

---

## 시각 - 촉각 일치된 마중형 햅틱 제시 시스템의 사용자 평가

### User Evaluation of Encountered Type Haptic System with Visual-Haptic Co-location

차백동, Baekdong Cha\*, 배유성, Yoosung Bae\*, 최원일, Wonil Choi\*\*, 류제하, Jaha Ryu\*\*\*

---

**요약** 산업안전을 위한 가상훈련시스템들 중 마중형 햅틱 제시 시스템에서는 가상 및 실제 물체 사이의 자연스러운 상호 작용을 위해 시각-촉각 일치가 필요하며 이를 위해 캘리브레이션이 수행된다. 본 논문에서는 어느 정도의 시각-촉각 일치를 구현한 몰입형 VR 햅틱 시스템의 사용자 평가를 수행하였다. 평가의 목표는 실제 및 가상환경에서 수행하는 일정한 과업들에 대해 두 환경에 대한 사용자 성능 (반응시간 및 거리 정확도)이 크게 다르지 않다는 것을 보이는 것이다. 사용자 평가 결과는 반응 시간에서 통계적으로 유의한 차이가 보이지만 절대 차이는 1초 미만이며 거리 정확도는 가상 환경과 실제 환경 간에 차이가 없는 것을 보여준다. 따라서 개발된 햅틱가상훈련시스템은 값비싼 실제 환경을 대신하여 저렴하게 산업안전 훈련을 할 수 있다고 사료된다.

**Abstract** For encountered haptic display systems among the virtual training systems for industrial safety, visual-haptic co-location is required for natural interaction between virtual and real objects. In this paper, we performed the user evaluation of the immersive VR haptic system which implement some level of visual-haptic co-location through a careful and accurate calibration method. The goal of the evaluation is to show that user performance (reaction time and distance accuracy) for both environments is not significantly different for certain tasks performed. The user evaluation results show statistically significant differences in reaction time but the absolute difference is less than 1 second. In the meantime, the distance accuracy shows no difference between the virtual and the actual environments. Therefore, it can be concluded that the developed haptic virtual training system can provide inexpensive industrial safety training in place of costly actual environment.

**핵심어:** VR, Virtual training simulations, Augmented Reality, Haptics, Visual-Haptic Collocation, Evaluation

---

본 논문은 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 작성되었음(14FIPB085984-02).

\*주저자 : 광주과학기술원 기계공학부 박사과정

\*\*공동저자 : GIST대학 기초학부 교수

\*\*\*교신저자 : 광주과학기술원 기계공학부 교수

■ 접수일 : 2018년 11월 15일 / 심사일 : 2018년 12월 7일 / 게재확정일 : 2019년 4월 26일

## 1. 서론

가상 현실(Virtual Reality, VR), 증강 현실(Augmented Reality, AR), 증강 가상(Augmented Virtuality), 및 혼합 현실 (Mixed Reality, MR)은 사용자가 실제처럼 경험하고 상호 작용할 수 있는 인공 환경을 생성하는 기술이다[15]. VR은 오롯이 가상 환경으로 구성되는 반면 AR은 가상 요소를 실제 공간에 중첩하는 기술을 말한다. AV는 가상환경에 실제 요소 (예: 만질 수 있는 햅틱 물체)를 증강시키는 것이고 MR은 VR과 AR의 중간에 속한 개념이다. MR의 형태 중 하나인 AV 가상 환경에서 주어지는 중요한 정보를 햅틱 피드백으로 제시하는 촉각 증강 가상현실(HAV: Haptic Augmented Virtuality)이다.

이러한 기술의 중요한 응용 분야 중 하나는 시뮬레이션된 환경 내에서 사용자가 특정 과정을 연습할 수 있는 가상 훈련이다. 이는 실제 상황에서 수행하기에는 너무 위험하거나 상당한 비용이 드는 훈련 절차를 안전하고 저비용으로 실제처럼 수행하는 것을 가능케 한다[1,2]. 이러한 이유로 일부 산업 응용 분야에서는 물리적 훈련에 대한 대안으로써 가상 훈련을 연구하고 개발하는 것에 중점을 두고 있다. 또한 VR에 햅틱 감각을 추가하면 교육의 효율성이 높아지는 것으로 알려져 있다[3]. 이 연구에 따르면 LEGO 조립 과제에서의 수행 능력은 시각적 정보만 주어진 경우보다 시각적 정보와 촉각 피드백이 함께 제공되었을 때 향상되는 것으로 드러났다.

공장 및 발전소와 같은 산업 시설의 경우에는 위험 상황 발생 대비의 하나로, 산업 시설 내 비상 대응 훈련을 위한 여러 형태의 VR 훈련 시스템이 제안되었다[8]. 이 훈련 시뮬레이터에서는 훈련생의 터치 조작에 대한 촉각 신호를 제공하기 위해 착용형 장갑만이 사용되었다. 이 연구의 저자들이 언급했듯이, 산업 시설에서의 활동에는 복잡한 기계 설비 또는 장치를 제어하는 것을 포함하여 수많은 시나리오가 존재한다. 이들은 하나의 햅틱 디스플레이를 사용하는 것이 비상 대응 훈련에 필요한 촉감을 제시하기에 충분하지 않다고 결론지었다.

촉각 제시 장치(Haptic Display)는 사용자에게 촉각 정보를 제공하는 방식에 따라, 착용형(Worn Type), 손잡이형(Grip Type) 및 마중형(Encounter Type) 제시 장치 등으로 분류할 수 있다. 착용형 제시 장치[20]는 진동자가 부착된 장갑과 같은 장치[22]로, 사용자는 촉각 피드백을 받기 위해 장치를 착용해야 한다. 다른 형태인 손잡이형 장치는 VR을 경험하는 동안 사용자가 장치를 쥐고 있어야만 촉각 피드백을 제시할 수 있다[21]. 이러한 형태의 제시 장치들은 촉각 제시 장치가 VR/MR을 사용하는 동안 사용자의 신체와 지속해서 접촉해야 한다는 문제가 있다. 이는 사용자가 촉각 상호 작용을 하지 않는 동안에도 접촉으로 인한 촉각정보를 제공하므로, 부자연스러운 경험을 일으킨다. 이에 대한 대안으로 연구된 것이 마중형 촉각 제시 시스템이다[4]. 이 장치는 사용자가 가상 환경을 경험하는 동안에, 촉각정보의 제시가 필요한 순간에만 실제 대상 물체를 로봇 등

을 이용하여 손, 팔 등에 가져다주어 그 물체를 사용자와 접촉할 수 있는 방식이다.

마중형 촉각 제시 시스템은 원래 CAD/CAM 응용 프로그램과 상호 작용하려는 방안으로 고안되었다[4]. 그러한 시도 이후, 평평한 판이 부착된 로봇 팔을 사용하여 넓은 공간에 촉각을 제공하고자 하는 연구가 이어졌다[5]. 이러한 방식을 통해 가상 환경에서의 육면체 표면 방향과 실제 환경의 육면체의 표면 방향을 동일하게 위치시켜, 시각-촉각을 함께 느낄 수 있도록 구현하였다. 이 연구에서 사용된 시각 제시 장치는 LCD 패널로, 마중형 촉각 제시 로봇과 사용자 사이에 위치하여 가상의 유리창과 같은 역할을 하였다. 그러나 이러한 평면 LCD 패널은 사용자 이동이 매우 제한적인 한계가 있었으며 부착된 평평한 판이 하나여서 단 하나의 질감만 가지고 있기 때문에 작업 공간 및 촉각 렌더링의 측면에서 아주 제한적이었다. 이러한 점을 극복하기 위해 크기가 변하는 실리콘 물체(silicone prop)를 사용하는 마중형 촉각 제시 시스템(Encountered Haptic Displays)과 같은 다른 접근법이 소개되었다[6]. 이러한 접근법은 실제 물건과 상호작용하는 것을 모방한 것으로, 훈련자가 실제 장치를 구동하는 움직임을 VR 훈련 시스템에서 완벽히 구현하기 어렵다. 훈련자가 VR 훈련 시스템에서 체험하는 경험이 실제와 유사할수록 몰입도가 증대되므로, 실제 훈련에서 필요로 하는 행동(핸들 돌리기, 버튼 누르기 등)을 VR 훈련 시스템 내에서 구현해야 할 필요성이 있다.

본 연구자들은 종래의 마중형 촉각 제시 시스템의 문제점 중 다양한 형태의 실제 물체를 제공하지 못하는 문제를 해결하기 위해 훈련시스템에서 사용되는 다양한 도구들 (예: 플랜트 훈련 시스템의 경우 다양한 밸브, 레버, 버튼 등)을 팔레트위에 설치하고 필요할 때 로봇손이 가져다주는 플랫폼을 구축하였다[7]. 구축된 플랫폼은 몰입감 있는 VR 훈련을 구현하기 위해 촉각 제시 장치와 VR 시스템 간의 보정 과정을 수행했으며, 이를 통한 가상환경에서의 시각-촉각 일치 구현하고자 하였다. 하지만 구현된 시각-촉각 일치가 시각 디스플레이의 한계로 오차가 발생할 수밖에 없는 하드웨어적 문제 있다. 본 논문에서는 시각-촉각 일치 구현에 오차가 있음에도 불구하고, 실제 훈련 환경을 모방한 가상 현실 훈련에서 사용자의 수행능력 평가를 통해 가상 현실 훈련이 실제 훈련을 대체할 수 있는 가능성에 대해 탐구하였다.

## 2. 마중형 촉각 제시 시스템

본 저자들은 다양한 운동감각을 제공할 수 있는 다수의 부착식 가상 촉각 훈련 시스템을 개발하였다[7]. 이 플랫폼은 가상 훈련 중의 시나리오에 맞춰, 하나의 로봇 팔에 여러 개의 도구를 탈 부착할 수 있는 형태를 가지고 있다. 또한, 최신 VR 기술과 로봇 제어 기능을 결합하여 HMD 시스템(HTC VIVE)에 포함된 트래커(VIVE Tracker) 이외의 추가 장치 없이 실제 공간과

가상 공간을 일치시킨다[16]. 또한 HMD와 트래커는 완전한 몰입형 시각정보를 제공하며 사용자가 가상 환경 내에서 탐색하고 상호 작용하는 동안, 사용자의 머리와 손의 위치와 방향을 추적하기 위해 사용된다. 추가적으로, Unity3D 엔진을 사용하여 본 플랫폼에서 사용하는 여러 하드웨어 장치를 통합할 수 있는 안정적인 소프트웨어 환경을 구성하였다[17]. 개발된 마중형 촉각 제시 시스템은 산업용 로봇과 1 자유도 (1DOF) 토크 렌더링 장치로 구성된다(그림 1 상단, 그림 2). 이는 python을 사용하는 URScript 미들웨어에 의해 작동되는 UR10 로봇 팔을 중심으로 구축되었으며[18], 탈부착 도구만으로는 사용자에게 유연한 토크 렌더링 촉감을 제공할 수 없기 때문에 1 자유도 (1DOF) 토크 렌더링 장치가 적용되었다. 로봇 팔은 시스템의 구동시간 동안 인접한 팔레트에 배치된 임의의 도구를 탈 부착할 수 있다(그림 2). 이를 통해 사용자는 주어진 시나리오에 맞는 다양한 도구를 만지고 상호 작용할 수 있다.

사용자는 손을 내밀어 가상의 도구와 함께 배치된 마중형 촉각 제시 시스템의 도구와 접촉한 후, 운동-감각적인 토크 렌더링 촉감을 받는다(그림1 하단). 이러한 환경 구성으로 사용자는 완전한 가상 환경에 몰입할 수 있게 된다.

### 3. 시각정보와 촉각정보의 일치를 위한 보정 방법

사용자가 HMD를 사용하는 완전히 몰입된 (Fully immersive) VR 환경에서 실제 물체와 상호 작용할 수 있게 하려면 실제 물체와 해당 가상 물체를 동일 시공간에 배치하여 시각-촉각 일치(Visual-Haptic Co-location)를 구현해야 한다[7,9,10]. 이를 통해 현실 세계와 마찬가지로 "볼 수 있는 것은 만질 수 있는 것 (what you see is what you feel)"이 된다. 이를 위해 마중형 촉각 제시 시스템의 로봇 매니퓰레이터는 실제 물체를 사용자가 보는 가상 물체의 위치로 이동시키기 위해 사용된다[10,11]. 최근의 VR 장비(HTC Vive, Oculus[19] 등)는 주로 IR 센서를 사용하여 HMD와 트래커의 상대 포즈를 측정 및 계산한 후, 사용자가 바라보는 VR 환경을 실시간으로 시각 렌더링한다. 개발된 촉각 제시 장치와 같이 시각정보와 촉각정보가 함께 제공되는 경우 시각과 햅틱의 일치는 매우 중요하다. 두 감각 사이의 불일치는 몰입을 방해하며 사용자의 수행 능력을 감소시킨다. 높은 일관성을 가지고 시각-촉각 일치를 구현하려면 효율적이고 정확한 보정(Calibration)과정이 필요하다. 본 저자들은 로봇의 엔드 이펙터에 트래커를 부착한 로봇 시스템을 사용하여 간단하면서도 정확한 보정 방법을 제안했다[9]. 제안된 보정 방법은 로봇 시스템의 실제 기준좌표계(Physical Reference Frame)와 Unity3d 가상 기준좌표계 사이(Virtual Reference Frame)의 변진 및 회전 변환 행렬을 구하는 것이다. 이것은 HTC Vive 추적 시스템에서 제공하는 중간 추적 기준좌표계(Intermediary Tracking Reference Frame)를 사용해 수행된다. 보정이 완료되면 해당 가상 도구의 자세와 실제 도구의 자세가 일치하도록 로봇을 제어

할 수 있으며 이로 인해 시각-촉각 일치 가능성이 증가한다. 제안된 보정 방법을 마중형 촉각 제시 시스템에 적용한 결과, 가상 환경과 실제 환경 사이의 RMS (Root Mean Square) 위치 오차가 1cm 이내로 감소함이 관찰되었다[12].

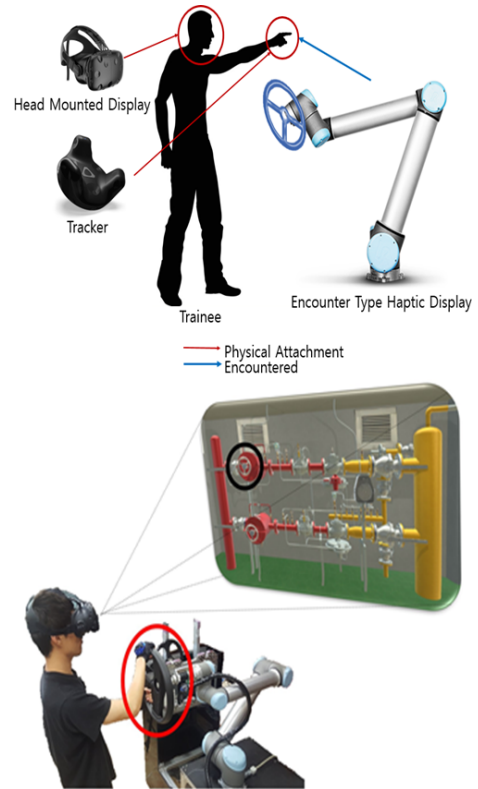


그림 1. 마중형 햅틱 제시 장치. 위: 개념도, 아래: 제작된 몰입형 VR 햅틱 시스템

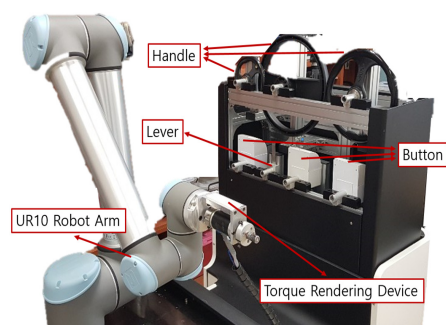


그림 2. 톨 팔레트와 1 자유도 토크 렌더링 장치

본 논문에서는 가상 환경에서 사용자가 마중형 햅틱 시스템을 사용할 때, cm 수준의 시각-촉각 일치 오류가 있을 때 사용자의 두 가지 성능 즉, 반응 시간 (Reaction Time: RT) 및 거리 정확도 (Distance Accuracy: Distance)가 얼마나 영향을 받는 지

에 대한 연구를 수행하였다. 수행된 교정의 목적은 가상 환경의 시각정보가 실제 환경의 촉각정보와 일치하도록 하는 것이다. 즉 HMD를 장착하지 않고 실제 물체에 손을 뻗어 물체에 접촉하는 과업 (손가락으로 조그만 버튼을 누르는 과업) 혹은 물체를 잡은 후 돌리는 과업 (두 손으로 밸브의 핸들의 잡고 돌리는 과업)의 경우와 HMD를 장착하고 가상의 물체 (버튼 및 핸들)를 조작하는 경우의 차이가 있는지를 연구하였다. 또한 과업을 수행할 때 서서하거나 앉아서 하는 경우와 같이 사용자의 자세에 대한 영향도 같이 연구하였다. 즉 시각-촉각 일치 오차에 따른 과업수행시간과 위치오차를 측정함으로써 마중형 촉각 제시 시스템에 대한 보정 오차의 영향을 정량적으로 밝혀내고자 하였다.

#### 4. 사용자 평가 실험

본 논문은 시각-촉각 오차가 존재하는 가상 환경과 시각-촉각 오차가 없는 실제 환경에서의 사용자의 조작 성능을 비교함으로써 시각-촉각 오차가 미치는 영향을 관찰하고자, 이에 대한 두 가지 실험을 제시하였다. 실험 1에서 사용자는 버튼 누름 과업을 수행하고 실험 2에서는 핸들 돌리기 과업을 수행하였다. 두 실험을 수행하기 위해 20대 남성 20명이 모집되었다.

##### 4.1. 실험 환경 구성

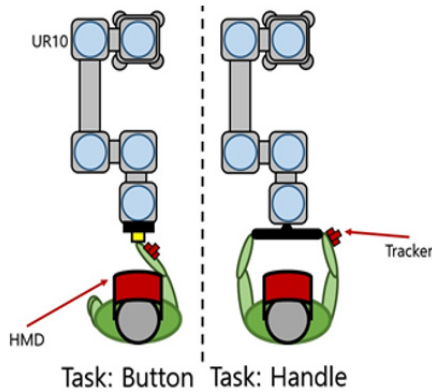


그림 3. 사용자 평가를 위해 피실험자들이 수행한 과업. 좌측: 버튼 누르기, 우측: 핸들 돌리기

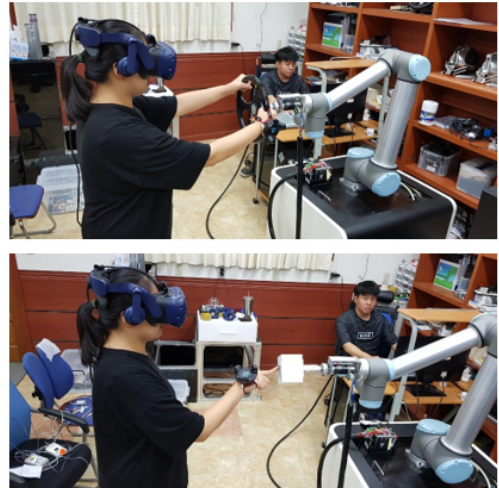


그림 4. 실제 과업 수행 환경. 위: 핸들 돌리기, 아래: 버튼 누르기

그림 3에서와 같이, 실험 환경은 산업용 로봇인 UR10, 이것의 엔드 이펙터에 부착된 도구(버튼, 핸들), 트래커(HTC VIVE Tracker)와 완전 몰입형 HMD(HTC VIVE)로 구성되었다. 참가자들은 실제 플랜트 시설에 설치되어 있는 도구(버튼, 핸들)를 각 실험에서 조작 수행(버튼 누르기, 핸들 돌리기)하도록 요청 받았다. 또한, 참가자의 작위적인 실험 수행을 방지하기 위해 참가자들에게 가능한 한 규칙적인 실험 수행을 하도록 지시하였다. 실험 수행 시, 참가자의 손에 부착된 트래커는 손가락 끝의 위치를 추적할 수 있도록 개개인의 손가락 길이 등에 맞춰 세부조정 과정을 거쳤다. 참가자는 HMD 착용 시, 구현된 가상 환경만을 볼 수 있으므로 가상 세계에 대한 완전한 시각적 정보를 받는다. 사용자는 정해진 과업 수행에 알맞은 가상 환경을 제공받는다. 예를 들어, 핸들 돌리기 과업에서 참가자는 가상 환경에 놓인 실제 핸들과 동일한 가상 물체를 보게 된다. 로봇 팔은 제안된 보정과정을 기반으로 실제 도구를 특정 자세에 배치하여 가상 도구와 시각-촉각 일치가 되도록 한다. 참가자와 도구 사이의 거리는 물체와 상호 작용할 때 자연스럽게 행동할 수 있도록 50cm 정도 떨어져 있었으며, 실험 수행에 집중할 수 있도록 백색 소음을 헤드셋을 통해 제공하였다.

##### 4.2. 실험 조건

실험은 다음 두 가지 요소를 통제하여 수행되었다. 첫 번째 요소는 HMD의 존재 (HMD 착용 대 HMD 미착용)였고 두 번째 요인은 참가자의 자세였다(의자 착석 대 기립). 참가자의 자세를 세분화 한 것은 실제 훈련 시, 조작해야 하는 도구가 다양하게 위치해 있기 때문이다. 이 두 가지는 피험자 내 요인으로 설정되었다. 각 참가자는 버튼 누르기와 핸들 돌리기 실험을 모두 수행하였다.

### 4.3. 실험 과정

사용자 평가는 실험 당, 훈련 시간과 측정 시간으로 구성되어 있으며, 훈련 시간 동안에 총 160회 (각 실험에 20번 x 4 번 조건 = 80회)의 수행과 측정 시간 동안에 총 40회 (각 실험에 5 번 x 4 번 조건 = 20회)의 수행이 포함되었다. 충분한 훈련 시간을 준 이유로는 VR 훈련에 충분히 익숙하도록 연습을 하여 VR 및 현실 모두 익숙함에도 불구하고, VR과 현실에서 차이가 있는 지 없는 지를 연구하기 위함이다. 실험 조건의 순서는 무작위로 참가자들에게 제시되었다. 참가자의 피로도가 실험 결과에 미치는 영향을 최소화하고자, 실험의 총 소요시간은 30분 내로 설정되었다.

### 5. 결과 및 토의

데이터는 R에서 lme4 패키지를 사용하여 분석되었으며 [14,15], 피험자와 수행 시도를 교차 무작위 효과(Crossed random effects)로 고려하였다. 종속 변수는 lmer 함수가 포함된 선형 혼합 효과 (Linear Mixed Effects) 모델을 사용하여 분석되었으며, 통계적 유의성은 Satterthwaite 근사를 기반으로 t 값과 자유도를 제공하는 R의 lmerTest 패키지를 사용하여 계산되었다. 범주형 변수인 HMD와 자세는 고정 효과로 통계 모델에 포함되었다.

표 1. 사용자 평가의 결과

	Tasks							
	Button				Handle			
	HMD(Haptic)				HMD(Haptic)			
	with		without		with		without	
RT	1,62(0,62)		1,31(0,41)		1,21(0,35)		1,13(0,30)	
Distance	1,32(0,19)		1,33(0,19)		1,30(0,21)		1,32(0,21)	
	Sit	Stand	Sit	Stand	Sit	Stand	Sit	Stand
	RT	1,64 (0,62)	1,60 (0,62)	1,31 (0,34)	1,33 (0,47)	1,26 (0,37)	1,15 (0,33)	1,19 (0,32)
Distance	1,14 (0,018)	1,50 (0,01)	1,15 (0,017)	1,51 (0,012)	1,11 (0,07)	1,49 (0,077)	1,13 (0,079)	1,51 (0,077)

표 1은 사용자 평가의 기술통계 결과이다. 표 1에서 RT는 반응시간을, Distance는 거리오차를 보여준다. 이 표의 결과에서 볼 수 있듯이, 버튼 누름 과업에서 참가자가 HMD를 착용한 경우, HMD를 착용하지 않았을 때보다 느린 RT가 관찰되었으며, HMD가 반응 시간 (RT)에 미치는 영향은 통계적으로 유의미하다 ( $b = 3, SE = .06, t = 4.87, p < .0001$ ). 그러나 사용자의 자세의 효과는 통계적으로 유의하지 않았다 ( $b = -.009, SE = .03, t =$

$-.25, p = .80$ ). 두 번째 핸들 돌리기 실험에서는, 두 조건의 효과 모두 통계적으로 유의미하였으며, HMD 착용 시의 RT가 HMD 미착용 시 RT보다 느렸고 ( $b = .07, SE = .02, t = 4.09, p < .001$ ), 참가자가 일어났을 때 에 비해 앉았을 때의 RT가 느려졌다 ( $b = -.11, SE = .22, t = -5.22, p < .0001$ ).

거리 정확도 결과의 경우, 버튼 누르기 과업에서 HMD의 효과는 통계적으로 유의미하였으며 HMD 미착용 조건보다 HMD 착용 조건에서 더 정확한 수행결과를 보여주었다 ( $b = -.009, SE = .001, t = -5.92, p < .0001$ ). 참여자가 앉았을 때가 일어났을 때와 비교하여 버튼 누르기 수행의 위치 정확도가 높았다 ( $b = .37, SE = .004, t = 85.99, p < .0001$ ). 핸들 잡기 과업에서도 HMD가 참여자의 위치 정확도를 향상시켰으며 ( $b = -.02, SE = .008, t = -2.52, p < .05$ )하고 앉아서 수행한 정확도가 서 있을 때보다 높은 ( $b = .38, SE = .004, t = 87.37, p < .0001$ ) 동일한 양상의 결과가 관찰되었다.

그림 5, 6은 각각의 실험에서의 측정 수행 시, 수행횟수에 따른 반응시간의 평균 변화를 나타낸 결과이다. 두 결과 모두 수행시간의 경과에 따른 변화는 크지 않았다. 본 논문에서는 VR 환경과 실제 환경 모두에 익숙하도록 충분한 훈련 시간을 가졌기에, 측정 시간 동안의 변화가 크지 않은 것으로 생각된다. 이는 본 논문에서 설정한 훈련 시간동안, 피험자들이 충분히 VR 환경에 익숙해질 수 있었다는 것으로 볼 수 있다. VR환경에 익숙하지 않은 상태로 실험을 진행하였다면, 수행 횟수에 따른 거리오차의 변화가 차이가 있었을 것으로 예상된다. 본 논문에서는 VR환경에 대한 익숙한 정도에 따른 결과를 보고자 한 것이 아니었으므로, 그림 5, 6과 같이 수행 횟수 전반에 걸쳐 평정한 반응시간을 나타내는 결과가 나왔다고 생각한다

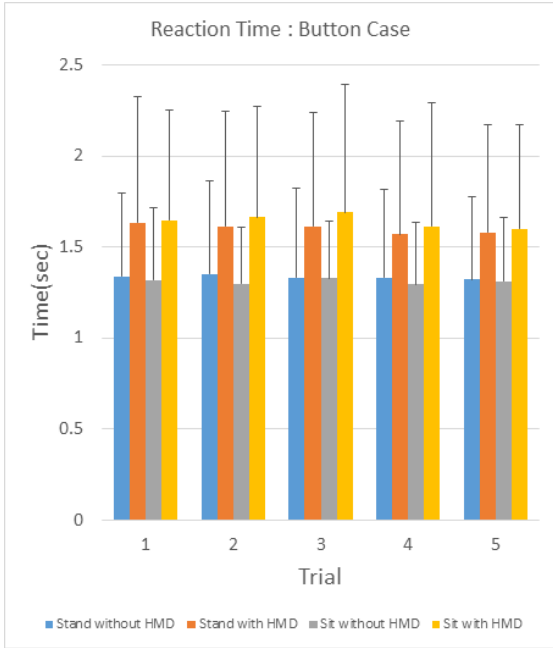


그림 5. 버튼 실험 시, 수행횟수에 따른 반응시간의 변화

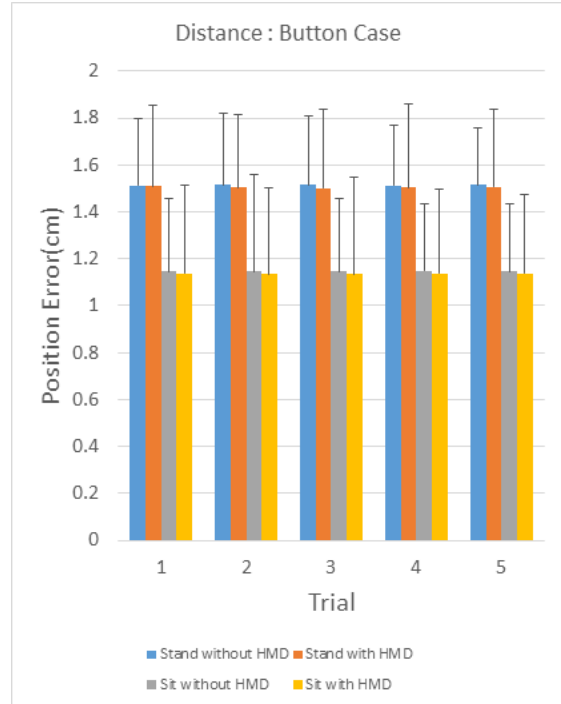


그림 7. 버튼 실험 시, 수행 횟수에 따른 거리오차의 변화

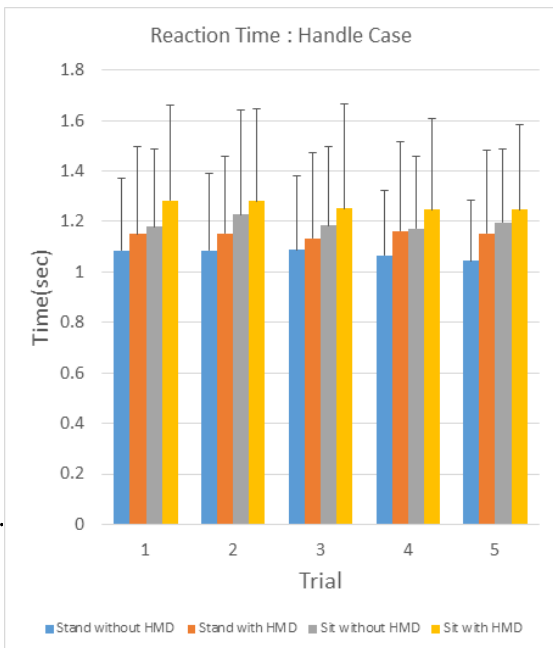


그림 6. 핸들 실험 시, 수행횟수에 따른 반응시간의 변화

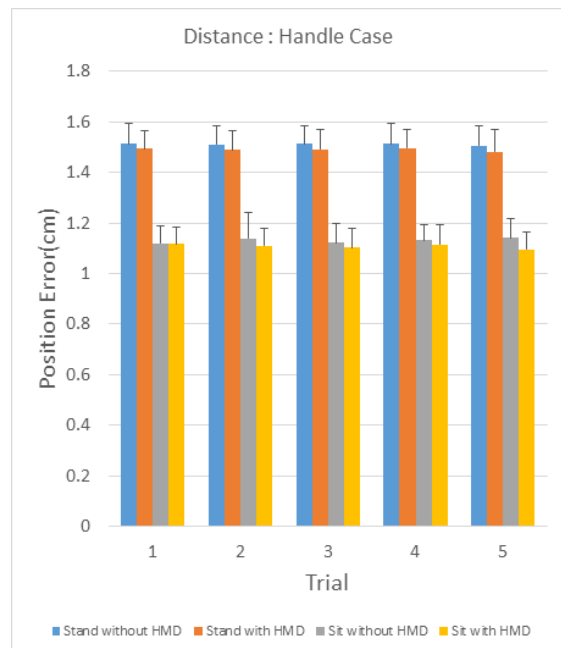


그림 8. 핸들 실험 시, 수행 횟수에 따른 거리오차의 변화

그림 7, 8은 각각의 실험에서의 측정 수행 시, 수행횟수에 따른 거리오차의 평균 변화를 나타낸 결과이다. 반응시간의 평균 변화와 동일한 양상이 거리오차의 변화에서도 관찰된다. 거리오차의 변화에서도 측정 시간 동안의 변화폭은 작은 것으로 보이며, 이는 충분한 훈련이 선행되었기 때문이라고 생각된다.

결과적으로, 시각-촉각의 일치율을 위해 개발된 보정 방법에 존재하는 cm 수준의 위치 오차는 가상 환경에서의 과업 수행에 용인할 수 없을 정도로 큰 영향을 미치지 않는 것으로 관찰된다. 오히려 가상 환경이 생소하므로, 과제를 보다 집중적으로 수행하려고 시도한 것으로 판단되는 정도의 증가를 관찰하였다. 이 평가에 참여한 소수의 참가자는 처음 가상 시스템을

만났다. 가상 현실에서의 움직임에 익숙하지 않은 참가자는 평가 결과에 상당한 영향을 미쳤을 것이다. 그러나 이 점을 고려함에도 불구하고, 개발된 보정 방법은 가상 환경이 포함된 마중형 촉각 제시 시스템에서 충분한 수준의 시각-촉각 일치를 구현하는 것으로 생각된다.

만약 가상훈련시스템이 아주 자연스럽게 만들어져 있어서 가상인 지 실제인 지 거의 구별을 못한다면 실제 훈련에 참가하는 사람들의 경우, HMD/Hand tracker 착용 후 수행해야 할 과업만 알려주면 앞에서 이야기한 사용자 평가를 위한 가상훈련 조작을 따로 연습하지 않고 곧바로 훈련에 돌입할 수 있을 것이다. 가상환경 훈련이 실제 환경 훈련을 대체 하 위해서는, 어떠한 요소가 가상환경과 실제환경 간의 차이를 유발하는지에 대한 세밀한 파악이 필요하며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다. 본 논문에서는 그러한 가능성에 대한 경향만 확인하였을 뿐, 가상 환경과 실제 환경의 차이를 유발하는 요소에 대해서는 확실한 결론을 얻지 못하였다.

## 6. 결론

마중형 촉각 제시 시스템에서의 시각-촉각 일치를 구현하는 교정 방법의 사용성이 평가되었다. 두 가지 실험은 시각-촉각 일치 오차와 사용자의 자세에 의해 영향을 받는 가상 환경을 가진 촉각 증강 시스템의 타당성을 탐구했다. 결과는 참가자가 HMD를 입었을 때 반응시간이 다소 지연되는 것을 보여주었지만, 참가자가 정확하게 과업을 수행하려고 시도했기 때문에 지연이 관찰되었다고 판단된다. 또한, 앉아있는 것과 같은 비교적 편안한 자세를 취할 때 과업 수행이 더 정확하게 이뤄지는 것을 확인하였다. 결론적으로, 개발된 마중형 촉각 제시 시스템과 이에 적용된 보정 방법을 사용하면, 가상 환경에서의 과업을 실제에서 행하는 것과 거의 차이가 없게 수행할 수 있다고 판단된다. 향후에는 이러 사용자 평가를 기반으로 햅틱 피드백을 이용한 효율적인 가상 훈련 시스템을 구축하고자 한다.

## 참고문헌

[1] Loftin, R. B. and Kenney, P. Training the Hubble space telescope flight team. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15(5). IEEE, pp. 31-37. 1995.

[2] Rose, F. D., Attree, E. A., Brooks, B. M. and Parslow, D. M. Training in virtual environments: transfer to real world tasks and equivalence to real task training. *Ergonomics*, 43(4), Taylor & Francis, pp. 494-511. 2000.

[3] Klowden, R. J. D. and Hannaford, B. Virtual Training for a Manual Assembly Task. *The electronic journal of haptics research*, 2(2). Haptics-e, pp. 1-7. 2001.

[4] McNeely, W. A. Robotic graphics: a new approach to force feedback for virtual reality. *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, Seattle, WA, pp. 336-341. 1993.

[5] Yokokohji, Y., Hollis, R. L. and Kanade, T. WYSIWYF display: A visual/haptic interface to virtual environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(4), MIT Press, pp. 412-434. 1999.

[6] Akbar, N. and Jeon, S. Encountered-type haptic interface for grasping interaction with round variable size objects via pneumatic balloon. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, Berlin Heidelberg, pp. 192-200. 2014.

[7] Lee, C. G., Dunn, G. L., Oakley, I. and Ryu, J. Visual Guidance for Encountered Type Haptic Display: A feasibility study. *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct)*, Merida, pp. 74-77. 2016.

[8] Cha, M. H. and Huh, Y. C. An application of haptic and locomotion interfaces in a virtual training environment. *44th International Symposium on Robotics (ISR)*. IEEE, pp. 1-2. 2013.

[9] Bae, Y. S., Baek, S. Y., Kim, Y. H., Dunn, G., ElSharkawy, A. and Ryu, J. A Haptic Augmented Virtuality for Immersive VR Plant Training Based on Unity3D Engine. *International Conference on Artificial Reality and Telexistence Eurographics Symposium on Virtual Environments 2017*, Adelaide, Australia, The Eurographics Association, poster B. 2017

[10] Lee, C. G., Oakley, I., Kim, E. S. and Ryu, J. Impact of Visual-Haptic Spatial Discrepancy on Targeting Performance. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Systems*, 46(8). IEEE, pp. 1098-1108. 2016.

[11] Yokokohji, Y., Muramori, N., Sato, Y. and Yoshikawa, T. Designing an encountered-type haptic display for multiple fingertip contacts based on the observation of human grasping behavior. *The International Journal of Robotics Research*, 24(9). SAGE Publications, pp. 717-729. 2005.

[12] Bae, Y. S., Cha, B. D., Choi, W. I. and Ryu, J. Preliminary Evaluation of Calibrating Haptic Augmented Virtuality Systems. *18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2018)*. PyeongChang, GangWon, Korea. 2018.

- [13] Bates, D., Maechler, M. and Bolker, B. Lme4: Linear mixed-effects models using S4 classes (R package version 0.999999-0). <http://CRAN.R-project.org> May 13, 2012.
- [14] R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org> September 5, 2011.
- [15] Milgram, P. and Kishino, F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 77(12). The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. pp. 1321-1329, 1994.
- [16] HTC Corporation. Vive VR SYSTEM. <https://www.vive.com/us/product/vive-virtual-reality-system> October 1, 2018.
- [17] Unity Technologies. Unity3D. <https://unity3d.com/kr> September 5, 2018.
- [18] Universal Robots. Introducing The Ur10 Collaborative Industrial Robot. <https://www.universal-robots.com/products/ur10-robot> March 15, 2017.
- [19] Facebook Technologies. oculus rift. <https://www.oculus.com> February 4, 2017.
- [20] Delhayé, B., Hayward, V., Lefèvre, P. and Thonnard, J-L. Texture-induced vibrations in the forearm during tactile exploration. Frontier in Behavioral Neuroscience. 6. Frontiers. pp. 1-10, 2012.
- [21] Bhagat, K. K., Liou, W. K. and Chang, C. Y. A cost-effective interactive 3D virtual reality system applied to military live firing training. Virtual Reality, 20(2). Springer. pp. 127-140, 2016.
- [22] Pabon, S., Sotgiu, E. and Leonardi, R. A data-glove with vibro-tactile stimulators for virtual social interaction and rehabilitation. 10th Annual International Workshop on Presence, International Society for Presence Research. pp. 345-348, 2007.