



# 인간공학적 제품 개발을 위한 가상 현실 기반 사용성 평가 시스템 개발

(Development of a Usability Testing System  
Based on Virtual Reality for Ergonomic Product Development)



박종배, 최신아, 이예진, 김민재, 심고은, 정소윤, 유희천

포항공과대학교 산업경영공학과  
인간공학 설계기술 연구실

---

# Contents

---

- **서론**
    - 연구 배경 및 필요성
    - 연구 목적
  - **본론: 가상 환경 기반 사용성 평가 시스템 개발**
    - 활용 HW 및 SW
    - 개발 시스템 환경
    - 개발 시스템 주요 기능
  - **개발 시스템 장점, 기대효과 및 한계점**
  - **추후 연구 방향**
-

# 현재 사용성 평가 방법

- 물리적 시제품(prototype)을 통한 주관식 설문 및 시나리오 기반 사례 테스트를 통한 사용자 경험 도출 (Wu et al., 2020)
  - ✓ 제품의 효율성, 유효성, 만족도에 대한 설문을 통해 이루어짐 (Lee et al., 2011)
- 사용자를 통한 정성적 데이터를 확보하는데 도움 (Martínez Sandoval et al., 2019)

사용성 평가 설문지 (Lee et al., 2011)

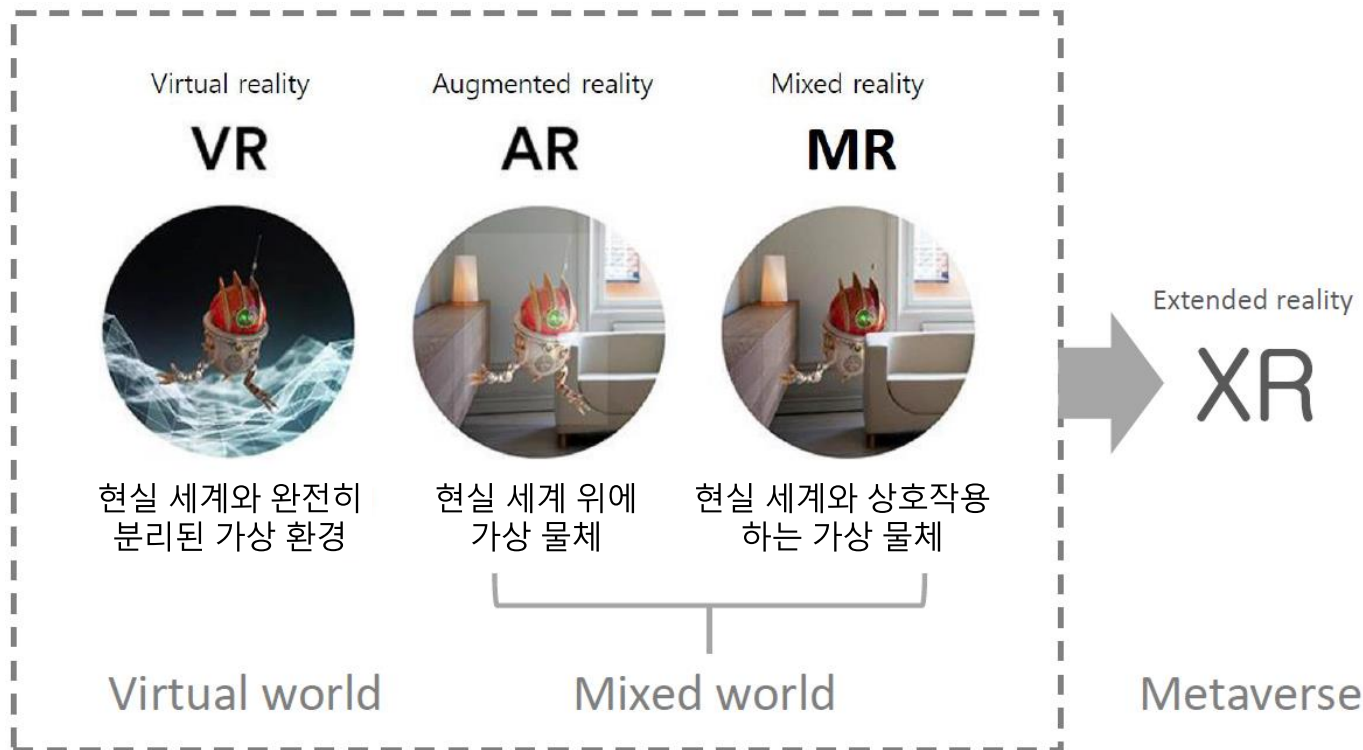
Component	Task	Usability questions		Score	
Brush	Connection of brush to tube	Ease of use	The extent to which the brush is connected to the tube at a single trial without error	Low    High ① ② ③ ④ ⑤	Ease of use
			The extent to which the brush is easily connected to the tube	① ② ③ ④ ⑤	
	Disconnection of brush from tube	Ease of use	The extent to which the button on the brush is pressed by applying a proper force	① ② ③ ④ ⑤	Comfortable posture
			The extent to which the brush can be easily disconnected from the tube	① ② ③ ④ ⑤	
Carriage handle	Movement	Comfortable posture	The extent to which the handle is operated with a comfortable posture at the hand and arm	① ② ③ ④ ⑤	Effective use of force
		Effective use of force	The extent to which the handle is operated with a evenly distributed force	① ② ③ ④ ⑤	
			Fit to the hand	The extent to which the handle is operated by a proper amount of force to move the cleaner	① ② ③ ④ ⑤
		The extent to which the handle is easily grasped		① ② ③ ④ ⑤	
		Ease of use	The extent to which the handle is effective to keep the cleaner body balanced during movement	① ② ③ ④ ⑤	Ease of use



# 가상 현실 기술

- **가상세계**에서 **실시간**으로 **상호작용**하는 **인간-컴퓨터 인터페이스**(Kim and Park, 2012)
- 가상 현실 기술은 **3D 시각화** 및 **몰입형 기술**을 통해 다양한 분야에서 광범위하게 채택되고 있음(Venkatesan et al., 2021)

## 가상 현실 기술의 종류



# 가상 현실 기술 제품 설계 분야 적용 사례

- 가상 현실 기술은 대기업을 중심으로 **제품 설계** 및 **개발 분야**에 **활용**되고 있으며, **지속적인 확장 적용**을 추진
  - ✓ **3D 모델링 소프트웨어**와 **가상 현실 기반**으로 **제품**을 **설계**하여 가상 환경에서 **상호작용** 및 **성능·효율 분석 지원**(Pelaez-Restrepo et al., 2021)
  - ✓ **공동 창의**(co-creative) **플랫폼**을 개발하여 제품 설계자와 인간공학 전문가의 **효과적 협업 환경 구현 지원**(Santhosh et al., 2022)

가상 현실 기반 승객실 설계 후,  
상호작용 성능 및 효율 분석  
(Pelaez-Restrepo et al., 2021)

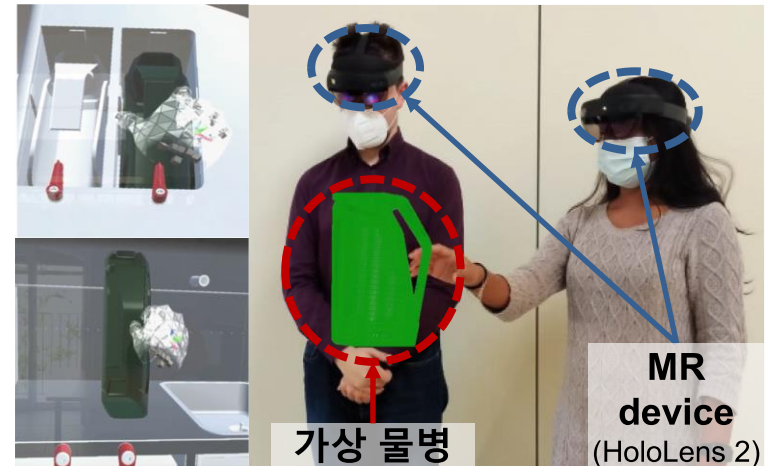
헬리콥터 승객실  
3D modeling



가상 승객실을  
전문가가 체험한 후 피드백 제공



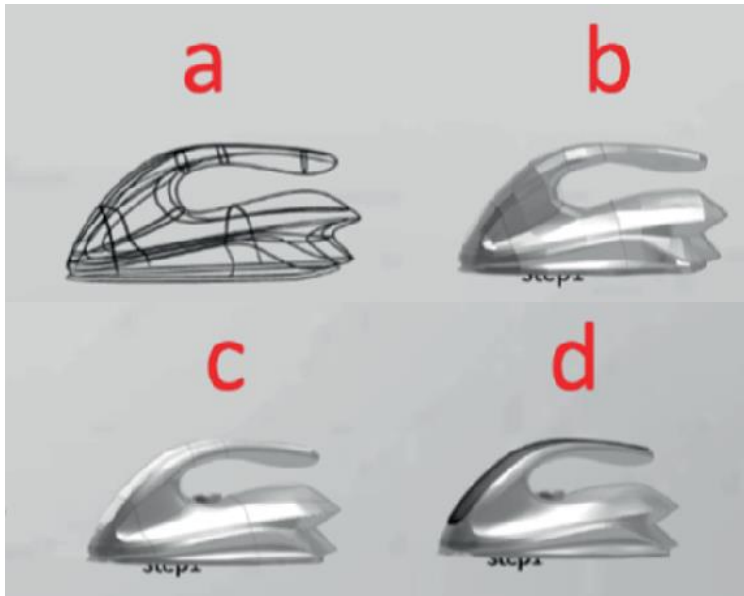
가상의 물체와 상호작용하여  
가상 환경에서 설계한 조리실 평가  
(Santhosh et al., 2022)



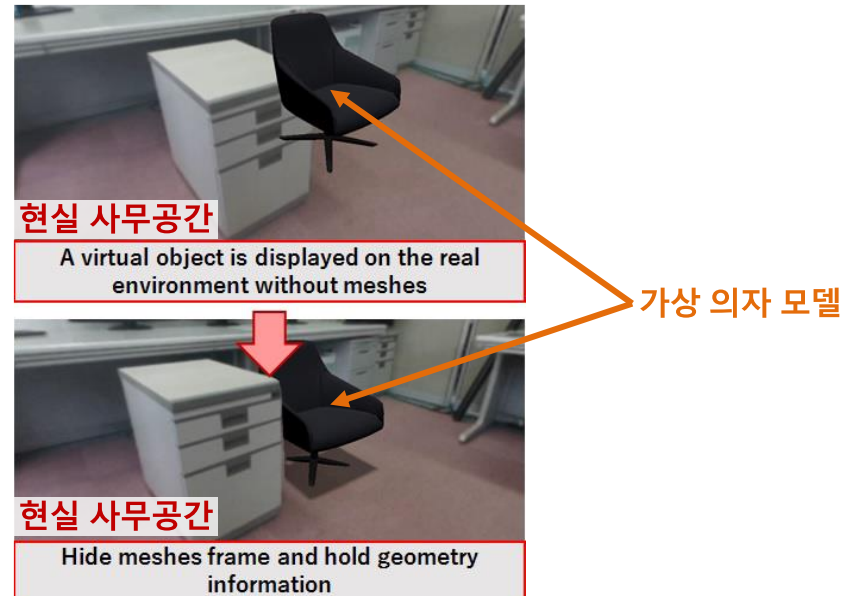
# 기존 가상 현실 기술 적용 연구 한계점

- 가상 환경에서 상호작용하는 **사용자의 동작 및 자세에 집중**한 연구 부족
  - ✓ **사용자의 동작 및 자세를 고려하지 않아**, 가상 환경에서 상호작용하는 **사용자의 자세**에 대한 **정량적 분석이 어려움**
- ⇒ **사용자의 움직임**을 **정확히 연동**한 가상 환경 속 **DHM**(digital human model)을 **구현**하여, **정확한 사용자 움직임 연동 기반 사용성 평가 시스템 개발** 필요

다리미 제품 설계 과정을  
가상 환경에서 시연(Dhawale et al., 2016)



실제 환경에 가상 의자 모델 투영  
(Lu & Ishida, 2020)



## 인간공학적 제품 개발을 위한 가상 현실 기반 사용성 평가 시스템 개발

- 실제와 동일한 크기의 가상 제품을 실시간으로 조작하며 사용성 평가 진행
  - ✓ 제품의 전체 구조와 조립 과정을 보여 주어 **product architecture**에 대한 이해 증진
  - ✓ 가상 환경에서 가상 제품을 실시간으로 조작하며 사용성 평가 진행
  - ✓ 제품 사용 시 사용자의 관절 각도, 충돌량 등의 객관적 지표를 산출하여 인간공학적 제품 개발 지원

# 활용 HW 및 SW

## Hardware

### VR device

**Meta Quest 2**  
Meta, USA



- 대중적인 VR 기기
- 무선 사용 가능
- **Hand tracking** 제공

### Motion camera

**Osprey motion camera**  
Motion Analysis, USA



- 사용자 움직임을 포착하여 동작 분석
- Unity와 연결하여 **human model**의 움직임을 **사실적**으로 구현

## Software

### VR software

**Unity3D**  
Unity Technologies, USA



- 대중적인 **VR 개발 소프트웨어**
- 방대한 user community
- 교육용 license로 Unity Pro 버전을 무료로 사용 가능

### 3D software

**Geomagic Design X**  
OQTON, USA

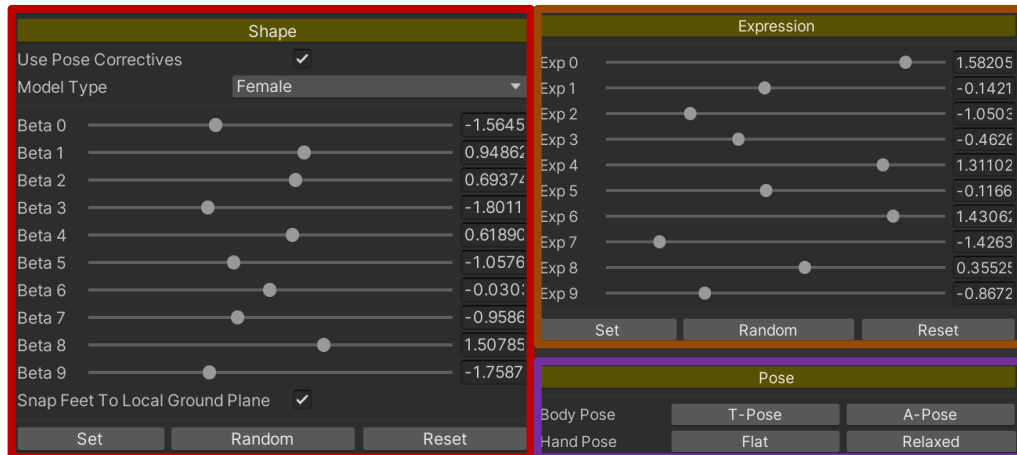


- **정확한 고품질의 3D 모델 생성** 가능
- 3D model data를 수정하는 기능이 다수 제공

# 개발 시스템 환경: DHM(Digital Human Model) (1/3)

- 가상 환경 속 **다양한 신체 형상을 반영**할 수 있는 **3D DHM 구현**
  - ✓ 3D DHM **모델: SMPL-X** for Unity, Max Plank Gesellschaft, Germany
  - ✓ 3D DHM의 **형상, 표정, 자세 조절 가능** ⇒ **다양한 신체**를 기반으로 한 **사용성 평가 가능**

신체 형상, 얼굴 표정을 바꿀 수 있는  
SMPL-X Unity script



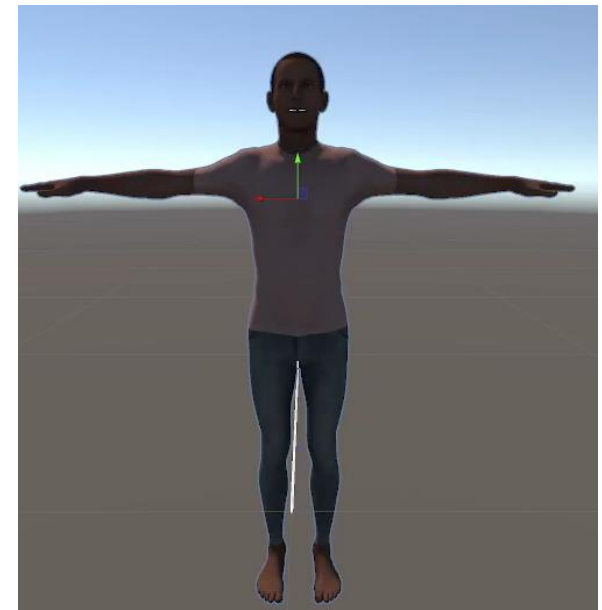
신체 형상 조정

얼굴 표정 조정

신체 및 손 포즈 수정



다양한 신체 형상을 반영한  
3D DHM(SMPL-X)



# 개발 시스템 환경: DHM(Digital Human Model) (2/3)

## □ 3D DHM에 사용자 신체 움직임 연동

- ✓ VR/MR 기기 착용자가 가상 환경에서 3D DHM의 신체 형상을 볼 수 있도록 설정하여 실제감 부여
- ✓ VR/MR 기기의 tracking 기술로 사용자의 손과 신체 전반 움직임을 3D DHM에 연동

가상 환경에 구현된 DHM



사용자의 손 및 신체 전반 움직임을 DHM과 연동



가상 환경 속  
3D DHM

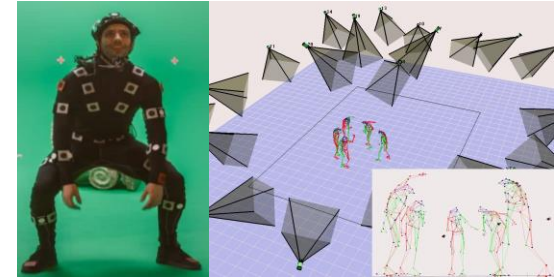
VR/MR 기기를  
착용한 사용자

# 개발 시스템 환경: DHM(Digital Human Model) (3/3)

- **Osprey motion camera**를 통해 **사용자 움직임을 3D DHM에 정확하게 반영**
  - ✓ 신체 **부위별 움직임**에 대한 **정확한 정량적 분석 가능**

## S1. 사용자 좌표 도출

Motion camera로 **marker**를 부착한 사용자의 **3D 좌표 도출**



## S2. 실시간 좌표 전송

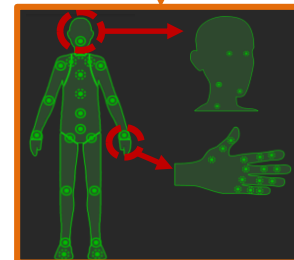
도출한 **3D 좌표**를 **Unity**로 **실시간 전송**



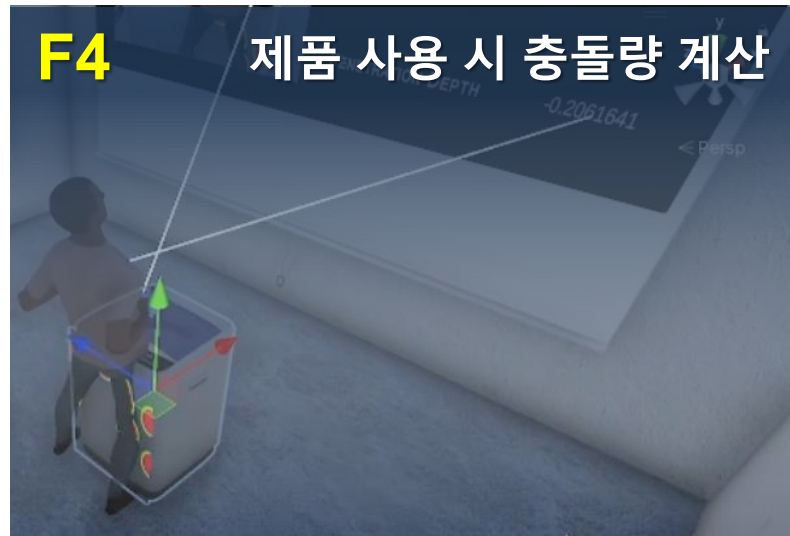
실시간 좌표 전송

## S3. 3D DHM과 연동

Unity로 구현한 **3D DHM**에 **3D 좌표 실시간 연동**



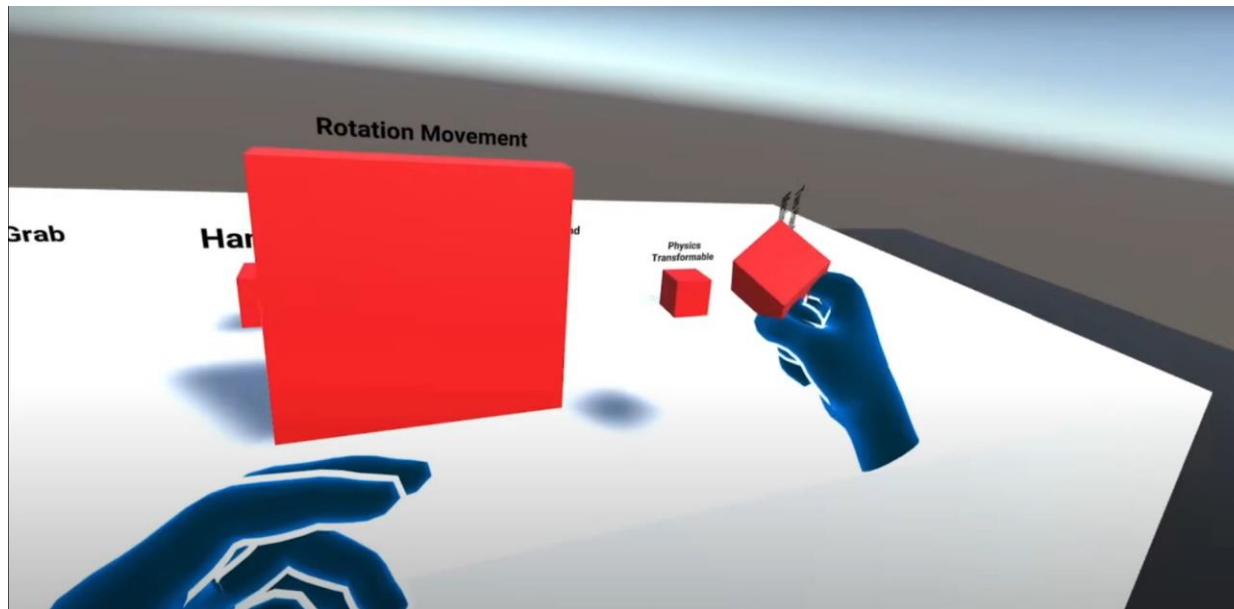
# 개발 시스템 주요 기능



# F1. 제품 크기 변경 (1/2)

- VR/MR 기기를 착용한 사용자가 **실제와 동일한 크기**의 **가상 제품**을 조작하고 크기 변경 등의 **상호작용을 진행**
- **맞춤형 제품 사양**: 각 사용자는 **본인 신체에 맞게 가상 제품**을 조작하므로 **조작 결과를 제품 설계에 활용**
  - ✓ (예시) 조작한 제품의 크기와 사용자 신체 치수 간 연관분석

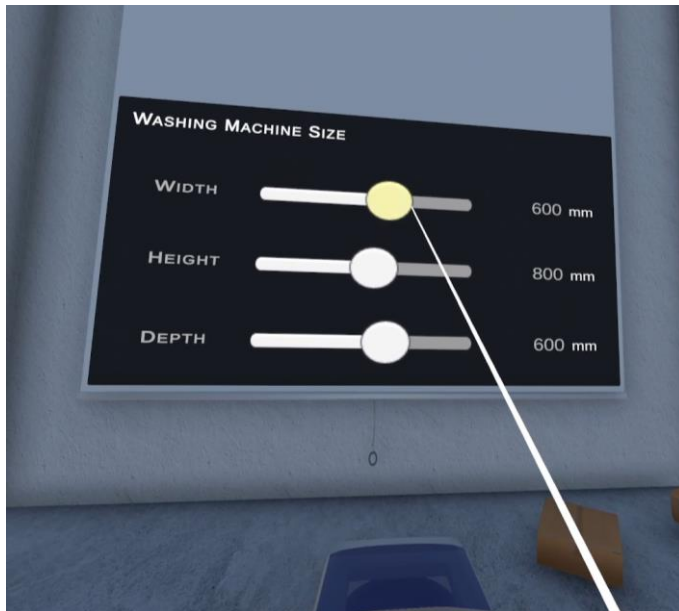
가상 환경에서 물체와 상호작용하는 예시



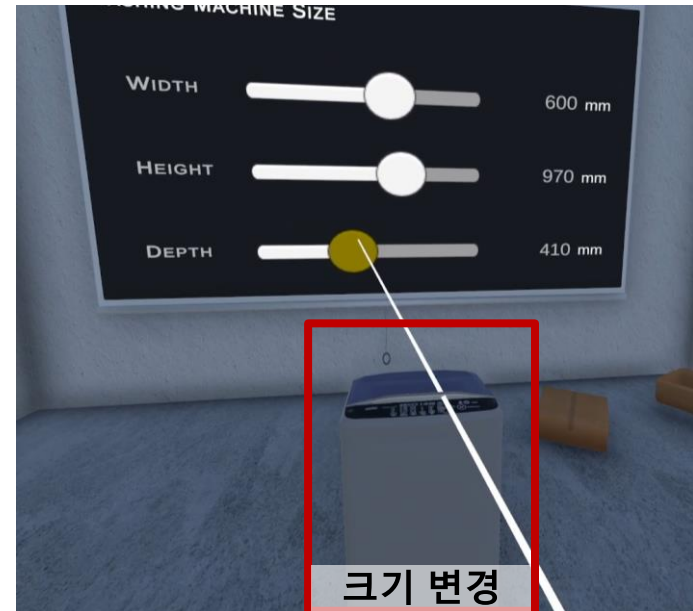
# F1. 제품 크기 변경 (2/2)

- 사용성 평가 대상: **세탁기**(top-loader)
  - ✓ 실생활에서 자주 쓰이는 가전제품이며, 사용자와 **상호작용 동작이 많은 제품**
- VR 기기를 착용한 사용자가 가상환경 속 **slider UI**를 **직접 조작**
  - ✓ Slider로 **변경한 수치**를 **실시간**으로 세탁기 **형상**에 반영
  - ✓ **Slider**에 **색 변화**를 **추가**하여 사용자에게 **시각적 피드백** 제공

Ray가 slider button에 도달: **노란색**



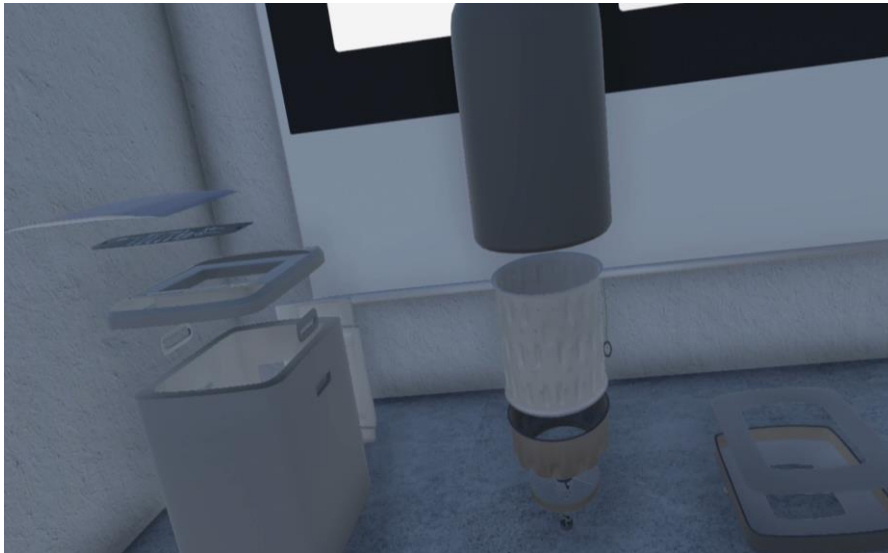
사용자가 button을 선택: **진한 노란색**



## F2. 가상 제품 조립 및 분해

- **제품 구조(product architecture) 시각화**: 실제와 동일한 크기 · 부품을 가진 **가상 제품**을 **분해**하고 **펼쳐서** 제품 **구조**를 **한 눈에 보이게 함**
- **조립 순서대로 복구**: 분해한 가상 제품을 다시 조립할 때, 실제 제품의 **조립 순서와 동일한 순서로 복구**하여 조립 공정에 대한 이해를 도움

제품 분해(disassemble) 영상



제품 조립(assembly) 영상



# F3. 관절 움직임 지표 도출 (1/2)

□ 사용자 **관절 움직임**에 대한 **정량적 지표**를 **도출**하여 **인간공학적 제품 설계 지원**

**S1. 사용자 움직임 데이터 도출**

- 가상 물체와 상호작용하는 사용자의 **각 신체 부위 움직임 데이터**(실시간 3차원 좌표)를 **motion camera**를 통해 도출

Frame별 각 marker의 3차원 좌표

Front head		Left			Right		
Index	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	181.3976	1108.056	-98.0867	93.8895	1053.56	-3.47075	
2	181.3741	1108.1	-98.1038	93.8895	1053.56	-3.47075	
3	181.3602	1108.236	-98.1139	93.8895	1053.56	-3.47075	
4	181.3585	1108.113	-98.1152	93.8895	1053.56	-3.47075	
5	181.3619	1108.125	-98.1127	93.8895	1053.56	-3.47075	
6	181.3647	1108.123	-98.1109	93.8895	1053.56	-3.47075	
7	181.3693	1108.119	-98.1078	93.8895	1053.56	-3.47075	
8	181.3772	1108.107	-98.1022	93.8895	1053.56	-3.47075	
9	181.3783	1108.098	-98.101	93.8895	1053.56	-3.47075	
10	181.3578	1108.111	-98.1147	93.8895	1053.56	-3.47075	
11	181.3164	1108.146	-98.1464	93.8895	1053.56	-3.47075	
12	181.2513	1108.182	-98.1857	93.8895	1053.56	-3.47075	
13	181.2096	1108.194	-98.2127	93.8895	1053.56	-3.47075	
14	181.2035	1108.181	-98.216	93.8895	1053.56	-3.47075	
15	181.2294	1108.16	-98.1985	93.8895	1053.56	-3.47075	
16	181.2727	1108.138	-98.1699	93.8895	1053.56	-3.47075	
17	181.3121	1108.114	-98.1438	93.8895	1053.56	-3.47075	
18	181.3257	1108.098	-98.1343	93.8895	1053.56	-3.47075	
19	181.3123	1108.098	-98.1428	93.8895	1053.56	-3.47075	

**S2. 정량적 지표 도출**

- Unity의 **C# coding**으로 움직임 데이터 분석
- Motion camera의 **marker 데이터**를 통해 관절 각도 등 **정량적 지표 도출**

```

[14:50:54] Left Elbow Angle: 153.8096
UnityEngine.Debug.Log (object)

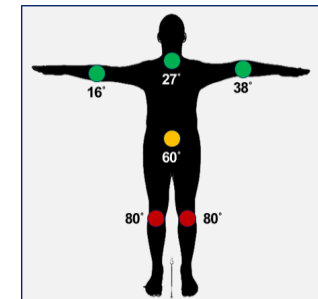
[14:50:54] Right Elbow Angle: 169.487
UnityEngine.Debug.Log (object)

// 1. Left knee angle
Transform left_upperleg = animator.GetBoneTransform(HumanBodyBones.LeftUpperLeg);
Transform left_lowerleg = animator.GetBoneTransform(HumanBodyBones.LeftLowerLeg);
Transform left_foot = animator.GetBoneTransform(HumanBodyBones.LeftFoot);

// 2. Right knee angle
Transform right_upperleg = animator.GetBoneTransform(HumanBodyBones.RightUpperLeg);
Transform right_lowerleg = animator.GetBoneTransform(HumanBodyBones.RightLowerLeg);
Transform right_foot = animator.GetBoneTransform(HumanBodyBones.RightFoot);
    
```

**S3. 분석 결과 시각화**

- 계산한 데이터를 **Unity UI**를 통해 VR/MR **디스플레이**에 표현
- 정량적 분석 결과를 **안전/경고/위험**의 **알림**과 함께 표현하여 사용자가 **결과**를 한 눈에 파악



## F3. 관절 움직임 지표 도출 (2/2)

### □ Unity UI를 통한 결과 시각화

- ✓ VR 화면의 상단 우측에 설치
- ✓ 사람 모형의 이미지와 함께 각 관절에 해당 부위 각도를 배치하여 시각화
- ✓ 관절 각도에 대한 실시간 해석 추가: 양호(●), 주의(●), 위험(●)

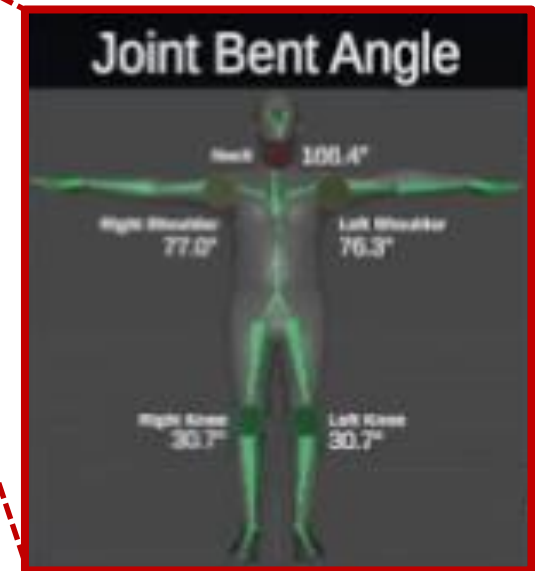
사용자  
움직임



Quest 2를 착용한  
사용자가 보는 화면



관절 각도  
실시간 계산 및 경고



## F4. 제품 사용 시 충돌량 계산

- 사용자가 **제품과 충돌**하는 **최대 깊이 계산**
- **충돌하는 정도**를 **히트맵**(heat-map)으로 **표현해 시각화**

제품과 사용자가 충돌한  
최대 깊이를 UI로 표현 (단위: m)



충돌하는 정도를  
히트맵으로 표현해 시각화



# 개발 시스템 설문 조사

- 설문 대상: 산업경영공학과 **학생 5명**
- 설문 내용: 개발 플랫폼에 대한 **사용성 평가(5점 척도: 1점 강한 부정, 5점 강한 긍정)**

## 설문 조사지

**Satisfaction Survey for Virtual Product Usability Testing System**

**Purpose of the Research**  
 Traditional product usability testing methods pose several challenges, including the **fabrication of costly physical prototypes** and the **difficulty of making adjustments to a product design**. A **virtual product usability testing system** is developed in the present study to **reduce prototype production costs** by minimizing the fabrication of physical prototypes. This virtual testing system also enables **real-time modifications to a product design** through the use of real-time rendering technology. The virtual testing system can be used for educational purposes, allowing **students to improve their understanding of the product design through their interaction within a virtual environment**.

This survey is designed to collect feedback on the virtual product usability testing system developed in the present study. We appreciate your genuine feedback, which will be used for the following:

- Enhancing the system's usability,
- Evaluating its effectiveness in educational contexts,
- Ensuring that the system adequately meets the educational needs of students, and
- Guiding ongoing and future development efforts to maintain the system as a state-of-the-art tool for virtual product usability testing and education.

Your feedback will be of great help in upgrading our virtual testing system, making it more effective and intuitive for users.

Questions	1: Strongly negative ↔ 5: Strongly positive				
	1	2	3	4	5
Q1. This virtual testing system is <b>easy to use</b> .	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Q2. The virtual testing system is <b>immersive</b> .	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Q3. This virtual testing system is <b>efficient</b> to develop a user-centered design.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Q4. This virtual testing system is <b>effective</b> to design and develop products.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Q5. I recommend students to use this virtual testing system for the <b>education of product design and development</b> .	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Q6. I am <b>satisfied overall</b> with this virtual testing system.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Please provide your thoughts on the **advantages** of the virtual product usability testing system as compared to traditional methods.

Q7. (1)  
(2)

Please provide your **suggestions** for enhancing the virtual testing system.

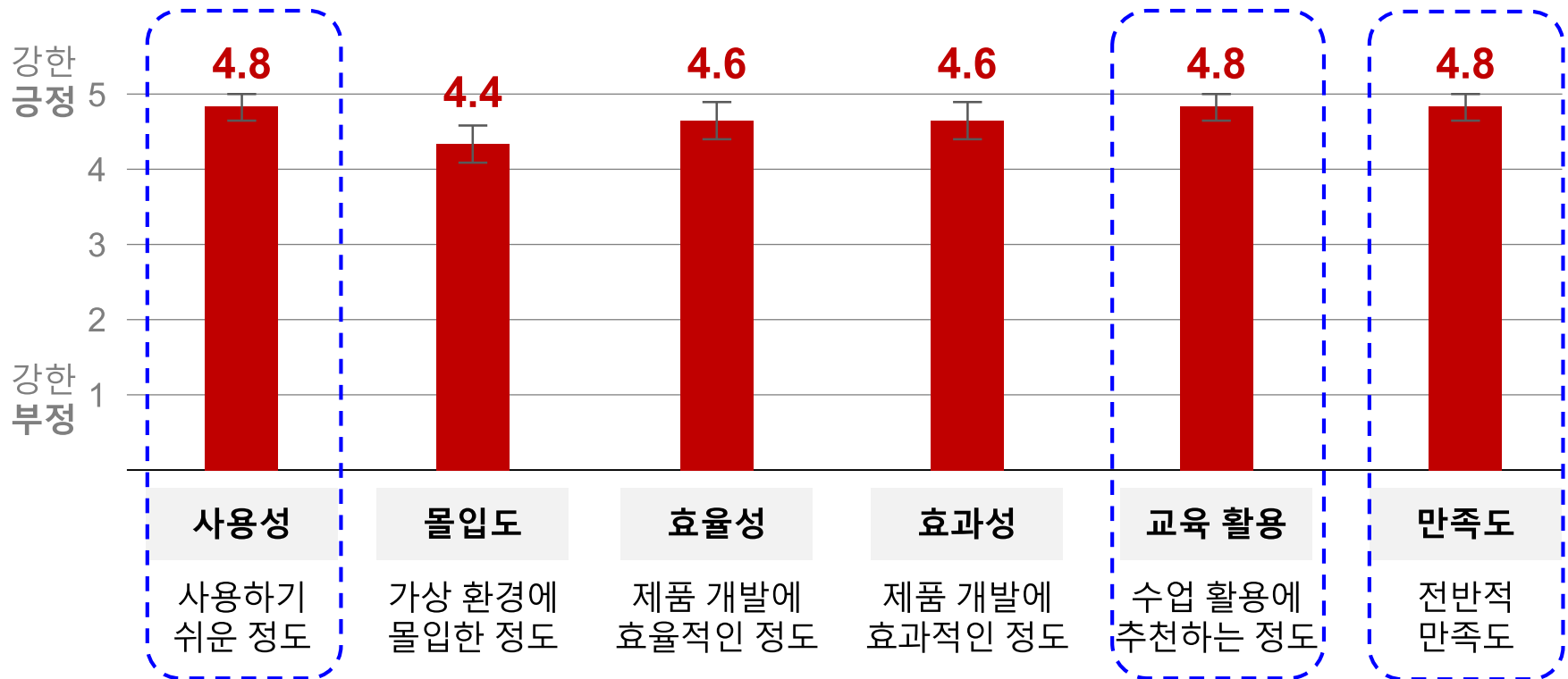
Q8. (1)  
(2)

## 개발 플랫폼 사용



# 개발 시스템 설문 조사 결과 (1/2)

□ **사용성, 교육활용, 전반적 만족도**에서 **높은 긍정적 의견**을 보임



# 개발 시스템 설문 조사 결과 (2/2)

- 사용하기 쉽고, 직관적이며, 확장성 및 학습 효과 증진 가능
- 제품 설계와 관련된 더 많은 기능 추가와 현실감(햅틱 피드백, 색감) 부여 필요

## 서술형 의견: 개발한 플랫폼의 장점과 보완점

### 장점

- ☺ 시각적인 효과를 통해 학습에 흥미를 주어 학습 효과가 증진됨
- ☺ 적은 비용으로 사용성 평가를 진행
- ☺ 직관적으로 사용하기 쉬움
- ☺ 다른 분야로 확장하기 쉬움
- ☺ 3D model을 제공하여 학습 효과를 증진

### 보완점

- ☹ 지금보다 더 많은 기능이 추가되어야 한다.
- ☹ 햅틱 피드백 등을 추가해 사용자에게 더 현실감을 부여해야 한다.
- ☹ 현실적 색감을 사용하여 더욱 현실감을 제공해야 한다.

# 개발 시스템 의의

- 기존 제품개발 방식에 비해 **비용**을 **절감**하고 **효율적인 제품 개발** 실현
  - ✓ 시제품(prototype) 생산에 **소요되는 시간**과 **비용**을 **크게 줄임**
  
- 가상현실 기술과의 연동을 통한 **사용자와의 상호작용** 기반으로 한 **객관적 데이터** 도출로 **제품설계의 효율성** 및 **유효성** 촉진
  - ✓ Unity의 **실시간 3D 렌더링** 기술을 통해 **실시간 상호작용**을 기반으로 제품설계를 평가하고 개선하여 **개발 프로세스 효율 향상**
  - ✓ **객관적 분석 데이터**를 산출하여 **인간공학적 제품 개발** 및 **개선**에 반영

# 개발 시스템 한계점

- 기술의 한계로 인한 **물리적인 신체적 상호작용의 어려움**
  - ✓ VR/MR device을 착용한 사용자가 가상 물체에 접촉할 경우 사용자에게 **신체적 feedback을 제공하지 않음**
- **물리적 제품의 사용성 평가와 비교한 검증 필요**

VR 기기를 착용하고 작업 중인 작업자  
(Reinhard et al., 2020)



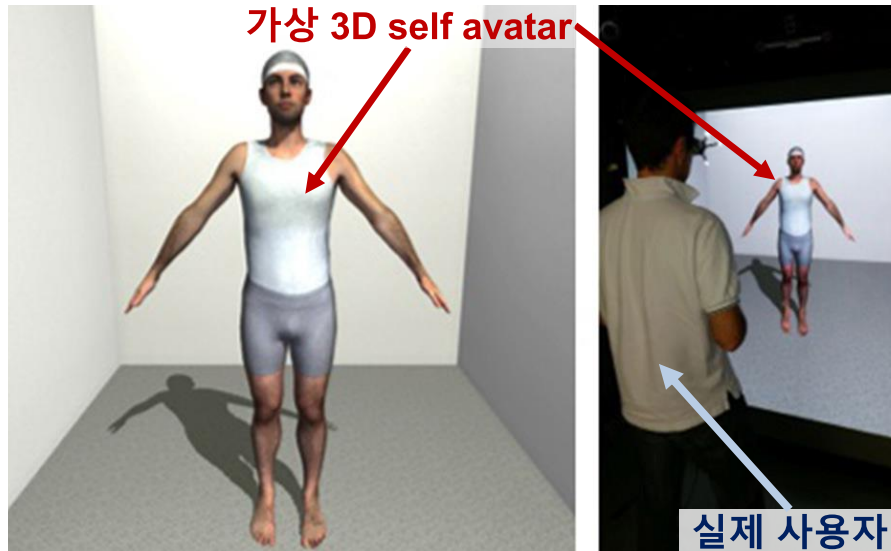
가상 환경 속 DHM은  
가상 물체에 기대  
있는 시각적 인식  
제공받음

물리적 피드백 요소가 없어  
현실 작업자는 기대고 있는  
느낌을 받을 수 없음

# 추가 연구 방향

- 사용자의 **신체**를 **scan**하여 **정확**하고 **사실적**인 **가상 avatar** 생성
  - ✓ **전신 스캐너**로 사용자의 **신체 형상**과 **색상 정보**를 **capture**하고 통계적 모델을 기반으로 **사실적인 3D 가상 self avatar** 생성(Thaler et al., 2018, Döllinger et al., 2022)
  - ✓ 생성한 3D 가상 self avatar를 개발한 **사용성 평가 시스템**과 **연동**하여 사용자의 **신체 형상**까지 반영한 **사실적**이고 **정확한 사용성 평가** 추진

사용자의 전신 scan을 통한 가상 3D self avatar  
(Thaler et al., 2018)



실제 사용자의 신체(좌)를 가상 환경에  
복제(우)한 모습 (Döllinger et al., 2022)



경청해 주셔서 감사합니다!

