



Dynamic Hand Scan Data의 자세, 치수 분석을 위한 Deformable Hand Model 개발

2022. 4. 28

정하영, 유희천

포항공과대학교

산업경영공학과

인간공학설계기술연구실(EDT Lab)

Contents

1. 연구 배경 및 필요성
 2. 연구 목적
 3. DHM 기반 hand scan 자세, 치수 분석
 - Deformable Hand Model (HTM) 개발
 - Digital hand scan 자세 추정
 - Deformable Hand Model Registration
 - 손 자세 및 치수 분석
 4. 토 의
-

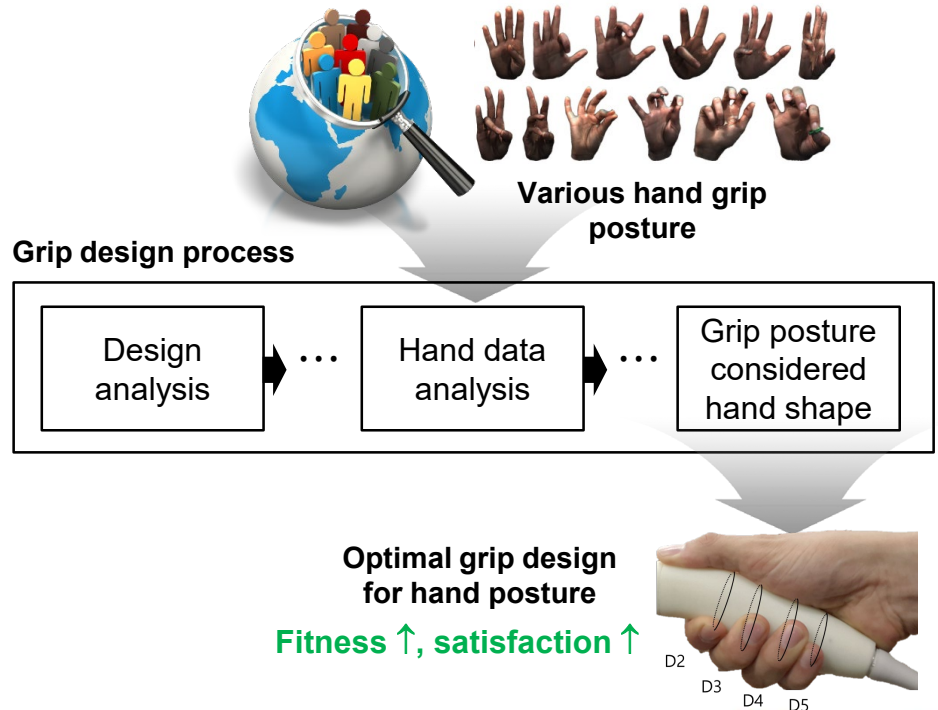
Background

- 인간은 손을 이용해 다양한 작업을 수행하며, 손으로 사용하는 도구 및 제품의 형상은 작업 능력, 사용성, 그리고 편의성에 영향을 줌
- 손 사용 제품의 인간공학적 설계를 위해서는 손 자세와 그에 따른 손 형상 및 치수 분석이 중요함

다양한 손 그립 자세 예시



손 특성을 고려한 인간공학적 제품 설계 절차



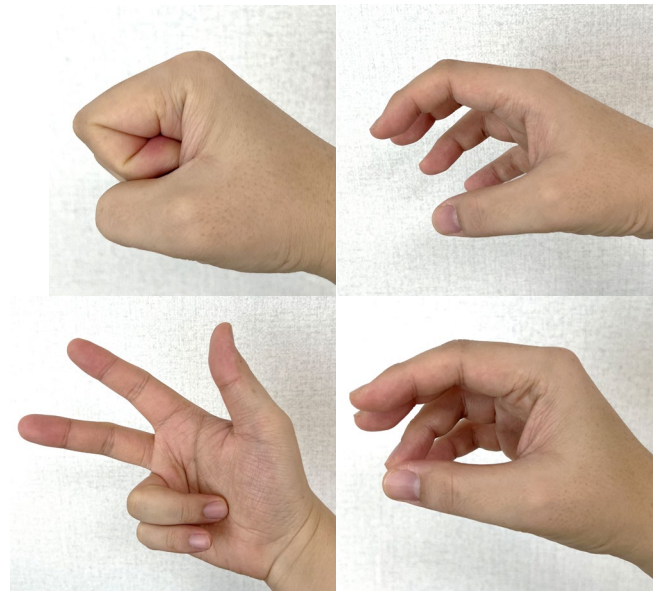
정적 손 데이터 vs. 동적 손 데이터

- **정적 손 데이터**: 편 상태의 기본 자세로 측정된 손 데이터
- **동적 손 데이터**: power grip, precision grip 등 다양한 자세로 변경된 손 데이터
 - ✓ 동적 손 데이터는 기본 자세 대비 변화된 자세에서의 손 치수, 형상 등의 특성 변화 분석에 활용됨
 - ✓ 사용자는 다양한 동적 자세에서 제품을 사용하며 자세에 따라 피부 변형 발생 및 관련 인체 측정 항목 치수가 변화됨

Static hand data



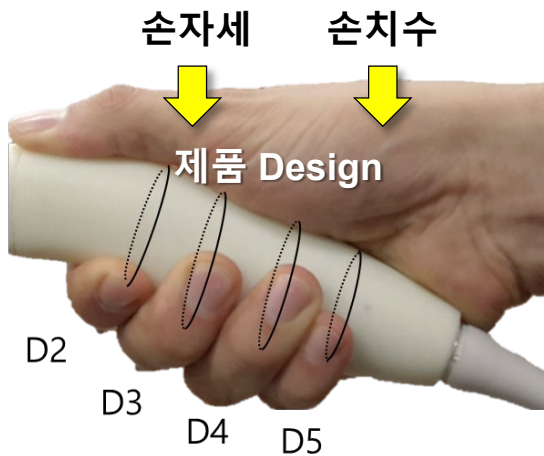
Dynamic hand data



자세
변경

동적 손 특성 분석의 중요성 (1/2)

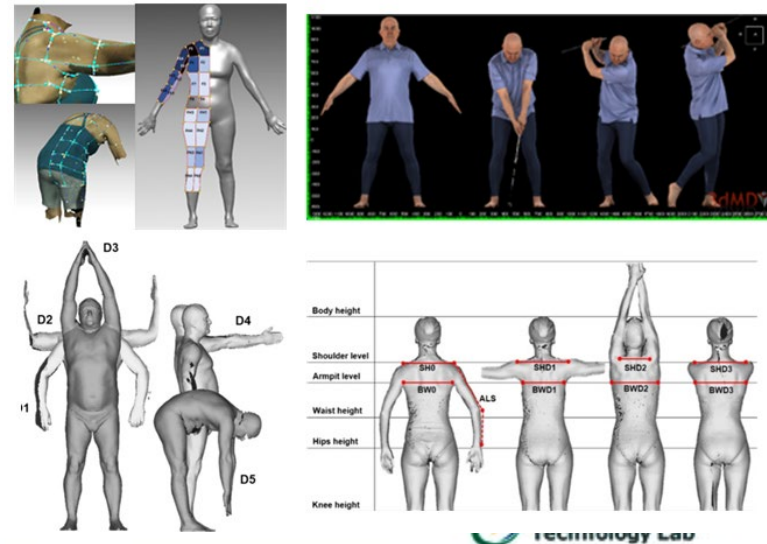
- 동작 시 형상, 치수, 자세의 손 특성 분석은 인간공학적 제품 설계의 중요 정보
 - ✓ 손 자세에 따른 형상 및 치수는 제품 그립부의 형상 및 크기를 결정하는데 중요함
 - ✓ 손 동작에 따라 자세, 형상 치수가 변하며 피부 변형도 발생하고 제품과의 interaction 방식이 달라져 사용성에 영향을 줄 수 있음
 - ✓ 동적 인체 치수 변형 분석 및 설계 적용 기술은 인간공학적 제품 설계의 핵심 기술
- 동적 손 특성 분석 기술 적용 분야
 - ✓ 착용 손 로봇, 장갑 및 의류, 도구류, 스포츠 그립, customized 핸들 등



Dynamic 3D hand scan



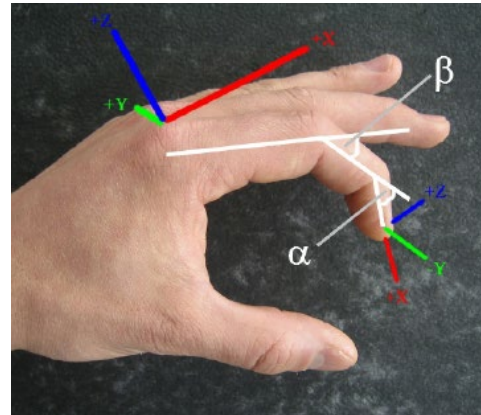
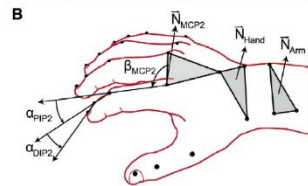
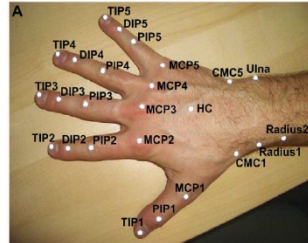
동적 인체 치수 변형 분석 기술 예시



동적 손 특성 분석의 중요성 (2/2)

- 동적 손 형상 및 자세 분석은 비침습적으로 의학적 진단에 활용 가능함
 - ✓ 재활 분야에서 손 기능의 정량적, 체계적 평가에 활용
 - ✓ 손 동작의 자연스러운 정도: 파킨슨병 진단에 활용(질병 조기 선별)
 - ✓ 손 움직임: 특정 상황 또는 감정 상태에서 보이는 피험자의 상태 파악

손의 기능 및 재활 정도의 정량적 평가 및 분석



파킨슨병 조기 진단



손 자세 분석 연구 (1/2)

- **의료영상 이미지, 동작측정시스템**을 이용한 **손 자세 분석 연구**들이 수행됨
 - ✓ **CT-scan** 기반 손 자세 분석: 관절 회전 중심(Joint Center of Rotation: J-CoR)의 정교한 탐색을 위한 연구, fixed joint (Kasa, 1879), instantaneous joint (Cao et al., 2021)
 - ✓ 다수의 **광학 카메라** 기반 손 동작, 자세 분석 시스템 (Lien, 2015; Zhang et al., 2003)

CT-scan 장비



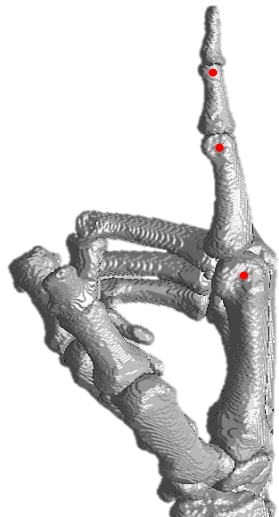
광학 카메라 기반 동작, 자세 측정 장비



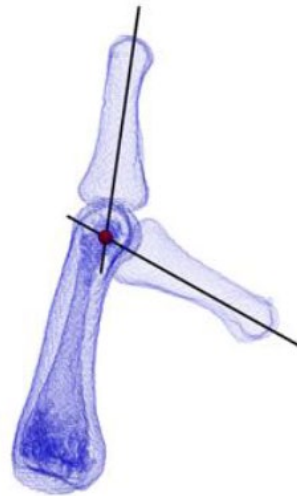
손 자세 분석 연구 (2/2)

- **의료영상 이미지, 동작측정시스템**을 이용한 **손 자세 분석 연구**들이 수행됨
 - ✓ **CT-scan 기반 손 자세 분석**: 관절 회전 중심(Joint Center of Rotation: J-CoR)의 정교한 탐색을 위한 연구, fixed joint (Kasa, 1879), instantaneous joint (Cao et al., 2021)
 - ✓ 다수의 **광학 카메라 기반 손 동작, 자세 분석 시스템** (Lien, 2015; Zhang et al., 2003)

CT-scan 기반 손 자세 분석 예시

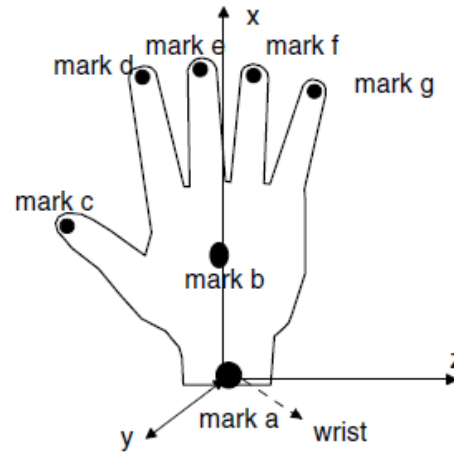


Fixed joint CoR
(Fowler et al., 2001)

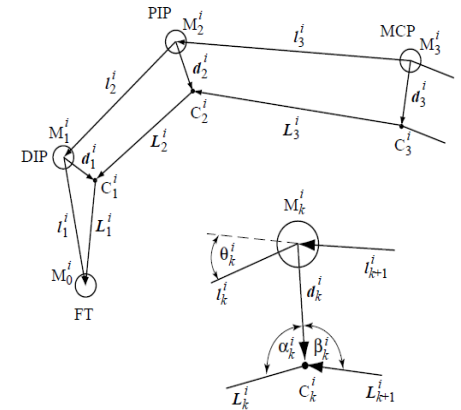


Instantaneous joint CoR
(Cao et al., 2021)

광학 카메라 기반 손 자세 분석 예시



Lien (2015)

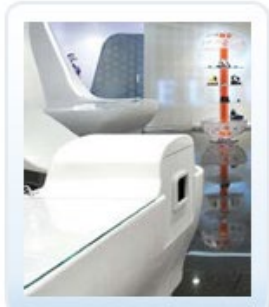


Zhang et al. (2003)

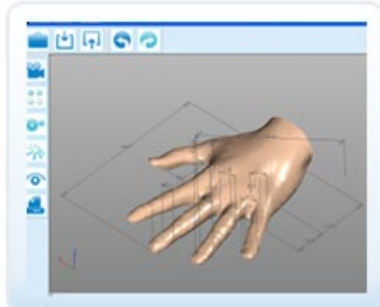
손 치수 분석 연구

- 직접 측정 및 3차원 측정을 이용한 손 치수 분석 수행
 - ✓ 한국인 인체치수 측정 사업(SizeKorea2018)
 - ✓ 북미인 인체치수 측정 사업(ANSUR, US Army Hand Anthropometry Study)

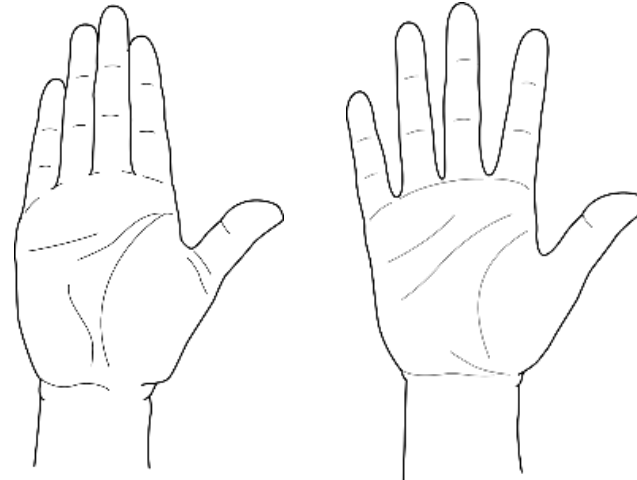
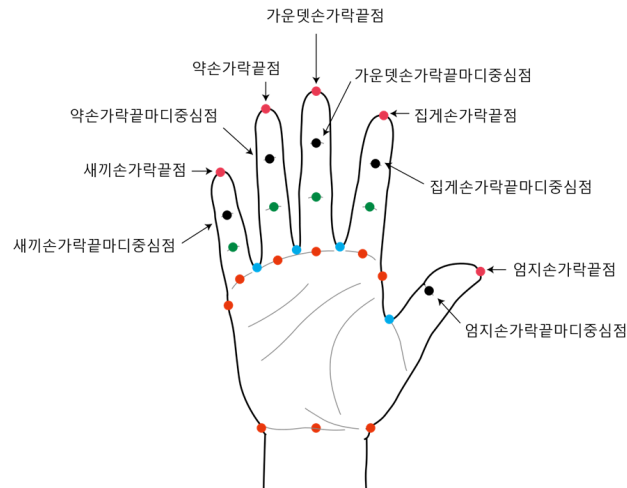
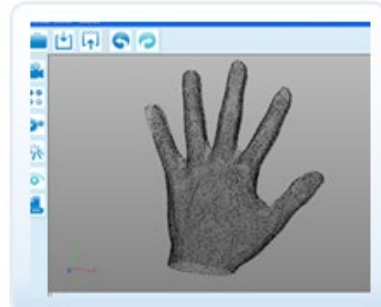
EnHAND



Parameter Extraction



Point Cloud Generation

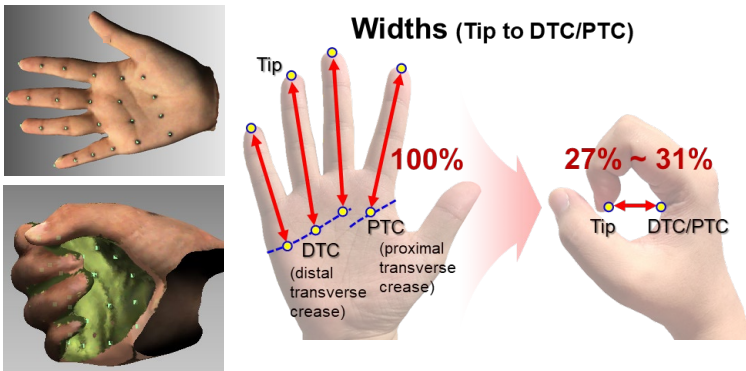


Digital 3D Hand

- 최근에는 손 자세를 비롯한 동작, 형상, 크기 등의 다양한 손 특성의 효율적 분석을 위해 **3D scanning, digital hand model** 등이 활용되고 있음
 - ✓ **3D hand scan**을 이용한 **palmar hand dimension** 측정 및 분석(Jung et al., 2019)
 - ✓ **Digital hand model**은 3D hand scan 또는 video image에 정렬되며 **real-time hand tracking, 3D reconstruction, posture analysis** 등을 수행하며 손 특성을 분석할 수 있음 (Bray et al., 2004; Tzionas et al., 2016; Oikonomidis et al., 2011; Tkach et al., 2016)

3D scanning 기반 손 특성 분석

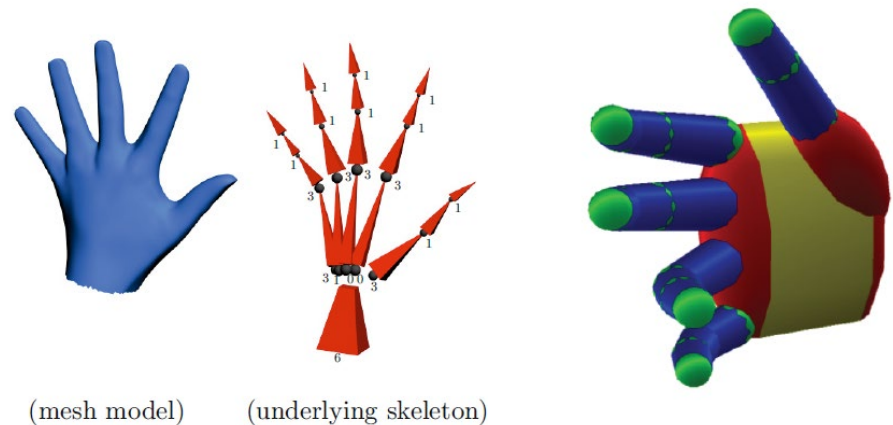
(Jung et al., 2019)



Digital hand model을 기반 손 자세 추적 및 분석

(Tzionas et al., 2016)

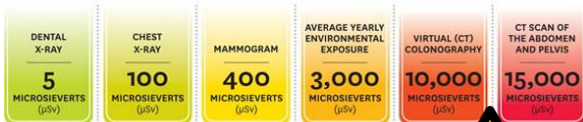
(Oikonomidis et al., 2011)



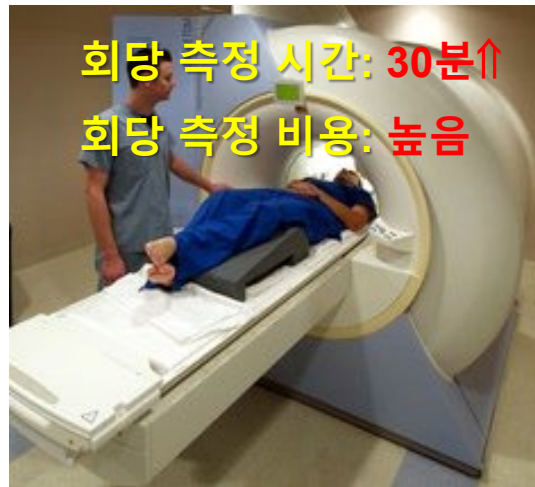
Limitations (1/3)

- **의료영상 이미지**를 이용한 방법은 **안전성, 비용, 효율성 문제**로 **제한적 활용**
 - ✓ CT-scan 시 피실험자가 **방사선에 노출**되어 다회 촬영 제한(Voros et al., 2011)
 - ✓ MRI는 **측정 시간(1회: 30분)**이 길고 **비용이 높음**
- **동작 측정 시스템**을 이용한 방법은 **동작 간섭 및 효율성(후처리, 시간) 개선 필요**
 - ✓ 손 표면에 부착된 marker는 손 동작 시 **자연스러운 동작을 방해**함(Molet et al., 1997)
 - ✓ 손 동작 시 **유실 및 간섭된 marker 보정**을 위한 **data 후처리** 등에 **많은 노력이 소요**됨

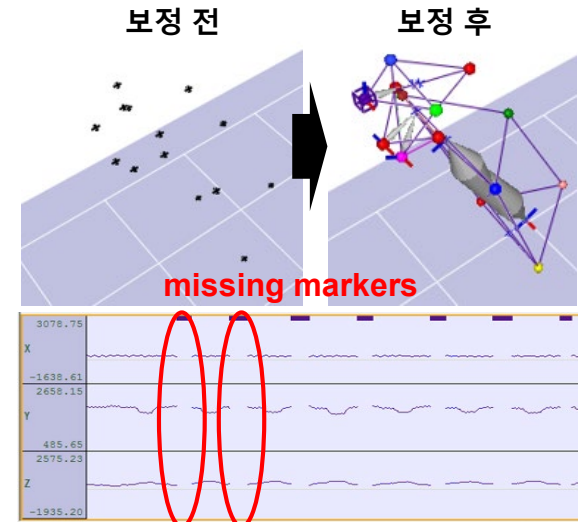
다회 CT-scan 시 방사선에 과다 노출



MRI scan 시 측정 시간 ↑

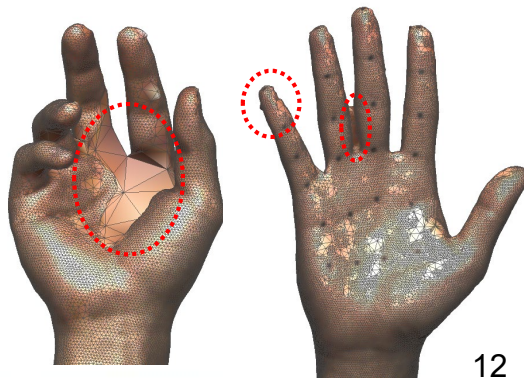


동작측정시스템 기반 측정 예시

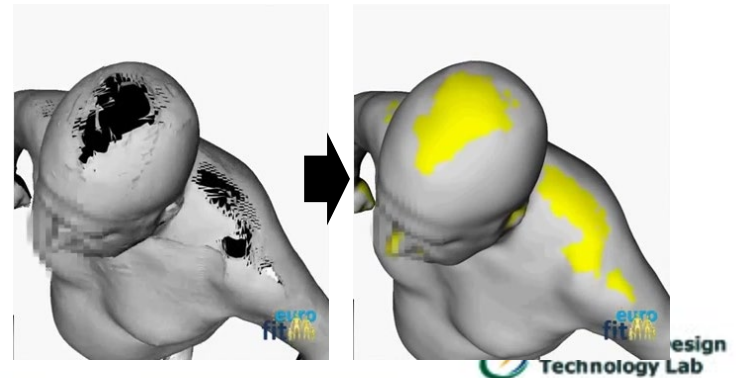


Limitations (2/3)

- **3D 손 scan raw data**는 인간공학적 분석에 활용되기 위해 **후처리에 소요되는 노력이** 크기 때문에 **손 자세 분석 시 활용도가 낮음**
 - ✓ **3D scan raw data**는 측정 시마다 mesh 구조, 점군 수, 점 배열 임의 생성으로 **비정형 데이터 특성**을 지님(정하영 외, 2020)
 - ✓ 인체 치수 측정, 형상 및 자세 분석을 위한 **3D 데이터 후처리**(smoothing, hole filling, 참조점 입력 등)에 분석자의 **많은 노력이 요구됨**
- **손은 구조 및 형태적 특징**으로 **온전한 3차원 형상 획득이 어려움**
 - ✓ 손의 얇고 긴 형태적, 구조적 특징으로 **손등 부분의 형상은 정확하고 용이하게 획득되나 손바닥 부위의 형상은 가려지는 경우가 많으므로 획득이 어려움**
 - ✓ 예를 들면, 편 자세 외 파지 자세에서 **물체와 접촉되는 손바닥 영역은 가려져 3차원 스캔이 불가함**



3D scan data 후처리 예시(hole filling)



Limitations (3/3)

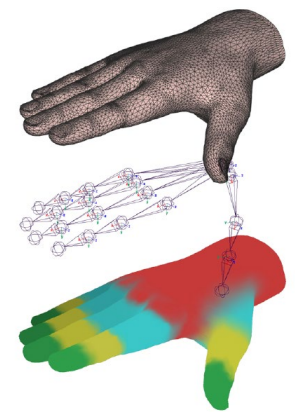
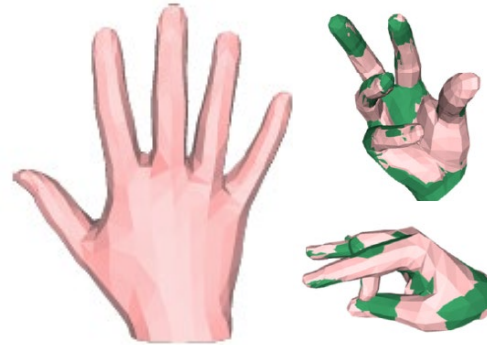
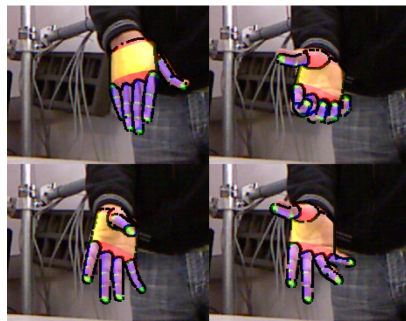
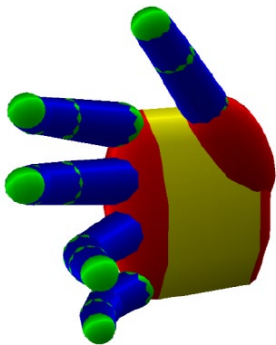
- **Hand model의 성능 평가**에 활용되기 위한 **true hand scan** 및 **자세 data 부재**
 - ✓ Gold standard인 CT-scan을 통해 구축된 **형상**, **자세가 포함된 손 dataset 부재**
 - ✓ CT-scan을 통해 **손 dataset 구축** 및 **자세 분석 모델 적용**, **성능 검증 필요**
- **Digital hand model** 및 **algorithm**을 이용한 방법은 **정확성(성능) 검증 필요**
 - ✓ **Hand model** 및 **algorithm**을 이용한 방법은 손의 **실시간 추적(tracking)** 및 **자세 분석**을 목적으로 하여 **자세 분석의 정확도가 낮게 요구됨**
 - ✓ **기존 연구는 가상으로 생성된 synthetic data**를 활용하여 **손 모델 자세 분석 성능 평가**, **인간공학, 의료(재활), 인체역학 분야로의 적용 가능성 확인 필요**

Digital hand model 예시

실시간 추적 손 모델: Oikonomidis et al. (2011)

3차원 손 스캔 보정 모델: Romero et al. (2017)

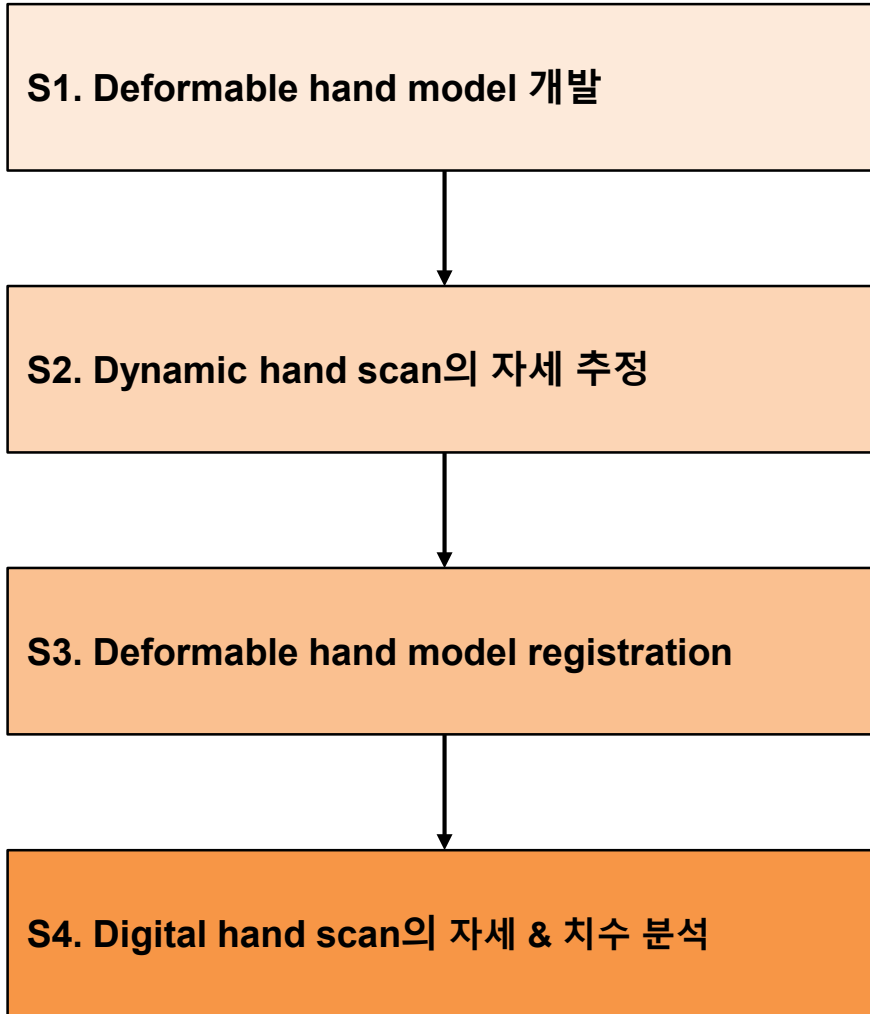
손 자세 구현 모델: Bray et al. (2004)



Dynamic Hand Scan의 자세 및 치수 분석을 위한 Deformable Hand Model 개발

- 1) Deformable hand model 개발
- 2) 표면 참조점, 손 형상을 이용한 dynamic hand scan 초기 자세 추정
- 3) Deformable hand model registration
- 4) 손 자세, 치수 분석

연구 절차 및 방법



- Deformable hand model 개발
- Joint CoR, link, landmark 등으로 구성

- 손 표면 textured landmark 기반 초기 자세 분석
- Stepwise regression 활용 6종 J-CoR 추정
- 자세 보정

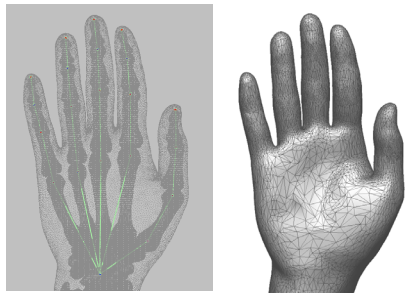
- Deformable hand model registration 수행
- 표면 mesh 기반 J-CoR 위치 보정

- 손 치수 측정 변수
- 길이, 둘레, 면적 측면 치수 분석
- 손 자세 분석

S1. Deformable Hand Model (DHM) 개발

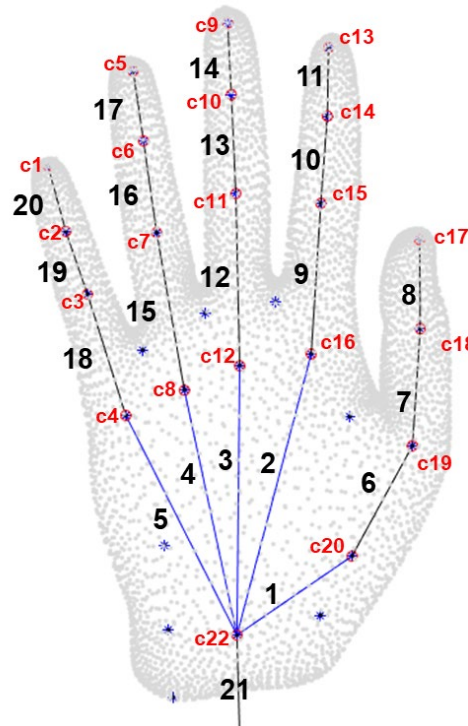
- ❑ Scalable, deformable, posable 특성의 digital hand model 개발(Jung et al., 2021)
- ❑ Deformable hand model은 표면 mesh, 관절 및 link 구조, 참조점 등으로 구성됨

Hand surface & bone mesh
(Hand geometry)



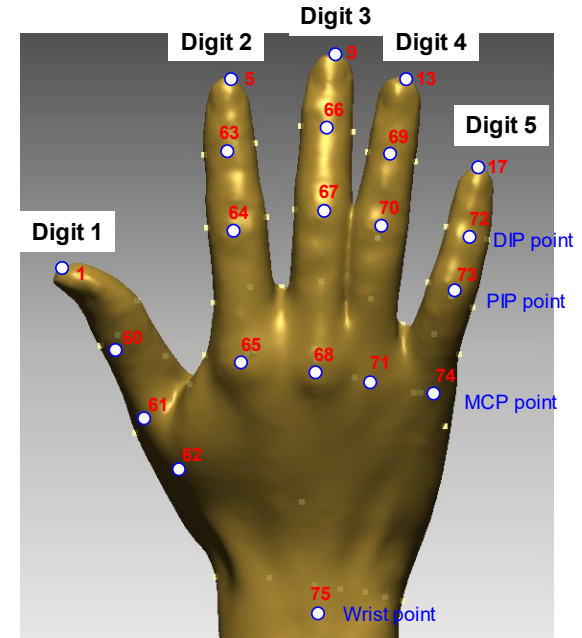
Hand bonds & joint CoRs

of link: 21, # of joints: 21

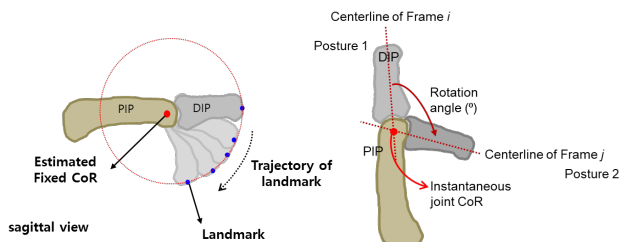


Hand surface landmarks

of landmarks: 75



Finger joint CoRs & link structure
(hand kinematics)



- Vertex: 6,984
- Face: 13,964

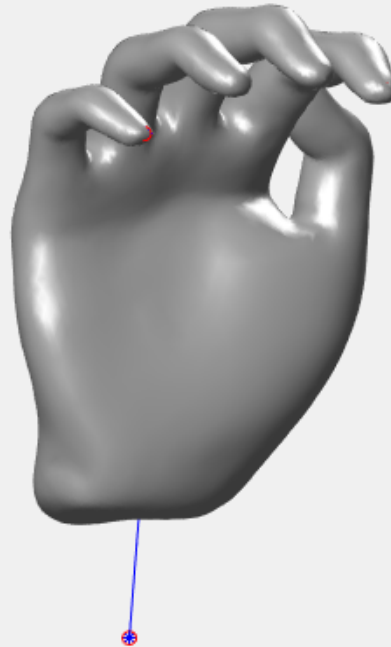
Deformable Hand Model (DHM)

- Digital hand model의 자세 변화에 따른 skin deformation 구현 예시

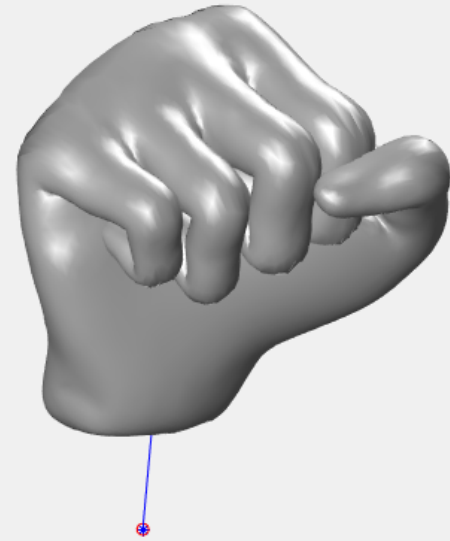
Neutral hand



Half grasping hand



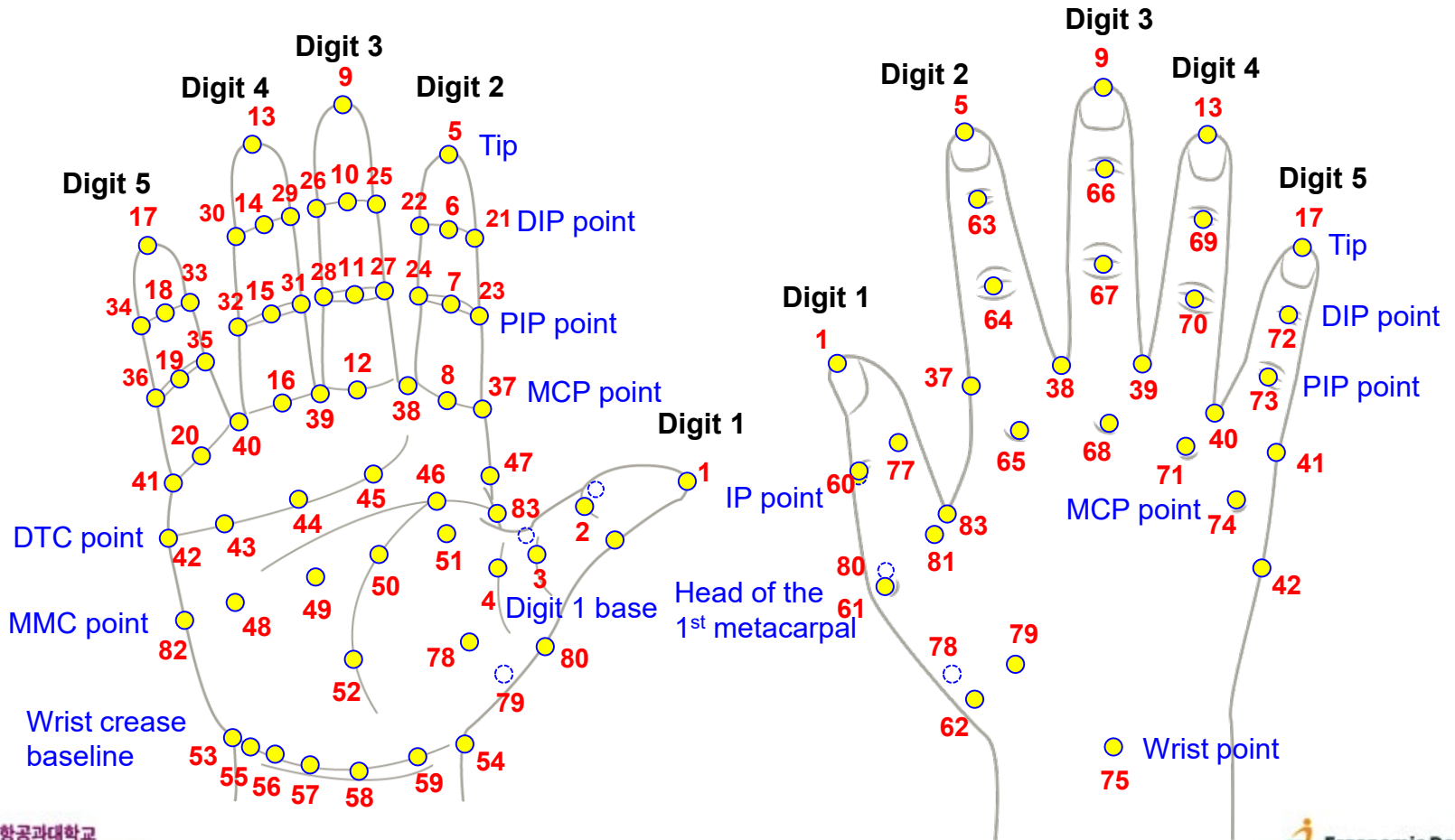
Full grasping hand



Hand Landmarks

- 총 83개 손 참조점이 hand anthropometry 연구를 참조하여 hand model에 적용됨 (Greiner, 1991; 문수진, 2018; SizeKorea 2010; SizeKorea 2018)

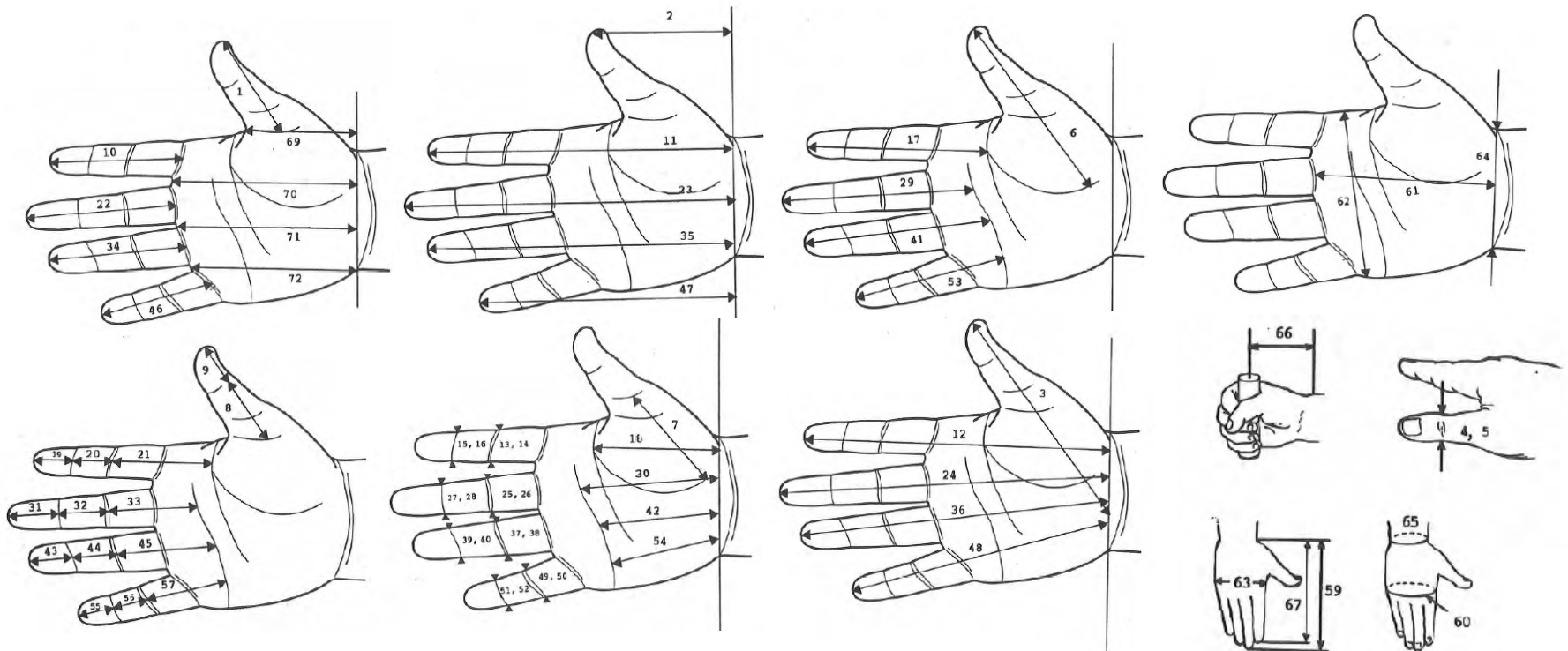
Selected 83 hand landmarks



Hand Dimensions: Summary

- 손 치수 측정 항목 **72종** 적용 (US Army hand anthropometry research, Size Korea 2020 참조)
- Length 37종, height 9종, breadth 12종, circumference 9종 hand dimension 선정

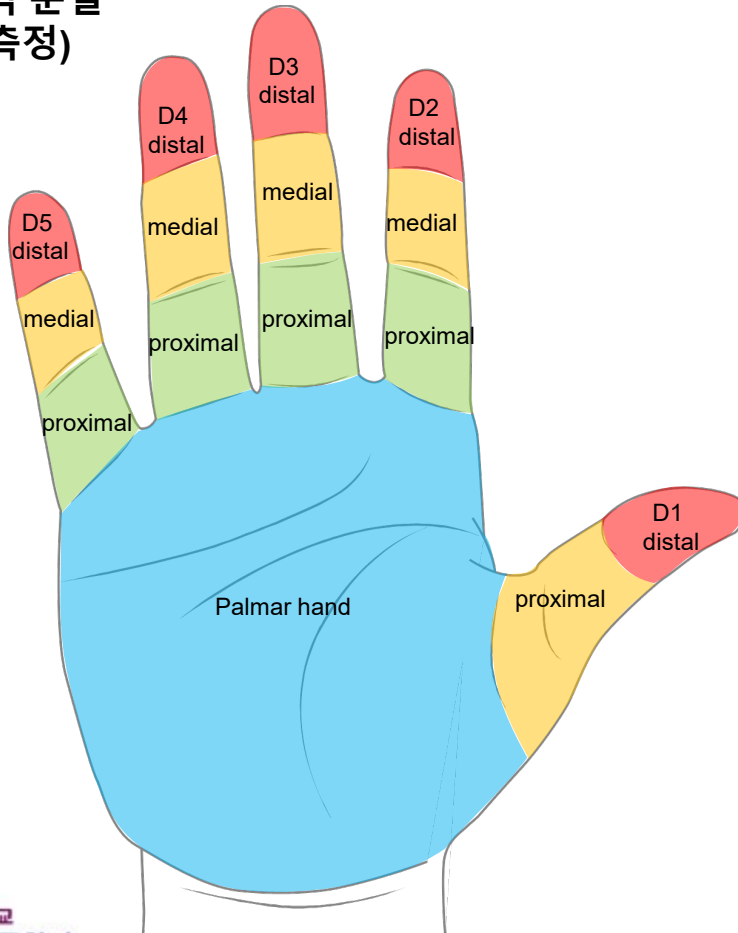
Hand dimensions (Greiner, 1991)



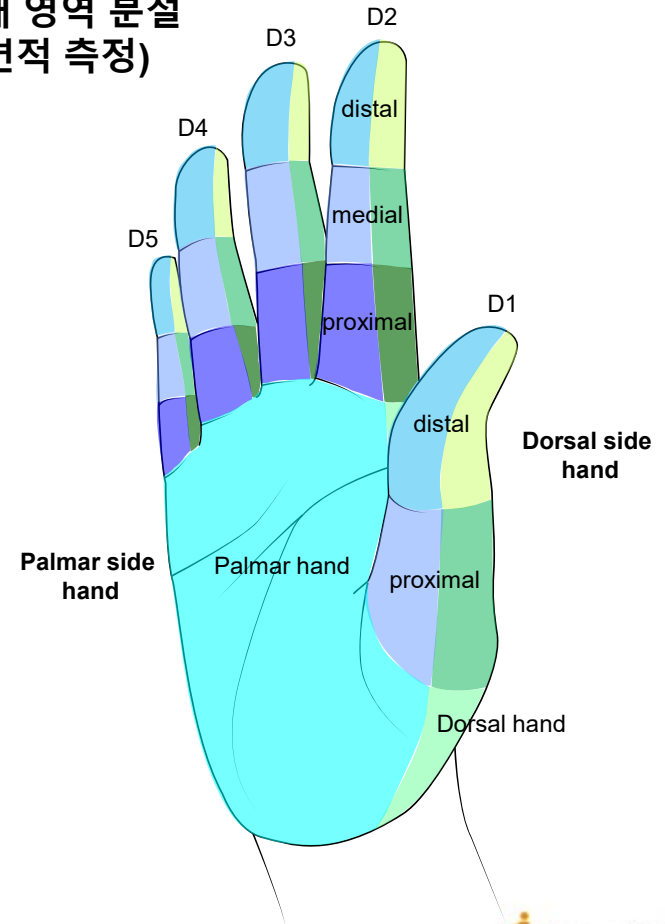
Area, Volume Analysis

- 손 주름 및 참조점을 기준으로 15개 영역으로 1차 분절
- 각 분절 영역에 대하여 손등면, 손바닥면의 상단 및 하단 영역으로 2차 분절

15개 영역 분절
(부피 측정)

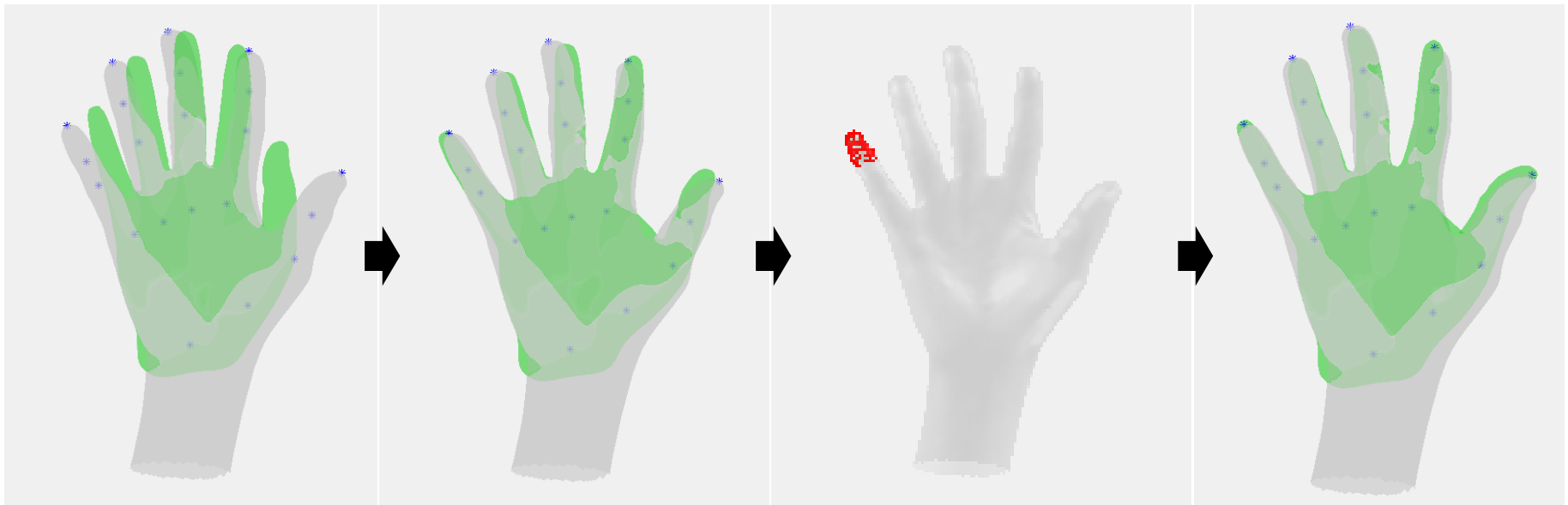


30개 영역 분절
(면적 측정)



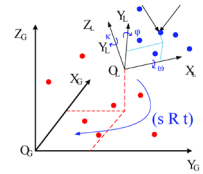
S2. Surface Landmark-based Posture Approximation

- 손 표면에 표기된 landmark position을 이용하여 초기 자세 추정
(colored texture, deep learning model을 이용하여 자동 탐지 방법 개발 중)
 - ✓ Palm 영역 joint CoR(D2-5 MCP joint, D1 CMC joint)은 palm fitting을 통해 위치 분석
 - ✓ PIP, DIP joint CoR 및 tip은 surface landmark를 이용하여 위치 분석
- 손가락 관절별 자세 fine fitting 수행

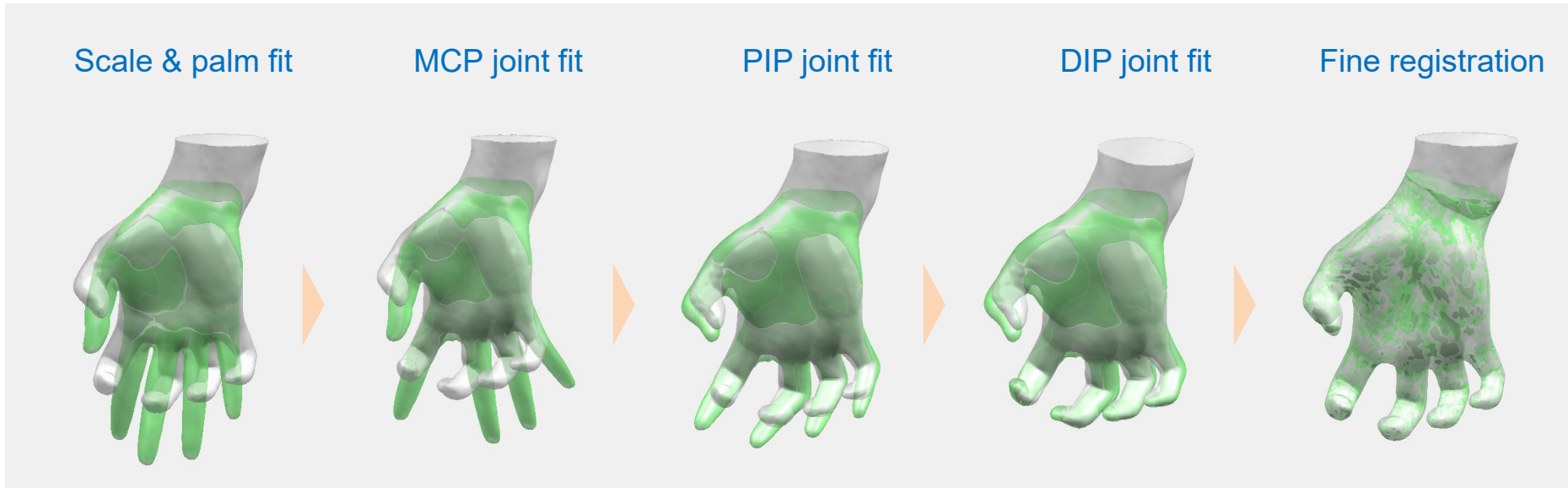


S3. Deformable Hand Model Registration: 개요

- Deformable hand model은 3단계 과정으로 3차원 손 스캔에 정렬됨
 - 1) Scale 조절 및 손바닥 영역 정렬 (Absolute Orientation Problem Solver (Horn, 1987))
 - 2) 관절체별 자세 정렬: MCP joint (2-DoF) → PIP joint (1-DoF) → DIP joint (1-DoF)
 - 3) Deformable hand model 미세 정렬 (ICP registration algorithm (Chen and Medioni, 1991))



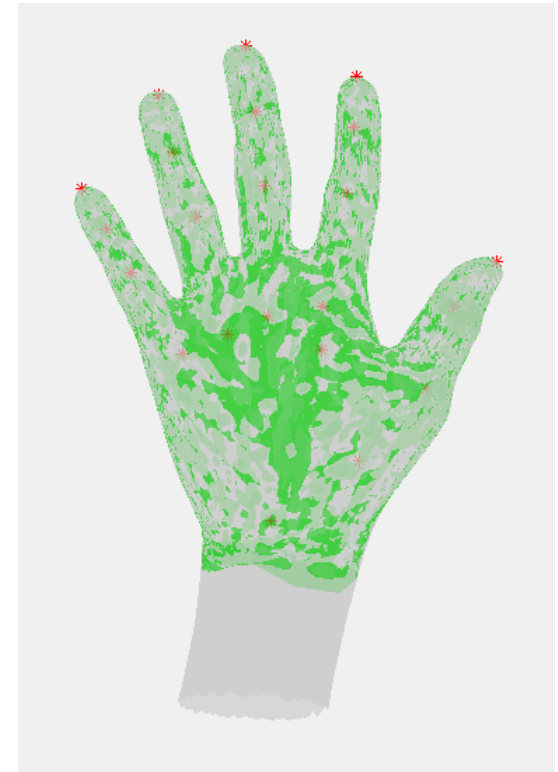
Deformable hand model registration 절차 예



■ : deformable hand model ■ : 3D hand scan

registration error (RMSE) = 0.2 mm

Deformable Hand Model Registration 결과

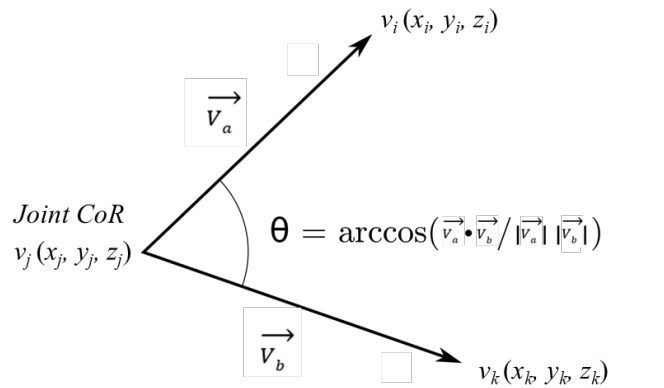


* : joint center of rotation (CoR) ■ : deformable hand model ■ : 3D hand scan

S4-1. 손 자세 분석

- **Flexion/extension 각도 분석:** 분석 대상 joint CoR과 인접 joint CoR을 연결하는 link vector 사이 각도 측정
- **Abduction/adduction, pronation/supination 각도 분석:** 기준 plane으로 투사된 projected joint CoR 위치를 이용하여 link vector 사이 각도 측정

Flexion/extension 각도 분석 예



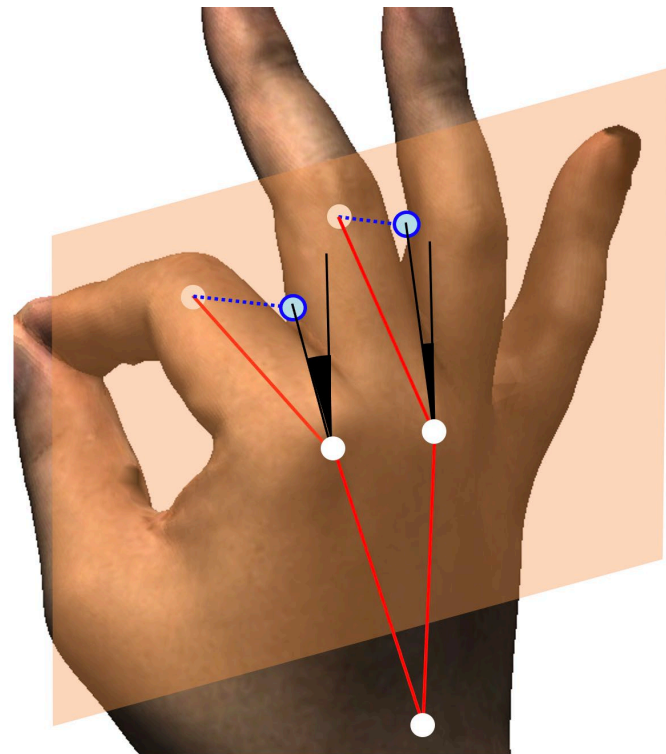
$$\vec{v}_y = (0, 1, 0)$$

$$\vec{v}_a = \frac{(x_i, y_i, z_i) - (x_j, y_j, z_j)}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}}$$

$$\vec{v}_b = \frac{(x_k, y_k, z_k) - (x_j, y_j, z_j)}{\sqrt{(x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2 + (z_k - z_j)^2}}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{v}_a \cdot \vec{v}_b}{|\vec{v}_a| |\vec{v}_b|}\right)$$

Abduction/adduction, pronation/supination 각도 분석 예



Finger Joint Angles

- Flexion/extension 측면 15종, abduction/adduction 측면 5종, supination/pronation 측면 5종 각도 분석

No.	Digits	Joint	Angle	No.	Digits	Joint	Angle
1	Digit 1	IP	Flexion / Extension	16	Digit 4	MCP	Abduction / Adduction
2		MCP	Flexion / Extension	17			Flexion / Extension
3		CMC	Abduction / Adduction	18			Supination / Pronation
4			Supination / Pronation	19		PIP	Flexion / Extension
5		Flexion / Extension	20	DIP			Flexion / Extension
6	Digit 2	MCP	Abduction / Adduction	21	Digit 5	MCP	Abduction / Adduction
7			Flexion / Extension	22			Flexion / Extension
8			Supination / Pronation	23			Supination / Pronation
9		PIP	Flexion / Extension	24		PIP	Flexion / Extension
10		DIP	Flexion / Extension	25		DIP	Flexion / Extension
11	Digit 3	MCP	Abduction / Adduction				
12			Flexion / Extension				
13			Supination / Pronation				
14		PIP	Flexion / Extension				
15		DIP	Flexion / Extension				

손 자세 분석 결과 예시: Straight Hand

□ 편 기본 자세의 hand scan 자세 분석 결과



Joint	Digit 1
CMC Fx(+)/Ex(-)	3.8
CMC Ab(+)/Ad(-)	42.4
CMC Pr(+)/Sp(-)	4.1
MCP Fx(+)/Ex(-)	24.5
IP Fx(+)/Ex(-)	25.5

Joint	Digit 2	Digit 3	Digit 4	Digit 5
MCP Fx(+)/Ex(-)	22.8	14.0	10.9	3.8
MCP Ab(+)/Ad(-)	12.4	0.0	13.5	29.5
PIP Fx(+)/Ex(-)	-16.4	-14.8	-16.7	-0.2
DIP Fx(+)/Ex(-)	1.5	-11.1	-11.9	-18.7
MCP Pr(+)/Sp(-)	-	-	-	-

손 자세 분석 결과 예시: Bent Hand

□ 구부린 자세의 hand scan 자세 분석 결과



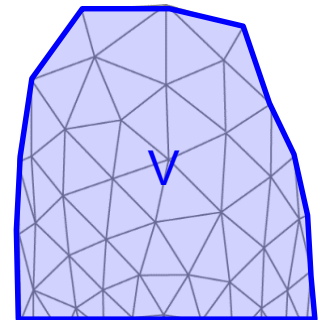
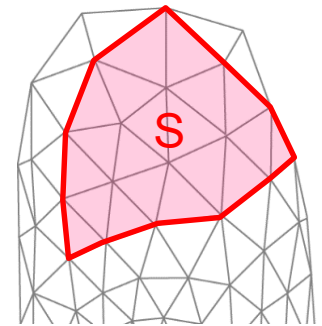
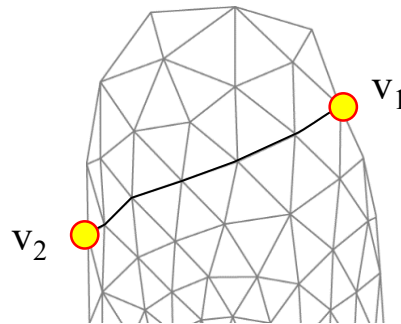
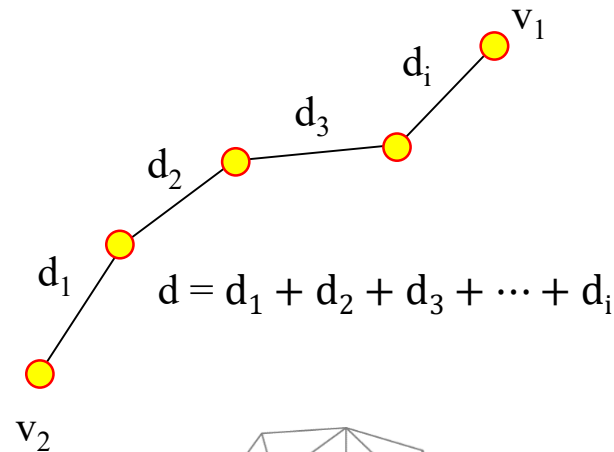
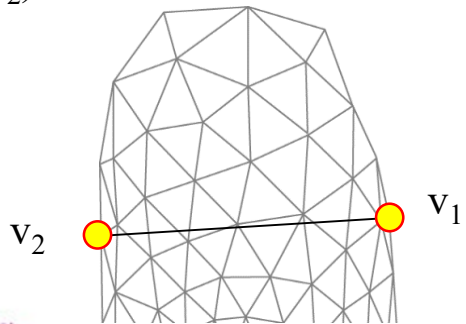
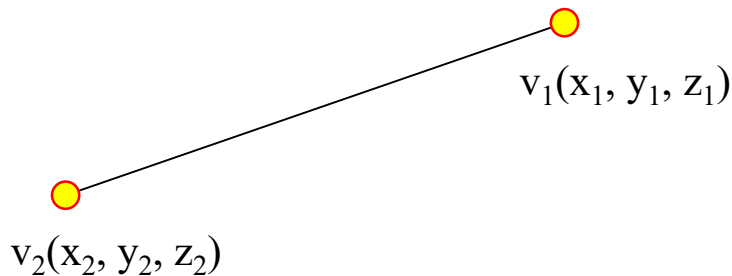
Joint	Digit 1
CMC Fx(+)/Ex(-)	18.7
CMC Ab(+)/Ad(-)	41.2
CMC Pr(+)/Sp(-)	21.1
MCP Fx(+)/Ex(-)	37.5
IP Fx(+)/Ex(-)	20.7

Joint	Digit 2	Digit 3	Digit 4	Digit 5
MCP Fx(+)/Ex(-)	17.1	9.5	9.4	9.0
MCP Ab(+)/Ad(-)	18.2	0.0	16.2	42.8
PIP Fx(+)/Ex(-)	21.3	42.1	51.8	37.6
DIP Fx(+)/Ex(-)	-2.7	-4.7	-2.9	-15.8
MCP Pr(+)/Sp(-)	-	-	-	-

S4-2. 손 치수 분석

- 직선 길이: 측정점 사이 **vector length** (by **vector norm function**) 측정
- 둘레 길이: 측정점 사이 최단 거리 측정
 - ✓ 측정점 사이 **최단거리 탐색 알고리즘**(by **shortest path detection algorithm**) 기반 측정
 - ✓ 분석 평면 **mesh 분절면 생성**(by **ISO cut function**) 및 **edge length** 측정
- **표면적**: 분석 대상 부위의 **삼각 face 면적의 총합**

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$



Hand Dimensions (1/3)

□ Length 37종, height 9종, breadth 12종, circumference 9종 hand dimension 선정

No	Dimensions	구분	속성
1	digit 1 length	Digit1	length
2	digit 1 height		length
3	digit 1 tip to wrist crease length		length
4	digit 1 distal interphalangeal joint breadth		breadth
5	digit 1 distal interphalangeal joint circumference		circumference
6	digit 1 link length		length
7	digit 1 metacarpal link length		length
8	digit 1 proximal phalanx link length		length
9	digit 1 distal phalanx link length		length
10	digit 2 length	Digit2	length
11	digit 2 height		height
12	digit 2 tip to wrist crease length		length
13	digit 2 proximal interphalangeal joint breadth		breadth
14	digit 2 proximal interphalangeal joint circumference		circumference
15	digit 2 distal interphalangeal joint breadth		breadth
16	digit 2 distal interphalangeal joint circumference		circumference
17	digit 2 link length		length
18	digit 2 metacarpal link length		length
19	digit 2 distal phalanx link length		length
20	digit 2 medial phalanx link length		length
21	digit 2 proximal phalanx link length	length	
22	digit 3 length	Digit3	length
23	digit 3 height		height
24	digit 3 tip to wrist crease length		length
25	digit 3 proximal interphalangeal joint breadth		breadth

Hand Dimensions (2/3)

□ Length 37종, height 9종, breadth 12종, circumference 9종 hand dimension 선정

No	Dimensions	구분	속성
26	digit 3 proximal interphalangeal joint circumference	Digit3	circumference
27	digit 3 distal interphalangeal joint breadth		breadth
28	digit 3 distal interphalangeal joint circumference		circumference
29	digit 3 link length		length
30	digit 3 metacarpal link length		length
31	digit 3 distal phalanx link length		length
32	digit 3 medial phalanx link length		length
33	digit 3 proximal phalanx link length		length
34	digit 4 length		Digit4
35	digit 4 height	height	
36	digit 4 tip to wrist crease length	length	
37	digit 4 proximal interphalangeal joint breadth	breadth	
38	digit 4 proximal interphalangeal joint circumference	circumference	
39	digit 4 distal interphalangeal joint breadth	breadth	
40	digit 4 distal interphalangeal joint circumference	circumference	
41	digit 4 link length	length	
42	digit 4 metacarpal link length	length	
43	digit 4 distal phalanx link length	length	
44	digit 4 medial phalanx link length	length	
45	digit 4 proximal phalanx link length	length	
46	digit 5 length	Digit5	length
47	digit 5 height		height
48	digit 5 tip to wrist crease length		length
49	digit 5 proximal interphalangeal joint breadth		breadth
50	digit 5 proximal interphalangeal joint circumference		circumference

Hand Dimensions (3/3)

□ Length 37종, height 9종, breadth 12종, circumference 9종 hand dimension 선정

No	Dimensions	구분	속성
51	digit 5 distal interphalangeal joint breadth	Digit5	breadth
52	digit 5 distal interphalangeal joint circumference		circumference
53	digit 5 link length		length
54	digit 5 metacarpal link length		length
55	digit 5 distal phalanx link length		length
56	digit 5 medial phalanx link length		length
57	digit 5 proximal phalanx link length		length
58	hand length from digitizer		Hand
59	hand length measured	length	
60	hand circumference	circumference	
61	palm length	length	
62	palm breadth	breadth	
63	hand breadth	breadth	
64	wrist breadth	breadth	
65	wrist circumference	circumference	
69	crotch 1 height	height	
70	crotch 2 height	height	
71	crotch 3 height	height	
72	crotch 4 height	height	

손 치수 분석 결과 예시: Straight Hand

□ 편 기본 자세의 hand scan 치수 분석 결과

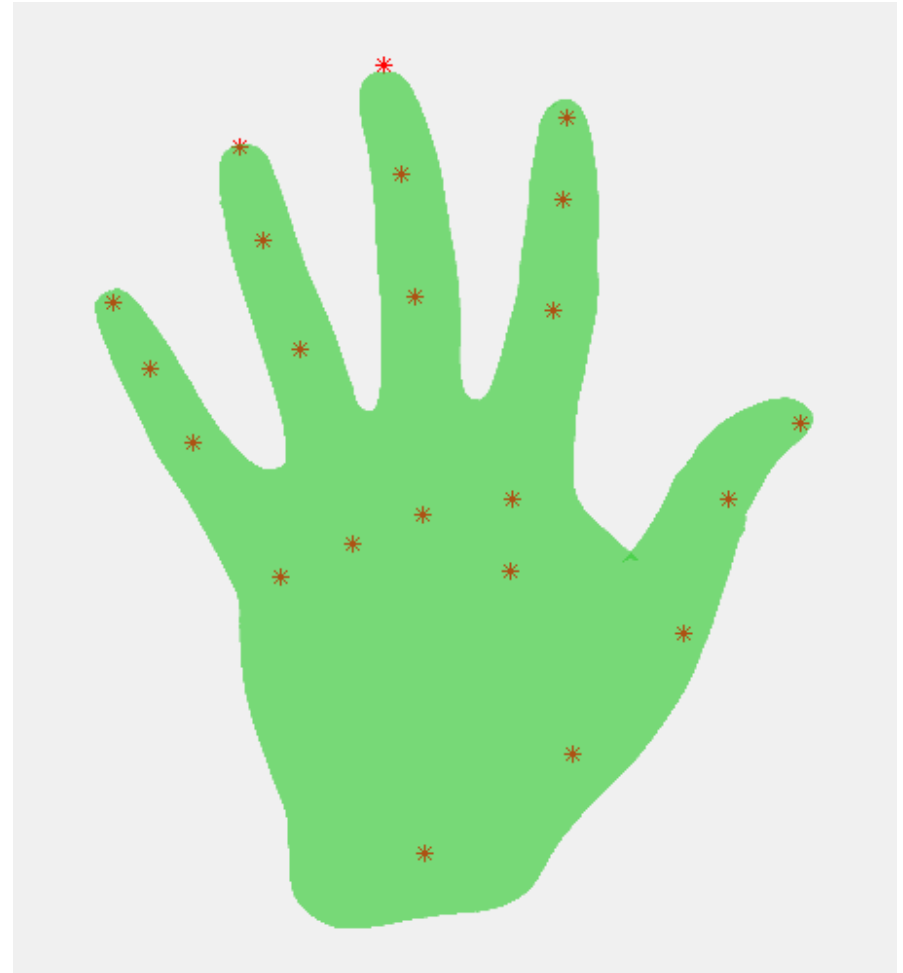
No	Hand Dimensions	치수
1	digit 1 length	54.0
2	digit 1 height	119.8
3	digit 1 tip to wrist crease length	148.4
4	digit 1 distal interphalangeal joint breadth	18.5
5	digit 1 distal interphalangeal joint circumference	78.8
6	digit 1 link length	92.1
7	digit 1 metacarpal link length	82.4
8	digit 1 proximal phalanx link length	31.3
9	digit 1 distal phalanx link length	29.4
10	digit 2 length	70.9
11	digit 2 height	179.6
12	digit 2 tip to wrist crease length	186.3
13	digit 2 proximal interphalangeal joint breadth	20.7
14	digit 2 proximal interphalangeal joint circumference	85.3
15	digit 2 distal interphalangeal joint breadth	17.8
16	digit 2 distal interphalangeal joint circumference	63.0
17	digit 2 link length	90.1
18	digit 2 metacarpal link length	96.4
19	digit 2 distal phalanx link length	23.0
20	digit 2 medial phalanx link length	24.5
21	digit 2 proximal phalanx link length	23.4
22	digit 3 length	79.8
23	digit 3 height	182.6
24	digit 3 tip to wrist crease length	193.4
25	digit 3 proximal interphalangeal joint breadth	19.9

No	Hand Dimensions	치수
26	digit 3 proximal interphalangeal joint circumference	73.7
27	digit 3 distal interphalangeal joint breadth	18.2
28	digit 3 distal interphalangeal joint circumference	65.6
29	digit 3 link length	106.9
30	digit 3 metacarpal link length	87.9
31	digit 3 distal phalanx link length	24.6
32	digit 3 medial phalanx link length	27.8
33	digit 3 proximal phalanx link length	26.7
34	digit 4 length	72.8
35	digit 4 height	170.1
36	digit 4 tip to wrist crease length	180.0
37	digit 4 proximal interphalangeal joint breadth	19.5
38	digit 4 proximal interphalangeal joint circumference	74.2
39	digit 4 distal interphalangeal joint breadth	15.0
40	digit 4 distal interphalangeal joint circumference	60.2
41	digit 4 link length	94.2
42	digit 4 metacarpal link length	87.5
43	digit 4 distal phalanx link length	25.6
44	digit 4 medial phalanx link length	25.3
45	digit 4 proximal phalanx link length	23.2
46	digit 5 length	55.9
47	digit 5 height	137.4
48	digit 5 tip to wrist crease length	150.6
49	digit 5 proximal interphalangeal joint breadth	16.8
50	digit 5 proximal interphalangeal joint circumference	62.7

손 치수 분석 결과 예시: Straight Hand

□ 편 기본 자세의 hand scan 치수 분석 결과

No	Hand Dimensions	치수
51	digit 5 distal interphalangeal joint breadth	16.0
52	digit 5 distal interphalangeal joint circumference	52.9
53	digit 5 link length	75.8
54	digit 5 metacarpal link length	77.4
55	digit 5 distal phalanx link length	20.1
56	digit 5 medial phalanx link length	21.4
57	digit 5 proximal phalanx link length	14.7
58	hand length from digitizer	186.8
59	hand length measured	186.8
60	hand circumference	231.6
61	palm length	114.7
62	palm breadth	85.1
63	hand breadth	85.1
64	wrist breadth	56.7
65	wrist circumference	173.1
69	crotch 1 height	N/A
70	crotch 2 height	183.0
71	crotch 3 height	N/A
72	crotch 4 height	71.0



손 치수 분석 결과 예시: Bent Hand

□ 편 기본 자세의 hand scan 치수 분석 결과

No	Hand Dimensions	치수
1	digit 1 length	49.2
2	digit 1 height	105.8
3	digit 1 tip to wrist crease length	140.5
4	digit 1 distal interphalangeal joint breadth	14.0
5	digit 1 distal interphalangeal joint circumference	65.9
6	digit 1 link length	84.4
7	digit 1 metacarpal link length	77.7
8	digit 1 proximal phalanx link length	31.7
9	digit 1 distal phalanx link length	25.5
10	digit 2 length	60.9
11	digit 2 height	166.6
12	digit 2 tip to wrist crease length	170.8
13	digit 2 proximal interphalangeal joint breadth	19.9
14	digit 2 proximal interphalangeal joint circumference	84.8
15	digit 2 distal interphalangeal joint breadth	15.8
16	digit 2 distal interphalangeal joint circumference	71.4
17	digit 2 link length	79.9
18	digit 2 metacarpal link length	93.4
19	digit 2 distal phalanx link length	17.0
20	digit 2 medial phalanx link length	24.3
21	digit 2 proximal phalanx link length	20.6
22	digit 3 length	64.6
23	digit 3 height	168.8
24	digit 3 tip to wrist crease length	169.0
25	digit 3 proximal interphalangeal joint breadth	19.5

No	Hand Dimensions	치수
26	digit 3 proximal interphalangeal joint circumference	74.7
27	digit 3 distal interphalangeal joint breadth	17.2
28	digit 3 distal interphalangeal joint circumference	66.5
29	digit 3 link length	87.4
30	digit 3 metacarpal link length	85.4
31	digit 3 distal phalanx link length	20.3
32	digit 3 medial phalanx link length	24.4
33	digit 3 proximal phalanx link length	20.3
34	digit 4 length	58.2
35	digit 4 height	148.7
36	digit 4 tip to wrist crease length	152.6
37	digit 4 proximal interphalangeal joint breadth	18.0
38	digit 4 proximal interphalangeal joint circumference	69.1
39	digit 4 distal interphalangeal joint breadth	15.8
40	digit 4 distal interphalangeal joint circumference	59.6
41	digit 4 link length	74.2
42	digit 4 metacarpal link length	84.5
43	digit 4 distal phalanx link length	23.4
44	digit 4 medial phalanx link length	21.2
45	digit 4 proximal phalanx link length	14.8
46	digit 5 length	50.2
47	digit 5 height	123.6
48	digit 5 tip to wrist crease length	137.5
49	digit 5 proximal interphalangeal joint breadth	13.1
50	digit 5 proximal interphalangeal joint circumference	60.2

손 치수 분석 결과 예시: Bent Hand

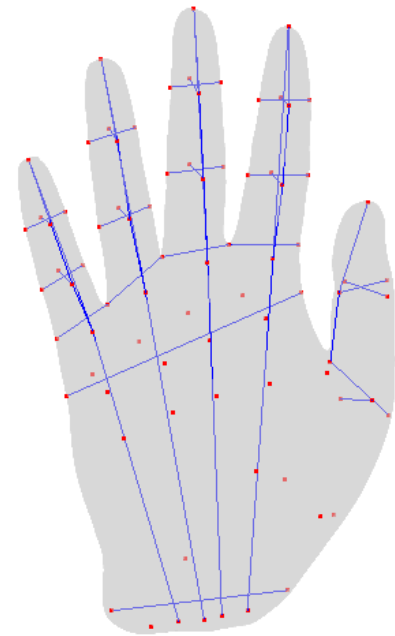
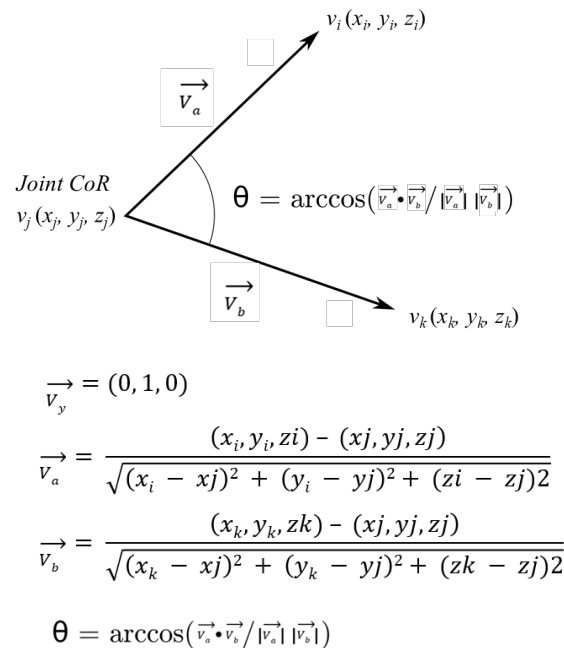
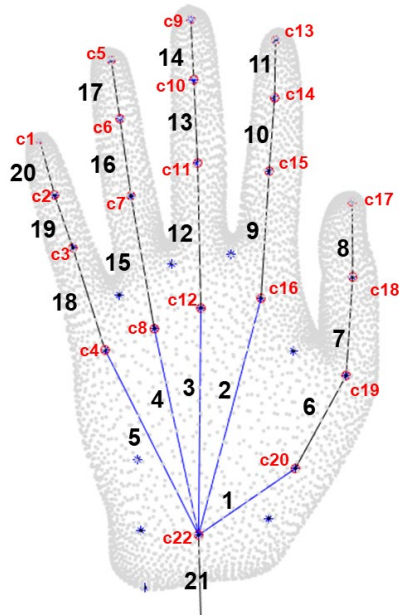
□ 편 기본 자세의 hand scan 치수 분석 결과

No	Hand Dimensions	치수
51	digit 5 distal interphalangeal joint breadth	12.8
52	digit 5 distal interphalangeal joint circumference	52.8
53	digit 5 link length	65.2
54	digit 5 metacarpal link length	74.8
55	digit 5 distal phalanx link length	21.0
56	digit 5 medial phalanx link length	19.6
57	digit 5 proximal phalanx link length	11.6
58	hand length from digitizer	170.6
59	hand length measured	170.6
60	hand circumference	241.0
61	palm length	111.4
62	palm breadth	91.2
63	hand breadth	91.2
64	wrist breadth	62.4
65	wrist circumference	189.6
69	crotch 1 height	0.0
70	crotch 2 height	171.6
71	crotch 3 height	0.0
72	crotch 4 height	63.4



Discussion: 손 자세 분석 방법 개발 및 검증

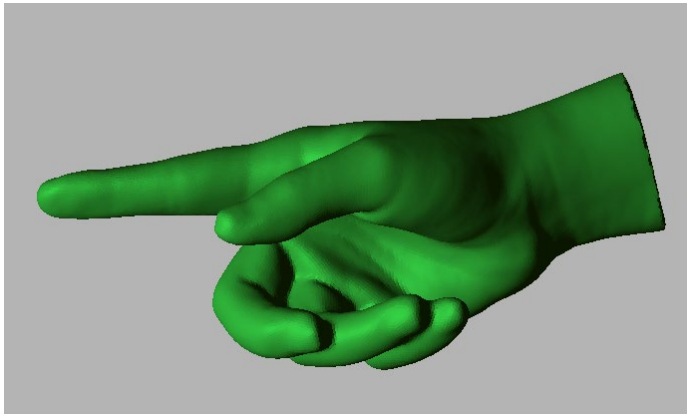
- 본 연구는 deformable hand model을 이용하여 **간편하게 3D hand scan 자세 및 치수 분석 방법을 개발함**
 - ✓ 다양한 크기, 자세의 hand scan에 정렬되는 deformable hand model 개발
 - ✓ Deformable hand model을 hand scan에 정렬하는 방법 적용
 - ✓ Hand scan으로 정렬 및 변환된 hand model을 이용한 효율적인 자세, 치수 분석



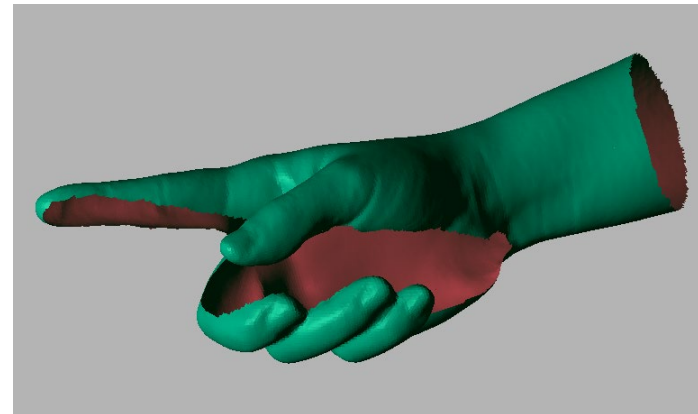
Discussion: Application (1/2)

- 본 연구에서 제안된 **손가락 관절 CoR 추정 방법**은 손등만 스캔 되거나 동작 없이 정적인 자세로 측정된 **제한된 상태 및 자세의 손 스캔에도 적용 가능함**
 - ✓ **손 형상**은 고유한 형태 및 다양한 관절체로 구성된 구조적 특성으로 인해 **3차원 스캔으로 손바닥 부위까지 온전한 손 형상을 획득하기 어려움**
 - ✓ 다양한 손 동작 및 그립 자세에서도 **가려지지 않고 노출되는 손등 영역**은 3차원 스캔을 통한 **형상 획득이 용이하여 손등 영역을 이용한 손가락 관절 CoR 추정 방법 개발**
 - ✓ 동작측정시스템은 손가락 flexion/extension 등과 같은 **손 동작이 포함된 경우에만 관절 CoR 추정 및 자세분석이 가능했지만**, 본 연구에서 개발된 방법은 **동작이 없는 정적인 상태에서도 손가락 관절 CoR 추정 및 자세 분석이 가능함**

온전한 3차원 손 형상



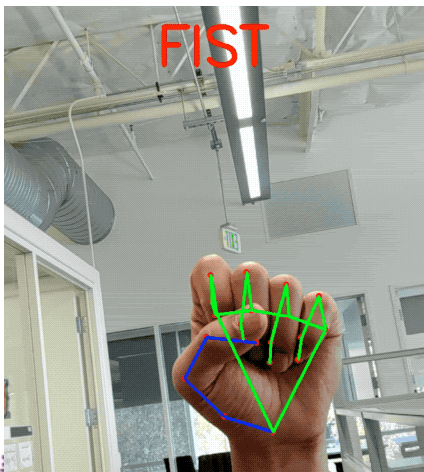
손등 부분만 스캔된 3차원 손 형상



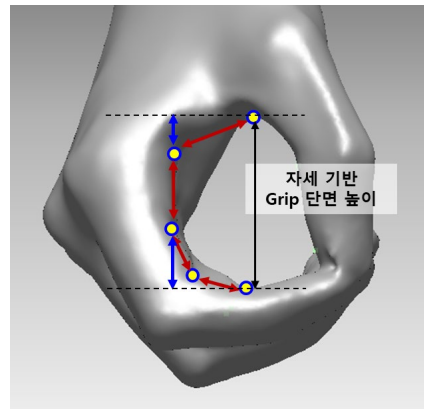
Discussion: Application (2/2)

- 본 연구에서 제안된 손 자세 및 치수 분석 방법은 **실시간 자세 분석, 인간공학적 제품 설계, digital hand model simulation**에 **유용하게 활용**될 것으로 기대됨
 - ✓ 손가락 관절 CoR 추정 및 손 자세 분석 방법은 최적화 기반 방법(Zhang et al., 2003)에 비해 연산이 간단하고 빠르므로 실시간 손 자세 분석 및 hand tracking 등에 활용 가능
 - ✓ 다양한 손 자세의 효율적인 분석을 지원하여 인간공학적 그립 및 핸들 제품 설계에 유용하게 활용 가능
 - ✓ 정교한 손가락 관절 CoR 분석은 registration, scale, posture adjustment 등을 구현하는 기반기술로 digital hand modeling 및 simulation 성능 향상에 기여

실시간 손 추적 모델



핸들 그립 제품 설계



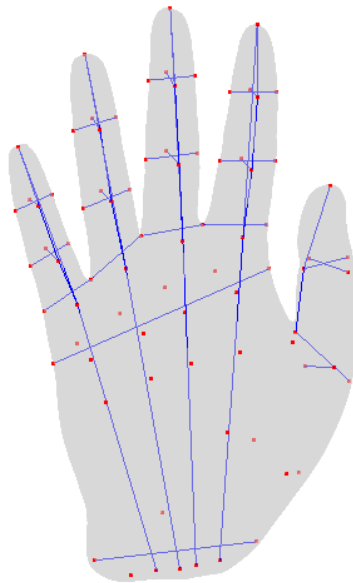
DHM의 자세 변형



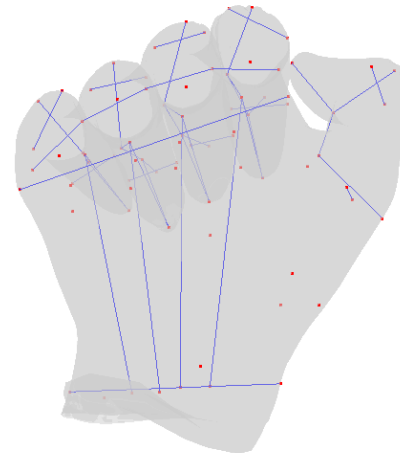
Limitations & Future Work

- 본 연구의 손가락 관절 CoR 분석은 평균 크기의 digital hand model의 특성을 기준으로 분석되므로 다양한 손의 크기 및 해부학적 특징을 지닌 digital hand model의 개발 및 적용에 대한 추가 연구 필요
- 다양한 자세의 동적 손 scan data(e.g., power grip, pinch grip 등) 수집 및 자세, 치수 분석과 이에 대한 성능 검증 필요

정적 자세



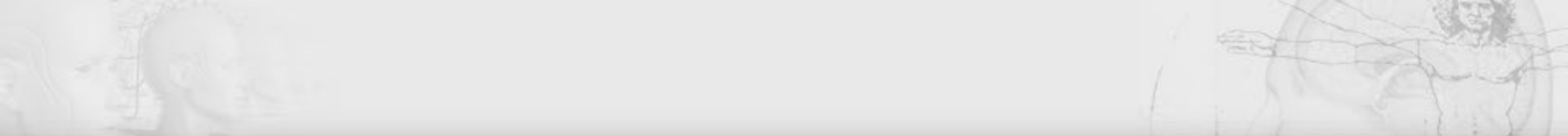
동적 자세
(주먹 쥐 자세)



*Thank You
for Your Attention!*

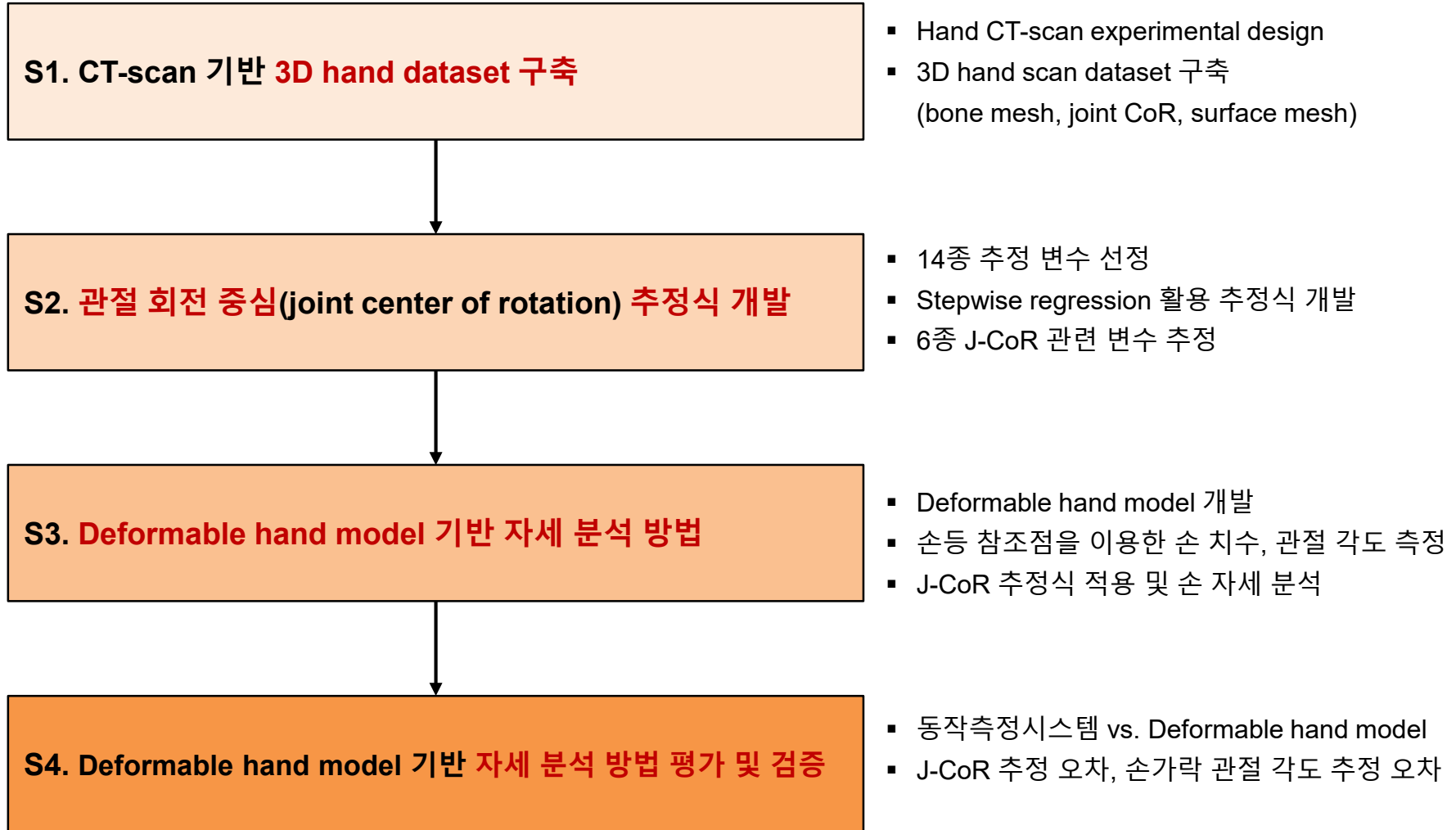


본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구임



Appendix

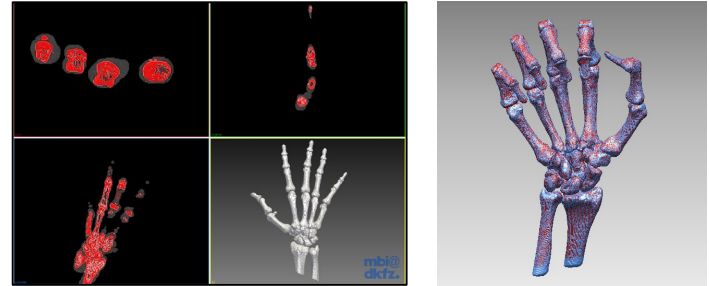
연구 절차 및 방법



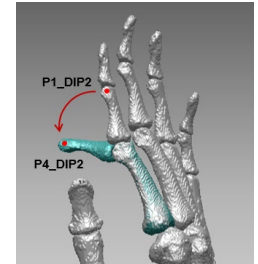
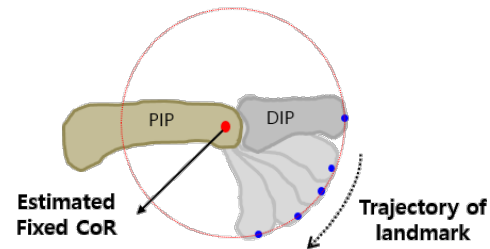
S1. 3D Hand Dataset 구축

- 3차원 손 형상 데이터는 skeletal structure, joint CoR (fixed & instantaneous), surface mesh를 포함하여 구축됨

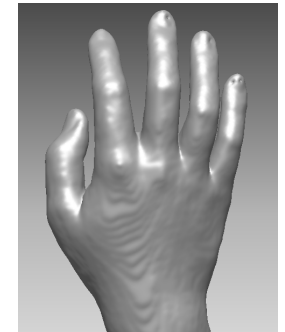
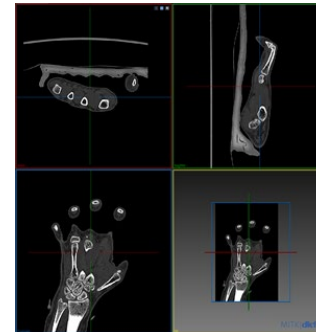
S1. Skeletal structure 구축



S2. Joint CoR 데이터 구축

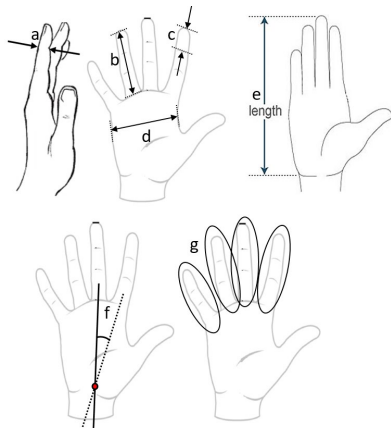


S3. Surface mesh 구축

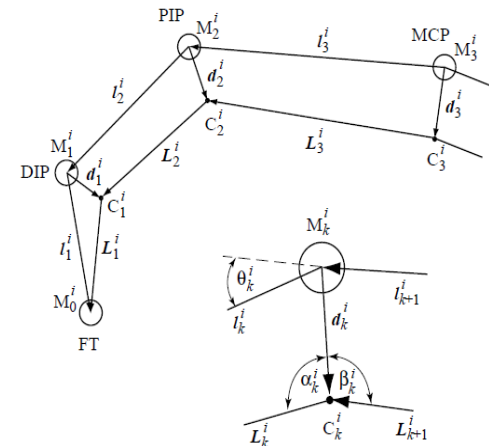


S2. 관절 회전 중심(J-CoR) 추정식 개발

- 손가락 관절 회전 중심(J-CoR)은 손 치수(link length), 손등면 참조점(landmark position), 관절 각도(joint angle)와 높은 상관관계 및 선형성을 보이는 것으로 보고됨 (Lim, 2018; Zhang et al., 2003; Cao et al., 2021; Figueroa et al., 2016)
 - Lim (2018)은 손 치수(손가락마디길이, 손가락길이, 손직선길이 등) 7종을 이용한 J-CoR 위치 추정식($R^2 = 0.9$)을 개발함
 - Zhang et al. (2003)은 손등에 부착된 reflective marker를 이용하여 J-CoR 위치 추정 및 손 자세를 분석하는 최적화 모델을 개발함
 - 기존 연구(Cao et al., 2021; Figueroa et al., 2016)는 손가락 J-CoR 위치는 관절체로 구성된 손의 해부학적 특성으로 인해 손 자세, 인접 관절 위치, 손가락길이와 같은 손 치수의 영향을 받는다고 보고함



Hand anthropometric	P-value	Adj-R ²	MSE	Regression Equation of CoR Coordinate (X,Y,Z)
N	0			
FSL	0	99.3	1.79	MCP_COR_X = -32.6 + 18.2 N - 0.287 FSL + 0.206 HW - 0.0868 A
HW	0			
A	0.025			
N	0			
HL	0	90.5	4.5	MCP_COR_Y = 10.7 - 4.74 N + 0.681 HL - 0.623 HW - 0.217 A
HW	0.002			
A	0.019			
A	0	58.1	2.01	MCP_COR_Z = 4.41 - 0.224 A - 0.171 FSL
FSL	0.002			
N	0	97.6	3.11	PIP_COR_X = -31.2 + 17.4 N
N	0.002			
FL	0			
HL	0	93.6	3.6	PIP_COR_Y = 12.5 + 0.213 FL - 5.90 N + 0.787 HL - 0.458 HW - 0.445 A
HW	0.005			
HL	0			
FSL	0	74.2	0.4	PIP_COR_Z = 0.34 - 0.0437 HL - 0.0764 FSL
N	0			
FID	0.011	96.4	3.7	DIP_COR_X = -17.2 + 16.8 N - 0.928 FID
N	0			
FL	0.001			
HL	0	93.4	4.5	DIP_COR_Y = 8.3 - 5.78 N + 0.276 FL + 0.732 HL - 0.742 A
A	0			
FSL	0.009			
HL	0.025	43.8	0.6	DIP_COR_Z = -1.08 - 0.0905 FSL - 0.0261 HL



S3. Deformable Hand Model (DHM) 개발

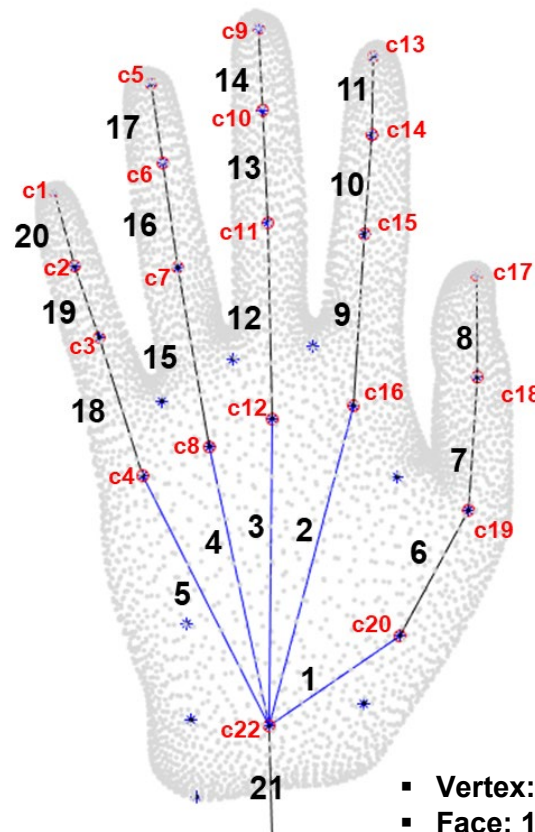
- Scalable, deformable, posable 특성의 digital hand model 개발(Jung et al., 2021)
- Deformable hand model에는 손 특성 분석을 위한 참조점(75개)이 정의됨

CoR coordinations

Digits	Joint	Coordinates		
		X	Y	Z
Digit 2	Tip	-4.15	-6.10	-98.16
	DIP	-1.85	-9.36	-76.81
	PIP	0.45	-13.83	-52.38
	MCP	0.67	-29.17	-10.23
Digit 3	Tip	-23.77	-4.15	-105.64
	DIP	-22.06	-9.28	-82.88
	PIP	-20.78	-16.39	-55.17
	MCP	-19.68	-25.48	-6.63
Digit 4	Tip	-43.83	-4.55	-93.14
	DIP	-42.38	-8.59	-70.29
	PIP	-40.14	-12.90	-43.96
	MCP	-35.41	-18.21	0.80
Digit 5	Tip	-68.04	-2.59	-65.44
	DIP	-65.42	-6.25	-44.81
	PIP	-60.51	-10.26	-26.71
	MCP	-52.06	-12.32	8.34
Digit 1	Tip	31.47	-6.79	-41.49
	IP	31.65	-11.61	-16.29
	MCP	29.43	-12.17	17.01
	CMC	12.24	-16.70	48.18
Wrist		-20.47	-17.32	70.64

Hand bonds & joint CoRs

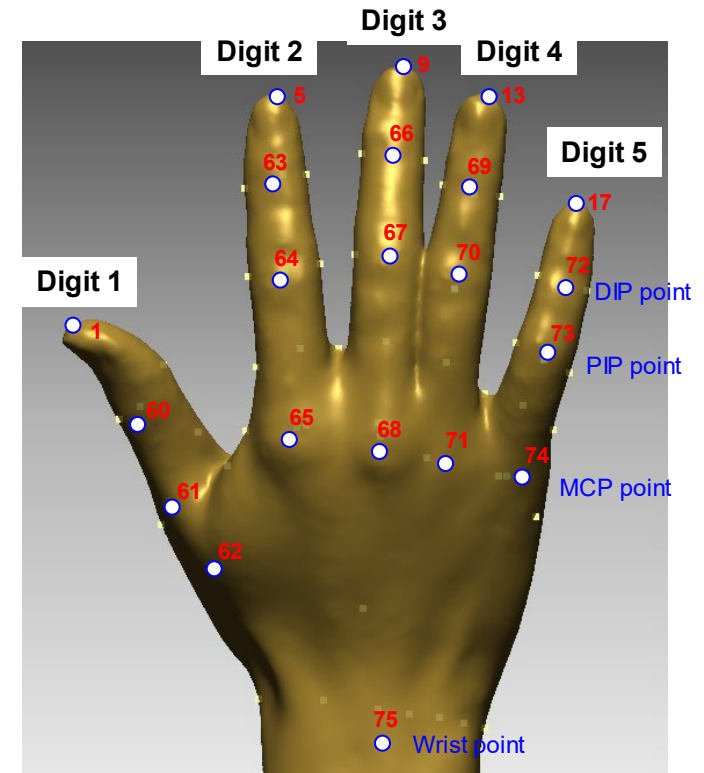
of link: 21, # of joints: 21



- Vertex: 6,984
- Face: 13,964

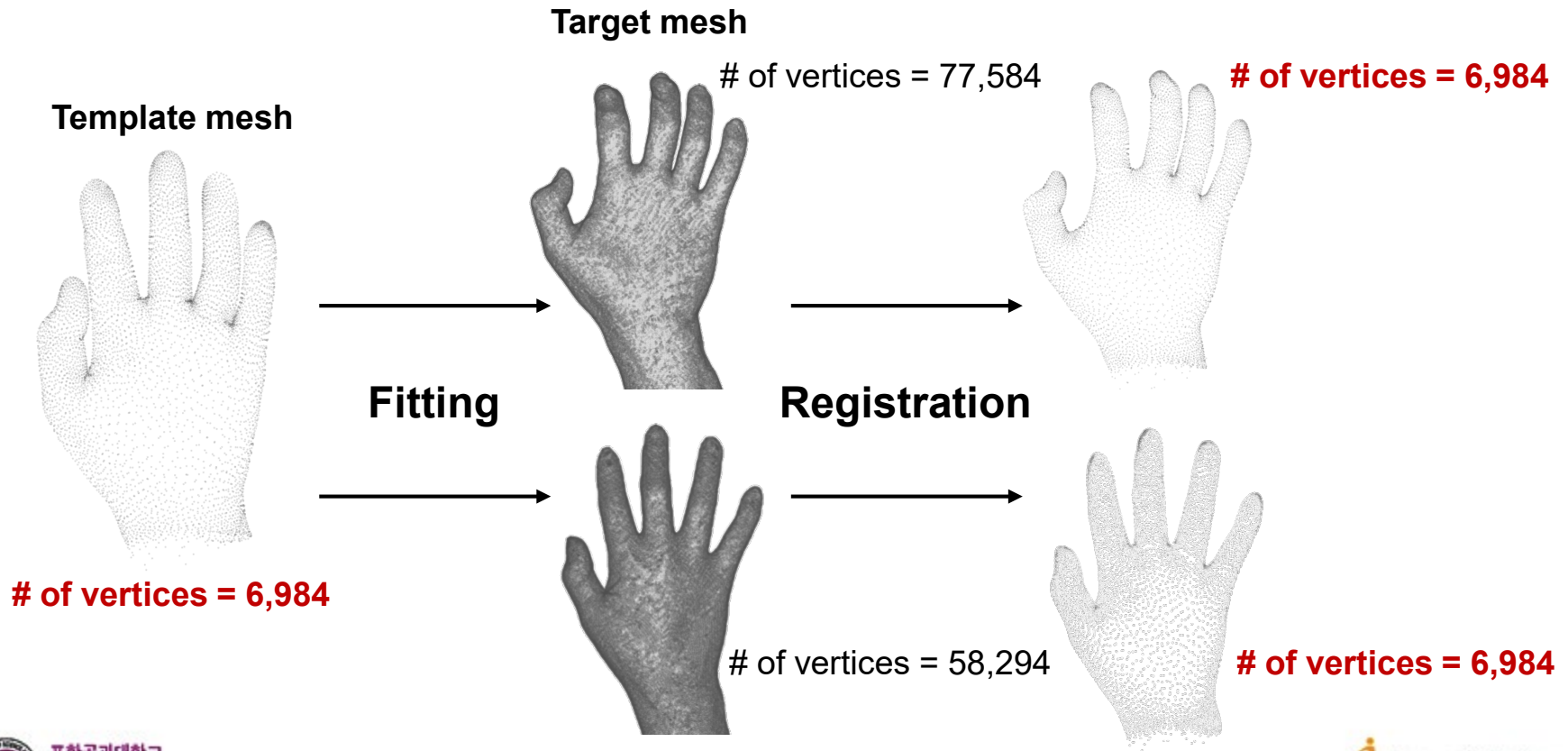
Hand surface landmarks

of landmarks: 75



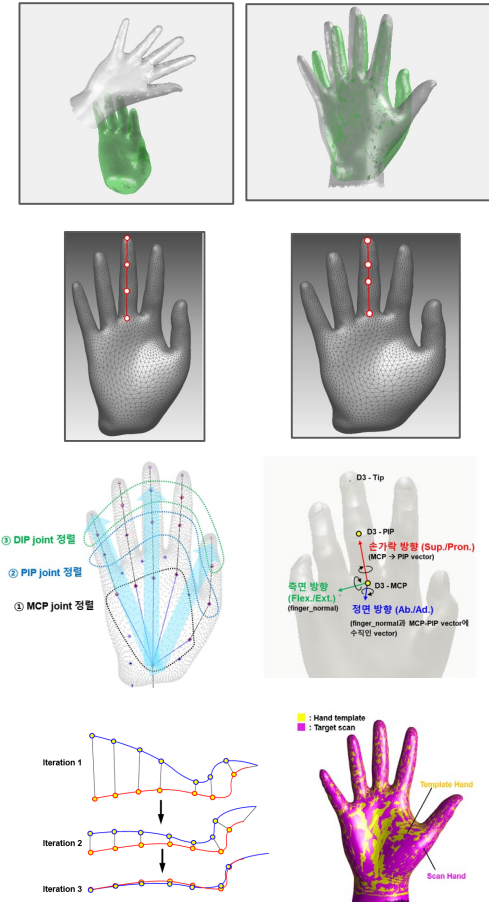
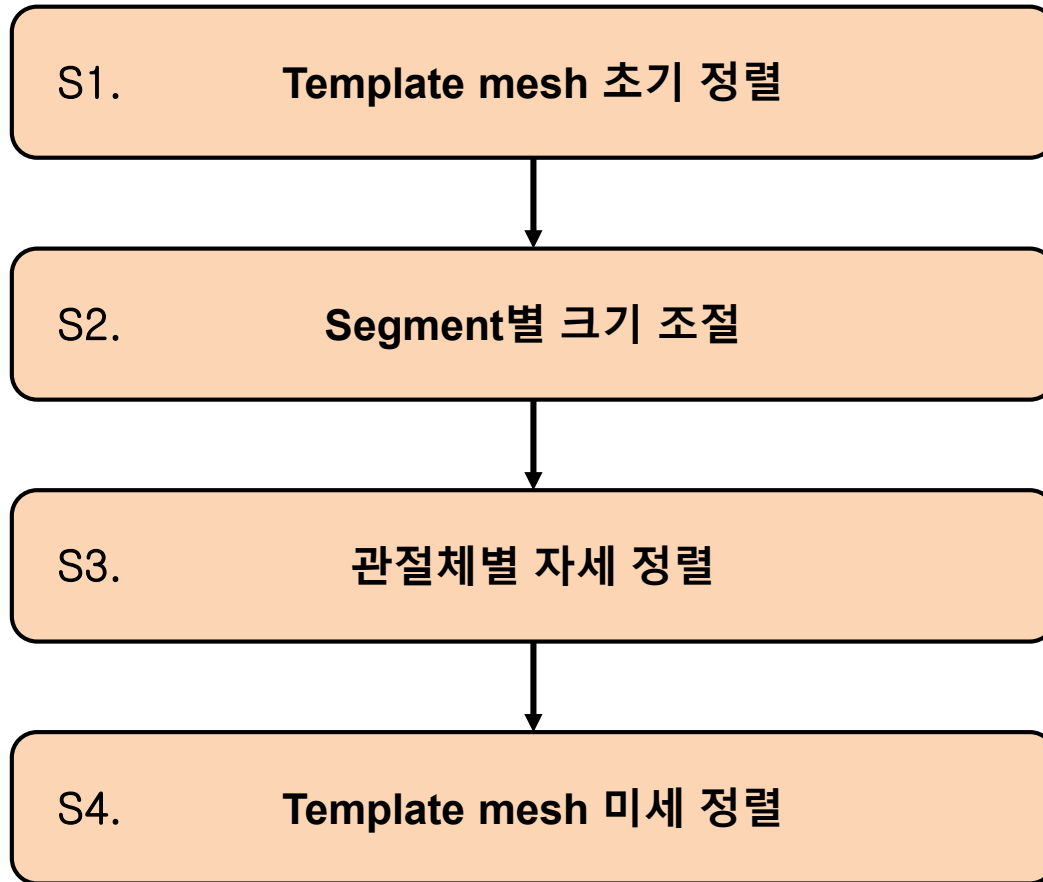
Hand Template Registration 필요성

- 소규모의 landmark set으로 template mesh를 target mesh에 fitting
 - Surface mesh의 vertex 개수와 위치를 일관되게 하여 정형화된 mesh 데이터 구축 가능
 - Template의 vertex index를 활용하여 다수의 landmark set 도출 가능



Hand Template Registration 절차

□ Hand template registration은 4단계 절차로 진행됨



S1. Template Mesh 초기 정렬

- Landmark를 기반으로 **Absolute Orientation Problem Solver** (Horn, 1987)을 활용하여 template model을 scan target과 유사한 크기, 방향으로 초기 정렬 수행

ABSOR
구성 예시

Input data

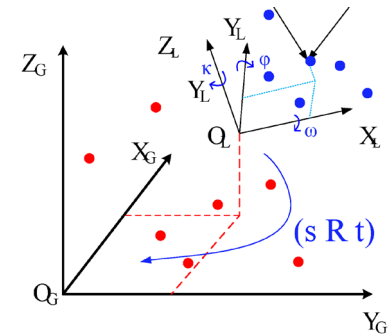
- 아래 점들의 공간 좌표
- n template landmarks
- n target landmarks

Minimize

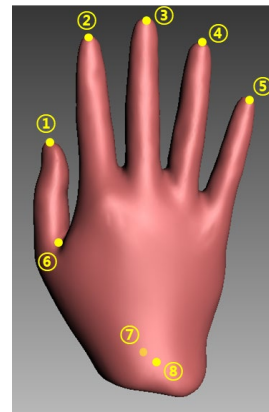
$$\sum_i ||R * A(:, i) + T - B(:, i)||^2$$

Output data

- Rotation matrix R
- Translation matrix T
- Scale factor s
- **Transform matrix M**

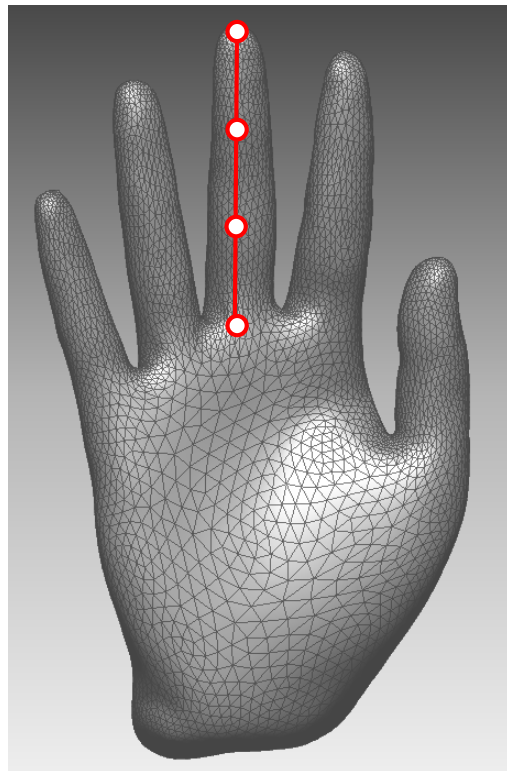


초기 정렬
과정



S2. Segment별 크기 조절

- Hand CT scan 실험 시 측정된 segment 길이를 이용하여 template model의 **segment별 크기를 scan data와 유사하도록 조정**
- 크기 조절 시 **CoR**도 일관되게 **변환**



입력된 Landmarks 정보

손길이 비율 변수 적용 변환



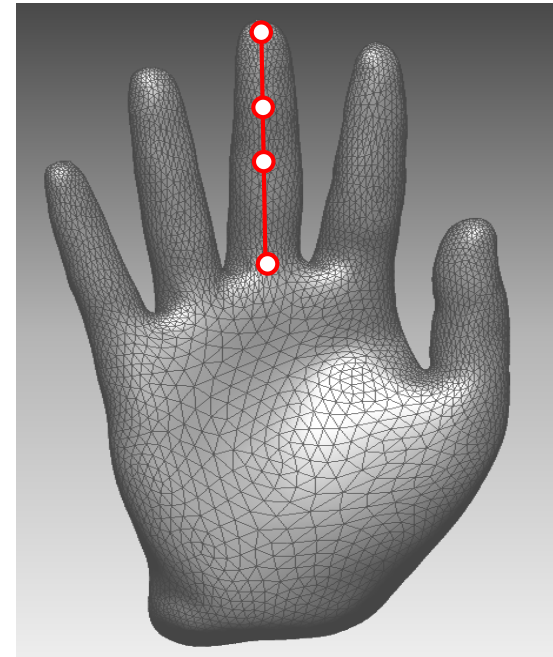
Template

- A: 0.3
- B: 0.4
- C: 0.3



Scan

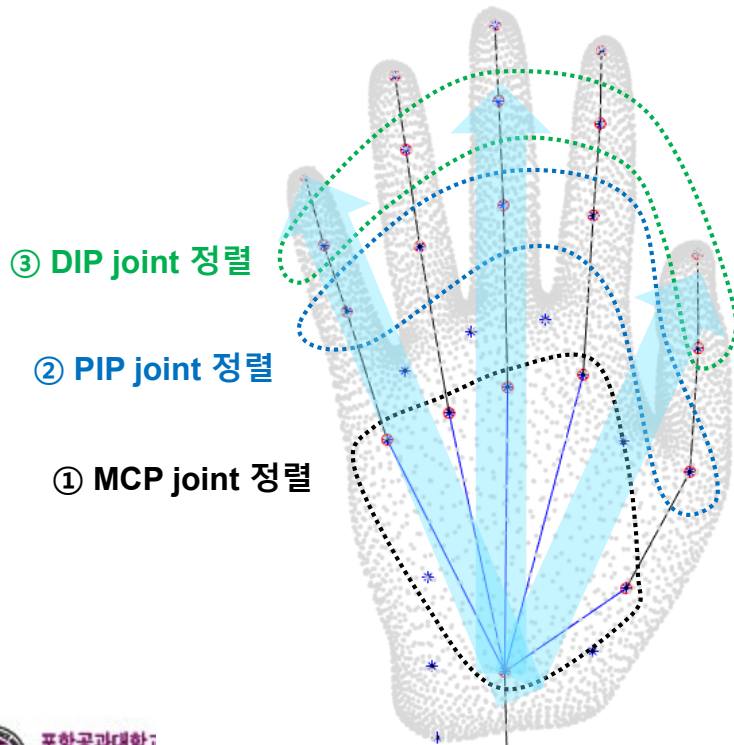
- A: 0.3
- B: 0.5
- C: 0.2



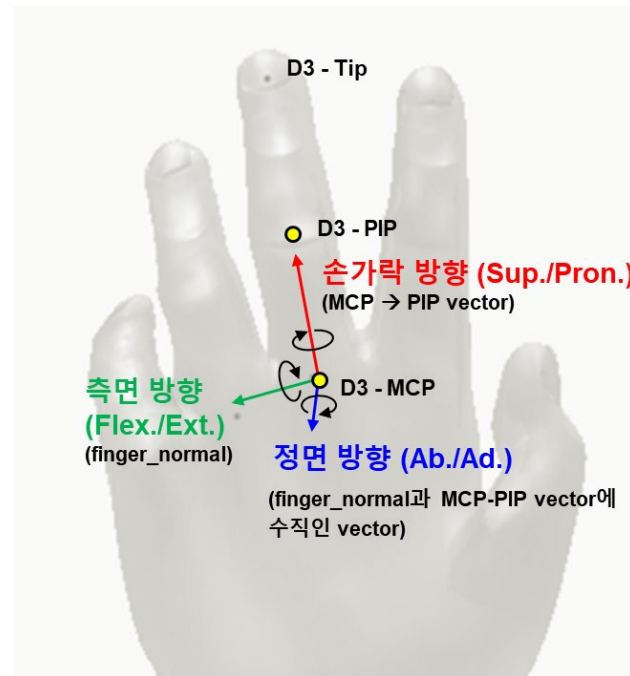
S3. 관절체별 자세 정렬

□ Template model의 **자세 변환**은 **인체 관절의 자유도를 고려**하여 설정된 **관절들의 회전축을 중심으로 최대 동작 범위 내에서 최적화 방법**(quasi-Newton method)을 이용하여 수행됨

Hand Template 관절체 정렬 순서



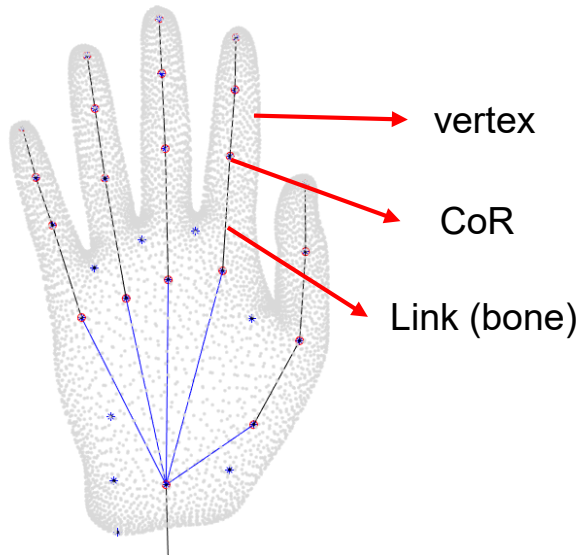
Hand Template 관절 회전축 구성 예시



Discussion: 3차원 Hand Scan Dataset 구축

- 본 연구는 손 표면 및 뼈 형상, 손가락 관절 회전 중심(J-CoR) 정보, 손 표면 참조점 정보가 포함된 정밀한 CT-scan 기반 3차원 hand scan dataset ($n = 79$) 구축
- 3차원 hand scan dataset은 질환 조기 선별, 재활 정도 평가, 인간공학적인 의수 개발 등을 목적으로 한 다양한 digital hand model의 자세 추정 성능 평가 및 검증에 활용될 수 있음

Hand scan dataset 예시



파킨슨병 조기 진단



인간공학적인 의수 개발



