

원격 신체 활동 교육에서 전기 근육 자극 기반 가이던스의 가능성에 대한 연구

김지환¹⁰ 조준형¹ 이태현² 정면걸³ 김광욱^{1*}

¹한양대학교 컴퓨터·소프트웨어학과

²멜버른대학교 컴퓨터·정보시스템학과

³한양대학교 의류학과

¹(solee1234, whwnsgud13, kenny)@hanyang.ac.kr, ²taehyun.rhee@unimelb.edu.au, ³wjdausrjf@hanyang.ac.kr

Exploring the Potential of Electrical Muscle Stimulation-based Guidance in Remote Physical Activity Education

Jihwan Kim¹⁰ Junhyeong Cho¹ Taehyun James Rhee² Myeongul Jung³ Kwanguk (Kenny) Kim^{1*}

¹Department of Computer and Software, Hanyang University, Republic of Korea

²School of Computing and Information Systems, The University of Melbourne, Australia

³Department of Clothing and Textiles, Hanyang University, Republic of Korea

요 약

원격 신체 활동 교육은 복잡한 전신 동작에서 요구되는 근육 사용, 신체 협응, 움직임의 타이밍을 전달하는 높은 난이도의 과제이다. 본 연구는 전기 근육 자극(Electrical Muscle Stimulation, EMS) 기반 전신 가이던스가 포함된 원격 훈련 후 동작 수행 변화와 사용자 경험을 분석하였다. 총 11명의 참가자는 강사의 원격 지도, 정답 동작 영상, 시간 동기화된 전신 EMS 자극을 제공받으며 전신 동작 훈련을 반복 수행하였다. 훈련 전후의 위치 및 회전 정확성은 Dynamic Time Warping 기법으로 분석하였고, 사후 인터뷰를 통해 EMS 사용 경험에 관한 데이터를 수집하였다. 연구 결과에 따르면 위치 정확성은 여러 동작에서 향상되었으나, 회전 정확성의 변화는 제한적이었다. 참가자들은 EMS가 근육 사용 부위 인지와 움직임 방향 경험에 도움이 된다고 인식했지만, 자극 타이밍 불일치, 주의 분산, 불편감, 개인차도 보고하였다. 본 연구는 EMS 기반 전신 가이던스가 원격 신체 활동 교육에서 보완적 신체 피드백 채널로 활용될 가능성과 적응형 설계의 필요성을 시사한다.

Abstract

Remote physical activity education has limitations required for complex full-body movements. This study analyzed movement performance changes and user experiences after remote training that incorporated full-body Electrical Muscle Stimulation (EMS) guidance. Eleven participants repeatedly performed complex full-body movements while receiving remote instruction from a trainer, reference motion videos, and time-synchronized EMS stimulation. Positional and rotational accuracy before and after training were analyzed using Dynamic Time Warping, and post-study interviews were conducted to collect EMS-related experiences. The results showed that positional accuracy improved in several movements, whereas improvements in rotational accuracy were limited. Participants perceived EMS as helpful for recognizing target muscle use and experiencing movement direction, while also reporting timing mismatches, divided attention, discomfort, and individual differences. These findings suggest that EMS guidance may be considered a supplementary embodied feedback channel in remote physical activity education.

키워드: 전기 근육 자극, 신체 가이던스, 원격 교육

Keywords: Electrical Muscle Stimulation, Physical Guidance, Remote Education

*corresponding author: Kwanguk (Kenny) Kim / Department of Computer and Software, Hanyang University, Republic of Korea (kenny@hanyang.ac.kr)

Received : 2026.05.26./ Review completed : 1st 2026.06.07. 2nd 2026.06.25./ Accepted : 2026.06.29.

DOI : 10.15701/kcgs.2026.32.3.23

ISSN : 1975-7883(Print)/2383-529X(Online)

1. 서론

원격 교육은 다양한 영역에서 빠르게 확산되고 있으며, 신체 활동 교육 방식 역시 영상 통화, 적응형 비디오, 혼합현실, 인공지능 피드백 시스템 등을 활용하여 진화하고 있다 [1-6]. 기존 연구에 따르면 화상 기반 운동 중재가 사용 가능하며, 혼합현실 기반 원격 훈련 시스템은 시점 공유, 공간 참조, 작업 이해를 향상시킬 수 있음을 보고하였다 [1, 2]. Onebody는 1인칭 시점 기반 가상환경을 통해 원격 자세 지도의 정확도와 선호도를 높이고자 하였고 [3], Reactive Video는 사용자의 움직임에 따라 교육 영상을 동적으로 동기화하는 방식을 제안하였으며 [4], FlowAR는 증강현실을 이용한 방법론을 제안했다 [5]. 그러나, 확장현실 기술은 점점 더 활발히 도입되고 있지만, 실제 운동 학습에 효과적으로 활용될 수 있는지에 대한 실증적 근거는 아직 충분하지 않다고 보고되었다 [6].

원격 신체 활동 교육에서 시각 및 언어 피드백은 학습자의 동작 이해와 수행을 지원하는 핵심 방법으로 활용되어 왔지만 [2-9], 복잡한 전신 동작에 대한 원격 교육 상황에서는 충분하지 않을 수 있다 [7-9]. 복잡한 전신 동작은 여러 관절과 근육의 협응, 회전, 위치 이동, 시간적 순서, 체중 이동을 포함하기 때문에, 학습자가 단순히 목표 동작의 외형을 관찰하는 것만으로는 어느 시점에 어떤 신체 부위를 어떻게 사용해야 하는지 명확히 이해하기 어렵다. 특히 원격 환경에서는 강사가 학습자의 신체를 직접 잡아주거나 움직임 방향을 촉각적으로 안내하기 어렵기 때문에, 학습자는 시각적으로 보이는 자세와 실제 신체 감각 사이의 차이를 스스로 해석해야 한다. 따라서 복잡한 전신 동작의 원격 교육에서는 시각 및 언어 피드백을 보완하여, 움직임의 방향과 근육 사용을 신체적으로 경험할 수 있도록 돕는 보조적 신체 가이던스가 필요하다.

전기 근육 자극(Electrical Muscle Stimulation, EMS)은 신체 가이던스를 제공할 수 있는 후보 기술 중 하나이다 [10-17]. EMS는 목표 근육의 수축을 유도함으로써, 학습자에게 단순한 설명이나 시각 정보가 아닌 신체적 가이던스를 제공할 수 있다 [10, 12]. 기존 연구들은 EMS를 움직임 유도 및 기술 학습을 지원하는 인터페이스로 확장해 왔다 [13-17]. 예를 들어, EMS는 피아노 연주 중 근시너지 형성을 유도하고 [13], 라켓 스포츠 중 준비 자세의 유지를 돕는 방식으로 활용 가능하다 [14]. 또한 EMS를 통한 운동 학습을 향상에 대한 연구도 수행되었다 [15]. 원격 상호작용 맥락에서는 TelePulse [16]가 생체역학 시뮬레이션을 기반으로 EMS 기반 원격 피드백 전달 방식을, TingleTouch [17]는 저항운동에서 강사의 Touch Guidance를 EMS로 번역하는 방식을 제안하였다.

하지만, 기존 EMS 연구는 주로 국소 부위에 초점을 두고 있으며, 짧은 시퀀스, 원격 힘 전달 같은 제한된 과제를 대상으로 했다 [10, 13-17]. 즉, EMS가 특정 근육 사용이나 운동 기술의 학습을 지원할 가능성은 제시되었지만 [13-17], 회전과 위치 이동이 복합적으로 요구되는 복잡한 전신 동작의 원격 교육에서 EMS 기반 전신 가이던스가 어떤 효용과 한계를 가지는지는 확인되지 않았다 [10, 13-17]. 특히 전신 동작은 특정 근육을 수축시키는 것으로 완성되지 않고, 전신 협응과 시간적 정합이 함께 요구되기 때문에, 기존의 국소적 EMS 적용 결과를 그대로 일반화하기 어렵다 [13-17]. 따라서 원격 환경 내 복잡한 전신 동작 교육 상황을 대상으로, EMS 기반 전신 가이던스의 가능성과 한계를 탐색할 필요가 있다 [13-17].

복잡한 동작의 교육에서는 목표 동작에 대한 학습자의 이해 뿐만 아니라, 실제 수행 중 신체 움직임이 목표 동작에 얼마나 가까워졌는지를 확인해야 한다 [17]. 전신 동작은 위치 이동, 관절 회전, 상·하체 협응, 시간적 순서를 함께 포함하므로, 수행 변화 역시 단일한 지표만으로 해석하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 훈련 전후의 동작 수행 변화를 위치 정확성과 회전 정확성으로 구분하고, 위치 정확성은 목표 동작의 공간적 이동 및 자세와의 유사성을, 회전 정확성은 관절 및 신체 분절의 방향 변화와의 유사성을 평가하기 위한 지표로 사용하였다. 사후 인터뷰는 EMS 기반 전신 가이던스가 교육 경험에 미치는 영향을 주관적으로 평가하는데 활용하였다.

이에 본 연구는 원격 신체 활동 교육 상황에서 EMS 기반 전신 가이던스가 포함된 훈련 후 동작 수행 정확성의 변화와 사용자 경험을 분석하였다. 이를 위해 회전, 위치 이동, 상·하체 협응이 요구되는 6개의 복싱 동작을 과제로 설정하고, 강사의 원격 지도, 정답 동작 영상, 참가자 자기 영상, 시간 동기화된 전신 EMS 자극이 함께 제공되는 EMS 기반 전신 동작 원격 훈련 시스템을 구축하였다. 이후 훈련 전후의 위치 및 회전 정확성을 분석하고, 사후 인터뷰를 통해 참가자들이 전신 EMS 기반 전신 가이던스를 어떻게 경험했는지 조사하였다. 본 연구의 기여는 후술하는 바와 같다.

- 첫째, 화상회의 기반 원격 지도, 영상을 통한 시각적 모니터링, 시간 동기화된 전신 EMS를 결합하여 EMS 기반 전신 동작 원격 훈련 시스템을 구축하였다.
- 둘째, 복잡한 전신 동작(복싱) 훈련 전후의 수행 변화를 시계열 유사도 분석을 통해 정량적으로, 인터뷰를 통해 정성적으로 평가함으로써 EMS 기반 전신 가이던스가 원격 신체 활동 교육에서 시각 및 언어 피드백을 보완하는 피드백으로 활용될 가능성을 탐색했다.
- 셋째, 동작 정보 전달, 대면 코칭 유사성 등 같은 장점과 타이밍 불일치, 주의 분산, 불편감 등의 단점을 종합하여 EMS 기반 전신 가이던스 설계 요소를 제안했다.

2. EMS 기반 전신 동작 원격 훈련 시스템

2.1 시스템 개요

본 연구를 위해 EMS 기반 전신 동작 원격 훈련 시스템을 설계하고 구현하였다. 본 시스템은 원격 강사의 언어적 피드백, 정답 동작 영상 및 자기 동작 모니터링을 통한 시각적 피드백, 정답 동작 영상과 시간 동기화된 EMS 자극을 통합하여 멀티모달 피드백을 제공하는 것을 목적으로 한다. 따라서 본 시스템은 강사와 학습자가 물리적으로 상이한 공간에 위치하여 동작을 학습하는 원격 신체 활동 교육 상황을 상정한다. Figure 1은 시스템 개요에 대한 도식이다.

2.2 시스템 아키텍처

본 시스템은 화상회의, 동작모니터링, EMS 피드백, 동작 측정의 네 가지 요소로 구성된다. Figure 2는 아키텍처의 도식이다.

첫째, 화상회의는 원격지의 강사가 실시간으로 학습자에게 설명과 피드백을 제공하기 위한 것이다. 강사의 영상 및 음성 정보는 화상회의 시스템을 통해 학습자에게 전달되며, 강사는 학습자의 수행을 관찰하면서 구두 피드백을 제공한다.

둘째, 동작 모니터링은 학습자가 정답 동작과 자신의 실시간 움직임을 시각적으로 비교하기 위한 것이다. 학습자는 정답 동작 영상과 자신이 수행한 동작을 실시간으로 확인하면서, 목표 동작과 자신의 수행 간 차이를 관찰할 수 있다.

셋째, EMS 피드백은 정답 동작 영상과 시간 동기화된 전신 EMS를 제공하기 위한 것이다. EMS는 정답 동작의 시간 흐름에 맞추어 사전에 설계되었으며, 정답 동작 영상과 함께 제시된다.

이를 통해 학습자는 목표 동작을 시각적으로 관찰하는 동시에, 해당 시점에 요구되는 신체 부위의 움직임을 경험한다.

넷째, 동작 측정 요소는 학습자의 동작 데이터를 기록하여 사후 분석에 활용하기 위한 것이다. 모션캡처 시스템은 학습자의 움직임을 기록하며, 기록된 데이터는 정답 동작 데이터와 비교되어 위치 및 회전 정확성 분석에 사용된다.

2.3 시각 피드백 및 EMS 설계

학습자에게 제공되는 정답 시각 피드백은 강사가 직접 수행한 동작을 촬영하여 제작하였다. 강사의 실제 움직임에서 발생하는 신체적 단서를 EMS로 함께 제공하기 위해, 정답 동작 영상을 기반으로 EMS를 설계하였다. EMS 설계 과정은 다음과 같다. 먼저 강사의 정답 동작 영상을 프레임 단위로 분석한다. 이후 각 프레임 구간에서 움직임이 발생하는 신체 부위와 해당 움직임에 주로 관여하는 것으로 판단되는 근육군을 결정한다. 다음으로 해당 근육군의 움직임이 시작되는 시점을 EMS Onset으로, 움직임이 종료되어 대기 자세 또는 중립 자세로 돌아오는 시점을 EMS Offset으로 설정한다. 결정된 근육군과 Onset-Offset 구간에 따라 EMS 장비의 해당 부위 채널에 EMS가 제공되도록 설정한다. 결정된 신체 부위는 EMS 장비의 전체 채널 중 해당 위치와 가장 가까운 채널에 매핑한다. 이 과정을 영상 전체에 대해 수행하여, 정답 동작 영상과 시간 동기화된 EMS 시퀀스를 구성한다. Figure 3은 본 연구를 위해 설계된 EMS 시퀀스의 도식이다.

2.4 시스템 구축 환경

본 시스템 구축에는 EMS 제시, 동작 측정, 기타 장비가 요구되며, 이하는 본 연구에서 사용한 장비들에 대한 설명이다.

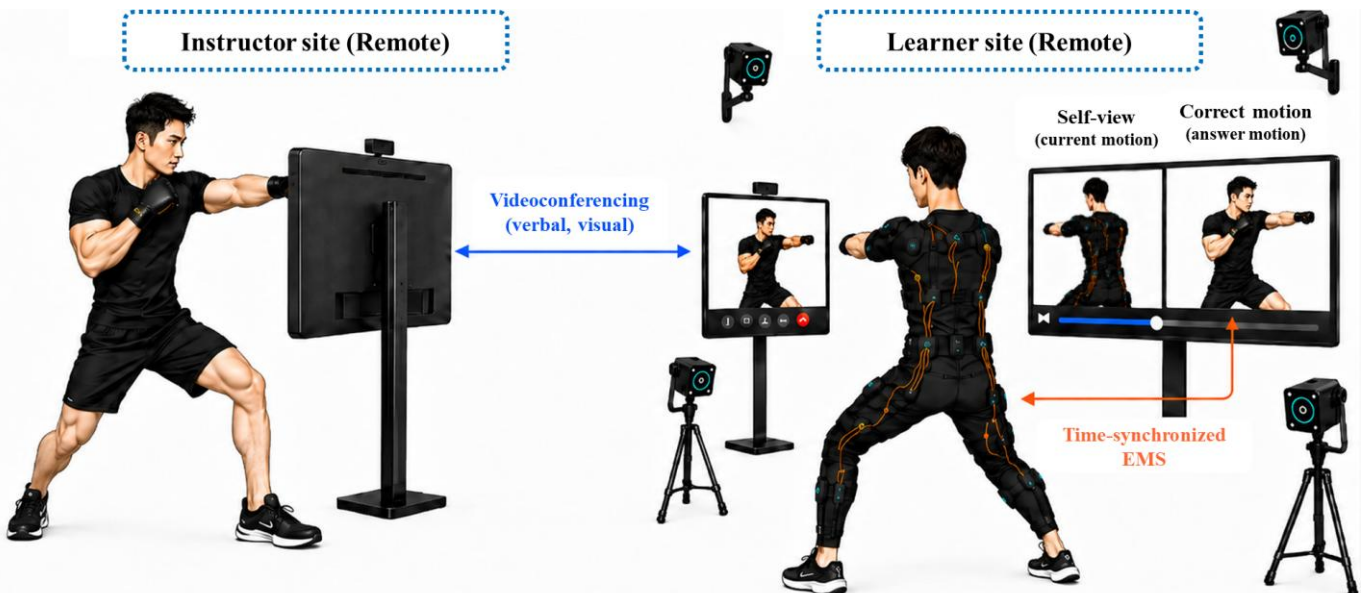


Figure 1. Overview of the electrical muscle stimulation-based guidance system for remote physical activity education

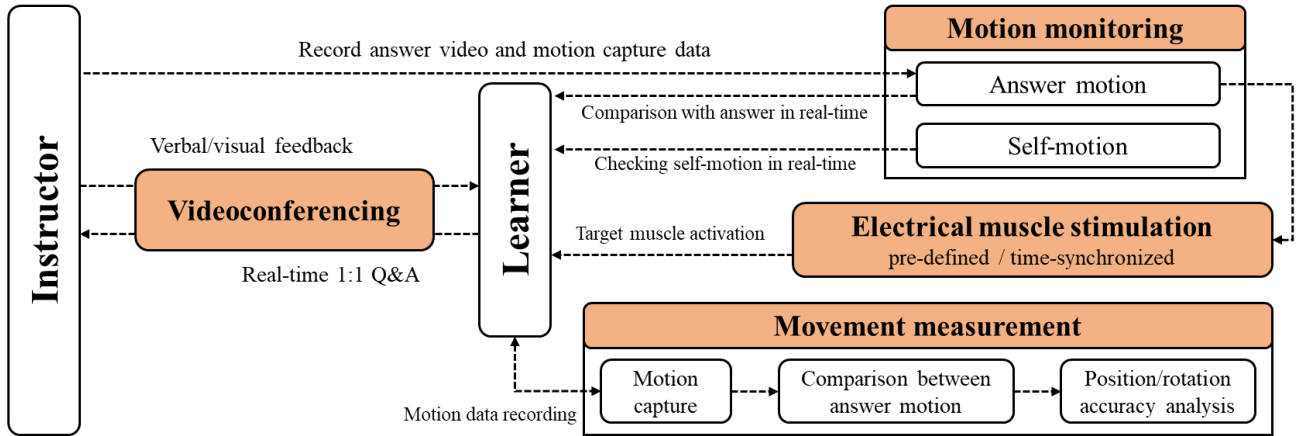


Figure 2. Overview of the system architecture for the electrical muscle stimulation-based physical guidance in remote education

EMS 제시에는 Teslasuit (Deep Divers Ltd, 영국)를 사용하였다. Teslasuit는 총 80개의 채널이 내장되어 있고, 각 채널의 자극 파라미터는 주파수 1–150 Hz, 전압 0–60 V AC, 펄스 폭 2–100 μ s 범위에서 조절할 수 있다.

동작 측정에는 Motive 2.0.1 (Natural Point, 미국)과 18대의 Flex 13 카메라(Natural Point, 미국)를 사용하였으며, 5 m $\times$ 3 m $\times$ 2.5 m 공간내 움직임을 측정할 수 있다. Flex 13 카메라는 1280 $\times$ 1024 해상도, 120 Hz 프레임 속도, 56° 시야각을 지원한다. 움직임 측정 수트에는 총 37개의 마커가 부착되었다.

기타 장비는 화상회의와 모니터링 장비가 포함된다. HD Webcam 270 (Logitech International S.A., 스위스) 두 대는 화상회의에 활용됐다. HD Webcam 270은 1280 $\times$ 720의 통화 해상도와 Always Focused를 지원한다. 30X-P Driver IPS LED (썬크로스오버존, 대한민국) 두 대는 모니터링에 활용됐다. 30X-P Driver IPS LED는 2560 $\times$ 1600 해상도, 120 Hz 주사율, 6 ms 응답속도, 대각선 크기 30 inch를 지원한다.

시스템 프로그램은 Unity 2020.3.26f (Unity Technologies,

미국)로 개발되었으며, Intel i5-14600KF 3.50 GHz 프로세서, 32 GB RAM (Samsung, 대한민국), GeForce RTX 4060 Ti 그래픽 카드(NVIDIA, 미국)가 장착된 PC에서 구동되었다.

3. 사용자 평가

3.1 피험자

본 연구는 대학의 연구윤리위원회의 승인을 받았다(HYUIRB-202507-008). 총 11명의 오른손잡이 참가자(여성 4명, 남성 7명)가 연구에 참여했다. 모든 참가자는 실험에 대해 상세한 설명을 들은 뒤 서면 동의서를 작성했다. 피험자의 평균 연령은 28.18세 (표준편차=4.64)였으며, 신체 질환이 있거나 약을 복용 중이거나 복싱 경험이 있는 피험자는 없었다. 모든 피험자는 참여에 대한 보상으로 시간당 30,000원을 지급받았다. 본 연구는 반복측정 설계를 사용하였으며, 모든 참가자는 여섯 가지 동작 과제와 Pre–Main–Post 단계에 모두 참여하였다.

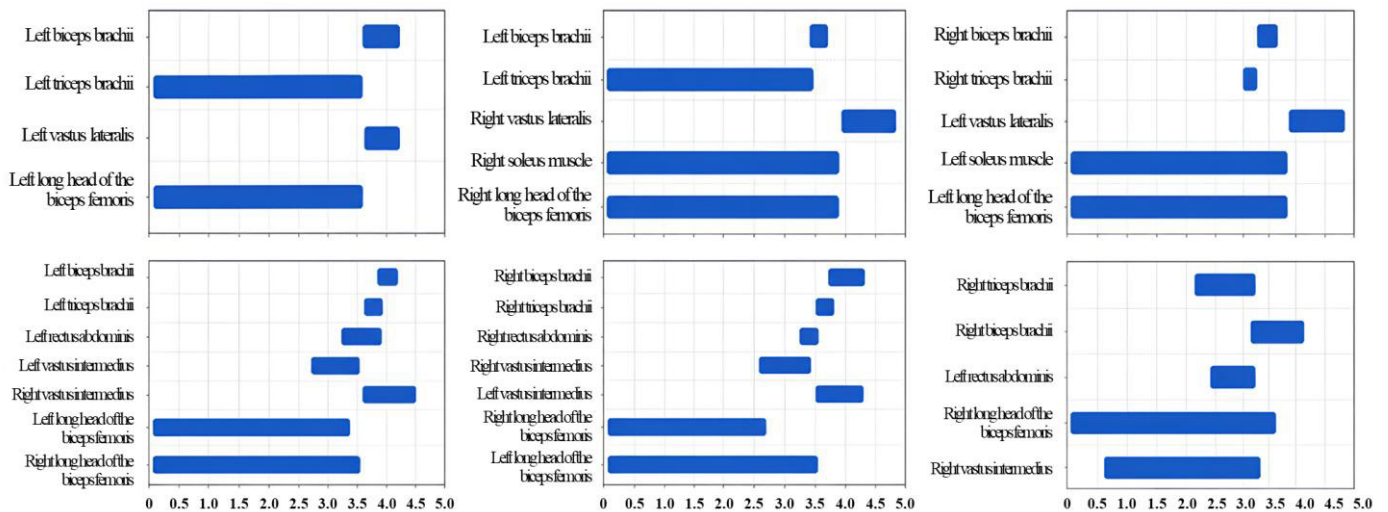


Figure 3. Pre-defined sequence of electrical muscle stimulation for this study including the Jab (upper-left), Straight (upper-middle), Left Hook (upper-right), Right Hook (lower-left), Left Uppercut (lower-middle), Right Uppercut (lower-right).

3.2 실험 환경

본 연구의 복싱 강사는 Melbourne, State of Victoria, Australia에서 과제를 진행하였고, 피험자들은 2.2절에 명시된 시스템 환경이 구축된 국내 실험 공간에서 과제에 참여하였다.

3.3 EMS 보정

본 실험 전 근육 유도를 위한 강도를 파악하고 안전 문제 발생을 예방하기 위해 개인별로 EMS 강도의 임계지점을 측정하는 보정을 수행했다. Teslasuit에 내장된 총 80개 채널 각각에 대해 최대 자극 강도를 측정했다. 순서는 다리, 팔, 등, 복부의 순으로 진행하였다. 각 채널의 최대 강도는 실험자가 목표 근육의 움직임을 육안으로 확인할 수 있는 수준 또는 피험자가 통증을 보고하는 수준 중 먼저 도달한 값으로 정의하였다. 다만 본 실험에서는 EMS가 반복적으로 제시되므로, 장시간 사용에 따른 통증 및 피로 가능성을 고려하여 실제 강도는 측정된 최대 강도의 80%로 설정하였다. 이를 통해 근육 수축 유도와 동시에 피험자의 안전을 함께 고려하였다.

3.4 실험 과제: 원격 복싱 동작 훈련

실험과제는 원격 복싱 동작 훈련이었다. 대상 동작은 Jab, Straight, Left Hook, Right Hook, Left Uppercut, Right Uppercut의 총 6가지였다. 각 동작은 하나의 세션으로 구성되었으며, 모든 세션은 Instruction-Pre-Main-Post의 네 단계로 구성되었다. Instruction 단계에서 피험자는 모니터에 적힌 동작 설명을 읽는 방식으로 수행 방법을 숙지했다. Pre 단계에서 피험자는 아무런 도움 없이 동작을 수행하였고, Main 단계에서는 강사의 실시간 피드백과 EMS 지원 하에 동작을 수행하였다. 마지막으로 Post 단계에서는 다시 추가적인 도움 없이 동작을 수행하였다.

3.5 측정변인

3.5.1 동작 정확성

정답과 피험자 동작 간의 위치 및 회전 정확성은 두 시계열 데이터의 유사도를 정량화하기 위해 Dynamic Time Warping (DTW) 방법을 사용하여 산출하였다 [18, 19]. DTW는 길이가 서로 다르거나 시간적으로 비선형적인 두 시계열 데이터를 최적으로 정렬한 뒤 누적 거리를 계산하는 방법으로, 두 데이터의 길이가 상이해도 유연한 조절을 통해 유사성을 찾을 수 있으며, 동일한 패턴이라도 진행 속도의 차이가 존재할 때 이를 보정하여 유사도를 파악할 수 있다는 장점을 갖는다.

본 연구에서는 정답 Motion Capture 데이터와 피험자의 Pre 및 Post 단계 데이터를 비교하는 데 사용하였다. 두 시계열 $A = (a_1, \dots, a_M)$, $B = (b_1, \dots, b_N)$ 에 대해 프레임 i 와 j 사이의 국소거리 $d(a_i, b_j)$ 를 정의하면 DTW 누적 비용 $D(i, j)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$D(i, j) = d(a_i, b_j) + \min \{D(i-1, j-1), D(i-1, j), D(i, j-1)\}$$

최종 DTW 값은 최적 정렬 경로 P에 대한 평균으로 산출하였다.

$$DTW(A, B) = \frac{1}{|P|} \sum_{(i,j) \in P} d(a_i, b_j)$$

여기서 위치 정확성은 각 프레임의 관절 위치 벡터 간 거리로, 회전 정확성은 각 관절의 상대 Quaternion 간 각도 차이로 국소 거리를 계산하였다. DTW 비용은 두 시계열이 서로 유사할수록 0에 가까워지므로, 값이 작을수록 동작 정확성이 높음을 의미한다. 따라서 Pre 대비 Post에서 DTW 값이 감소할수록 동작 수행 정확성이 향상된 것으로 해석 가능하다. 분석에 앞서 각 프레임의 관절 위치 데이터는 골반을 기준으로 상대좌표화하고, 골반의 회전 성분을 제거한 뒤, 신체 크기 차이를 보정하기 위해 어깨 폭을 기준으로 정규화하였다. 회전 데이터는 각 관절의 Quaternion을 골반 기준의 상대 Quaternion으로 변환하여 사용하였다. 이를 통해 참가자 간 체형 차이와 전역 좌표계 차이의 영향을 줄이고, 동작 자체의 형태 차이를 비교했다.

3.5.2 사후 인터뷰

EMS 기반 전신 가이던스에 대한 피험자의 주관적 경험을 탐색하기 위해 사후 인터뷰를 실시하였다. 피험자는 실험자 요청에 따라 EMS의 장점과 단점에 대해 자유롭게 응답했다. 이는 정량적 지표만으로 파악하기 어려운 주관적 인식과 경험을 수집하기 위함이었다. 구체적으로, EMS가 동작 이해와 수행에 어떻게 도움을 주는지, EMS의 타이밍과 강도가 적절한지, 수행 중 불편감이나 방해 요소는 무엇이었는지, 그리고 개인차에 따른 반응 차이가 존재하는지를 확인하였다.

3.6 실험 절차

가장 먼저, 피험자들은 실험에 대해 상세한 안내를 받았다. 이어서 연령, 성별, 근골격계 질환 유무 등 인구통계학적 사전 설문을 진행했다. 본 실험 전, EMS 사용으로 인한 안전 사고 방지를 위해 EMS 보정 작업을 수행했다. 본 실험은 총 6개의 세션으로 구성되었으며, Jab, Straight, Left Hook, Right Hook, Left Uppercut, Right Uppercut 순으로 진행됐다. 세션은 Instruction-Pre-Main-Post의 순서로 진행되었다. Instruction에서는 약 3분 정도 동작에 대해 숙지했다. 이어서 Pre에서 동작을 10회, Main에서 30회, Post에서 10회 총 50번의 동작을 수행했다. 모든 세션이 종료된 뒤, 사후 인터뷰를 수행한 후 실험을 종료하였다. 실험에는 약 2시간 30분이 소요됐다. Figure 4는 실험 절차이다.

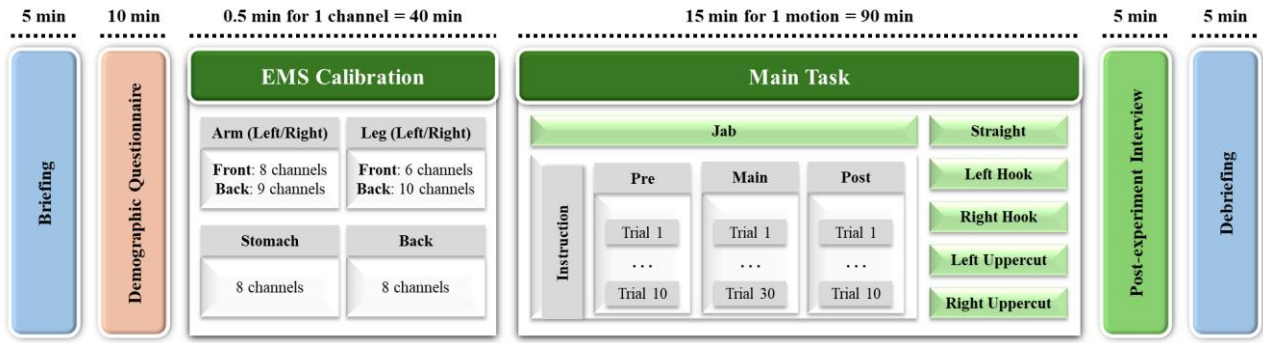


Figure 4. Experimental procedures. Note: Electrical muscle stimulation, EMS

3.7 결과 분석

동작 정확성은 측정 시점(Pre vs. Post) 과 동작 종류(Jab vs. Straight vs. Left Hook vs. Right Hook vs. Left Uppercut vs. Right Uppercut)를 요인으로 하는 Repeated-measures Analysis of Variance 을 통해 분석하였다. 이를 통해 측정 시점의 주효과, 동작 종류의 주효과, 그리고 두 요인 간 상호작용 효과를 확인했다. 유의한 효과가 확인된 경우에는 Bonferroni-corrected Paired t-test 로 사후 검정을 실시했다. 모든 분석의 유의수준은 $p < .05$ 로 설정하였다.

사후 인터뷰 응답은 두 명의 연구자가 독립적으로 인터뷰 응답을 검토한 뒤, EMS 사용 경험과 관련된 주요 의미 단위를 도출하고 논의를 통해 최종 범주를 합의하여 분석했다.

4. 결과

4.1 동작 정확성 변화

위치 정확성 변화에 대한 분석 결과 측정 시점의 주효과, 동작

종류의 주효과, 상호작용 효과가 모두 확인됐다($F(1, 10) = 36.440, p < .001 \eta_p^2 = .785$; $F(5, 50) = 6.901, p < .001 \eta_p^2 = .408$; $F(5, 50) = 4.058, p = .004 \eta_p^2 = .289$). Pre 및 Post 비교 결과 Jab, Straight, Left Hook, Right Uppercut은 유의하게 위치 정확성이 개선되었다($p = .008$; $p = .002$; $p = .024$; $p = .048$). Left Uppercut은 개선되는 경향은 보이나 통계적으로 유의한 차이는 확인되지 않았다($p = .057$). Right Hook은 유의한 개선이 없었다($p = .652$). Pre 단계에서 Straight는 Right Hook보다 정확도가 낮았고, Left Uppercut보다 높았다($p = .045$; $p = .004$). Right Hook은 Left Uppercut보다 정확도가 높았다($p < .001$). Left Uppercut은 Right Uppercut보다 정확도가 낮았다($p = .022$). Post 단계에서 Jab은 Left Hook보다 정확도가 높았다($p = .014$). Left Uppercut은 Jab, Straight, Right Uppercut 대비 정확도가 낮았다($p = .003$; $p < .001$; $p = .013$). Figure 5 (A)는 위치 정확성 결과이다.

회전 정확성 변화에 대한 분석 결과 측정 시점과 동작 종류의 주효과는 확인되었으나, 상호작용 효과는 확인되지 않았다($F(1, 10) = 11.506, p = .007 \eta_p^2 = .535$; $F(5, 50) = 4.329, p = .002 \eta_p^2 = .302$; $F(5, 50) = 1.164, p = .340 \eta_p^2 = .104$). Pre 및 Post 비교 결과 Jab은 회전 정확성이 유의하게 개선됐다($p = .003$). Left Uppercut은 개선 경향은 보이나 통계적 차이는 확인되지 않았다($p = .054$).

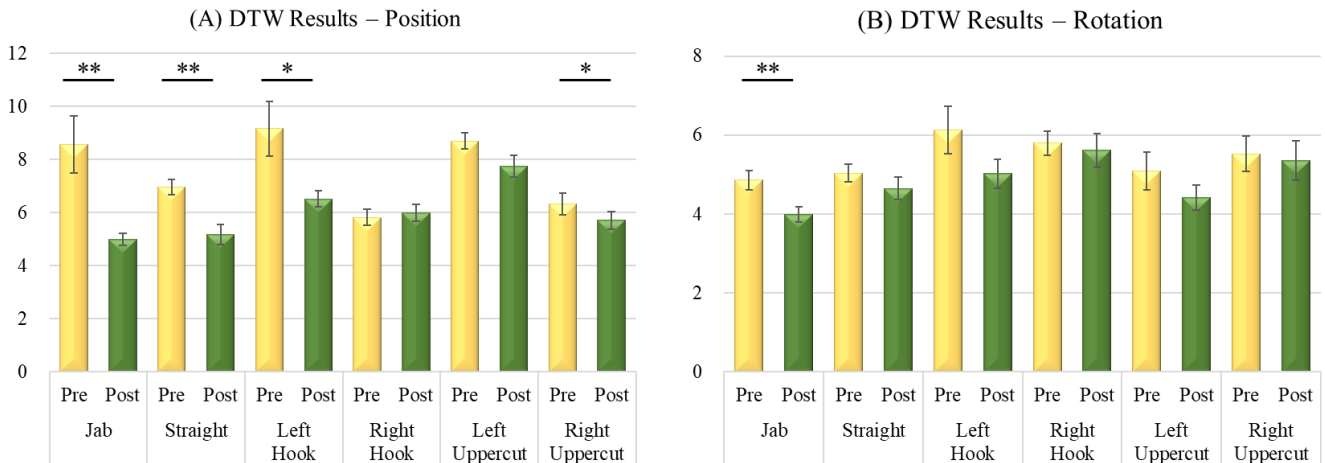


Figure 5. Dynamic time warping (DTW) results for position (A) and rotation (B). DTW values indicate the distance between the answer and participants' motion data; therefore, lower DTW values indicate higher motion accuracy. Error bars indicate standard errors. * $p < .05$, ** $p < .01$.

Table 1. Post-experimental interview results. Note: Electrical muscle stimulation, EMS

분류		피험자	응답
장점	근육 사용 부위 인지	2	EMS를 통해 어떤 부분을 신경 쓰면서 움직여야 하는지 알 수 있어서 도움이 됐다.
		3	어떻게 동작을 취해야 하는지 더 잘 알 수 있었고, 모니터링을 할 수 있다는 점이 좋았다.
		4	동작을 수행할 때 어떤 부위를 사용해야 하는지 헛갈릴 수 있는데, 그럴 때 근육에 느낌이 오니까 도움이 됐다.
		8	정확하게 사용해야 하는 부위를 알려주는 느낌이어서 올바른 동작 수행에 도움을 준다는, 지지해주는 느낌을 받았다.
	직접적인 동작 유도	1	EMS를 통해 세세하게 동작을 수정할 수 있었다. EMS가 없었다면 정밀한 수정이 어려웠을 것 같다.
		3	EMS 덕분에 끝나고 나서도 자극이 남아 있는 것처럼 생생하게 동작 재현이 가능했던 것 같다.
		6	동작하는 시점에 맞춰서 쓰이는 근육들에 자극이 와서 도움이 됐다.
		9	동작을 수행할 때 내가 생각하고 동작하는 것보다 더 신속하게 움직임을 할 수 있도록 도와주었고, 이 점이 동작 수행에 도움이 됐다.
		10	시각 피드백만 있으면 자세가 틀어지기 쉬운데, EMS로 직접 자극을 줘서 바른 자세를 찾아가는데 꽤 도움이 됐다.
		11	막상 Main 단계를 수행할 때는 인지하지 못했으나, 사후 조건에서는 EMS로 인해 동작이 몸에 익은 것 같아 도움이 되었다고 생각한다.
	대면 코칭 유사성	3	EMS 덕분에 자극이 가해지는 부위에 힘이 들어가다 보니까 동작을 수행할 때 선생님이 직접 만져주는 느낌이 들었다.
단점	타이밍	2	천천히 수행하고 싶었을 때 그게 마음대로 되지 않는다는 점이 불편했다.
	및 속도 불일치	5	올바른 동작을 수행하면 크게 불편하지 않은데, 잘못된 동작을 수행하면 EMS가 매우 불편하게 느껴졌다.
		7	동작을 수행하는데 EMS 때문에 동작을 하지 못하거나 밀리는 경우가 있어서 불편했다.
	주의 분산	4	동작을 더 잘하고 싶었는데 EMS로 인한 느낌이 신경 쓰여서 방해가 됐다.
	및 불편감	5	정답 영상이랑 EMS가 동시에 제공되다 보니, 정답 영상에 집중을 못하고 따라하느라 주의가 분산되었다.
		11	사람마다 자극에 대한 반응이 다를 것 같아서 더 세부적인 조절이 필요할 것 같다.

Straight, Left Hook, Right Hook, Right Uppercut은 유의한 개선이 없었다($p=.190$; $p=.096$; $p=.688$; $p=.142$). Pre 단계에서는 동작 간 유의한 차이가 없었다(all $ps > .259$). Post 단계에서는 Left Hook이 Jab, Left Uppercut보다 정확도가 낮았다($p=.042$; $p=.019$). Figure 5 (B)는 회전 정확성 결과이다.

4.2 사후 인터뷰

인터뷰 응답은 EMS의 장점과 단점을 중심으로 정리되었으며, 주요 응답은 근육 사용 부위 인지, 직접적 동작 유도, 대면 코칭 유사성 등 장점과 타이밍 및 속도 불일치, 주의 분산 및 불편감 등 단점이 있었다. Table 1은 11명 피험자의 응답 전체이다.

먼저, 근육 사용 부위 인지와 관련된 응답이 다수 확인되었다. 피험자들은 EMS를 통해 어떤 부위의 근육을 사용해야 하는지 보다 분명하게 알 수 있었다고 응답하였다. 다음으로, 직접적인 동작 유도에 대한 응답이 보고되었다. 피험자들은 시각

정보만으로는 파악하기 어려운 세부적인 움직임을 EMS가 보완해 주었다고 진술하였다. 또한 자극이 움직임 시작 자체를 돕는다고 응답하였다. 추가로, 신체적 코칭 유사성에 대한 응답도 확인되었다. 한 피험자는 EMS로 인해 강사가 직접 몸을 만져 주는 것과 유사한 느낌을 제공한다고 응답하였다.

반면, 부정적인 응답도 확인되었다. 일부 피험자는 EMS의 자극 타이밍이 수행 속도와 맞지 않는다고 응답하였다. 또한 주의 분산 및 불편감 관련 응답이 확인되었다. 피험자들은 정답 영상과 EMS가 동시에 제시될 때 주의가 분산되거나, 올바르게 수행하지 못한 경우 EMS가 불편했다고 보고하였다.

종합하면, EMS의 장점과 단점이 모두 보고되었다. 피험자들은 EMS로 인한 근육 사용 부위 인지, 직접적인 동작 유도, 대면과 원격 교육 사이의 코칭 유사성 등 긍정적인 측면이 존재하는 동시에 EMS의 타이밍 및 속도 불일치로 인한 물리적 불편함과 인위적인 느낌으로 인한 심리적인 불편감도 존재했다.

5. 논의

본 연구는 EMS 기반 전신 가이던스가 원격 전신 동작 교육에서 복잡한 동작수행을 보조할 수 있는지 탐색하였다. 그 결과, 훈련 이후 위치 정확성은 전반적으로 향상되었으나, 회전 정확성의 변화는 상대적으로 제한적이었다. 또한 사후 인터뷰에서는 EMS가 근육 사용 부위 인지와 직접적인 동작 유도에 도움이 되었다는 긍정적 경험과 함께, 자극 타이밍 불일치, 주의 분산, 불편감, 개인차와 같은 한계가 함께 보고되었다.

5.1 EMS 기반 전신 가이던스의 가능성과 적용 범위

본 연구의 결과는 EMS 기반 전신 가이던스가 원격 전신 동작 교육에서 보완적 Embodied Feedback Channel로 고려될 수 있음을 시사한다. 참가자들은 EMS를 통해 사용해야 할 근육 부위를 더 명확히 인식하고, 시각 정보만으로는 이해하기 어려운 움직임을 직접적으로 유도받았다고 보고하였다. 이는 참가자들이 EMS를 단순한 정보 제시가 아니라, 움직임의 방향과 근육 사용을 신체적으로 경험하게 하는 피드백으로 인식했음을 보여준다. 이러한 해석은 Augmented Feedback 및 Haptic Guidance 연구와 연결된다. 기존 연구들은 외부 피드백이 학습자가 자연적으로 인식하기 어려운 수행 정보를 제공함으로써 운동 수행을 보조할 수 있으며, 특히 Haptic Guidance는 목표 움직임을 신체적으로 경험하게 할 수 있다고 논의해 왔다 [20]. 본 연구는 이러한 논의를 EMS 기반 전신 가이던스 맥락으로 확장했다는 의의가 있다.

다만 EMS의 효과는 동작 정확성의 모든 차원에서 동일하게 나타나지 않았다. 위치 정확성은 여러 동작에서 유의하게 변화되었지만, Right Hook에서는 유의한 개선이 나타나지 않았다. 이는 Right Hook의 사전 위치 정확성이 학습 이후의 정확성 수준으로 높았기 때문으로 해석된다. 이러한 초기 수행 이점은 모든 참가자가 오른손잡이였다는 점과 일부 관련될 수 있으나, Straight와 Right Uppercut 역시 오른쪽 손을 사용하는 동작임에도 동일한 양상이 나타난 것은 아니므로 우세손 특성만으로 설명하기는 어렵다. 따라서 Right Hook의 위치 정확성 무개선은 해당 동작의 초기 이해 용이성, 사전 설명 또는 시각적 예시의 명료성이 함께 반영된 결과로 해석해야 한다.

회전 정확성의 변화는 제한적이었다. 이는 EMS가 특정 신체 부위의 활성화나 움직임 방향을 알려주는 데에는 효과적일 수 있으나, 세밀한 관절 회전과 전신 협응을 정교하게 보정하는 데에는 한계가 있음을 시사한다. 생체역학적으로 근육은 수축을 통해 힘을 생성하지만, 관절 회전은 이 힘이 관절 중심에 대해 모멘트암을 가질 때 발생하는 토크의 결과로 나타난다 [16]. 따라서 회전은 특정 근육의 단순 수축 또는 이완과 일대일로

대응되는 움직임이라기보다, 관절의 현재 자세, 모멘트암, 주동근과 길항근의 상대적 활성화, 여러 근육군의 시간적 협응에 의해 형성되는 복합적 움직임이다 [13, 16]. 특히 본 연구에서 사용한 EMS는 정답 동작을 기반으로 특정 근육군과 Onset-Offset 구간을 사전에 정의하여 제시한 방식이므로, 움직임의 시작 부위나 방향을 알려주는 데에는 도움을 줄 수 있지만, 회전축 주위의 토크를 정밀하게 형성하거나 관절 및 신체 분절의 방향 변화를 목표 각도에 맞추어 유도하는 데에는 제한적일 수 있다 [10, 14, 16]. 따라서 EMS는 복잡한 전신 동작 전체를 자동으로 교정하는 기술이라기보다, 특정 동작 요소에 대한 신체적 단서를 제공하는 보조 채널로 이해될 필요가 있다.

5.2 도움과 간섭 사이: 적응형 EMS 설계의 필요성

본 연구의 사후 인터뷰는 EMS 기반 전신 가이던스가 도움과 간섭의 가능성을 동시에 가진다는 점을 보여준다. EMS는 적절한 타이밍과 자세에서 제공될 경우 사용자가 근육 사용 부위와 움직임 방향을 직접 경험하도록 도울 수 있다. 일부 참가자가 EMS를 강사가 직접 몸을 만져 교정해주는 것과 유사하게 느꼈다는 점은, EMS가 원격 환경에서 부족한 신체적 코칭을 부분적으로 보완할 수 있음을 시사한다.

그러나 EMS는 시각 피드백과 달리 실제 근육 수축과 감각을 유발하기 때문에, 사용자의 수행 속도나 자세와 맞지 않을 경우 즉각적인 간섭으로 경험될 수 있다. 본 연구에서 보고된 타이밍 불일치, 주의 분산, 불편감은 EMS가 단순히 추가적인 피드백 채널이 아니라 강한 신체 개입성을 가진 피드백임을 보여준다. 이러한 결과는 Motor Learning 분야의 Guidance Hypothesis와도 연결된다. 외부 피드백이나 Physical Guidance는 수행 중 오류를 줄이고 즉각적인 수행을 향상시킬 수 있지만, 지나치게 강하거나 빈번하게 제공될 경우 학습자가 피드백에 의존하게 되어 장기적인 학습에는 부정적일 수 있다 [21, 22]. 또한 Concurrent Feedback은 수행 중 즉각적인 수정을 도울 수 있으나, 복잡한 동작에서는 학습자의 주의 자원을 분산시키거나 내재적 감각 정보 형성을 방해할 가능성이 있다 [20, 23]. 따라서 EMS 기반 전신 가이던스는 “더 많이 제공할수록 좋은 피드백”이 아니라, 학습자의 수행 상태와 학습 단계에 맞추어 조절되어야 하는 피드백으로 이해되어야 한다.

5.3 EMS 기반 전신 가이던스 설계 제안

본 연구의 결과는 EMS 기반 원격 교육 시스템이 고정된 자극 패턴을 반복 제시하는 방식에서 벗어나, 사용자의 수행 상태와 학습 단계에 맞추어 조절되는 적응형 시스템으로 설계될 필요가 있음을 시사한다.

첫째, EMS 자극은 정답 동작의 고정된 시간축이 아니라 사용자의 실제 수행 속도와 동기화되어야 한다. 일부 참가자는

자신의 속도에 맞춰 천천히 수행하고 싶을 때 EMS가 방해가 되었다고 보고하였다. 따라서 향후 시스템은 모션 캡처, 생체 신호, 컴퓨터 비전 등을 활용해 사용자의 상태를 추정하고, 해당 단계에 맞추어 자극 시점과 지속 시간을 인공지능 기반 자동 조절 등의 방법을 도입할 필요가 있다.

둘째, 동작 요소에 따라 EMS 전략을 다르게 설계해야 한다. 위치 이동이 중요한 동작에서는 특정 근육의 활성화나 방향 단서가 효과적일 수 있지만, 회전과 전신 협응이 중요한 동작에서는 단일 EMS 자극만으로 충분하지 않을 수 있다. 이러한 경우 EMS를 시각적 궤적 피드백, 단계적 언어 단서, 오류 기반 피드백과 결합하는 방식이 더 적절할 수 있다.

셋째, EMS의 강도와 빈도는 학습 단계에 따라 점진적으로 조절될 필요가 있다. 초기에는 EMS를 통해 움직임 방향과 근육 사용을 명확히 경험하게 하고, 이후에는 자극 강도나 빈도를 줄여 사용자가 스스로 동작을 재현하도록 유도할 수 있다. 이러한 전략은 피드백 의존성을 줄이고 독립적 수행을 촉진하는 데 도움이 될 수 있다 [21-23].

넷째, 사용자의 통제감과 안전감을 보장해야 한다. EMS는 신체에 직접 작용하기 때문에 사용자가 자극을 예측하고 조절할 수 있어야 한다. 예를 들어 자극 전 예고 신호, 강도 조절, 일시정지, 즉시 중단 버튼, 피로도 확인 절차를 제공할 수 있다.

5.4 한계 및 후속 연구

본 연구는 몇 가지 한계를 가진다. 첫째, 참가자 수가 제한적이기 때문에 결과를 일반화하는 데 주의가 필요하다. EMS에 대한 감각 민감도, 근육 반응, 통증 역치, 운동 경험은 개인마다 상이하다. 향후 연구에서는 더 많고, 다양한 조건의 참가자를 대상으로 교육 상황에서 EMS의 효용을 평가해야 한다.

둘째, 본 연구는 EMS 기반 전신 가이드스가 포함된 원격 훈련 환경의 종합적 가능성을 탐색하는 데 초점을 두었기 때문에, EMS 단독 효과를 분리하기 위한 통제 조건은 포함하지 않았다. 따라서 본 연구의 결과는 EMS, 강사 피드백, 정답 동작 영상, 반복 수행이 결합된 훈련 환경에서의 수행 변화로 해석되어야 한다. 향후 연구에서는 EMS 조건, 비EMS 조건, 시각 피드백 조건, 언어 피드백 조건을 비교하여 EMS 기반 전신 가이드스의 고유한 기여를 보다 명확히 검증할 필요가 있다.

셋째, 본 연구는 훈련 직후의 수행 변화에 초점을 맞추었기 때문에 장기적인 학습 효과, 유지 효과, 전이 효과를 확인하지 못했다. Motor Learning 관점에서 중요한 것은 즉각적인 수행 향상뿐 아니라 시간이 지난 뒤에도 동작이 유지되는지, 새로운 상황이나 유사한 동작으로 전이되는지이다 [8,9,15,21]. 따라서 향후 연구에서는 지연 사후 검사와 전이 과제를 포함하여 EMS 기반 전신 가이드스가 단기 수행 보조를 넘어 실제 운동 학습에 기여하는지 검증할 필요가 있다.

마지막으로, 본 연구에서 사용한 EMS는 사용자의 실시간 오류에 반응하는 페루프 방식이 아니라, 정답 동작에 시간 동기화된 사전 설계 방식이었다. 이로 인해 일부 참가자는 자극 타이밍이 자신의 수행 속도와 맞지 않거나, 잘못된 자세에서 자극이 불편하게 느껴졌다고 보고하였다. 향후 연구에서는 학습자의 상태에 반응하는 Adaptive System의 효용을 평가할 필요가 있다. 이는 추후 하드웨어와의 결합을 통해 내재적인 인간 증강과 외골격 등 외재적 인간 증강을 결합하는 연구로 확장하는데 초석이 될 수 있을 것이다 [24,25].

6. 결론

본 연구는 원격 신체 활동 교육에서 EMS 기반 전신 가이드스가 포함된 훈련 후 동작 정확성 변화와 사용자 경험을 분석하였다. 본 연구의 결과는 EMS 기반 전신 가이드스가 원격 신체 활동 교육에서 시각 및 언어 피드백을 보완하는 신체적 피드백 채널로 활용될 가능성을 시사한다. 향후 연구에서는 통제 조건을 포함한 비교 실험과 사용자 상태에 반응하는 적응형 EMS를 통해 EMS의 고유한 기여를 명확히 검증할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 문화체육관광 연구개발사업과 교육부 및 한국연구재단의 공동연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제명: G-DeepXR 연구센터, 과제번호: RS-2024-00399136, 기여율: 50% / 과제명: 실사용자 요구 기반 ASD 사회-정서 기능 평가 및 디지털 훈련 도구 개발: 뇌 동기화를 통한 Real-world adherence 효과 검증, 과제번호: No. NRF-2025S1A5A2A03013961, 기여율: 50%).
* Correspondence to K. Kim. (kenny@hanyang.ac.kr).

References

- [1] Robin, L., Mandigout, S., Batcho, C. S., Gelineau, A., and Borel, B., "Usability of Videoconferencing for Physical Exercise Interventions in Older Adults: Scoping Review," *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, vol. 12, e65552, 2025. doi: 10.2196/65552
- [2] Fidalgo, C. G., Yan, Y., Cho, H., Sousa, M., Lindlbauer, D., and Jorge, J., "A Survey on Remote Assistance and Training in Mixed Reality Environments," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 29, no. 5, pp. 2291-2303, 2023. doi: 10.1109/TVCG.2023.3247081
- [3] Hoang, T. N., Reinoso, M., Vetere, F., and Tanin, E., "Onebody: Remote Posture Guidance System using First Person View in Virtual Environment," in *Proceedings of NordiCHI 2016*, 2016. doi: 10.1145/2971485.2971521

- [4] Clarke, C., Cavdir, D., Chiu, P., Denoue, L., and Kimber, D., "Reactive Video: Adaptive Video Playback Based on User Motion for Supporting Physical Activity," in *Proceedings of UIST 2020*, pp. 196–208, 2020. doi: 10.1145/3379337.3415591
- [5] Jo, H.-Y., Seidel, L., Pahud, M., Sinclair, M., and Bianchi, A., "FlowAR: How Different Augmented Reality Visualizations of Online Fitness Videos Support Flow for At-Home Yoga Exercises," in *Proceedings of CHI 2023*, 2023. doi: 10.1145/3544548.3580897
- [6] Le Noury, P., Polman, R., Maloney, M., and Gorman, A., "A Narrative Review of the Current State of Extended Reality Technology and How It Can Be Utilised in Sport," *Sports Medicine*, vol. 52, no. 7, pp. 1473–1489, 2022. doi: 10.1007/s40279-022-01669-0
- [7] Mödinger, M., Woll, A., and Wagner, I., "Video-based Visual Feedback to Enhance Motor Learning in Physical Education: A Systematic Review," *German Journal of Exercise and Sport Research*, vol. 52, no. 3, pp. 447–460, 2022. doi: 10.1007/s12662-021-00782-y
- [8] Petancevski, E. L., Inns, J., Fransen, J., and Impellizzeri, F. M., "The Effect of Augmented Feedback on the Performance and Learning of Gross Motor and Sport-Specific Skills: A Systematic Review," *Psychology of Sport and Exercise*, vol. 63, 102277, 2022. doi: 10.1016/j.psychsport.2022.102277
- [9] Zhou, Y., Shao, W. D., and Wang, L., "Effects of Feedback on Students' Motor Skill Learning in Physical Education: A Systematic Review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 12, 6281, 2021. doi: 10.3390/ijerph18126281
- [10] Tamaki, E., Miyaki, T., and Rekimoto, J., "PossessedHand: Techniques for Controlling Human Hands Using Electrical Muscles Stimuli," in *Proceedings of CHI 2011*, pp. 543–552, 2011. doi: 10.1145/1978942.1979018
- [11] Kono, M., Takahashi, T., Nakamura, H., Miyaki, T., and Rekimoto, J., "Design Guideline for Developing Safe Systems that Apply Electricity to the Human Body," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 25, no. 3, Article 19, 2018. doi: 10.1145/3184743
- [12] Kim, J., Kang, M., Kim, J., and Kim, K. K. "Becoming a Rapid Shooter in a Game Using Embodied Electrical Muscle Stimulation: Development and Usability Study," *JMIR Serious Games*, 13(1), e69330. 2025. doi: 10.2196/69330
- [13] Nijijima, A., Takeda, T., Aoki, R., and Miyahara, S., "Muscle Synergies Learning with Electrical Muscle Stimulation for Playing the Piano," in *Proceedings of UIST 2022*, Article 54, 2022. doi: 10.1145/3526113.3545666
- [14] Faltaous, S., Hubert, A., Karolus, J., Villa, S., Kosch, T., and Woźniak, P. W., "EMStriker: Potentials of Enhancing the Training Process of Racket-based Sports via Electrical Muscle Stimulation," in *Proceedings of TEI 2022*, 2022. doi: 10.1145/3490149.3505578
- [15] Villa, S., Krammer, F. J. E., Weiss, Y., Welsch, R., and Kosch, T., "Understanding the Influence of Electrical Muscle Stimulation on Motor Learning: Enhancing Motor Learning or Disrupting Natural Progression?," in *Proceedings of CHI 2025*, 2025. doi: 10.1145/3706598.3714183
- [16] Hwang, S., Kang, S., Oh, J., Park, J., Shin, S., Luo, Y., DelPreto, J., Lee, S., Lee, K., Matusik, W., Rus, D., and Kim, S., "TelePulse: Enhancing the Teleoperation Experience through Biomechanical Simulation-Based Electrical Muscle Stimulation in Virtual Reality," in *Proceedings of CHI 2025*, 2025. doi: 10.1145/3706598.3713767
- [17] Kim, D.-U., Jo, H.-Y., Kim, H., Suzuki, R., Je, S., and Kim, Y., "TingleTouch: Touch Guidance through Electrical Stimulation in Resistance Training," in *Proceedings of CHI 2026*, 2026. doi: 10.1145/3772318.3791646
- [18] Sakoe, H., and Chiba, S., "Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 26, no. 1, pp. 43–49, 1978. doi: 10.1109/TASSP.1978.1163055
- [19] Müller, M., "Dynamic Time Warping," in *Information Retrieval for Music and Motion*, Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 69–84, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-74048-3_2
- [20] Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., and Wolf, P., "Augmented Visual, Auditory, Haptic, and Multimodal Feedback in Motor Learning: A Review," *Psychonomic Bulletin & Review*, vol. 20, pp. 21–53, 2013. doi: 10.3758/s13423-012-0333-8
- [21] Salmoni, A. W., Schmidt, R. A., and Walter, C. B., "Knowledge of Results and Motor Learning: A Review and Critical Reappraisal," *Psychological Bulletin*, vol. 95, no. 3, pp. 355–386, 1984. doi: 10.1037/0033-2909.95.3.355
- [22] Winstein, C. J., Pohl, P. S., and Lewthwaite, R., "Effects of Physical Guidance and Knowledge of Results on Motor Learning: Support for the Guidance Hypothesis," *Research Quarterly for Exercise and Sport*, vol. 65, no. 4, pp. 316–323, 1994. doi: 10.1080/02701367.1994.10607635
- [23] Wulf, G., Shea, C. H., and Lewthwaite, R., "Motor Skill Learning and Performance: A Review of Influential Factors," *Medical Education*, vol. 44, no. 1, pp. 75–84, 2010. doi: 10.1111/j.1365-2923.2009.03421.xDigital Object Identifier (DOI)
- [24] Marchal-Crespo, L., and Reinkensmeyer, D. J., "Review of Control Strategies for Robotic Movement Training after Neurologic Injury," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 6, Article 20, 2009. doi: 10.1186/1743-0003-6-20
- [25] Kim, D., Kim, J., and Kim, K. "Impact of Motion Capabilities in Supernumerary Robot Arms," *Journal of the Korea Computer Graphics Society*, 31(3), 35–44. 2025. doi: 10.15701/kcgs.2025.31.3.35

〈 저 자 소 개 〉



김 지 환

- 2020년 한양대학교 건설환경공학과 졸업(학사)
- 2022년 한양대학교 컴퓨터·소프트웨어학과 졸업(석사)
- 2026년 한양대학교 컴퓨터·소프트웨어학과 졸업(박사)
- 관심분야: 인간컴퓨터상호작용, 인간 증강, 퍼지컬 AI, 가상/증강/혼합현실
- <https://orcid.org/0000-0002-3357-1673>



김 광 욱

- 2009년 한양대학교 졸업(박사)
- 2009년 - 2010년 듀크대학교 연구원
- 2010년 - 2013년 캘리포니아 대학교(Davis) 연구원
- 2013년 - 현재 한양대학교 컴퓨터·소프트웨어학과 교수
- 관심분야: 인간컴퓨터상호작용, 가상현실, 의학용소프트웨어
- <https://orcid.org/0000-0002-4184-2058>



조 준 형

- 2024년 한양대학교(ERICA) ICT융합학부 졸업(학사)
- 2026년 한양대학교 헬스케어디지털공학과 졸업(석사)
- 2026년 - 현재 (주)제이엘케이 의료AI 연구원
- 관심분야: 딥러닝, 의료영상 인공지능
- <https://orcid.org/0009-0007-0164-6259>



이 태 현

- 1996년 - 2009년 삼성전자 책임연구원/연구원
- 2009년 - 2012년 삼성종합기술원 수석/책임연구원
- 2012년 - 2024년 뉴질랜드 빅토리아 웰링턴 대학교 교수
- 2017년 - 2024년 뉴질랜드 빅토리아 웰링턴 대학교 Computational Media Innovation Centre 소장
- 2024년 - 현재 호주 멜버른 대학교 School of Computing and Information Systems 교수
- 관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전, 가상/증강/혼합현실
- <https://orcid.org/0000-0002-6150-0637>



정 면 길

- 2017년 한양대학교 컴퓨터·소프트웨어학과 졸업(학사)
- 2023년 한양대학교 컴퓨터·소프트웨어학과 졸업(박사)
- 2023년 한양대학교 컴퓨테이션사회과학연구센터 연구원
- 2024년 - 현재 한양대학교 의류학과 조교수
- 관심분야: 패션인공지능, 인간컴퓨터상호작용, 가상신체, 감성컴퓨팅
- <https://orcid.org/0000-0001-9432-103X>