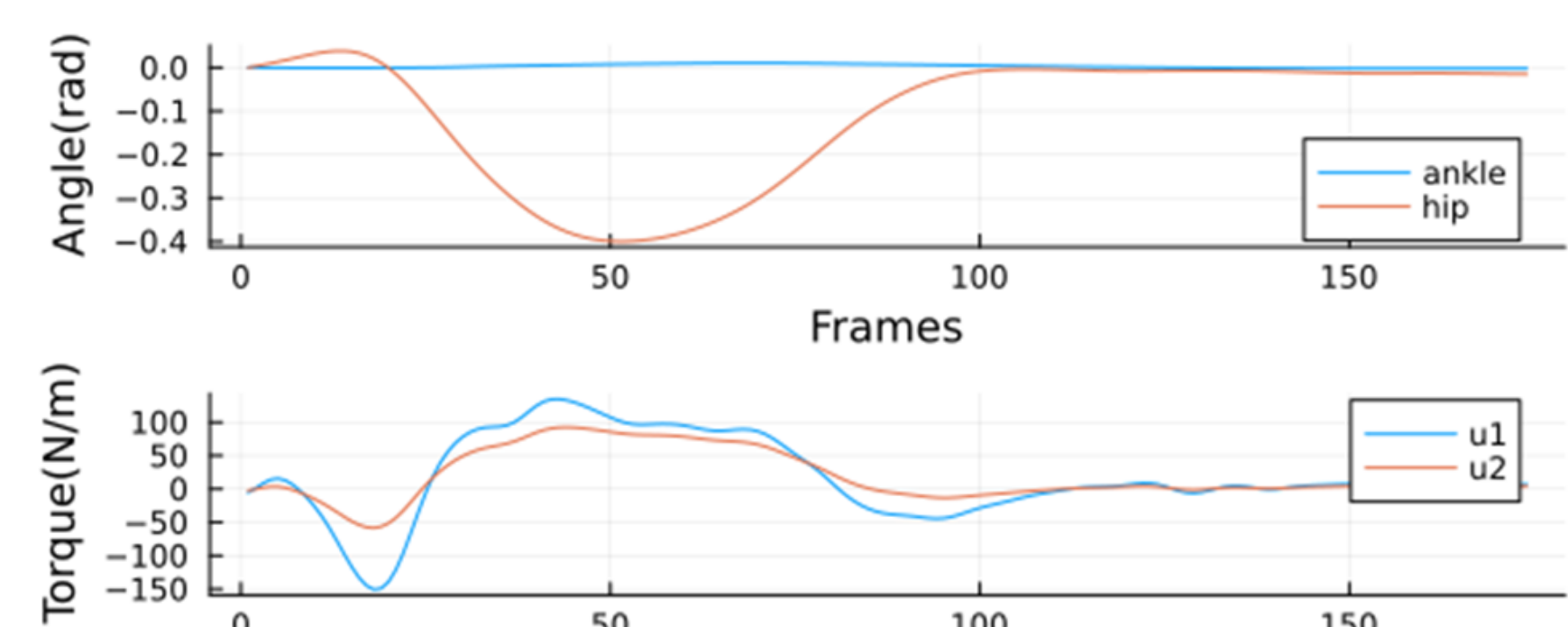


그림 2. 피험자1의 (상)  $q_1, q_2$  (하) 최적화된 관절 토크

#### □ FPCA를 통해 획득한 토크 별 PC

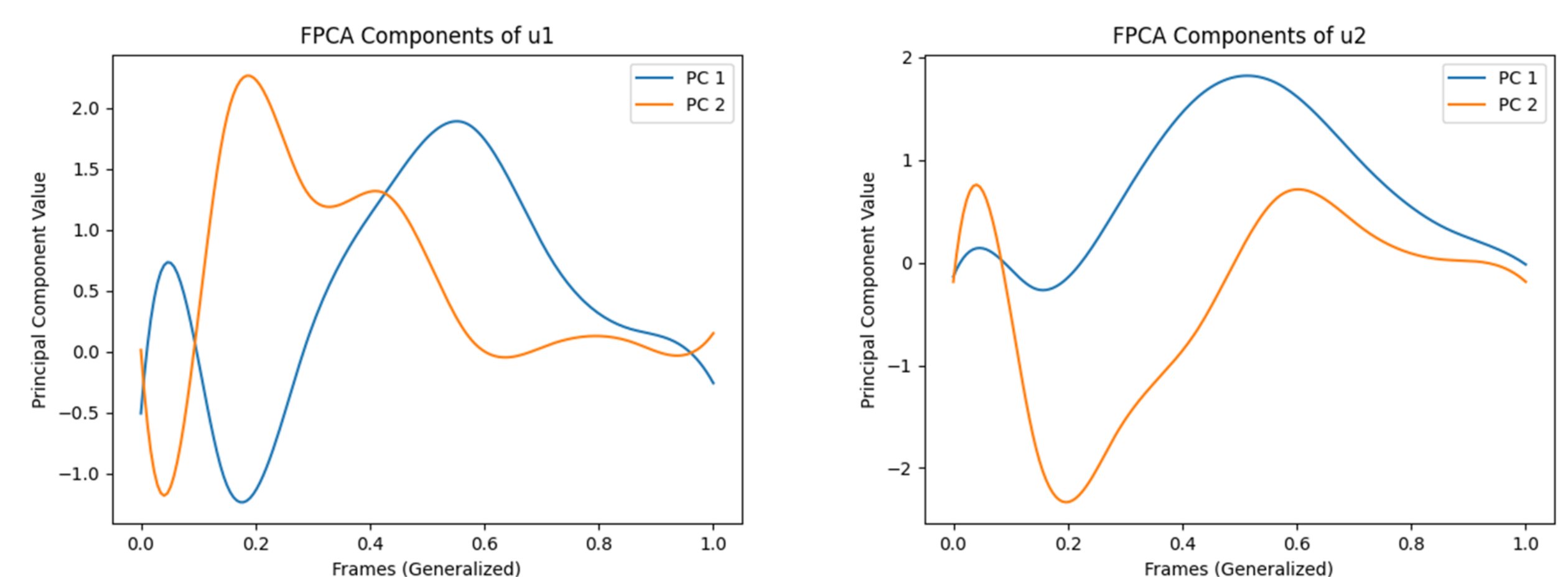


그림 3. (좌) ankle 토크의 PC (우) hip joint 토크의 PC

#### □ FPCA-based 토크의 적용

- 외력이 주어졌을 때 FPCA-based 토크를 적용한 2-Link 모델도 균형을 성공적으로 되찾음

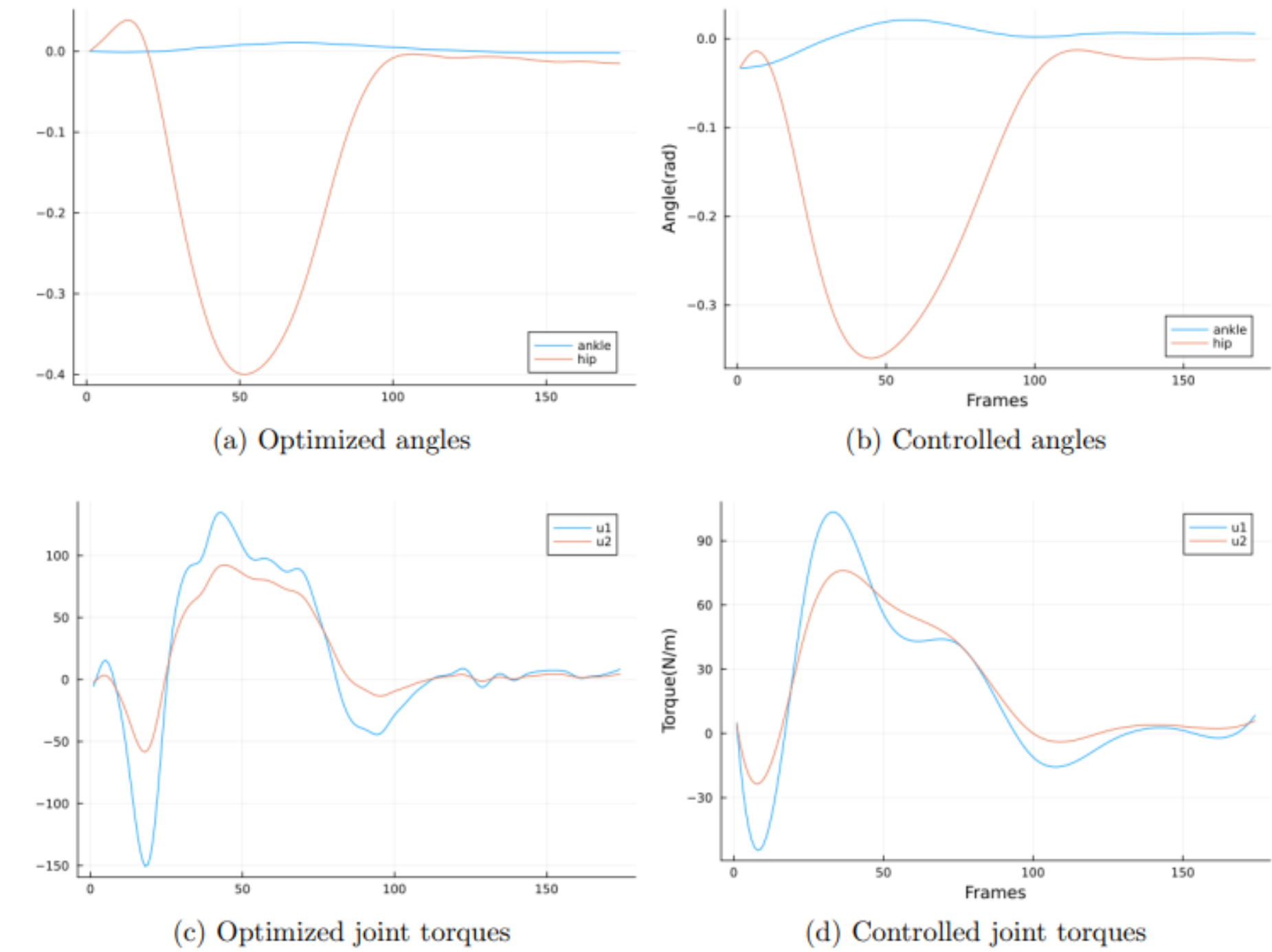


그림 4. (좌) 실제 인간 모션의 관절각 및 최적화 된 토크 (우) FPCA-based 토크 및 이에 따른 관절각

### 2. 실험 및 데이터 처리

#### □ 외력에 반응하는 인간의 모션 캡처

- 피험자 10명을 대상으로 허리 쪽에 무작위적인 타이밍에 밀림힘을 가한 뒤 중심을 잡는 과정에서의 움직임을 측정
- [측정 데이터]
  - 1) 양 어깨/측면 골반/발목/발뒤꿈치의 위치 (모션 캡처)
  - 2) 피험자가 지면에 가하는 힘 (force plate)

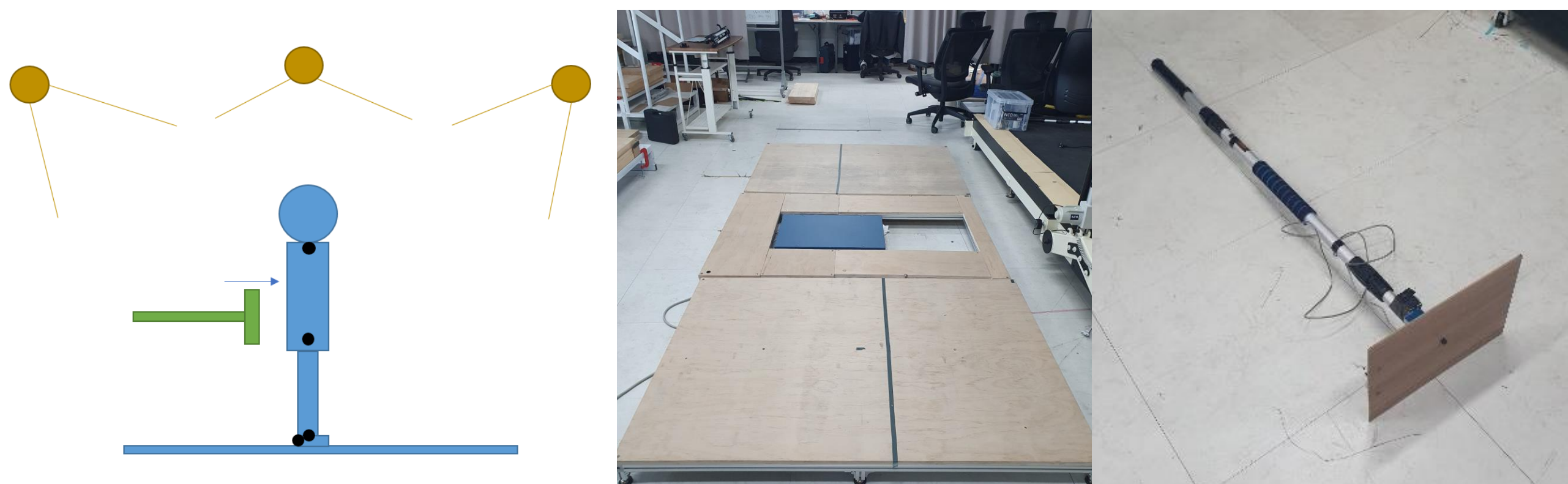


그림 1. 실험 도식 및 환경

#### □ 데이터 처리 및 최적화

- 피험자 별 평균 ankle 각( $q_1$ ), hip joint 각( $q_2$ ) 획득
- Direct Collocation 수행으로 최적화된 관절 토크를 획득

Variable  $x = [q_1, q_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2, u_1, u_2]$

$$x^* = \underset{x}{\operatorname{argmin}} \sum (u_1^2 + u_2^2)$$

Subject to,

1. Angle Constraints

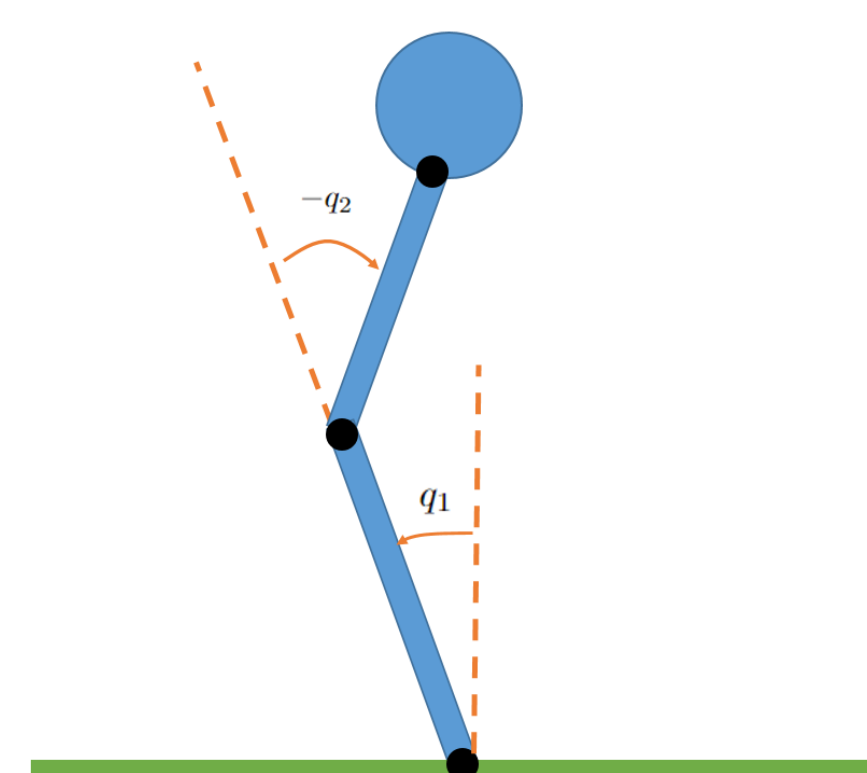
$$q_1 = q_{\text{ankle}}, q_2 = q_{\text{hip}}$$

2. Constrained Dynamics

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = u$$

#### □ FPCA 수행을 통한 주성분 획득

- 피험자 10명의 ankle 토크, hip joint 토크에 대해 FPCA를 수행해 각 토크에 대한 2개의 주성분  $p_1, p_2$  획득
- Gram matrix를 이용,  $p_1, p_2$ 를 선형 결합해 최적화된 관절 토크를 reproduce 하는 피험자 별 계수  $a, b$ 를 획득:  $u_{\text{opt}} \approx ap_1 + bp_2$



$$\begin{aligned} < -f + a * p_1 + b * p_2, p_1 > = 0 \\ < -f + a * p_1 + b * p_2, p_2 > = 0 \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} \langle p_1, p_1 \rangle & \langle p_2, p_1 \rangle \\ \langle p_1, p_2 \rangle & \langle p_2, p_2 \rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle f, p_1 \rangle \\ \langle f, p_2 \rangle \end{pmatrix}$$

### 4. 결론

#### □ 연구 결과의 중요성

- 토크 제어에 FPCA를 적용함으로써 제어에서의 basis function (PC)을 찾고, 더 적은 parameter를 이용해 효율적인 제어 가능

#### □ 향후 연구

- 2개 PC가 데이터를 충분히 설명할 수 있는지 확인
- 각 피험자의 PC 계수 ( $a, b$ )를 scatter plot으로 그렸을 때 cluster를 확인: cluster의 특성 파악
- PC의 의미를 파악: Variation을 만드는 변수를 파악하여 설계 시 반영 가능

[1] Friston, K. The free-energy principle: a unified brain theory?. Nat Rev Neurosci 11, 127–138 (2010).

[2] J. Ramsay, Functional Data Analysis. John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

[3] R. Bordalba, T. Schoels, L. Ros, J. M. Porta, and M. Diehl, "Direct collocation methods for trajectory optimization in constrained robotic systems," IEEE Transactions on Robotics, vol. 39, p. 183–202, Feb. 2023.