

교수자-학습자 손 자세 운동학습 시나리오를 위한 공압 햅틱장갑 시스템

단안 손 자세 추정 사전학습 모델을 통한 폐쇄루프 위치제어

Pneumatic Haptic Glove for Tutor-Learner Hand Pose Motor Learning Scenario: Closed Loop Position Control with Monocular Hand Pose Estimation

이민우, Minwoo Lee*, 양준석, Junseok Yang**, 이우일, Uil Lee**, 오승재, Seungjae Oh***

요약 공압 햅틱장갑은 손을 활용한 인간-컴퓨터 상호작용의 효과적인 수단이다. 또한 손동작을 훈련하는 상황에서 교수자와 학습자 간 손동작 동기화를 바탕으로 운동학습을 매개하면 훈련 효율을 향상할 수 있다. 이에 본 연구는 학습자의 손에 착용하는 공압 햅틱장갑 시스템과, 교수자-학습자 손 동기화를 위한 사전 학습된 컴퓨터 비전 모델을 활용한 단안 카메라 손 자세 추정 기반의 폐쇄루프 위치제어 방안을 제시한다.

Abstract Pneumatic haptic glove is regarded as an efficient kinesthetic HCI method. And assisting one's body to follow the target motion is known to increasing training efficiency. This study introduced the pneumatic haptic glove system that syncing hand pose of learner with tutor's. Closed-loop position control scheme, acquiring feedback data from monocular vision camera stream with pretrained hand pose estimation model, is also proposed.

핵심어: Haptic Glove, Pneumatic, Tutor-Learner, Hand Pose Estimation, Computer Vision

1. 서론

인간-컴퓨터 상호작용에서 손이 가지는 중요성으로 인하여, 역할을 제공하는 다양한 햅틱장갑 시스템이 제시되어 오고 있다 [1]. 이러한 시스템에 공압을 활용하는 것은 기계적 구성이 간결하고 소형-경량화가 쉬우며, 대개 연결의 장치로 이루어짐에 따라 내재적인 안전성을 갖는 장점이 있다 [2-3].

한편 이러한 시스템의 주요한 적용처로서 주목받는 운동학습 분야에서, 신체의 동작을 훈련하는 상황에서 학습자에게 시각적 단서와 더불어 적극적인 동작 보조를 제공하는 햅틱 장치의 도입이 훈련 효율을 증대하는 것으로 보고되었다 [4].

따라서 본 연구에서는 손동작에 대해 교육을 수행하는 교수자와 학습자 사이에서 운동학습을 매개하고자, 학습자가 착용하여 교수자의 손동작이 학습자에게 동기화될 수 있도록 보조하는 공압 햅틱장갑 시스템을 고안하였다.

해당 시스템은 제어 명령을 정밀하게 추종하여 목표하는 효

과를 증대하고자 폐쇄루프 위치제어를 수행하며, 이때 필요한 장갑 착용 손 자세 피드백 취득에는 사전학습된 컴퓨터 비전 모델을 활용하였다.

2. 시스템 및 제어 구현

2.1 공압 햅틱장갑 하드웨어 구성

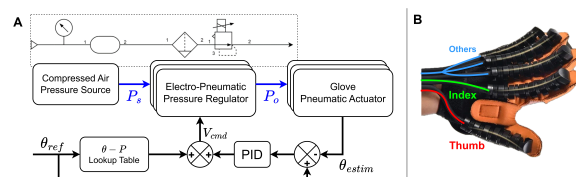


그림 1. (A) 시스템 모식도 (B) 햅틱장갑 실제 모습, 자유도 구분

시스템은 기존 연구를 바탕으로 하는 공압 액추에이터[3]를 손가락마다 장착, 전체 손가락을 쥐고 펴는 단순 동작을 수행하는 의료용 공압장갑(ML-113)을 활용하였다. 장치의 제어 가능한 자유도를 확장하고자 그림 1-(A)과 같이 각 손가락에

*경희대학교 소프트웨어융합학과 석사과정

**경희대학교 소프트웨어융합학과 학사과정

***경희대학교 소프트웨어융합학과 조교수; e-mail: oreo329@khu.ac.kr

공기압력을 가변하는 레귤레이터 밸브(SMC ITV-2030-3125)를 기반한 공압 제어장치를 추가로 도입하였다. 이때 공기압력의 가변 범위는 대기압 기준 양압 0~100kPa로 설정하였다.

각 손가락의 움직임을 이루는 자유도는 상호작용 간 중요도를 바탕으로 그림 1-(B)에서처럼 엄지, 검지, 그리고 나머지 손가락을 일괄로 묶어 단순화하고, 각각에 상기한 공압 제어장치를 연결하였다. 이를 통해 총 3개 자유도에 굽힘 정도를 제어할 수 있는 공압 햅틱장갑 하드웨어를 도출하였다.

2.2 사전학습 컴퓨터 비전 모델을 통한 손 자세 추정

Google AI 프레임워크의 Mediapipe 라이브러리가 제공하는 손 자세 추정 사전학습 기계학습 모델을 활용하였다. 해당 모델은 그림 2-(A)와 같이 사전에 정의된 손의 랜드마크 총 21개 지점 각각의 3D 좌표를 단일 RGB 카메라 시점을 바탕으로 취득한다 [5]. 각 손가락의 말단 마디 벡터, 그리고 손목에서 손가락 시점까지의 벡터를 취득하고, 이 2개 벡터 사이의 각도를 상응하는 손가락의 굽힘 정도로 추산하였다. 일반적인 성능의 PC에서 SD 웹캠을 활용해 구성된 실험 환경에서, 본 각도는 30Hz의 샘플링 레이트로 획득된다. 이후 One Euro 필터를 통해 신호처리 후 제어 알고리즘에 활용하였다.

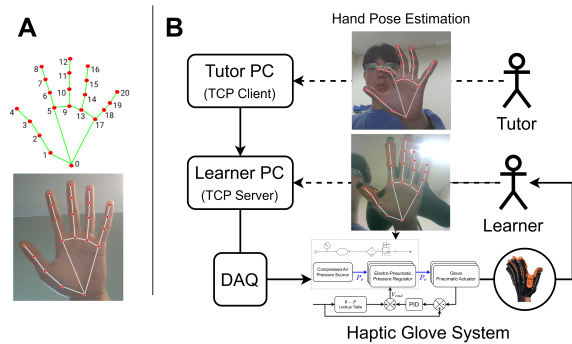


그림 2. (A) Mediapipe 손 랜드마크 지점 정의와 실제 손 자세 추정 결과 (B) 교수자-학습자 간 손 자세 동기화 제어 모식도

2.3 교수자-학습자 간 손 자세 동기화 제어 알고리즘

그림 2-(B)에서와 같이 교수자는 손 자세 추정모델이 동작하는 PC에서 학습의 목적이 되는 손동작을 카메라로 시연한다. 이는 TCP 통신으로 학습자에게 전송되므로 원격 시연이 가능하다. 학습자는 햅틱장갑을 착용한 상태에서 동일한 방식으로 손 자세를 취득, 전송된 교수자 손 자세와의 오차를 계산한다. 오차는 DAQ(NI cRIO-9045)에서 폐쇄루프 PID 제어의 참조값으로 수집되며, 공압 레귤레이터의 명령값으로 출력된다. 최종적으로 햅틱장갑은 명령값에 따라 제어된 공기압력을 통해 학습자 각 손가락의 굽힘을 조절, 목표 자세를 추종한다.

3. 손 자세 동기화 동작 평가

도출한 시스템의 동작 결과를 그림 3에서와 같이 확인하였다. 학습자 손 자세가 교수자의 자세를 추종하여 움직이는 동작이 나타남을 볼 수 있다. 다만, 햅틱장갑 공기압력의 가변

범위가 양압에 국한되고 있어 손가락의 구부림(각도 감소) 대비 펴짐(각도 증가)의 응답성이 다소 떨어짐이 확인된다. 아울러 장갑을 착용한 상태의 손 자세 추정은 초기 추종에 실패하며, 노이즈 존재 등 맨손에 비해 부정확한 결과가 나타난다.

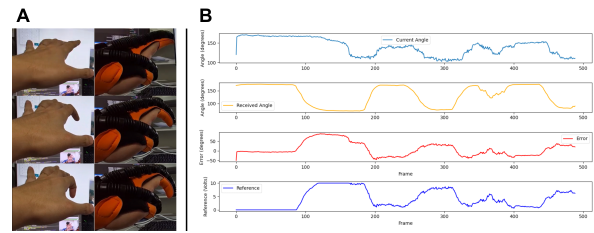


그림 3 (A) 실제 동작 모습 (B) 동작 간 학습자 손가락 각도(Cyan), 교수자 손가락 각도(Yellow), 상기 둘의 오차(Red), 공압 레귤레이터 명령값(Blue) 데이터

4. 결론

교수자와 학습자 간 손동작을 동기화하는 학습자 착용식 공압 햅틱장갑 시스템과 컴퓨터 비전을 통한 폐쇄루프 제어 방법론을 제시하였다. 향후 연구에서는 하드웨어에 있어 음압 조성이 가능한 공압 레귤레이터 도입으로 제어 정밀성을 개선하며, 사용자 신체 조건에 따라 장갑에 조정하는 압력의 범위를 낮추고 긴급 배기 밸브를 갖추는 등으로 안전성을 향상할 수 있겠다. 기존 맨손 자세 추정 컴퓨터 비전 모델을 장갑의 자세 인식에 적용하며 생기는 부정확성을 개선하기 위해, 장갑 착용 상태의 자세 데이터를 획득하여 사전학습 모델의 파인튜닝을 수행하는 등의 접근 모색이 필요할 것이다. 이후 손 동작 훈련 상황에서 본 장치의 효용성을 엄밀히 보이기 위한 평가 수행이 이루어져야 하겠다.

참고문헌

- [1] D. Wang, M. Song, A. Naqash, Y. Zheng, W. Xu, and Y. Zhang. Toward Whole-Hand Kinesthetic Feedback: A Survey of Force Feedback Gloves. *Transactions on Haptics*. 12(2). IEEE. pp. 189-204. 2019
- [2] S. Li, R. Rameshwar, A. M. Votta, and C. D. Onal. Intuitive Control of a Robotic Arm and Hand System with Pneumatic Haptic Feedback. *Robotics and Automation Letters*. 4(4). IEEE. pp. 4424-4430. 2019
- [3] D. Hu, J. Zhang, Y. Yang, Q. Li, D. Li, and J. Hong. A novel soft robotic glove with positive-negative pneumatic actuator for hand rehabilitation. *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. IEEE. pp. 1840-1847. 2020
- [4] E. Basalp, P. Wolf, and L. Marchal-Crespo. Haptic Training: Which Types Facilitate (re)Learning of Which Motor Task and for Whom? Answers by a Review. *Transactions on Haptics*. 14(4). IEEE. pp. 722-739. 2021
- [5] F. Zhang et al. MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking. <https://arxiv.org/abs/2006.10214v1>. 2020