

# 인간공학적 설계 및 평가를 위한 Digital Human Modeling 기술 동향 및 개발 Needs

(Trends and R&D Needs of Digital Human Modeling Technology  
for Ergonomic Product Design and Evaluation)



유 희 천

포항공과대학교  
산업경영공학과  
인간공학설계기술연구실

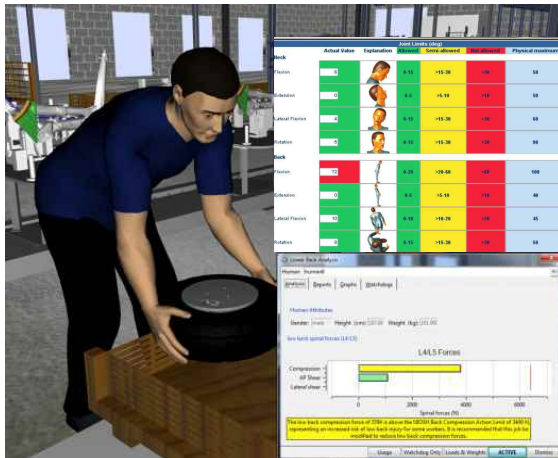
## Contents

- Introduction
  - ✓ 고찰 배경
  - ✓ 고찰 목적
- DHM 기술 동향 및 개발 Needs
  - ✓ XR 기반 DHM
  - ✓ AI 기반 DHM
  - ✓ Digital Twin 기반 DHM
- Summary
- Q & A

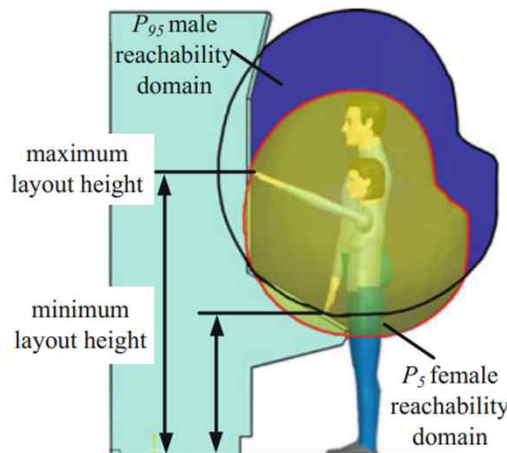
# Digital Human Modeling (DHM) (1/2)

- DHM은 인간의 인체측정학적, 생체역학적, 생리적, 그리고 행동적 특성을 수치화하여 컴퓨터 환경에서 가상의 인간(digital human, digital avatar, virtual human, dynamic persona)으로 재현하는 기술 (Ji et al., 2023; Silva et al., 2022; Wang and Lau, 2013)
  - 제품 및 시스템 설계 과정에서 인간공학적 문제를 예측하고 개선하는데 중요한 역할
  - 개발 초기 단계에서 잠재적인 인간공학적 설계 오류를 줄이고 보다 안전하고 효율적이며 사용자 친화적인 제품 개발

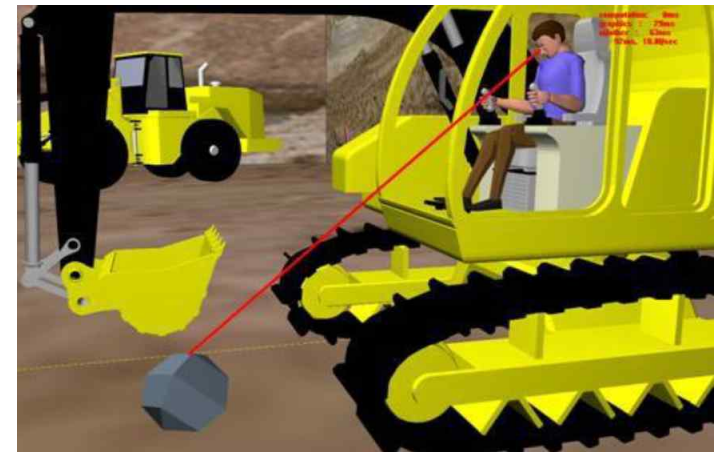
자세 부하(Postural Load) 평가  
(Bubb et al., 2019; Högberg et al., 2007)



도달성(Reachability) 평가  
(Yu et al., 2018)



가시성(Visibility) 평가  
(Akyeampong et al., 2013)

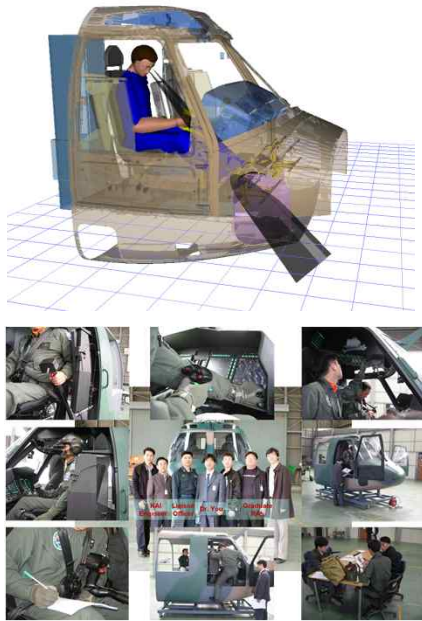


# Digital Human Modeling (DHM) (2/2)

□ DHM은 인간의 인체측정학적, 생체역학적, 생리적, 그리고 행동적 특성을 수치화하여 컴퓨터 환경에서 가상의 인간으로 재현하는 기술 (Ji et al., 2023; Silva et al., 2022; Wang and Lau, 2013)

- 디지털 휴먼 모델을 활용하여 가상 환경에서 인간의 행동 및 반응을 예측하여, 물리적인 시제품 없이 제품·시스템 설계안에 대한 평가 시간과 개발 비용을 감소하며, 다양한 설계안(what-if design scenarios)의 평가를 통해 최적 설계안을 도출하는데 유용한 도구로 활용

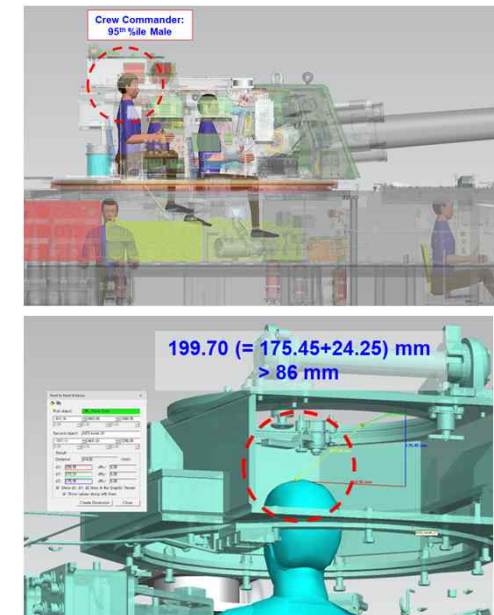
수리온 조종공간 설계  
(2006 ~ 2007)



보라매 조종공간 설계  
(2016 ~ 2018)



AS9/AS10 자주포 운용공간 평가  
(2022 ~ 2023)



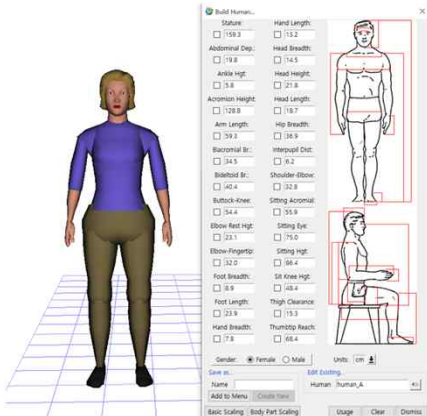
# Conventional DHM Technology 한계

- ❑ **재현 정확성 및 신뢰성 (Accuracy & Reliability):** 인간의 인체 측정학적, 생체역학적, 행동학적 특성들의 정확한 모사 한계 ⇒ 자연스럽게 못한 사용 자세 및 동작
- ❑ **실제 사용자 경험과의 연동성 (Connectivity with Real-World UX):** 실제 제품·시스템과 상호작용하는 사용자의 인체 형상, 생리적 반응, 행동 양태 정보와 실시간(real-time data) 연동 미비 ⇒ 사용자의 신체적, 인지적, 감성적 상태에 대한 실시간 파악(real-time monitoring) 미흡
- ❑ **결과의 타당성 (Validity):** “가상 환경에서의 DHM 기술을 적용한 인간공학적 설계 및 평가 결과 vs. 실제 사용 환경에서의 물리적 시제품을 사용한 인간공학적 설계 및 평가 결과” ⇒ 유사성(선호 방향성, 선호 변별 정도)에 대한 후속 검증 필요

## Real human에 대한 digital human의 재현성 한계

Table 9 Boundary manikin critical measurements

Dimension	Applicable FECCF	Mankin				Average male			
		A	B	C	D				
M09 Eye Height Sitting (mm)	EM122	750	841	858	750	831	770	820	
M10 Acromion Height Sitting (mm)	EM122	559	636.5	644	562	636	595	609	
M11 Elbow Rest Height (mm)		231.4	218.5	221	192	230	247	248	
M12 Thigh Clearance (mm)	EM127	153	172	162	179	196	153	187	
M13 Knee Height Sitting (mm)	EM128	484	571	564	561	581	534	566	
M14 Popliteal Height (mm)	EM129	381	473	455	454	471	438	454	
M17 Biacromial Breadth (mm)		345	440	443	420	421	390	392	
M18 Bifurcated Breadth (mm)	EM125	404	517	516	495	504	462	469.5	
M19 Chest Breadth (mm)	EM108	299	331	292	330	336.9	280	333.5	
M20 Chest Depth (mm)	EM109	237	260	244	290	236	221		
M21 Bicondylar Breadth (mm)		254	297	297	281	315	267	308.5	
M22 Forearm-Forearm Breadth (mm)	EM124	411	614	542	545	528	545.5	525	
M23 Abdominal Extension Depth Sitting (mm)	EM125	198	236	235	240	301	216	258.5	
M24 Hip Breadth Sitting (mm)	EM126	369	386	394	345	415	341	372.5	
M25 Buttock-Knee Length (mm)	EM130	543.5	645	608	610	669	571	622	
M26 Buttock-Popliteal Length (mm)	EM131	452.5	524	509	495	568	464	503	
M27 Thumbtip Reach (mm)		484	598	560	750	842.5	742	809	
M28 Stature (mm)	EM101	1593	1884	2	1808	1760	1843	1684	1800
M29 Sitting Height (mm)	EM121	864	892.7	976	913	956	896.5	910	
M40 Weight (kg)	EM102	58	85.1	83.5	80.4	95.1	69.4	83.8	
M50 Back Width (mm)		269.3	410.6	373.1	379.4	370.2	354	384.6	
M51 Back Length (mm)		427.6	620.3	466.5	430.2	495.4	448.3	472.7	

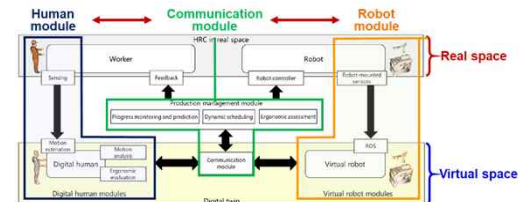
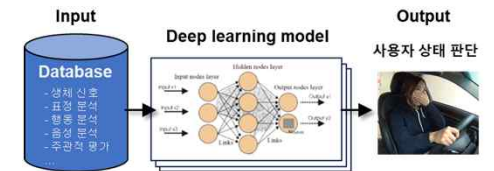
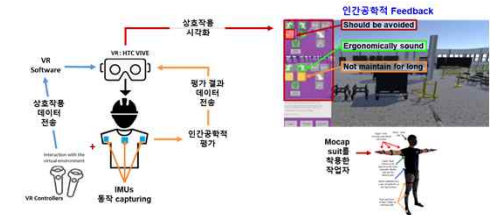


## 어색한 작업 자세 시뮬레이션 (Lamkull et al., 2020)



## 제품·시스템의 **인간공학적 설계 및 평가**에서 **DHM 기술 개발 추세 및 연구개발 Needs 고찰**

- **XR 기술과의 융합**: 몰입형 환경을 조성하고, XR 환경 상의 설계 대상 제품·시스템·사용자와 **실제 환경에서의 사용자의 행동과 연동**하여 **인간공학적 평가**를 수행하고 **최적 설계안 도출**
  
- **AI 기술과의 융합**: 물리적 측정 정보로부터 **AI 기법을 사용하여** 제품·시스템의 인간공학적 설계와 평가를 위한 **신체적, 인지적, 감성적 특성 추출 및 상태 예측**
  
- **Digital Twin 기술과의 융합**: 실제 **인간과 제품·시스템의 디지털 복제본을 생성**하여 **실시간으로 연동**하는 기술로서 인간과 제품·시스템의 **행동 모니터링, 예측, 위험 분석**을 통해 생산성, 사용성, 안전성 측면의 **최적 설계 및 평가**

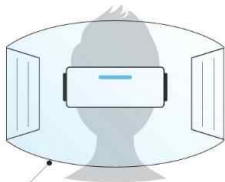
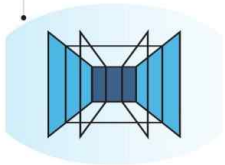


# XR & Applications

- XR(eXtended Reality)는 가상현실(VR), 증강현실(AR), 혼합현실(MR)을 포함하는 몰입형 디지털 경험 기술로서 엔터테인먼트, 교육, 의료, 산업 등 다양한 분야에서 몰입형 경험 제공, 시뮬레이션, 원격 협업, 제품 디자인 등에 활용

## Virtual Reality

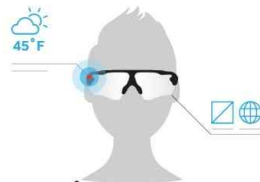
Completely digital environment



Fully enclosed, synthetic experience with no sense of the real world.

## Augmented Reality

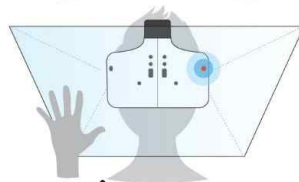
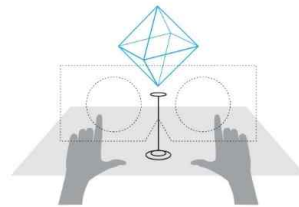
Real world with digital information overlay



Real world remains central to the experience, enhanced by virtual details.

## Mixed Reality

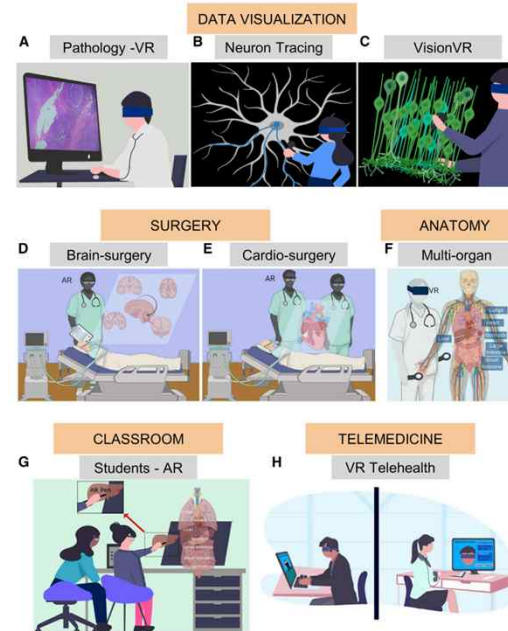
Real and the virtual are intertwined



Interaction with and manipulation of both the physical and virtual environment.

## 의학 분야의 XR 응용

(Lamkull et al., 2020)



(A) Digital whole-slide visualization and navigation using an HMD in VR and a web-based browser for whole-slide imaging on a desktop.<sup>33</sup>

(B) Visualization of a user demonstrating a neuron tracing tool. For example, TeraVR can visualize whole-brain imaging data in VR and reconstruct neuron morphology at different regions of interest (ROIs).<sup>34</sup>

(C) Visualization and navigation of a 3D scanning electron microscope (SEM) image using VisionVR software by arivis.<sup>35</sup>

(D and E) Physicians can use AR to rotate certain anatomy during brain surgery and cardiac surgery to get full visualization to better perform, plan, and explain their surgeries.

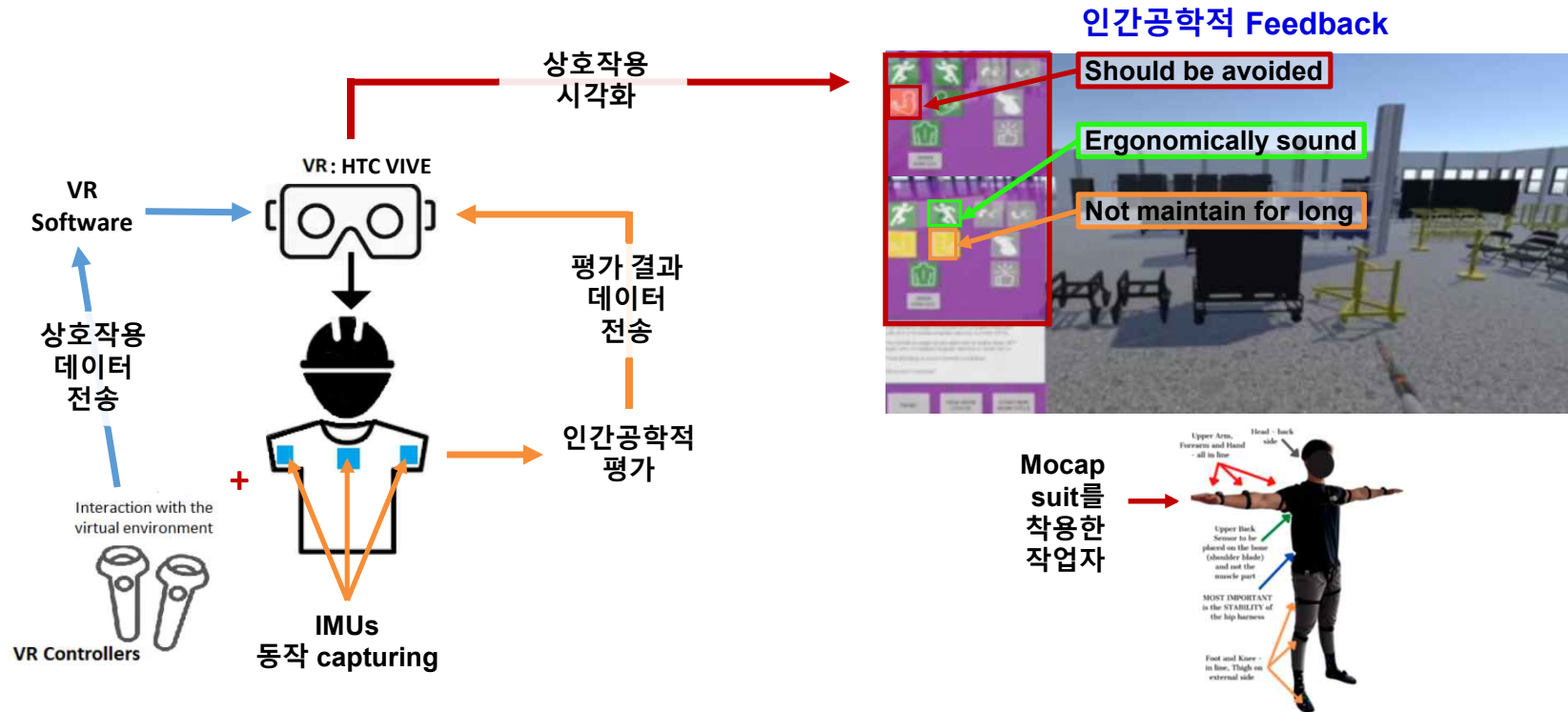
(F) Studying anatomy using VR can help physicians visualize and explain medical processes to other health professionals. A medical student visualizes multiple organs and organ systems in VR.

(G) AR pens can be used to get a 3D image to help students better visualize and study concepts.

(H) VR can be used for clinical assessments where the doctor and affected individual can enter a virtual world to receive a checkup.


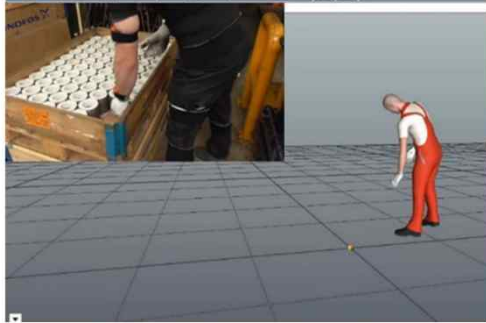
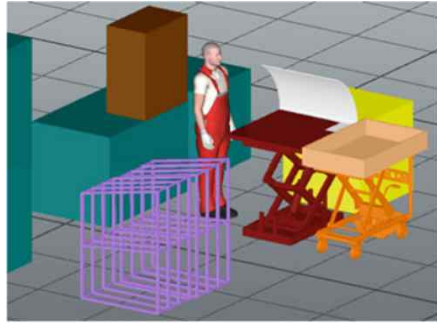
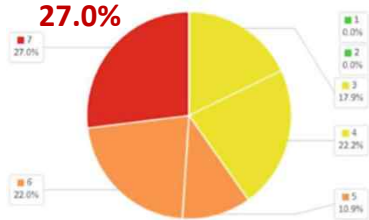
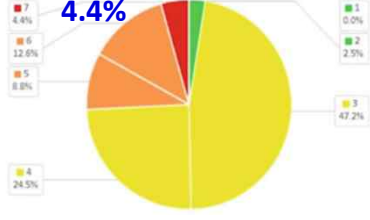
# XR 기반 DHM

- 몰입형 XR(VR/AR/MR) 환경을 조성하고, **XR 환경 상의 설계 대상 제품·시스템·사용자와 실제 환경에서의 사용자의 행동(동작, 힘)을 연동**하여 **인간공학적 평가**를 수행하고 **최적 설계안 도출**



# XR 기반 DHM: 인간공학적 설계 및 평가 적용 사례 (1/2)

- Babicsné-Horváth et al.(2022)는 전기모터 고정부(stator) 제조 작업장에 있어서 가상 환경 상의 개선된 작업장을 motion capture system을 활용하여 작업수행도 및 작업부하 개선 효과 평가 수행

	Original	Redesigned
<p>Xsens motion capture suit</p> 		
Workflow duration	9 min	3 min.
ISO 11226	103 incorrect postures	19 incorrect postures
EN1005-4	39 incorrect postures	26 incorrect postures
RULA		

ISO 11226: Ergonomics — Evaluation of static working postures

EN1005-4: Safety of machinery - Human physical performance - Part 4: Evaluation of working postures and movements in relation to machinery

# XR 기반 DHM: 인간공학적 설계 및 평가 적용 사례 (2/2)

- Pelaez-Restrepo et al.(2021)은 **3D modeling S/W**를 사용하여 헬리콥터 승객실 구현 후 가상 환경에서 전문가가 승객실을 체험한 후 승객실 설계에 대한 피드백 제공
- Ahmed et al.(2019)는 가상 환경 상의 Boeing 767 조종실 설계안에 대해 화재 발생 시 실제 조종사의 행동 양태를 분석

헬리콥터 승객실 3D modeling + 3D 모델과의 상호작용 설정

가상 3D 모델을 터치하면 모델의 윤곽선이 노란색으로 highlight

Boeing 767 Cockpit에서 화재 발생 시 조종사 행동 특성 분석

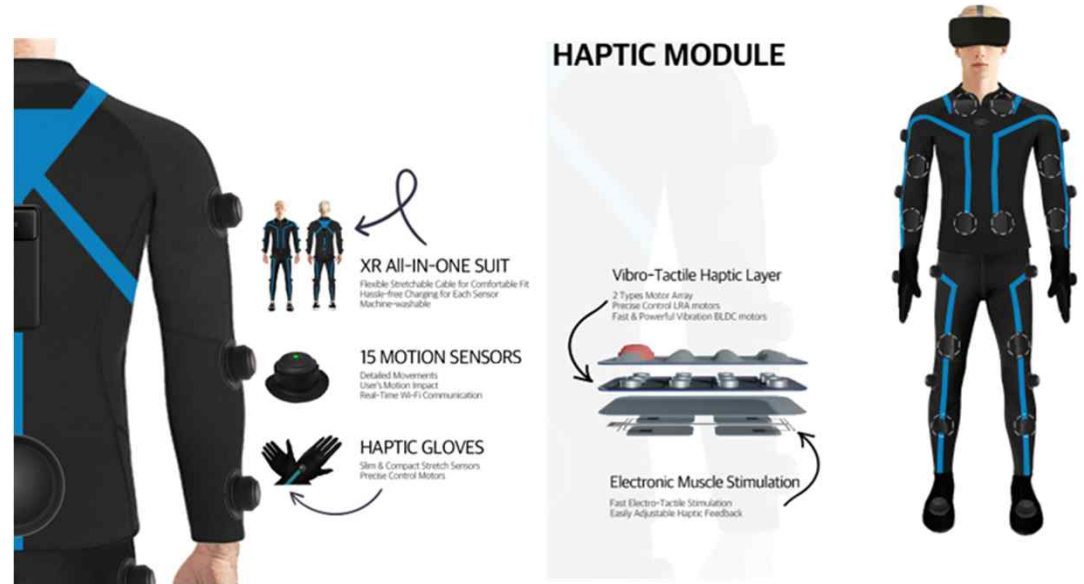
# XR 기반 DHM: R&D Needs

- **Digital Human 충실성(Fidelity):** 고품질성·고기능성 제품에 대한 인간공학적 설계 및 평가 시, **사용자와 형상 및 크기가 유사한 3D avatar**를 생성하여 **사용자와 제품과의 상호작용에 대한 정확한 모사 및 분석** 필요
- **상호작용 실제감(Sense of Reality):** 가상 환경에서의 제품 사용에 대한 실제감을 주기 위해, 제품 사용 동작 뿐만 아니라 제품과의 **신체적 접촉 및 힘 사용에 대한 햅틱 피드백** 필요

## 현실 사용자의 Digital Twin

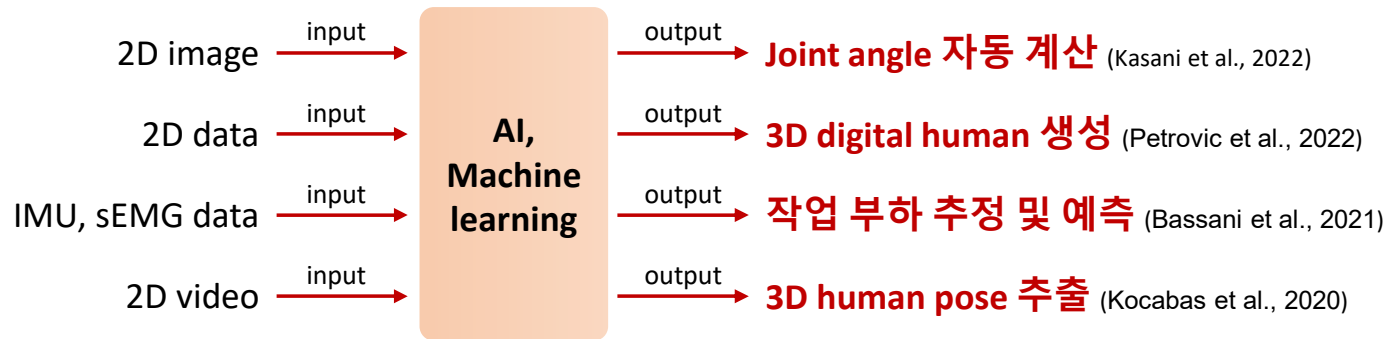


## Motion/Haptic Suit

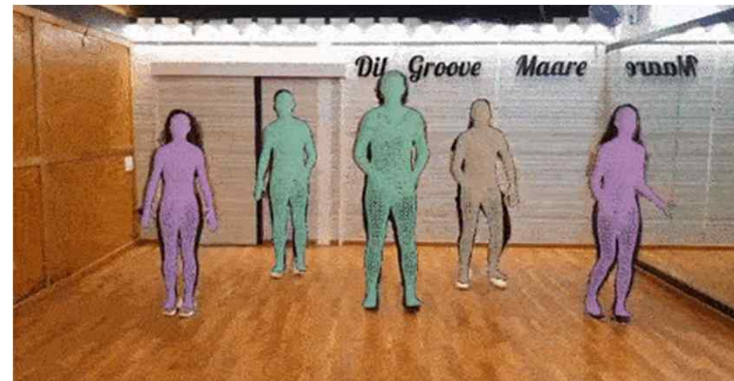
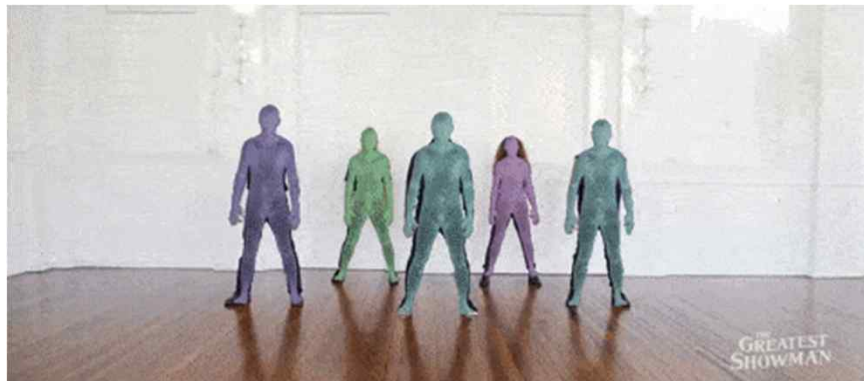


# AI 기반 DHM

- 물리적 측정 정보로부터 AI 기법을 사용하여 제품·시스템의 인간공학적 설계와 평가를 위한 신체적, 인지적, 감성적 특성 추출 및 상태 예측



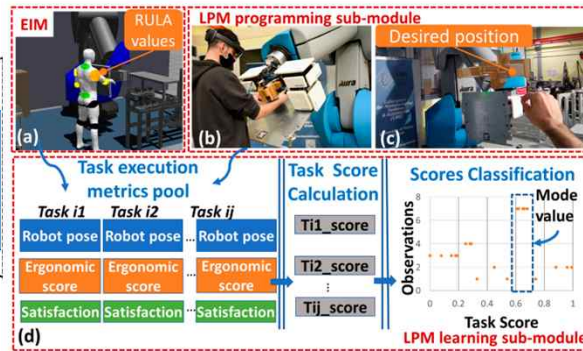
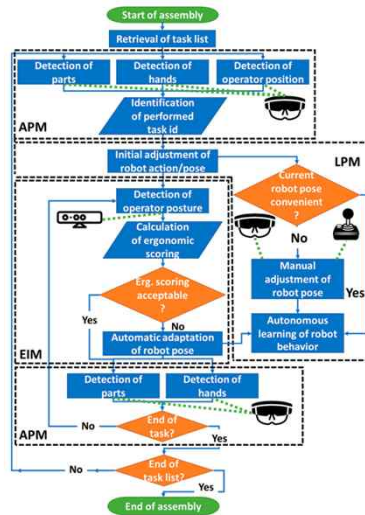
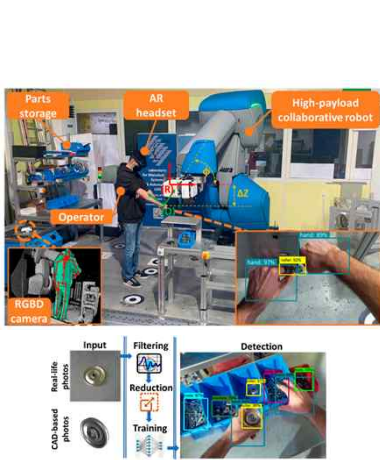
Machine learning 기술로 video에서 3D human pose 추출  
(Kocabas et al., 2020)



# AI 기반 DHM: 인간공학적 설계 및 평가 적용 사례 (1/2)

- Dimitropoulos et al.(2021)는 **협동로봇(Cobot)**을 사용하는 **조립 생산 시스템**에서 일련의 작업 수행 시 **CNN**을 사용하여 **작업자의 손과 자세** 그리고 **조립될 부품을 인지**한 후 **DHM과 연동하여 작업자의 자세 부하를 최소화**하도록 **로봇의 부품 공급 위치를 결정**  
 ⇒ **작업 수행 cycle time**과 더불어 **작업 부하를 감소**시킴

## AI 기반 Human-Robot Collaborative Assembly 설계 및 평가 (Dimitropoulos et al., 2021)



	Cycle Time (s)		Ergonomics Score (Max RULA Value) (Lower Is Better)	
	Before	After	Before	After
Operator 1	137	140	2/6	2/6
Operator 2	186	175	2/6	3/6
Operator 3	154	141	3/6	2/6
Operator 4	192	177	4/6	2/6
Operator 5	169	155	3/6	2/6

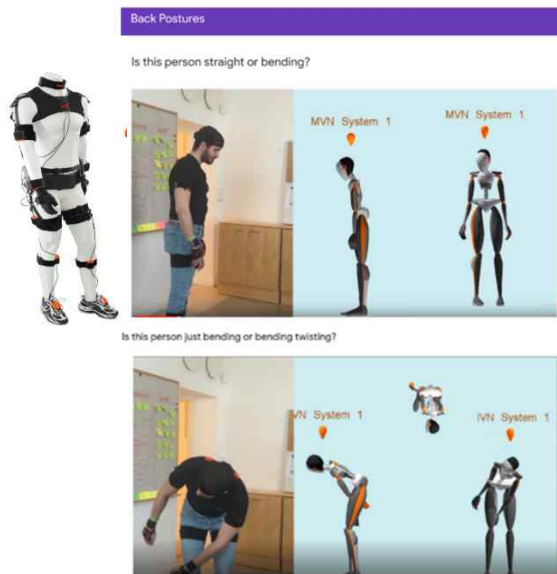
- EIM: Ergonomic Improvement Module
- LPM: Learning & Programming Module

- Before(without AI support): 고정된 robot 위치에서 작업자 공정 수행
- After(with AI support): 작업자 수요에 따라 robot 위치 자동 조절

# AI 기반 DHM: 인간공학적 설계 및 평가 적용 사례 (2/2)

- Igelmo et al.(2020)은 IMU 기반 **Xsens MOCAP system**을 사용하여 측정된 정보에 AI 기법들을 적용하여 **OWAS 자세 평가 시스템** 기반 전문가들의 주관적 평가를 추정 시 평균 정확도를 95% 이상 얻을 수 있음을 보고

## 객관적 MOCAP 시스템



## OWAS 주관적 평가 시스템 (Ovako Working Posture Assessment System)

Back			Legs		
Straight		1	Sitting		1
Bent		2	Standing on both leg straight		2
Twisted		3	Standing on one straight leg		3
Bent & twisted		4	Standing on both knees bent		4
Arms			Standing on one knee bent		5
Both below shoulder		1	Kneeling on one or both leg		6
One above shoulder		2	Walking or moving		7
Both above shoulder		3			

## AI 모델별 성능

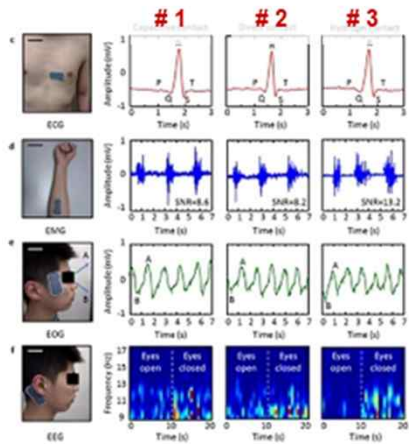
Model	Back OWAS accuracy (%)	Upper limbs OWAS accuracy (%)	Legs OWAS accuracy (%)	Avg. (%)
Fine tree	91.8	98.1	97.1	95.7
Medium tree	91.8	98.1	97.1	95.7
Coarse tree	85.7	98.1	97.1	95.6
Fine KNN	85.4	95.2	97.1	92.6
Medium KNN	90.7	98.1	97.1	95.3
Coarse KNN	79.3	55.2	97.1	77.2
Cosine KNN	92.1	98.1	97.1	95.8
Cubic KNN	90.7	98.1	97.1	95.3
Weighted KNN	92.9	98.1	97.1	96.0
Convolutional Neural Network	99.9	99.9	99.9	99.9

(Note) CNN은 과적합(overfitting)되어 부정확한 결과 야기 가능성 높음

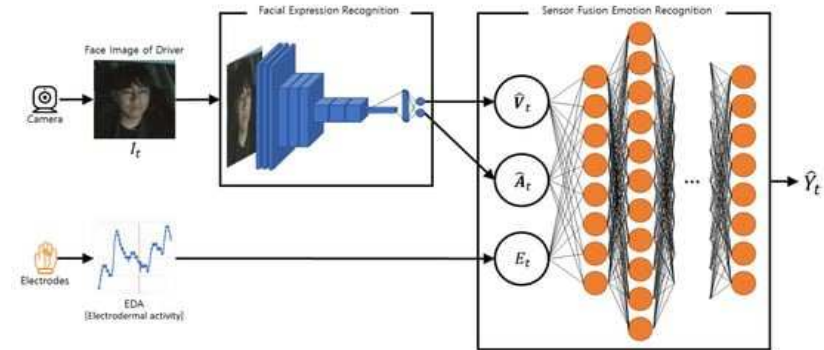
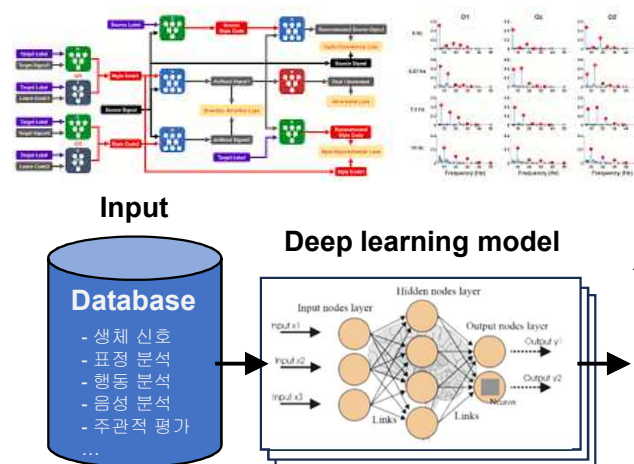
# AI 기반 DHM: R&D Needs

- ❑ **타당한 실시간 데이터**(Valid Real-Time Data): **정확**하고 **신뢰성** 있는 **타당한 고품질의 데이터**(input, output)를 **실시간적으로 확보**하는 기술 개발 필요
- ❑ **맞춤형 모델 및 교차검증**(Personalization & Multi-Center Cross-Validation): **개인별, 상태별**(신체적·인지적·감성적 상태; 학습 상태; 건강 상태) 상이한 인간의 인체측정학적, 생체역학적, 생리적, 행동 양태 특성을 반영하는 **지능적·진화형 특성을 가진 AI 모델** 개발 및 **다기관 교차 검증** 필요

## 멀티모달 실시간 데이터



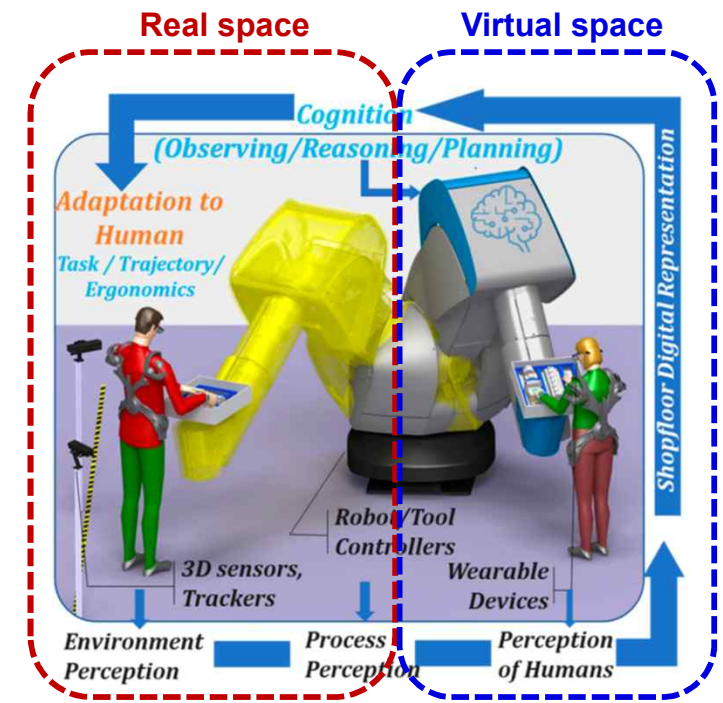
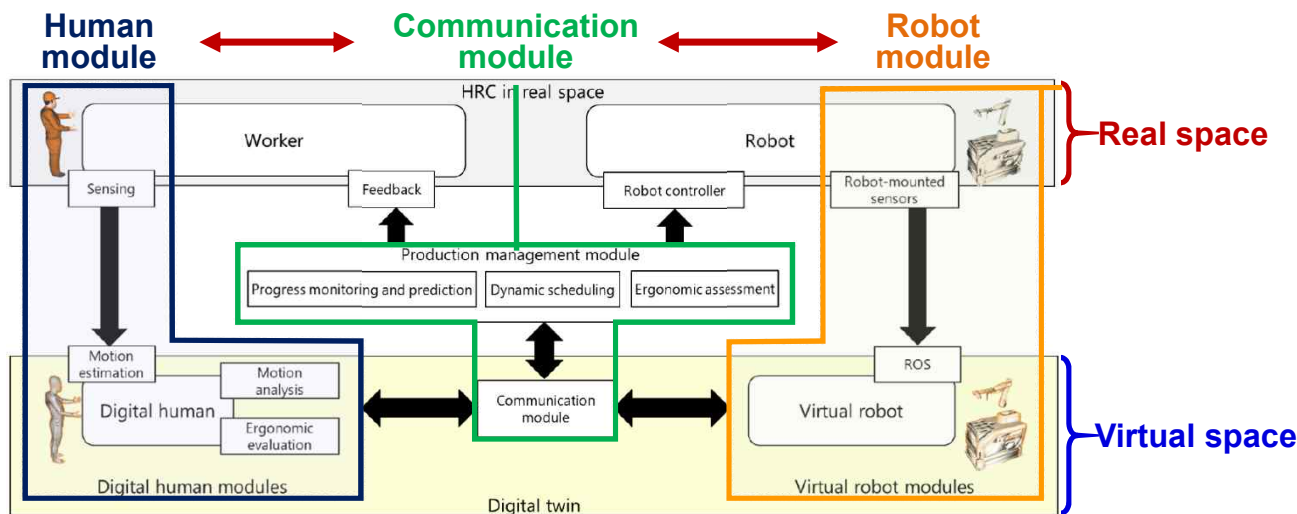
## 개인 맞춤형 상태 판별 모델 개발



# Digital Twin 기반 DHM

- Digital Twin은 실제 인간과 제품·시스템의 디지털 복제본을 생성하여 실시간으로 연동하는 기술로서 인간과 제품·시스템의 행동 모니터링, 예측, 위험 분석을 통해 생산성, 사용성, 안전성 측면의 최적 설계 및 평가

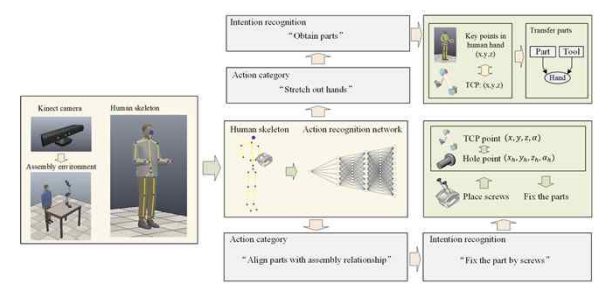
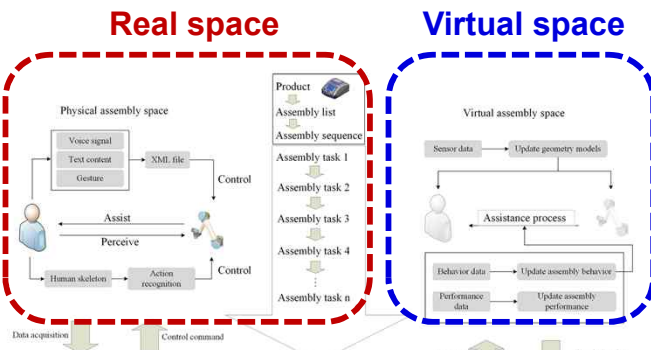
Human-Robot Collaborative System의 Digital Twin Framework  
(Maruyama et al., 2021)



# DT 기반 DHM: 인간공학적 설계 및 평가 적용 사례 (1/2)

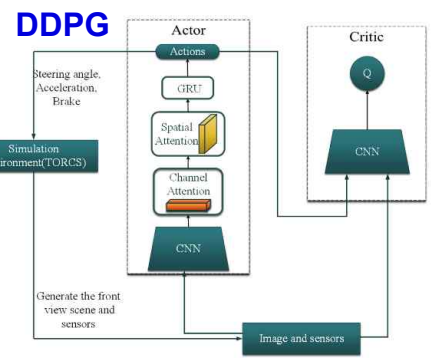
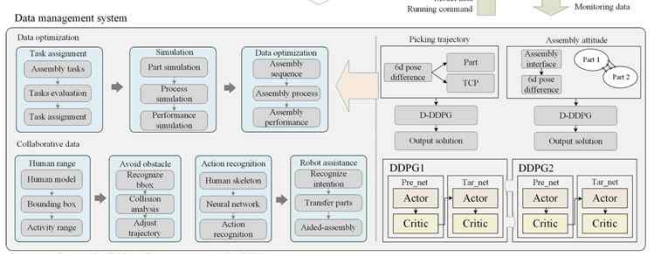
□ Lv et al.(2021)는 **HRC assembly system**에서 **digital twin** 기반 DHM 기술을 적용하여 **작업 효율성, 안전성, 작업 정확도를 향상**시킬 수 있음을 보고

- **DDPG(Deep Deterministic Policy Gradient)**: 연속적인 동적 시스템을 제어하는 강화 학습 알고리즘으로서 actor 네트워크는 현재 상태에서 최적의 행동을 결정하며, critic 네트워크는 해당 행동의 가치를 평가.
- **D-DDPG(Double-DDPG)**: DDPG1(최적 작업자 동작 순서) + DDPG2(최적 로봇 궤적)



부품 선택 수행도

Control method	Picking time (s)	Collision rate	Picking accuracy ( $\Delta d$ )
Pre-programming	25.645	5.208 %	2.447 mm
DDPG	16.354 ↓ 44% 감소	1.563 % ↓ 90% 감소	1.875 mm ↓ 63% 감소
D-DDPG	14.832	0.521%	0.895 mm

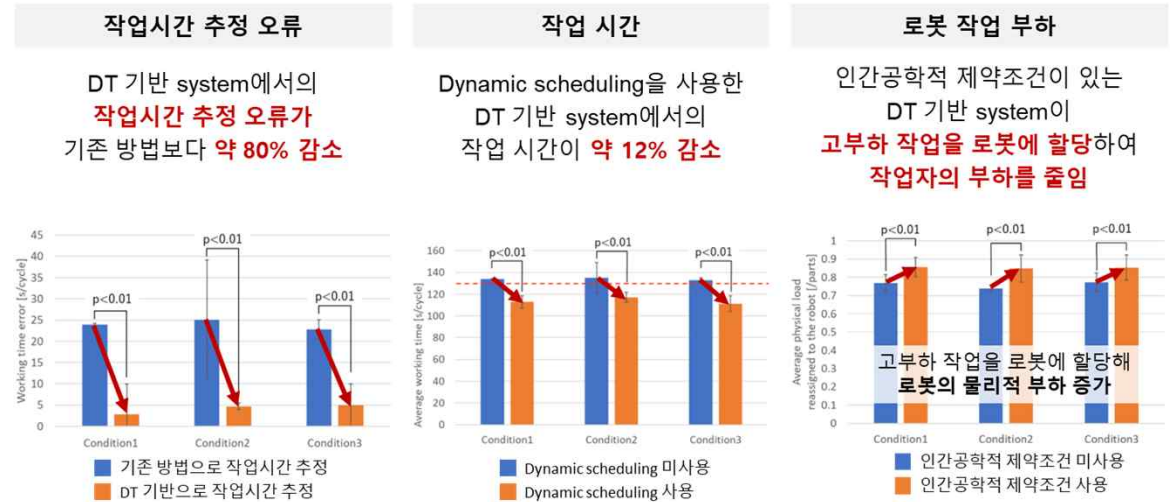
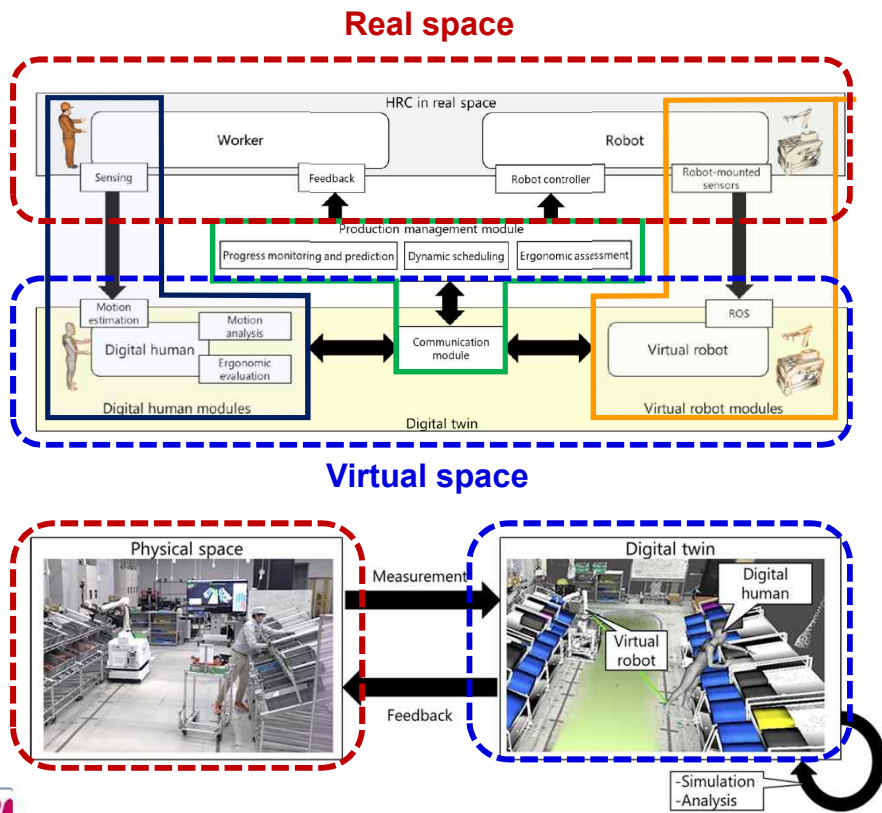


조립 작업 수행도

Control method	Assembly time (s)	Collision rate	Assembly accuracy ( $\Delta d$ )
Pre-programming	24.845	5.128 %	1.884 mm
DDPG	14.564 ↓ 50% 감소	1.538 % ↓ 90% 감소	0.964 mm ↓ 69% 감소
D-DDPG	12.453	0.513 %	0.587 mm

# DT 기반 DHM: 인간공학적 설계 및 평가 적용 사례 (2/2)

- Maruyama et al.(2021)은 **HRC(human-robot collaboration) 생산 현장에서 digital twin 기반 DHM 기술 적용:**
  - 작업 진행 상태 및 작업자의 행동·작업부하 상태를 실시간으로 모니터링한 정보를 활용 ⇒ 가상 환경에서 시뮬레이션하여 작업자-로봇 간의 작업 배분과 작업 진행 일정을 역동적으로 조정
  - 작업시간과 작업오류를 감소시킬 수 있음을 실증

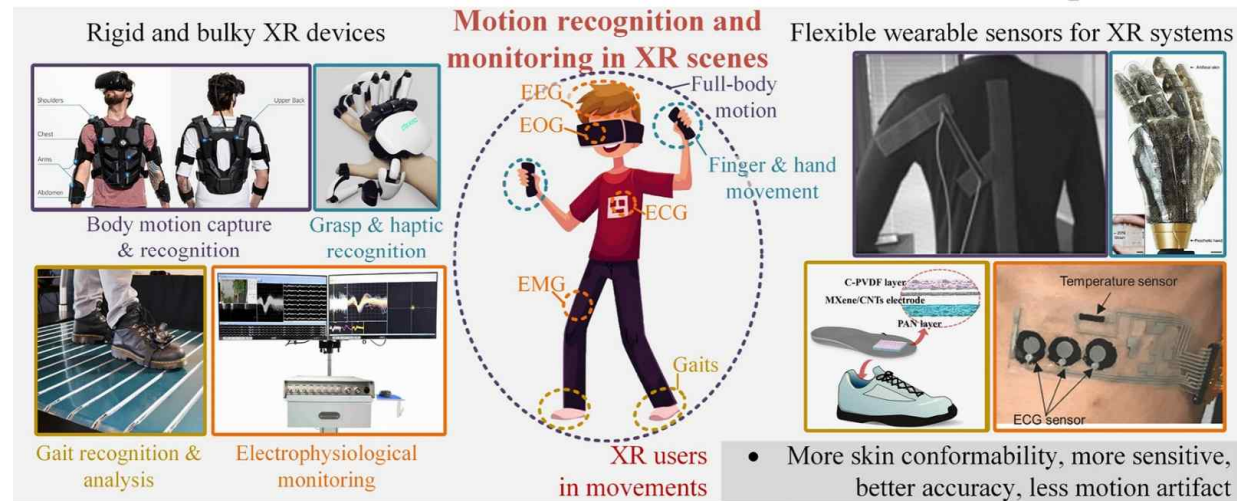
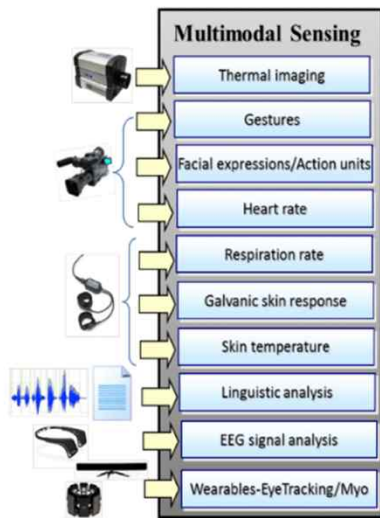


# DT 기반 DHM: R&D Needs

- 멀티모달 연동 (Multimodal Connectivity):** 사용자의 동작 뿐만 아니라 다양한 역학적·생리적 반응, 얼굴 표정, 안구 움직임, 작업 수행 정보들과 연계하여 사용자의 신체적, 인지적, 감성적 상태에 대한 통합 모니터링 및 시뮬레이션 필요
- 맞춤형 시스템 (Customization):** 개인별, 상태별(신체적·인지적·감성적 상태; 학습 상태; 건강 상태) 상이한 인간의 특성과 적용 환경 특성을 반영하는 Digital Twin 기술 개발 필요

## Multimodal sensors

(Qiu et al., 2024)



# Summary: DHM 기술 R&D Needs

부문	연구개발 Needs
XR 기반 DHM	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ <b>Digital Human 충실성(Fidelity)</b>: 고품질·고기능성 제품에 대한 인간공학적 설계 및 평가 시, 사용자와 형상 및 크기가 유사한 3D avatar를 생성하여 사용자와 제품과의 상호작용에 대한 정확한 모사 및 분석 필요</li> <li>❑ <b>상호작용 실제감(Sense of Reality)</b>: 가상 환경에서의 제품 사용에 대한 실제감을 주기 위해, 제품 사용 동작 뿐만 아니라 제품과의 신체적 접촉 및 힘 사용에 대한 햅틱 피드백 필요</li> </ul>
AI 기반 DHM	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ <b>타당한 실시간 데이터(Valid Real-Time Data)</b>: 정확하고 신뢰성 있는 타당한 고품질의 데이터(input, output)를 실시간적으로 확보하는 기술 개발 필요</li> <li>❑ <b>맞춤형 모델 및 교차검증(Personalization &amp; Multi-Center Cross-Validation)</b>: 개인별, 상태별 (신체적·인지적·감성적 상태; 학습 상태; 건강 상태) 상이한 인간의 인체측정학적, 생체역학적, 생리적, 행동 양태 특성을 반영하는 지능적·진화형 특성을 가진 AI 모델 개발 및 다기관 교차 검증 필요</li> </ul>
DT 기반 DHM	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ <b>멀티모달 연동(Multimodal Connectivity)</b>: 사용자의 동작 뿐만 아니라 다양한 역학적·생리적 반응, 얼굴 표정, 안구 움직임, 작업 수행 정보들과 연계하여 사용자의 신체적, 인지적, 감성적 상태에 대한 통합 모니터링 및 시뮬레이션 필요</li> <li>❑ <b>맞춤형 시스템(Customization)</b>: 개인별, 상태별(신체적·인지적·감성적 상태; 학습 상태; 건강 상태) 상이한 인간의 특성과 적용 환경 특성을 반영하는 Digital Twin 기술 개발 필요</li> </ul>

## 경청해 주셔서 감사합니다!

