

인간공학적 제품 설계 및 개발을 위한 XR 기반 사용성 평가 시스템 개발

Development of a Usability Testing System Based on Extended Reality for Ergonomic Product Design & Development

Inju Choi¹, Jongbae Park², Yejin lee³, Xin CUI³, Goeun Shim³, and Heecheon You^{1,3*}

¹Program in Industrial Data Science, Graduate School of Convergence Science and Technology, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

²LG Electronics HS CMF/3F Technology R&D Team

³Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

Contents

- **Introduction**
 - 연구 배경 및 필요성
 - 연구 목적
- **XR 기반 사용성 평가 시스템 개발**
 - System Architecture
 - Hardware 및 Software
 - 사용성 평가 시나리오
- **XR 기반 시스템의 사용성 평가**
 - 실험 과정
 - 사용성 평가 결과
- **Discussion**

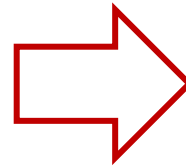
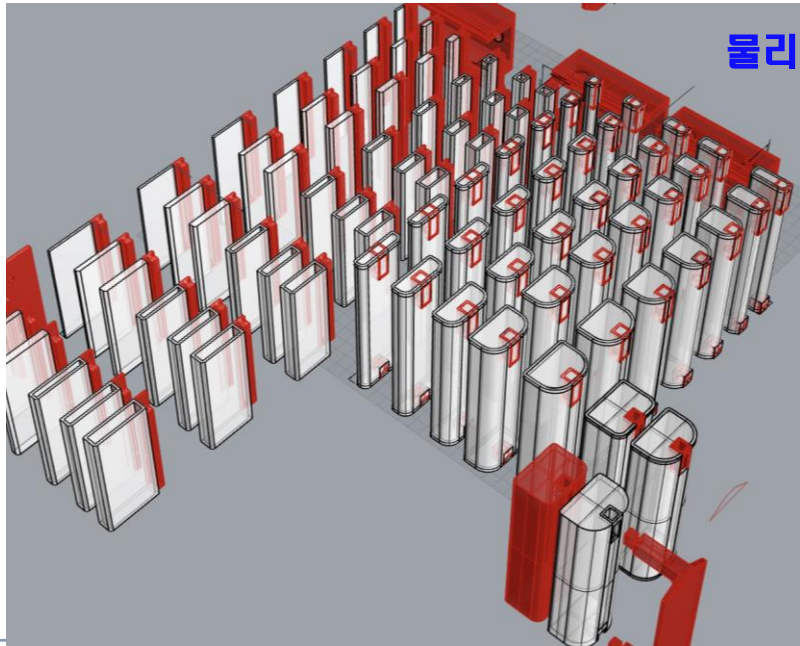
Introduction

전형적 사용성 평가 방법 및 한계점

- ❑ **물리적 시제품**(physical prototype)을 사용하여 **주관식 설문** 및 **시나리오 기반 테스트**를 통해 **사용자 평가**
 - ✓ 설문을 통한 제품의 효율성, 유효성, 만족도 등 평가 (Lee et al., 2011)
- ❑ 사용자를 통한 **적정·선호 설계 정보**를 **파악**하는데 **유용** (Sandoval et al., 2019)
- ➔ **시제품 제작에 상당한 시간 및 비용** 필요

Mock-up 형태로 모델 제작

물리적 시제품



전형적 사용성 평가 예시

3D Volume 초음파 Probe 사용성 조사

본 연구는 3D volume 초음파 probe의 사용성 향상을 위한 인간공학적인 설계 개념을 목적으로 하며, 3D volume probe 사용성 조사(20명 내외 소규모 사용자 probe 설계에 대한 주관적 만족도 평가(시간 내외 소규모 사용자)를 실시합니다. 본 연구 참여 시 설문 설문 또는 7분 동안 설문(간헐적 설문)을 실시하며, 설문지 Ansa Probe 2.0(초음파) 실험에 참여할 수 있습니다. 사용자 조사는 이해를 바탕으로 진행되며, 주관적 만족도 평가는 저의 연구팀이 참여자가 원하는 시간과 장소에 방문하여 진행할 예정입니다.

본 설문은 3D volume probe 사용자를 대상으로 사용자 요구사항을 수집하기 위해 작성되었으며, 설문 응답에 소요되는 시간은 약 30분입니다.

3D Volume 초음파 Probe 제작

본 설문 응답 내용은 연구 목적 이외에 다른 용도로 사용되지 않으며, 응답 내용이 연구에 관한 사항이나 질문은 최우선 순위로 답변드립니다. 참고로, 3D volume probe를 사용하는 방법을 거치는 동료 분들도 함께 주시면 감사하겠습니다.

포항공과대학교 인간공학기술 연구실
책임교수: 우희준 (054-279-2249, hjuw@postech.ac.kr)
연구원: 박우영 (010-4698-6445, uyoung@postech.ac.kr)

■ 참여자 정보

성명	성별	성/년	생년월일	년월일
교부(가)	소속부서	직책	주요업무	연구/교수/연구사/연구원
연락처	E-mail			

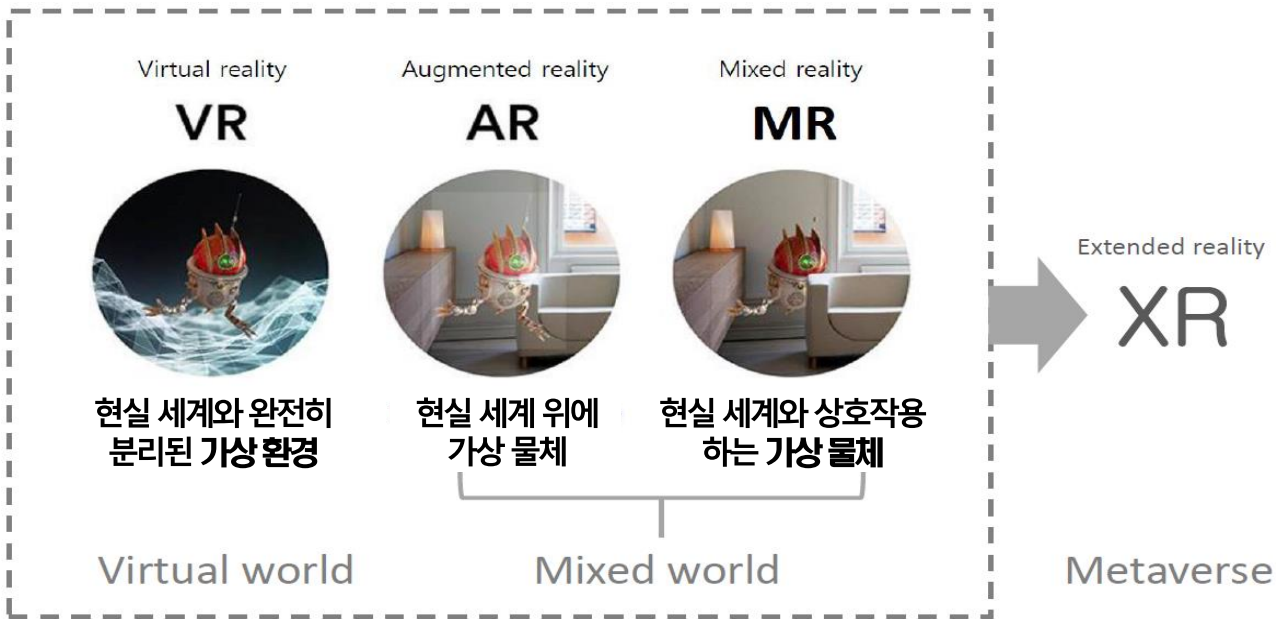
페이지 1 / 5



확장 현실(eXtended Reality, XR)

- 감각 몰입이 이루어지는 **가상 환경**에서 **실시간**으로 **상호작용**하는 **인간-컴퓨터 인터페이스** (Kim & Park, 2012)
 - ✓ **실제 경험을 시뮬레이션**하기 위해 **물리적 요소**와 **가상 요소**를 **혼합**하는 **다중 감각 몰입형 공간 제공** (Kosko et al., 2021; Stanney et al., 2021)
- **3D 시각화** 및 **몰입형 기술**을 통해 다양한 분야에서 **광범위**하게 **적용** (Venkatesan et al., 2021)
- **물리적 시제품 제작이 어려운 제품 설계**에 **주로 적용** (Pelaez-Restrepo et al., 2021)

확장 현실 기술의 종류



헬리콥터 승객실 설계 및 상호작용 성능 분석 (Pelaez-Restrepo et al., 2021)



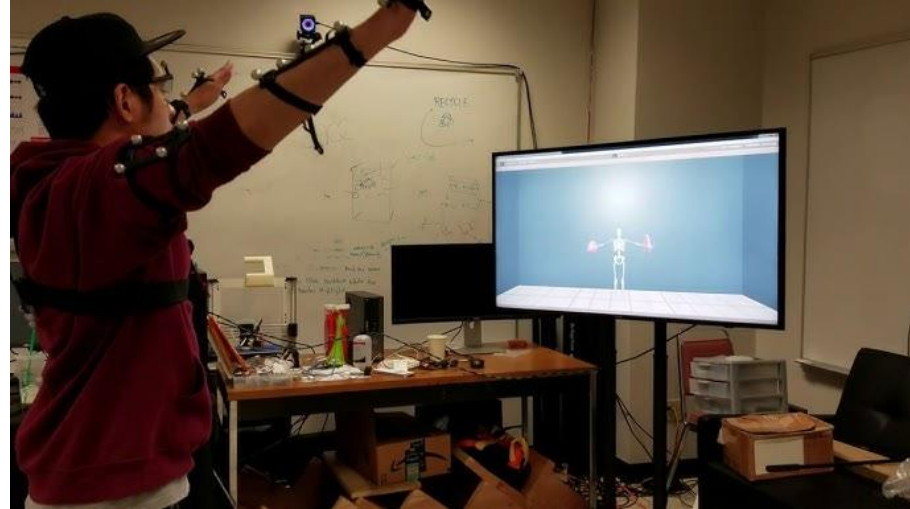
기존 XR 적용 연구 한계점

- **제품 성능과 효율 개선 초점** → 사용자 중심의 **인간공학적 제품 설계 집중 연구 부족**
- ⇒ **사용자의 움직임을 정량적으로 분석하여 제품 사용성을 높이는 가상 환경 개발 필요**
 - ✓ 가상 환경에 사용자의 움직임을 정확히 연동한 **3D DHM(digital human model) 구현 필요**
 - ✓ 사용자 움직임에 대한 **정량적 분석 결과 도출하여 인간공학적 제품 설계에 활용 필요**

가상 환경에서 사용자의 자세 및 움직임을 정량적으로 분석 필요



+



연구 목적

인간공학적 제품 설계를 위한 XR 기반 사용성 평가 시스템 개발

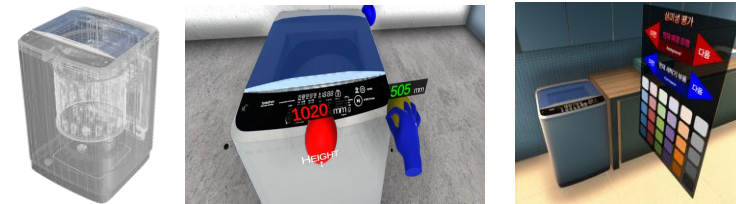
□ 사용자를 대신하는 가상 환경 3D DHM 구현

- ✓ Motion capture system - Quest 3 - Unity3D 통합 시스템 구현
- ✓ 사용자 움직임을 실시간으로 정확히 연동하는 3D DHM 구현
- ✓ Controller 없이 사용자의 손으로 직접 상호작용



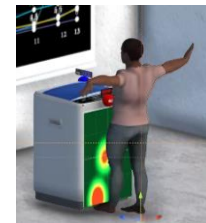
□ 제품 설계에 확장 현실 기술 적용 가능성 확인

- ✓ 실제와 동일 크기 및 형상의 가상 제품 구현
- ✓ 사용성 평가 시나리오 구현
- ✓ 가상 사용성 평가 시스템의 사용성 평가



□ 상호작용 정량적 데이터 산출 및 인간공학적 제품 설계 반영

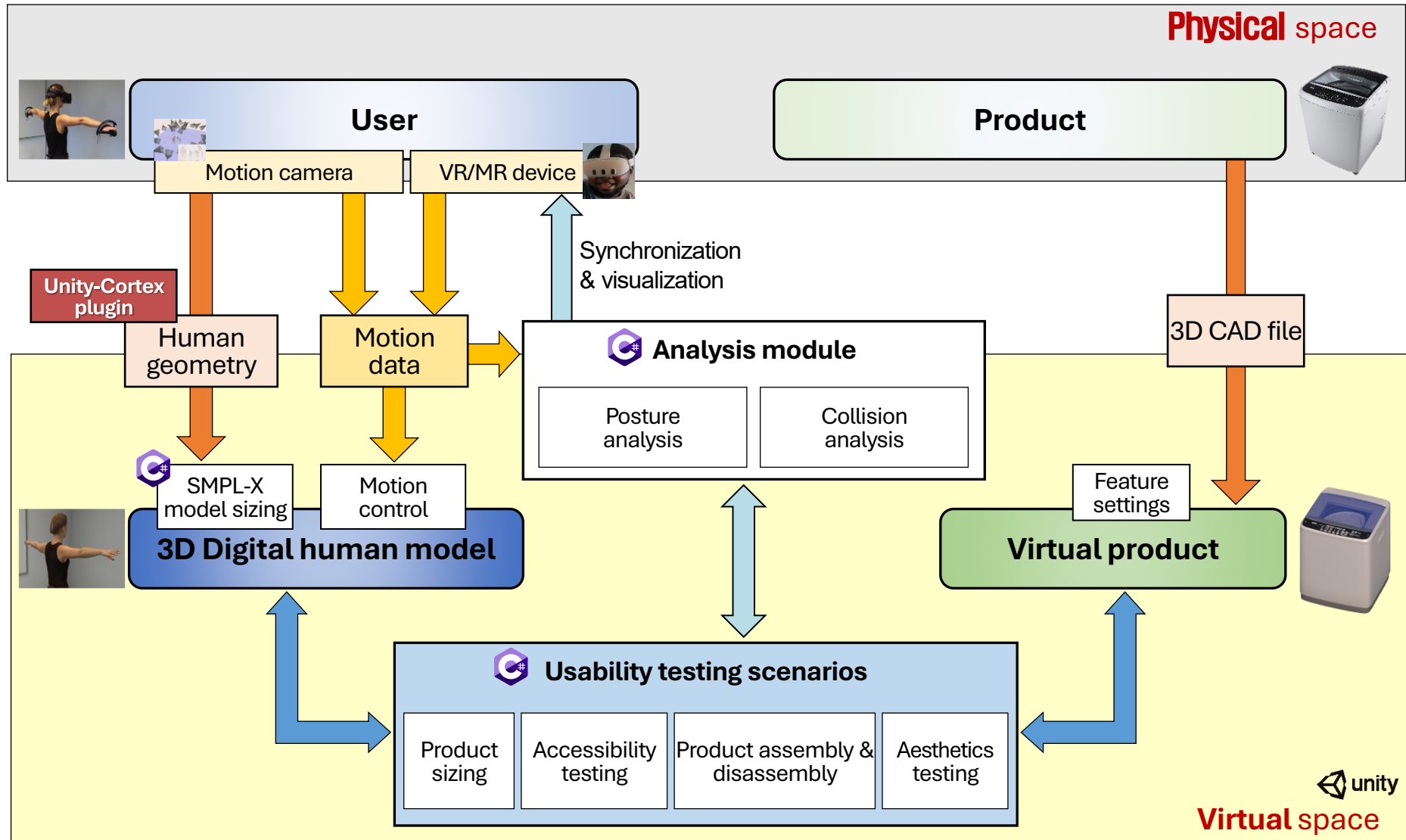
- ✓ Motion capture system을 통한 사용자 자세 정량화 및 시각화
- ✓ 제품과 사용자 간 충돌 깊이 및 범위 계산



XR 기반 사용성 평가 시스템 개발

System Architecture

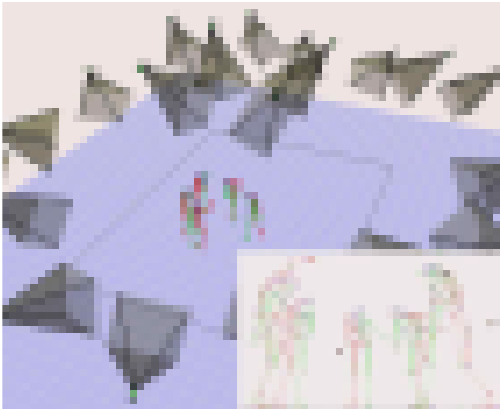
본 연구에서 개발한 C# script



Hardware 및 Software

- ❑ **Motion capture system**으로 **motion marker 3차원 위치 실시간 도출**
- ❑ Meta Quest 3를 사용하여 사용자에게 **몰입감 높은 시각적 경험 제공**
- ❑ 대중적인 VR 개발 소프트웨어인 Unity3D를 사용하여 **가상 환경 개발**
- ❑ **SMPL-X Unity package**(Max-Planck-Gesellschaft, Germany) 사용하여 **3D DHM 구현**

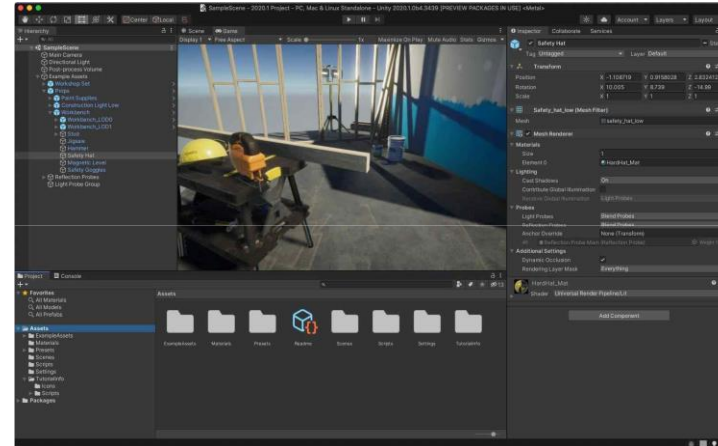
Osprey motion capture system



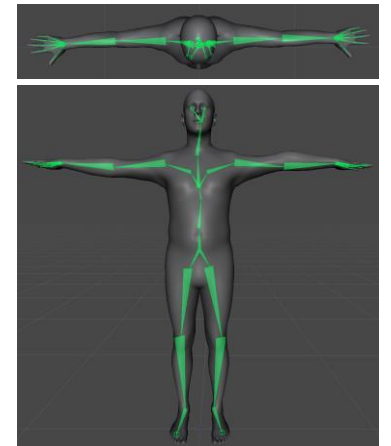
Meta Quest



Unity3D



SMPL-X mapping 구조

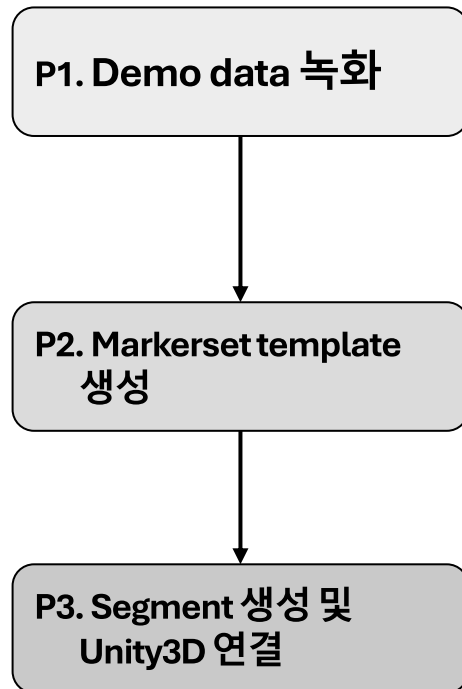


3D DHM 설정: Motion Capture System 연동 과정

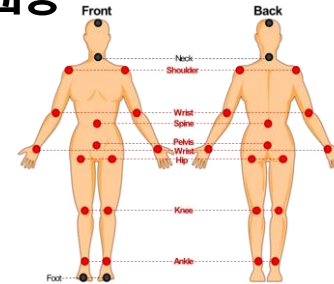
□ Motion capture system과 Unity3D 간 실시간 연결을 위해서는 사용자 전용 markerset template 및 segment 생성 필수

⇒ Demo data 녹화하여 해당 사용자 전용 markerset template 및 segment 생성

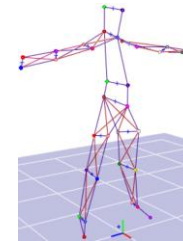
사용자 전용 markerset template 및 segment 생성 과정



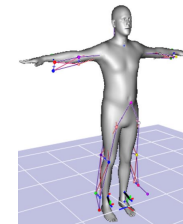
- 사용자 신체 전반에 marker 부착
- Demo data 녹화(2~3초): 8대의 Osprey motion camera로 marker 위치 도출



- Demo data에서 도출된 marker에 이름 부여(identification)
- Virtual marker 생성
- Link 설정

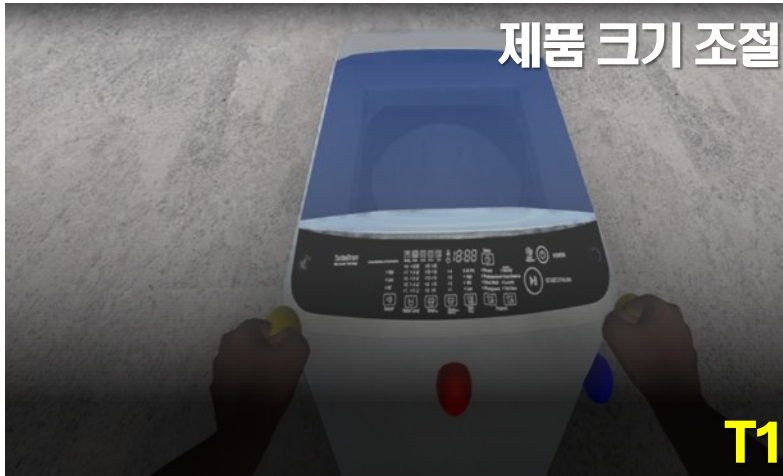


- Unity3D humanoid 구조와 동일하게 segment 설정
- Unity3D에서 사용할 3D DHM file(.fbx) 연결



사용성 평가 시나리오

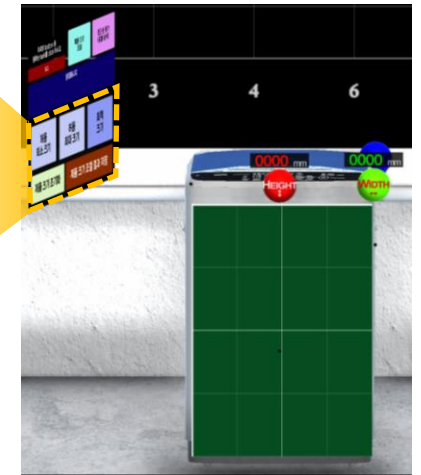
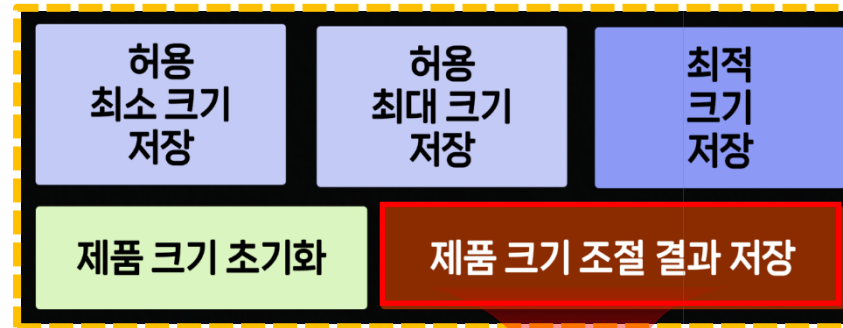
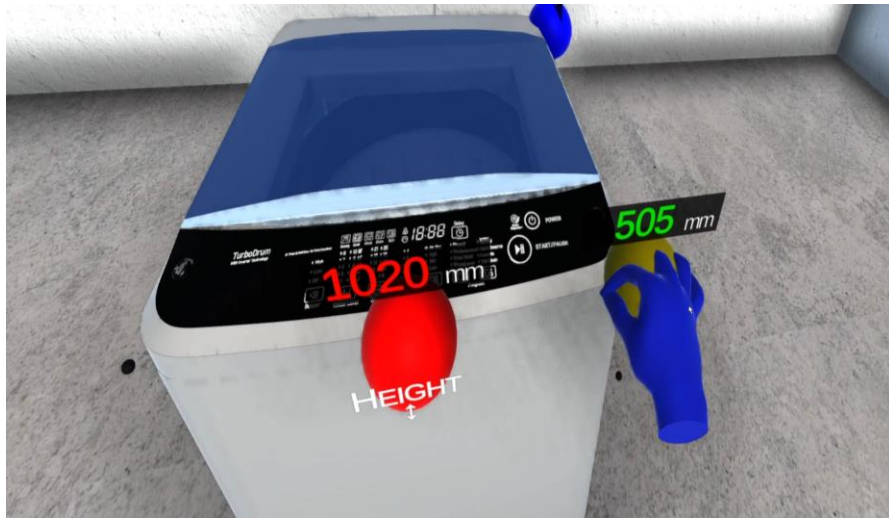
- 실제 환경에서 다양한 제품 크기에서 사용성 평가를 진행하려면 다양한 크기의 시제품 생산 필요
 - 시간과 비용 모두 증가
- ⇒ 물리적 시제품 없이 가상 환경에서 제품 크기를 실시간으로 조절하면서 제품과 상호작용 진행
- 접근성은 제품과의 상호작용에 직접적 영향을 미쳐 제품 설계에 가장 중요한 요소
- 현실에서는 제품과의 상호작용 정도 및 위치를 시각화하기 어려움
- 제품 외관은 설치되는 배경 색상이나 조명 조건 등 주변 환경의 영향을 많이 받음
- 현실에서 주변 환경을 즉각적으로 바꿔가며 사용성 평가 하기 어려움



사용성 평가 시나리오: 제품 크기 조절 (크기 조절 방법)

- 손으로 버튼을 잡고 팔을 좌우 또는 위아래로 움직이며 세탁기 크기 실시간 조절
- 크기 조절 결과 저장 ⇒ 사용자 중심 데이터 수집
 - ✓ 사용자는 세탁기 크기를 직접 조절하며 자신이 판단한 허용 및 적정 크기 설정
 - 허용 최소 크기: 사용자가 "이 정도보다 작으면 사용하기 어렵다"고 판단하는 최소 크기
 - 허용 최대 크기: 사용자가 "이 정도보다 크면 사용하기 어렵다"고 판단하는 최대 크기
 - 최적 크기: 사용자가 "이 크기가 딱 맞는다"고 판단하는 최적 크기

세탁기 크기 조절 예시

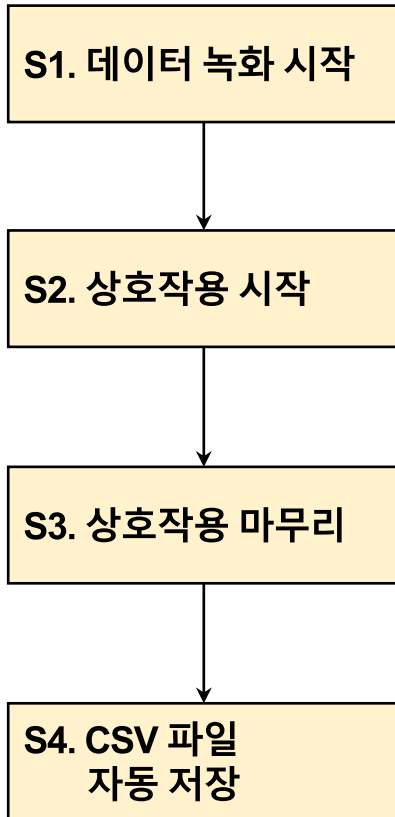


Type	Timestamp	Width	Height	Depth
min	2024-12-11 16:48	509	823	590
max	2024-12-11 16:52	753	1023	866
prefer	2024-12-11 16:55	645	963	713

사용성 평가 시나리오: 접근성 평가 (평가 과정)

- 세탁기의 **손잡이**, **먼지 필터**, **세탁조 바닥**과 상호작용 할 때의 **접근성 평가**
- **사용자와 제품 간 충돌 깊이**, **충돌 범위 계산** 및 **히트맵(heat-map) 시각화**

접근성 평가 진행 과정



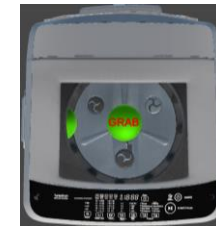
✓ 녹화 시작 버튼을 눌러 상호작용 시작



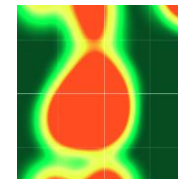
✓ 세탁기 각 부품과 상호작용 시작
 ✓ 충돌 위치 히트맵(heat-map) 시각화 및 최대 충돌 깊이 계산



✓ 세탁기 부품에 따라 상이한 방법으로 상호작용 마무리
 > 손잡이: 사용자가 손잡이를 잡으면 마무리
 > 먼지 필터, 세탁조 바닥: 설치된 버튼을 누르면 마무리



✓ 히트맵 이미지 파일 및 데이터 녹화 결과 csv 파일로 자동 저장



Frame	LeftKneeAr	RightKnee	LeftShould	RightShou	NeckAngle
0	10.2	7.9	42.2	40.9	10.9
1	10.2	7.9	42.2	40.9	10.9
2	10.2	7.9	42.2	40.9	10.9
3	10.2	7.9	42.2	40.9	11
4	10.2	7.9	42.2	40.9	11
5	10.2	7.9	42.2	40.9	11
6	10.2	7.9	42.2	40.9	11.1
7	45.4	7.9	42.2	40.9	11.1
8	70.3	7.9	42.2	40.9	11.1
9	81.5	7.9	42.2	40.9	11.1

사용성 평가 시나리오: 심미성 평가 (가상 공간 구현)

- Unity asset store에서 **세탁실 배경 3D model asset** 구매하여 사용
- **기존 asset**에 있던 **세탁기**를 **본 연구**에서 사용하는 **세탁기 3D model**로 변경

심미성 평가 가상 공간

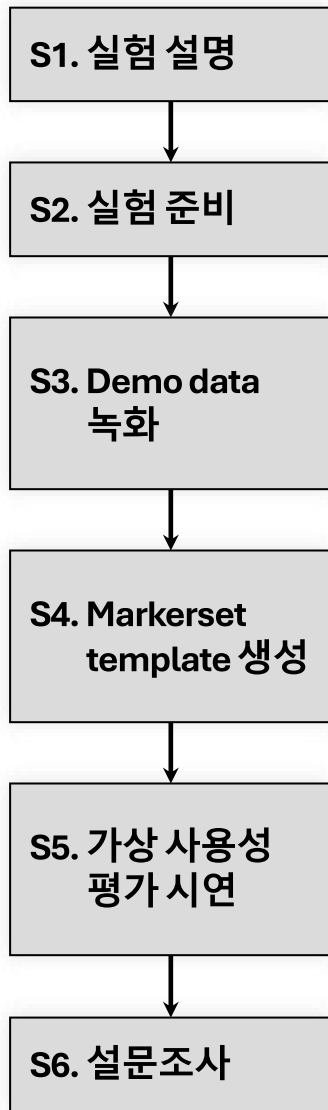


심미성 평가 가상 공간에 세탁기 3D model 설치



XR 기반 시스템 사용성 평가

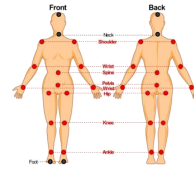
실험 과정



- 실험 목적, 실험 개요 설명
- 실험 동의서 작성



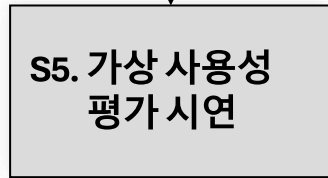
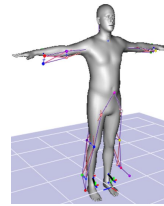
- 실험 대상자 신체에 **marker 부착**
- 실험 대상자 **Quest 3 착용 및 개인 설정**



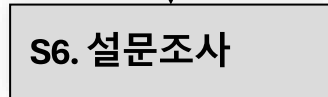
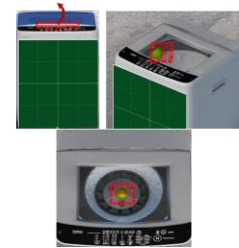
- **Markerset template 생성을 위한 demo data 녹화**



- 실험 대상자별 **markerset template 생성**



- | | | |
|--|---|---|
| 1) 제품 크기 조절 | 2) 접근성 평가 | 3) 심미성 평가 |
| <ul style="list-style-type: none"> ■ 허용 최소, 허용 최대, 최적 크기 설정 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 설정한 각 세탁기 크기에서 세탁기와 상호작용 진행 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 다양한 배경 조건에서 맞춤형 색상 제품 설정 |



- 가상 사용성 평가 시스템의 **사용성 설문조사**

순	질문	1	2	3	4	5
Q1	가상 사용성 평가 시스템이 유용하다					
Q2	가상 사용성 평가 시스템을 사용하여 작업 효율이 증가했다					
Q3	가상 사용성 평가 시스템을 사용하여 작업 부담이 줄었다					
Q4	가상 사용성 평가 시스템을 사용하여 작업 만족도가 높았다					
Q5	가상 사용성 평가 시스템을 사용하여 작업 집중력이 높았다					
Q6	가상 사용성 평가 시스템을 사용하여 작업 능률이 높았다					
Q7	가상 사용성 평가 시스템을 사용하여 작업 스트레스가 줄었다					
Q8	가상 사용성 평가 시스템을 사용하여 작업 안전성이 높았다					
Q9	가상 사용성 평가 시스템을 사용하여 작업 정확도가 높았다					
Q10	가상 사용성 평가 시스템을 사용하여 작업 생산성이 높았다					

참가 인원

□ 인원: **다양한 키**를 가진 **20~60대** 일반인 **여성 27명**

✓ **20~30대: 17명, 40~50대: 10명**

✓ Size Korea 데이터로 **키 치수별로 그룹을 나눈 후**, 각 **그룹별 실험 대상자 모집**

➤ **小** 그룹 9명: **159 cm 미만** (Size Korea 기준 33%tile 이하)

➤ **中** 그룹 9명: **159 cm 이상 164 cm 미만** (Size Korea 기준 33%tile ~ 67%tile)

➤ **大** 그룹 9명: **164 cm 이상** (Size Korea 기준 67%tile 이상)

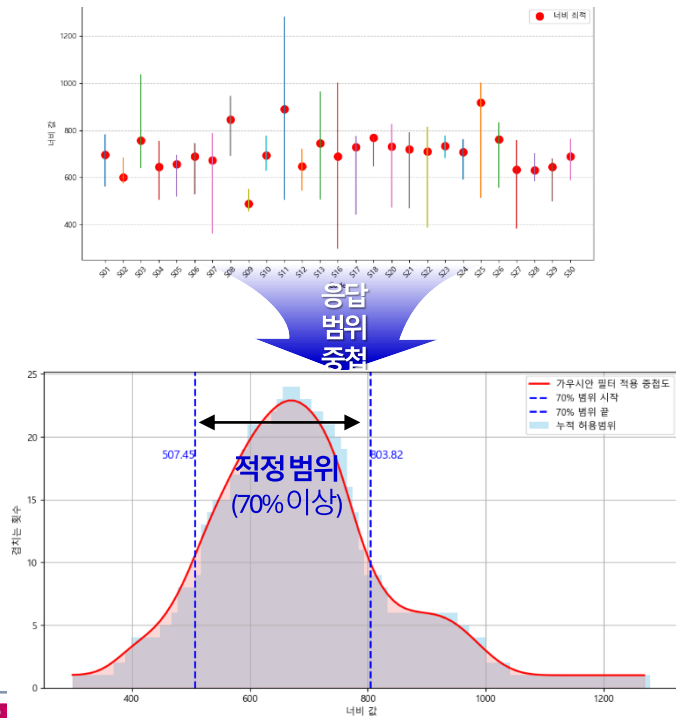
사용성 평가 결과

인간공학적 적정 제품 크기 도출: 개요

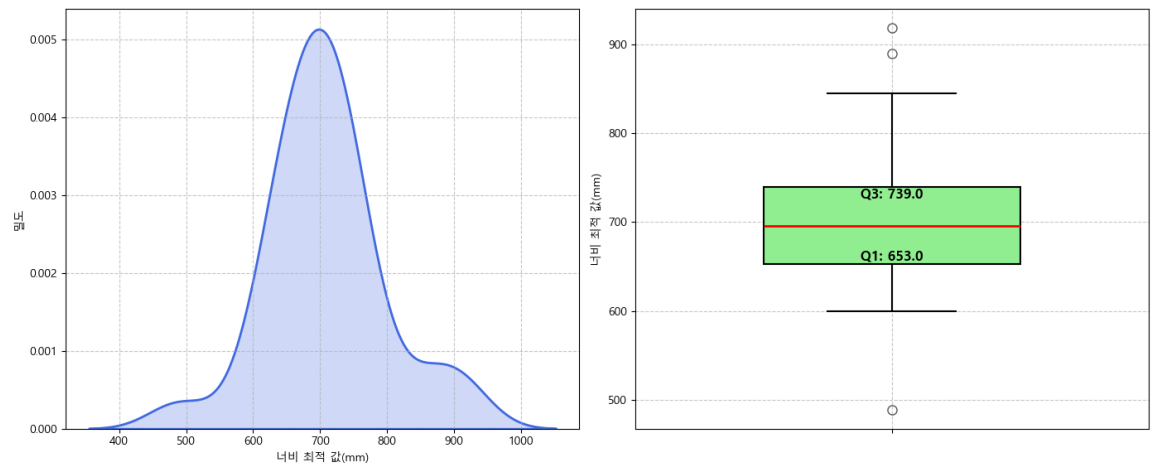
□ 현실 환경에서의 사용자 경험 기반 제품 치수의 적정 범위 도출 프로토콜과 동일하게 설정

- ✓ 실험 참여자가 응답한 허용 최소 크기와 허용 최대 크기 사이를 적정 범위로 설정
- ✓ 실험 참여자의 응답 범위가 중첩된 영역 중 70% 이상의 실험 참여자가 응답한 영역을 각 세탁기 치수의 적정 범위로 선정
- ✓ 최적 치수를 기준으로 산점도와 box-plot 으로 데이터 확인
- ✓ Q1 과 Q3 사이에 있는 범위를 최적 치수의 범위로 설정

사용자 경험 기반 인간공학적 적정 제품 크기 범위 도출 예시



사용자 경험 기반 인간공학적 최적 치수 크기 범위 도출 예시

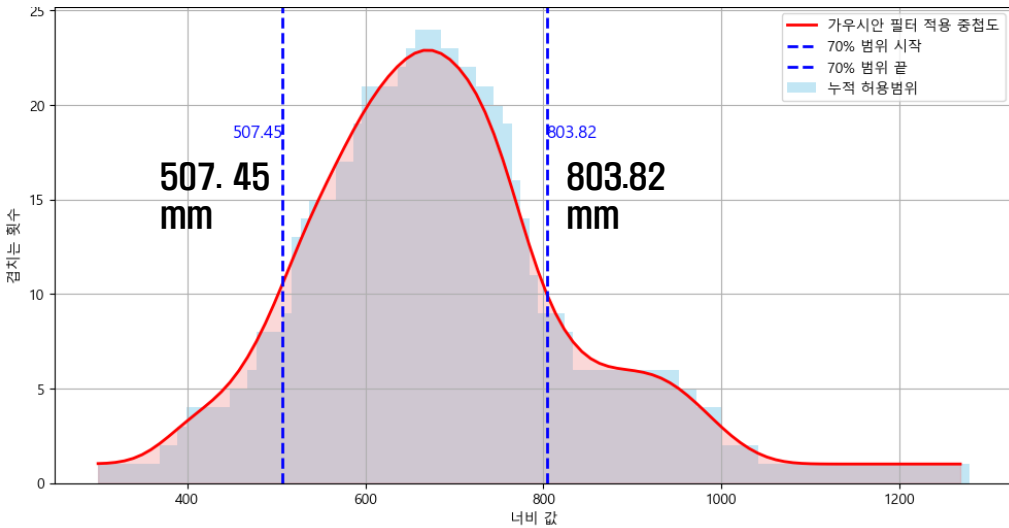


인간공학적 적정 크기: 세탁기 너비(Width)

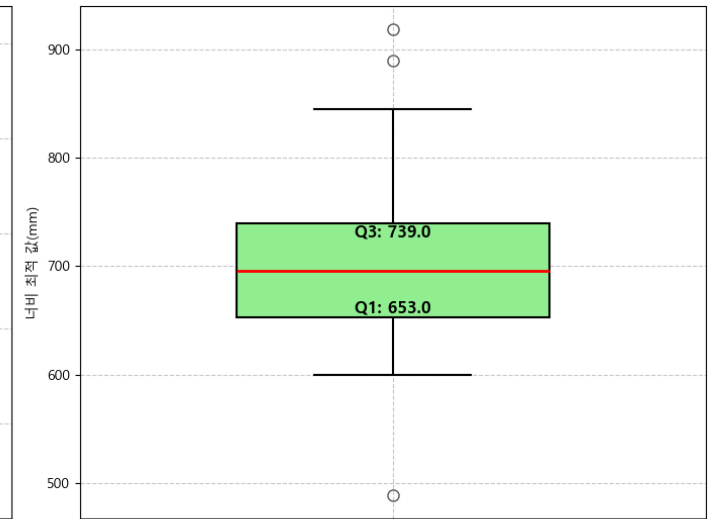
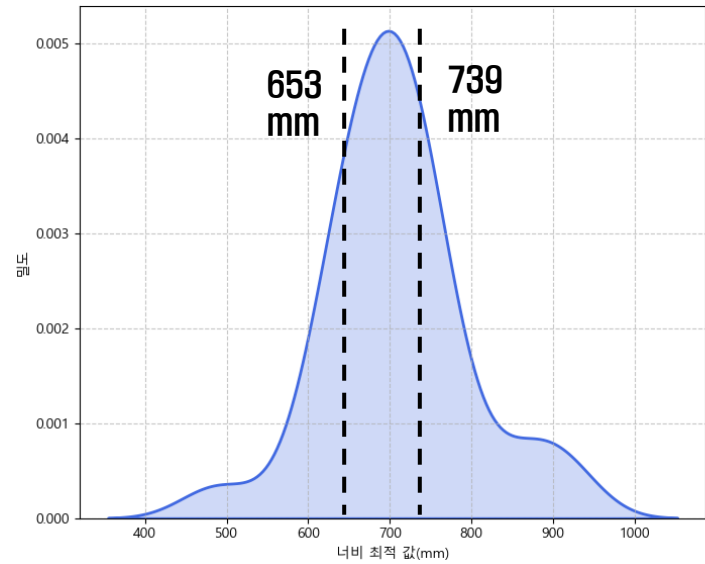
- 세탁기 너비의 적정 범위 : 507.45 ~ 803.82 (mm)
- 653.0 ~ 739.0 (mm) 에서 실험 참여자의 최적 치수가 집중됨



허용 범위 누적 중첩도



최적 범위 도출

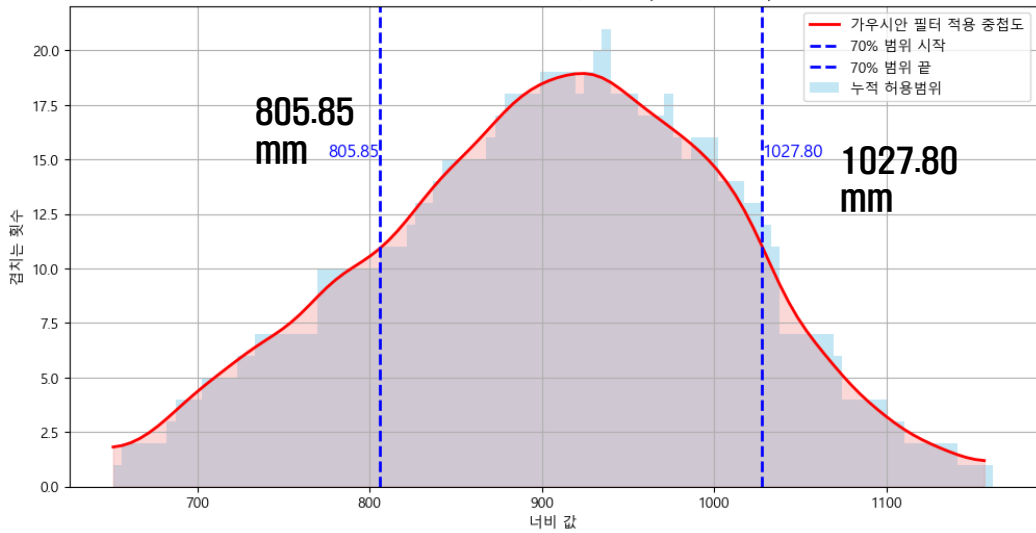


인간공학적 적정 크기: 세탁기 높이(Height)

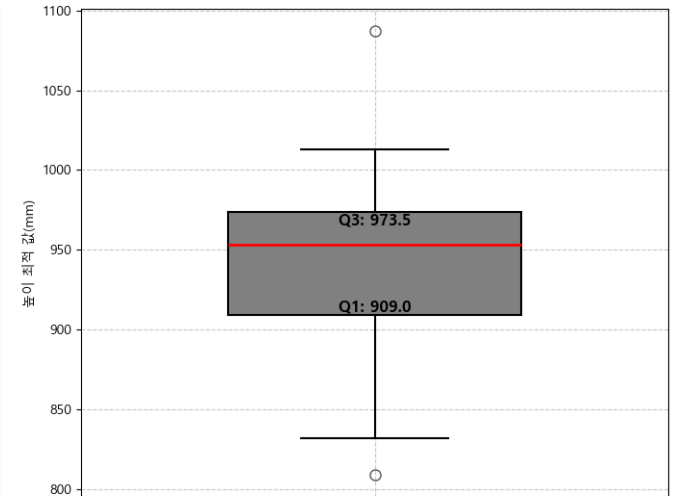
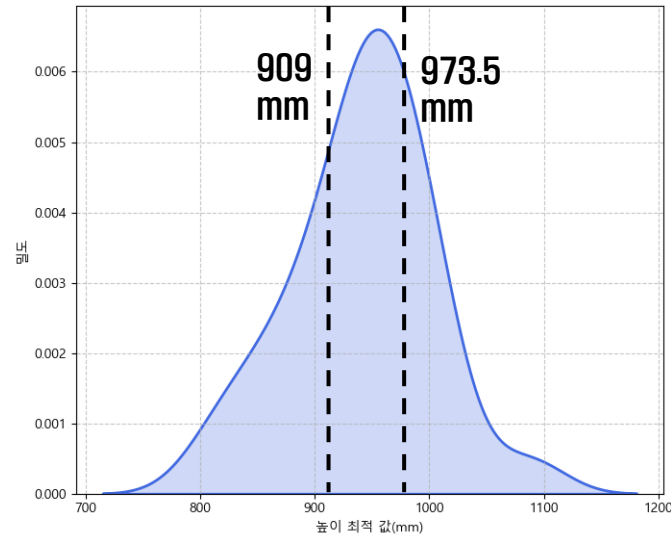
- 세탁기 높이의 적정 범위 : 805.85 ~ 1027.80 (mm)
- 909.0 ~ 973.5 (mm) 에서 실험 참여자의 최적 치수가 집중됨



허용 범위 누적 중첩도

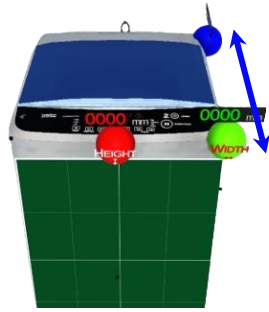


최적 범위 도출

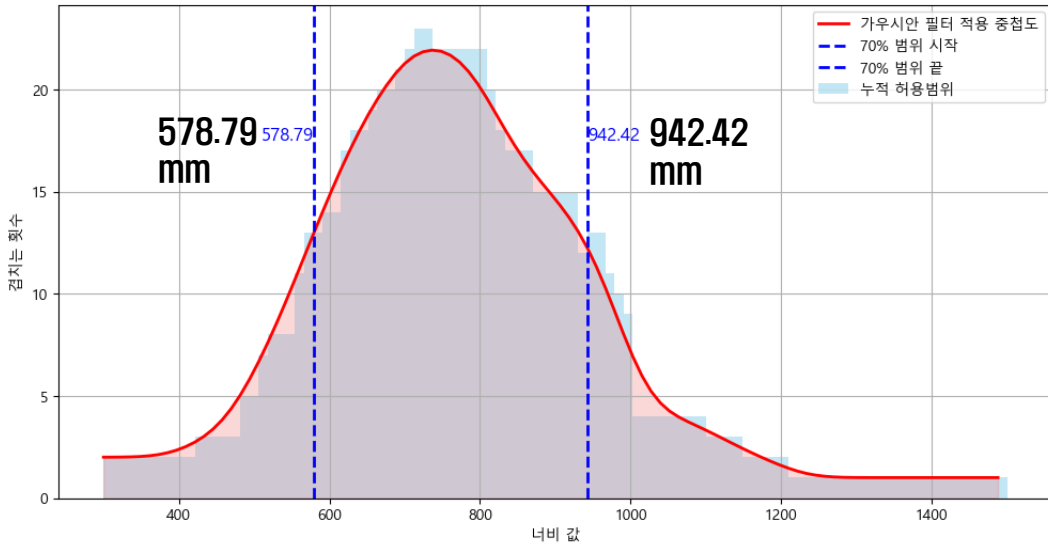


인간공학적 적정 크기: 세탁기 깊이(Depth)

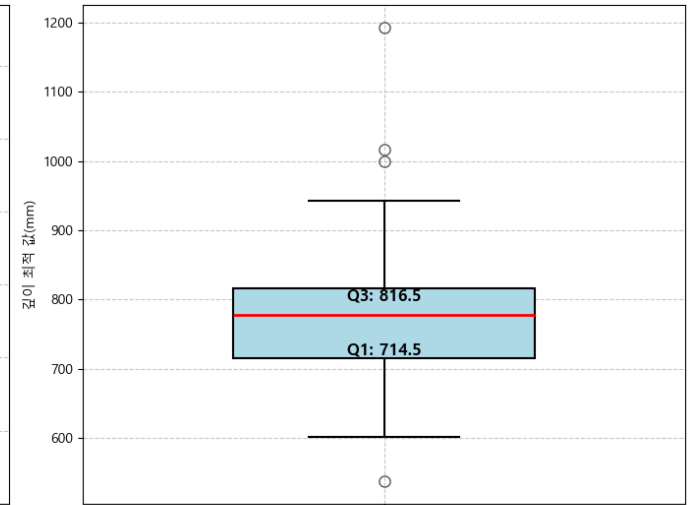
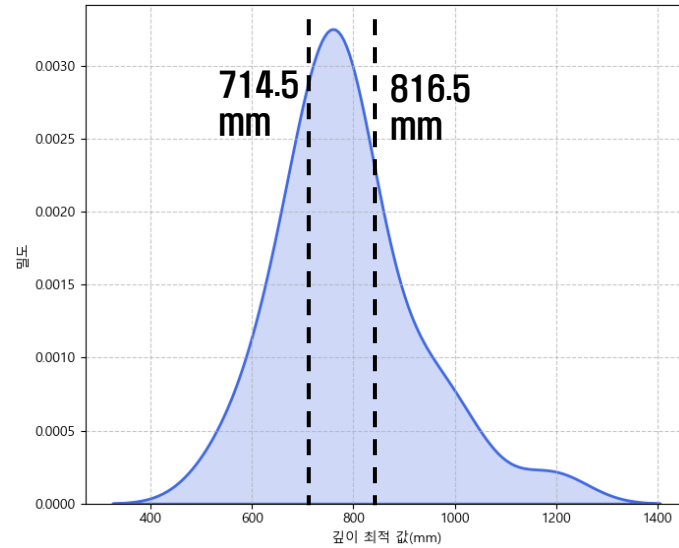
- 세탁기 **깊이**의 적정 범위 : **578.79 ~ 942.42 (mm)**
- **714.5 ~ 816.5 (mm)** 에서 실험 참여자의 **최적 치수**가 집중됨



허용 범위 누적 중첩도



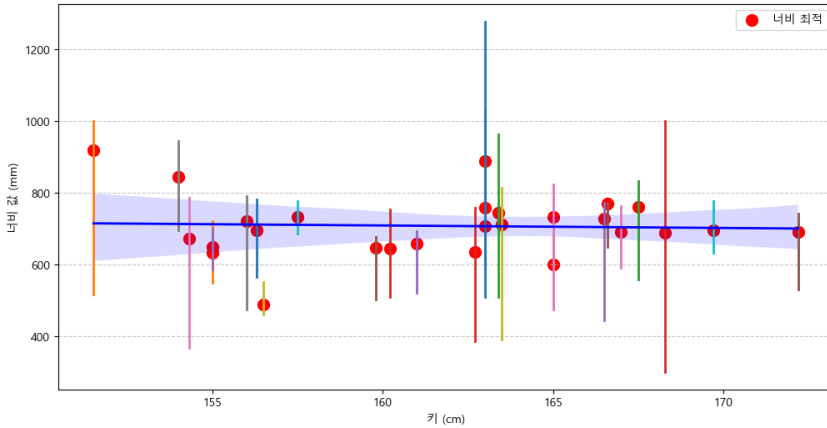
최적 범위 도출



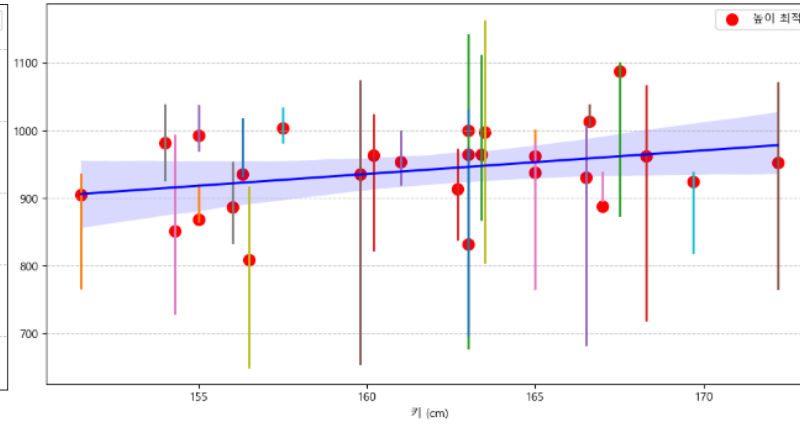
신체 치수와 제품 크기 간 상관분석: 키

- 세탁기 **높이**(height)와 키 → **약한 양의 상관관계**($r = 0.32$)
 - ✓ 키가 클수록 높은 세탁기를 선호하는 경향 파악

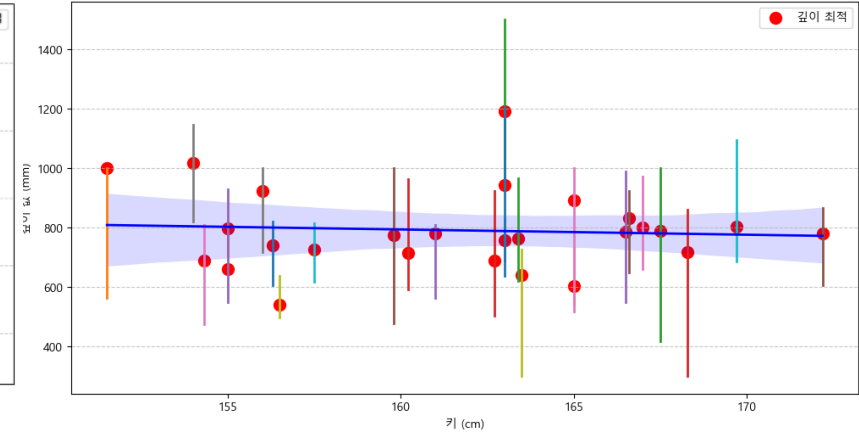
키와세탁기너비간 상관분석
($r = -0.04$)



키와세탁기높이간 상관분석
($r = 0.32$)



키와세탁기깊이간 상관분석
($r = -0.07$)

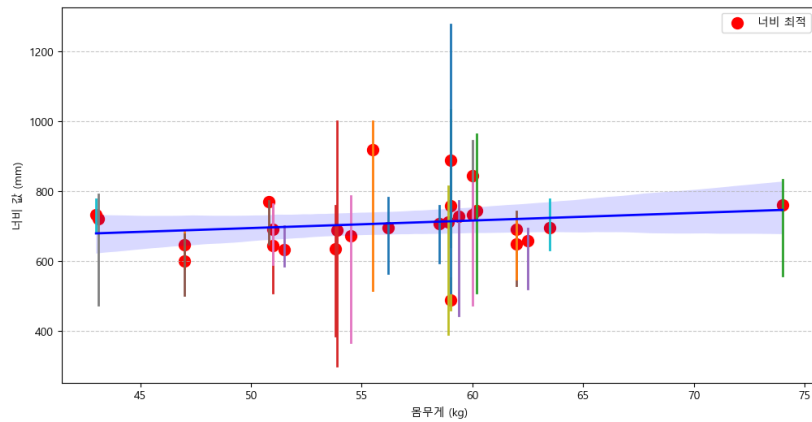


신체 치수와 제품 크기 간 상관분석: 몸무게

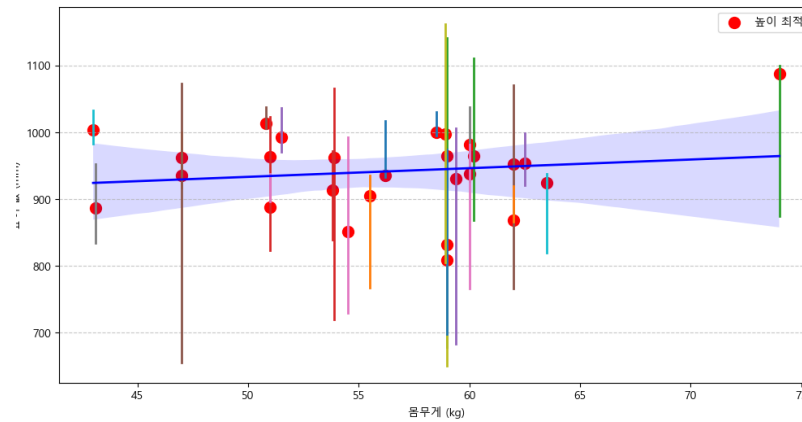
□ 의미 있는 상관관계 도출되지 않음

- ✓ 몸무게와 세탁기 치수(너비, 높이, 깊이) 간 **최적 수치에 대한 선호도는 명확하지 않음**

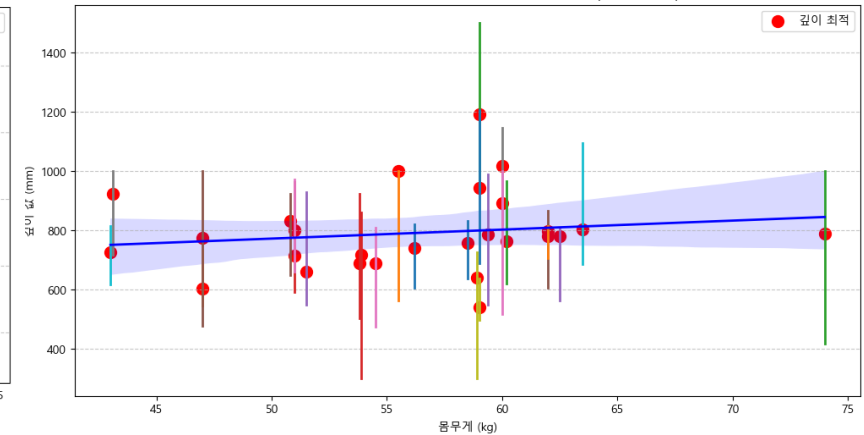
몸무게와세탁기 **너비**간 상관분석
($r = 0.17$)



몸무게와세탁기 **높이**간 상관분석
($r = 0.15$)



몸무게와세탁기 **깊이**간 상관분석
($r = 0.15$)

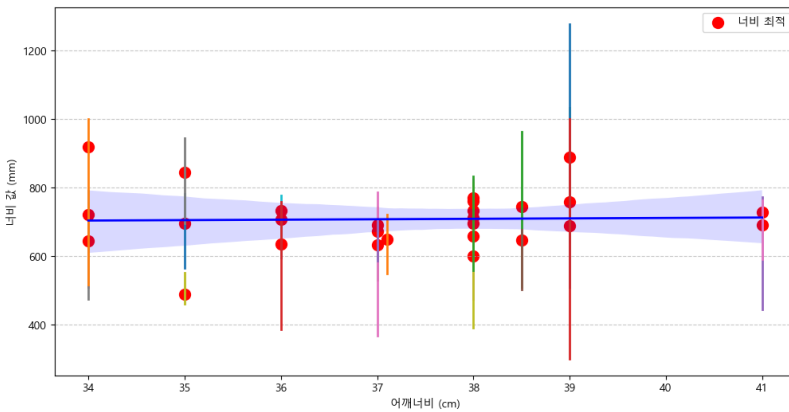


신체 치수와 제품 크기 간 상관분석: 어깨너비

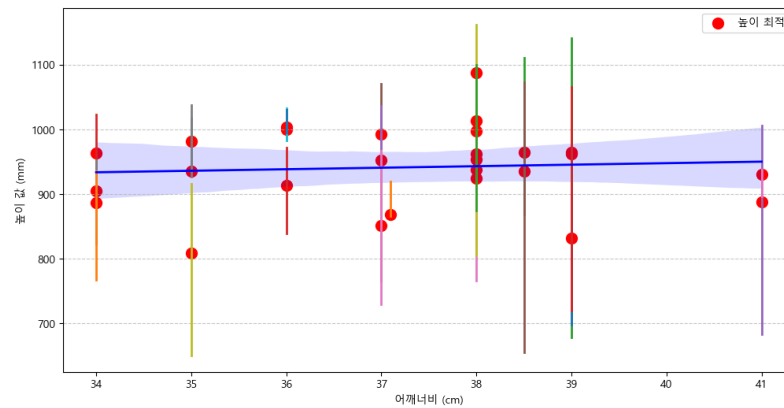
□ 의미 있는 상관관계 도출되지 않음

- ✓ 어깨너비와 세탁기 치수(너비, 높이, 깊이) 간 **최적 수치에 대한 선호도는 명확하지 않음**

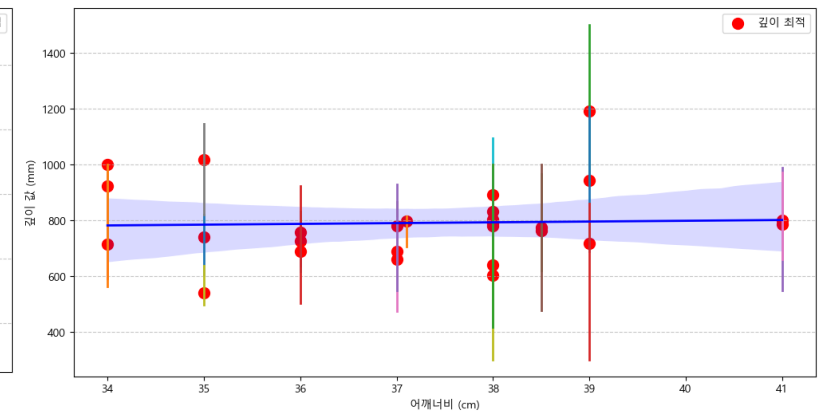
어깨너비와세탁기너비간 상관분석
($r = 0.03$)



어깨너비와세탁기높이간 상관분석
($r = 0.07$)

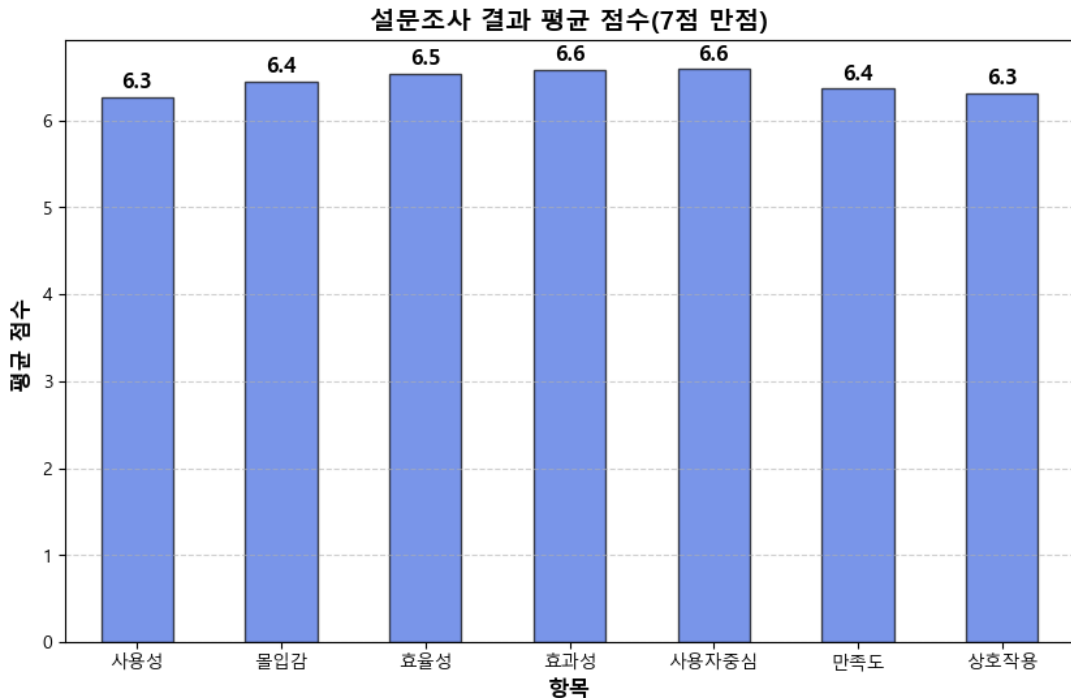


어깨너비와세탁기깊이간 상관분석
($r = 0.04$)



설문조사 결과

- 모든 부분에서 **6.3점 이상**의 높은 점수를 기록함
- **효율성, 효과성, 사용자중심**에서는 **6.5점 이상**을 기록
- 제약 없는 **가상 환경**에서 **자연스러운 상호작용**과 **즉각적 피드백**을 통한 **제품 크기 조절** 및 **실시간 의견 제안** 가능
- 추가적 **청각적 피드백**이나 **햅틱 반응** 등의 **추가 기능 필요**



서술형 의견: 개발 시스템의 장점과 보완점

장점

- ☺ 현실 환경과 달리 **환경 제약 없는 가상 환경**에서 **다양성을 보여줄 수 있음**
- ☺ **자연스러운 상호작용**과 **즉각적인 피드백**으로 **내 신체에 맞는 제품 크기 조절**
- ☺ **다양한 환경**에서 **실시간**으로 **제품에 대한 의견 제안**

보완점

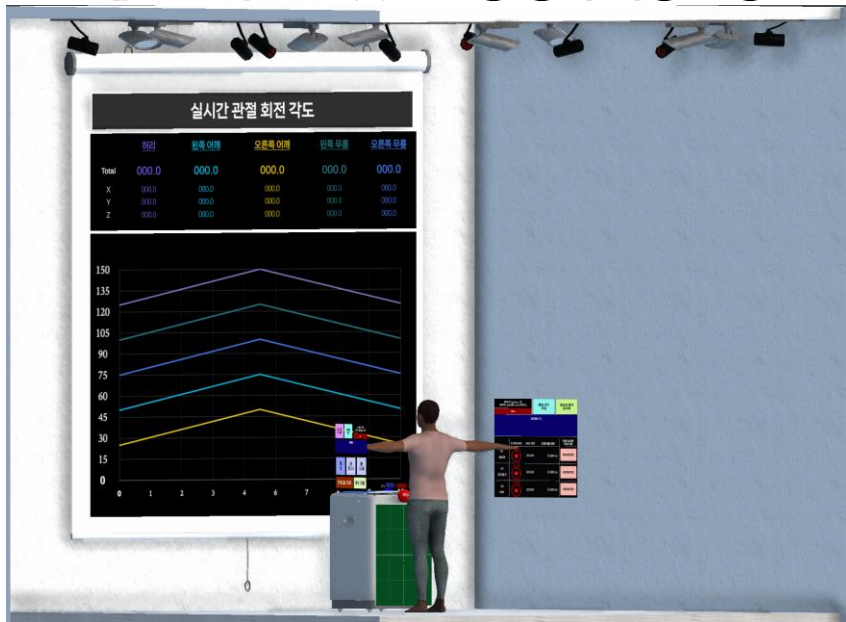
- ☹ **추가적인 청각적 피드백 필요**
- ☹ **햅틱 반응** 및 **버튼 클릭 민감성 해결 필요**
- ☹ **장시간 착용** 시 **멀미 발생**

Discussion

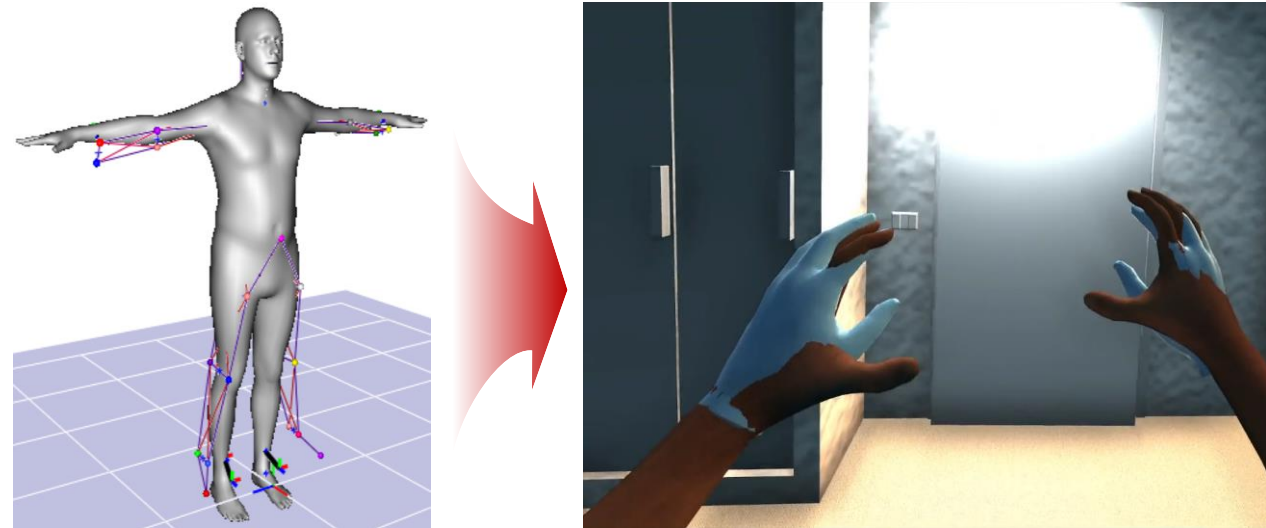
가상 환경 구현

- 물리적 시제품 없이 의도한 상황에서 실시간 동적 피드백을 통한 제품 사용성 평가 가능
- 기존 제품 설계 과정보다 더 빠르고 비용 효율적인 접근 방식으로 전환 가능
- 가상 환경에 motion capture system과 3D DHM을 실시간 연동하여 사용자의 움직임을 사실적으로 시뮬레이션
⇒ 사용자가 더욱 몰입감을 느낄 수 있는 반응형 환경 조성

제품 크기 조절 및 접근성 평가 가상 환경



가상 환경에 사용자 움직임 실시간 연동한 3D DHM 구현

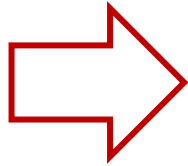


실제 세탁기 사이즈와 비교

- 실제 세탁기 사이즈가 XR 기반 사이즈의 허용범위 안에 포함
- 실제 세탁기 설계 사용성 평가 검증

실제 세탁기 사이즈 (LG, Samsung)

제품명	너비(mm)	높이(mm)	깊이(mm)
T19MX8	632	1040	670
T25PX9	690	1070	730
T19MX8A	632	1040	670
T25PX9A	690	1070	730
T19DX8	632	1040	670
T19MX8B	632	1040	670
TR16MK2	632	1020	670
T17DX3A	632	1018	670
T17MX3	632	1018	670
T19MX7	632	1040	670
T18MX7A	632	1040	670
T19DX7	632	1040	670
T17WX3	632	1018	670
T18WX7	632	1040	670
T19DX7A	632	1040	670
WA19CG6745BW	637	1093	701
WA80F19E8L	637	1093	701
WA80F19S8W	637	1093	701
WA80F19SKB	637	1093	701
WA10CG5441BW	610	1059	675
WA14CG6441BY	637	1068	701
WA16CG6441BY	637	1093	701



	실제 세탁기
너비	610 ~ 690
높이	1018 ~ 1093
깊이	670 ~ 730

XR 기반 사이즈 측정 범위

	허용 범위	최적 치수
너비	578.79 ~ 942.42	714.5 ~ 816.5
높이	805.85 ~ 1027.80	909.0 ~ 973.5
깊이	578.79 ~ 942.42	714.5 ~ 816.5

추후 연구 방향

□ Haptic 장비와의 연동으로 사용자에게 현실감을 제공하기 위한 물리적 피드백 구현

- ✓ Haptic glove(Prime 3 Haptic XR, MANUS, The Netherlands)와 가상 사용성 평가 시스템 및 다른 장비와 연동하여 정교한 상호작용 제공
- ✓ Haptic suit와의 연동을 통해 사용자와 제품 간 상호작용 시 사용자의 움직임과 자세에 따라 물리적 피드백 제공

가상 환경에서 haptic glove 활용 예시



Haptic suit 착용 예시



경청해 주셔서 감사합니다!



This research was supported by POSCO Holdings and the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korean government (MSIT) (No. IITP-2024-RS-2024-00441244, Global Data Convergence Leader Training Program).