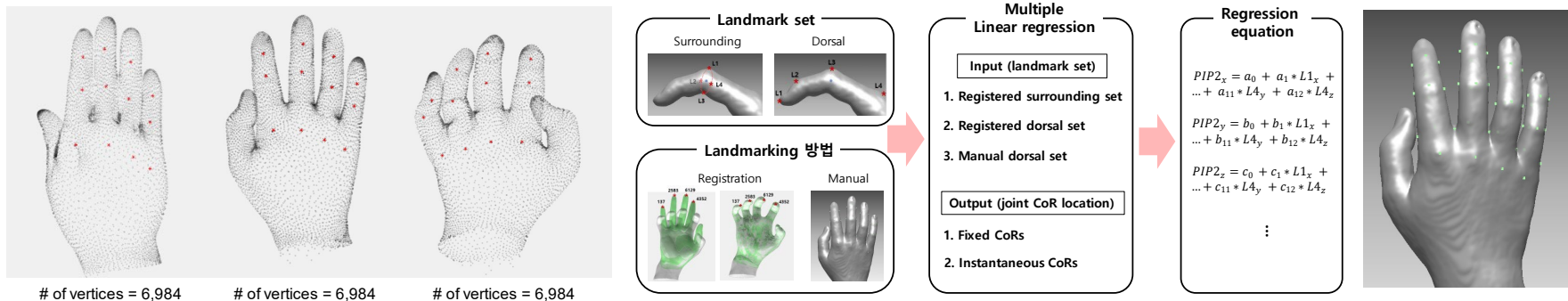


A Method for the Estimation of Finger Joint Center of Rotation Using Dorsal Hand Surface Landmarks



정하영¹, 홍영기¹, 이원섭², 유희천¹

¹ 포항공과대학교 산업경영공학과

² 한동대학교 ICT창업학부

2021년 춘계학술대회

본 연구는 한국연구재단(NRF-2018R1C1B5047805, 2020R1F1A1050076)의 지원을 받아 수행되었습니다.

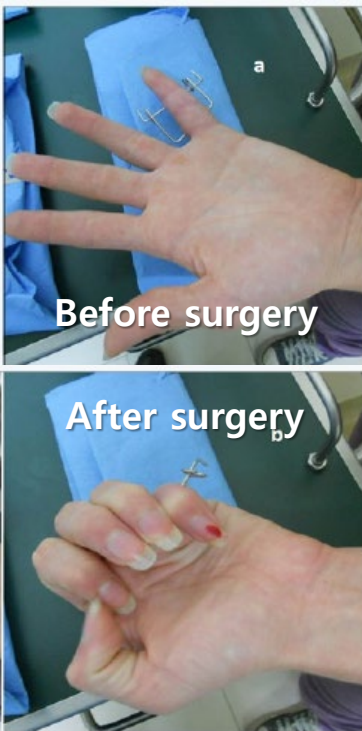
Contents

1. 연구 배경 및 필요성
 2. 연구 목적
 3. 연구 방법 및 결과
 - 3차원 복합 손 형상 데이터 구축
 - 손가락 관절 회전 추정 모델 개발
 - 손가락 관절 회전 추정 성능 평가
 4. 토의
-

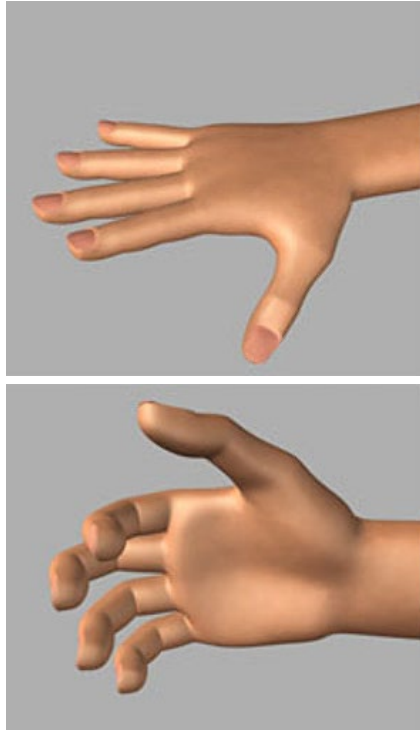
연구 배경

- Digital hand model은 **hand link, surface mesh**로 구성되어 손을 **가상으로 구현함**
- DHM의 적용 분야: 의학적 평가, 손 모델 애니메이션, 인체측정, 인간공학 디자인

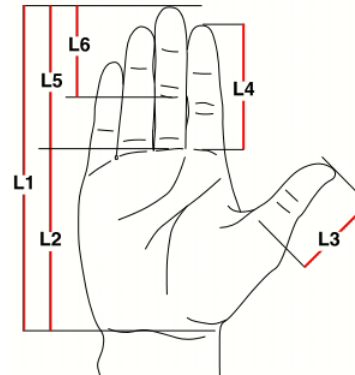
Clinical assessment



Hand animation



Hand anthropometry



Measured Items	Mean (SD) in mm		p-value
	D	I	
Hand length	D	169.21 ± 7.30	0.182
	I	168.93 ± 4.36	
Index finger Length	D	65.32 ± 3.61	0.655
	I	64.90 ± 1.61	
Medius finger length	D	72.75 ± 3.59	0.846
	I	72.54 ± 1.57	
Ring finger length	D	68.01 ± 3.88	0.246
	I	68.05 ± 2.14	
Little finger length	D	53.63 ± 3.98	0.54
	I	53.13 ± 1.28	
Palm length perpendicular	D	97.05 ± 5.09	0.854
	I	97.02 ± 3.15	
Hand breadth with thumb	D	76.91 ± 3.69	0.68
	I	75.84 ± 2.54	
Hand breadth with wrist	D	52.08 ± 3.16	0.15
	I	51.87 ± 2.58	
Hand thickness	D	26.29 ± 2.15	0.14
	I	26.14 ± 1.24	
Hand circumference	D	177.73 ± 9.0	0.94
	I	177.624 ± 2.1	

D: Direct measurement method, I: Indirect measurement method.

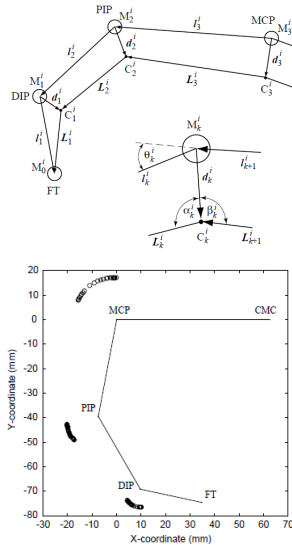
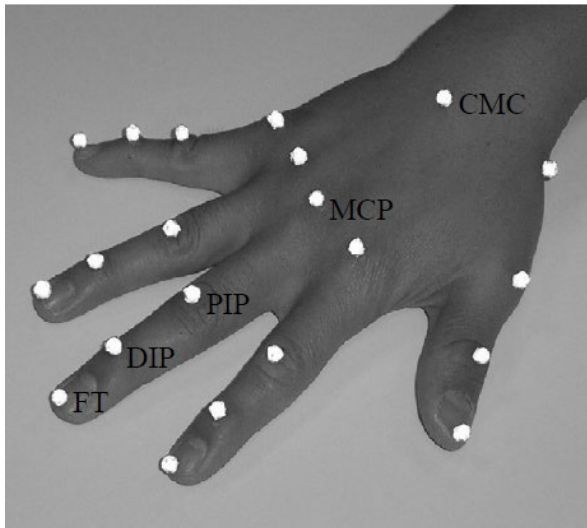
Ergonomic design



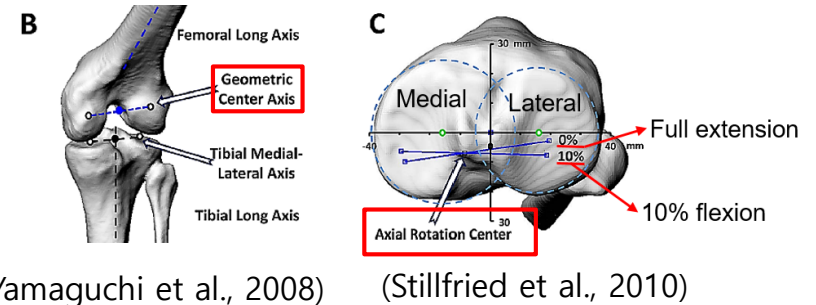
Hand Link Model 구축 방법

- Hand link model은 손 자세를 구현하는데 필요하며, 정확하게 손가락 관절 회전 중심이 정의되어야 함
- 손가락 관절 회전 중심을 추정하는 방법으로 손 표면 기반, 뼈 기반 방법이 존재함

Surface-based hand joint COR estimation
(Zhang et al., 2003)

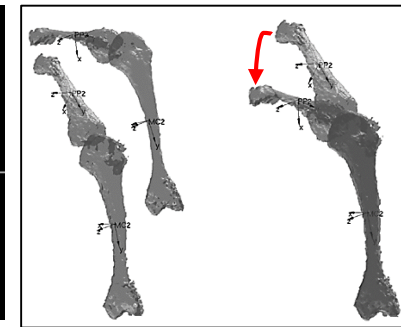
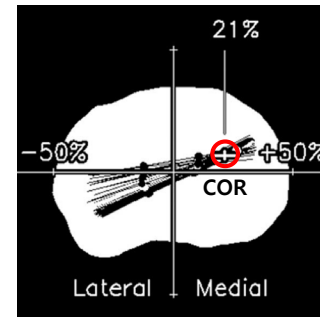


Skeleton-based hand joint COR estimation
(Yong Feng et al., 2015)



(Yamaguchi et al., 2008)

(Stillfried et al., 2010)



기존 연구의 한계점

□ 손 표면 기반 방법

- 비침습적 방법으로 안전하게 측정 가능하나 측정이 번거롭고 처리에 많은 노력이 요구됨
- 손가락 관절 회전 중심 추정 결과의 검증 불가

□ 뼈 기반 방법

- MRI나 CT-scan 같은 침습적 방법으로 피실험자의 부담, 데이터 수집 및 처리 비용이 높음
- 손 동작에 대해 제한된 frame에 대해서만 측정(자세별 scan 수 제한)

Type	뼈 기반 CoR 추정	표면 기반 CoR 추정
Data type	Medical images data (MRI/CT)	Surface motion data
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Reuleaux, bone curvature, PCA 	<ul style="list-style-type: none"> • Circle fitting, optimization
Strengths	<ul style="list-style-type: none"> • CoR 위치 시각화 용이 • 높은 정확성 	<ul style="list-style-type: none"> • 데이터 수집 용이 • 비용 • 안전성
Limitations	<ul style="list-style-type: none"> • 비용 • 방사능 노출 위험 • 데이터 처리 시간 	<ul style="list-style-type: none"> • Static mesh에서 CoR 추정 불가능 • 계산의 복잡성

3차원 손 형상 모델과 인체 참조점을 이용한 손가락의 관절 회전 중심(Joint CoR) 추정

1. 3차원 손 형상 데이터 구축
2. Surface landmarks 기반 joint CoR 추정 모델 개발
3. Surface landmarks 기반 joint CoR 추정 모델 평가 및 검증

연구 절차

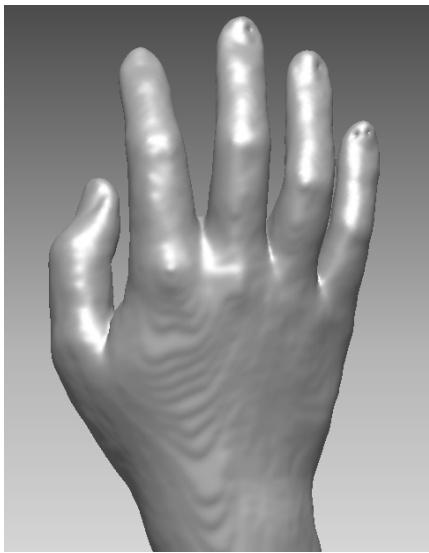


- Deformable hand model
 - Vertices and Faces
 - Accurate joint CoR
 - Hand Link model
-
- Dorsal Landmark Set
 - Surrounding Landmark Set
 - Multiple linear regression model
-
- Surrounding vs. Dorsal Set
 - Performance evaluation
(Previous vs. Present study)

S1. 3차원 복합 손 형상 데이터

- 본 연구에서 사용된 **3D hand model**은 vertex, face, **surface mesh**, **center of rotation (CoR)**, **skeletal structure**로 구성됨
 - Vertex: model 표면을 이루는 점
 - Face: 3개 또는 4개의 vertex를 이은 표면의 최소 단위
 - Surface mesh: face가 합쳐진 model의 표면 형상

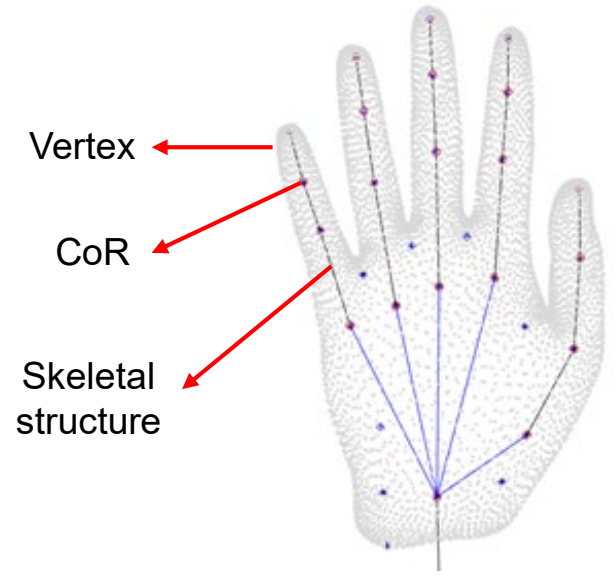
Surface mesh



Skeletal structure

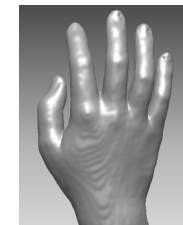
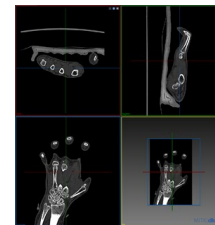
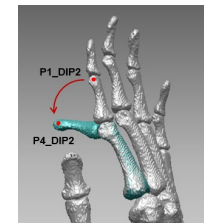
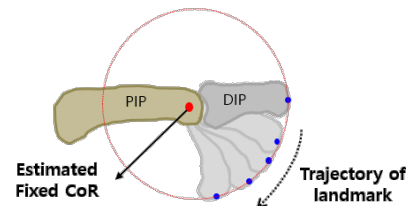
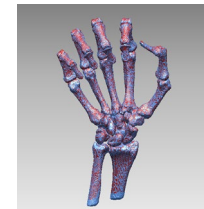
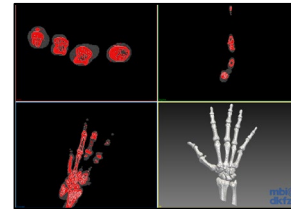
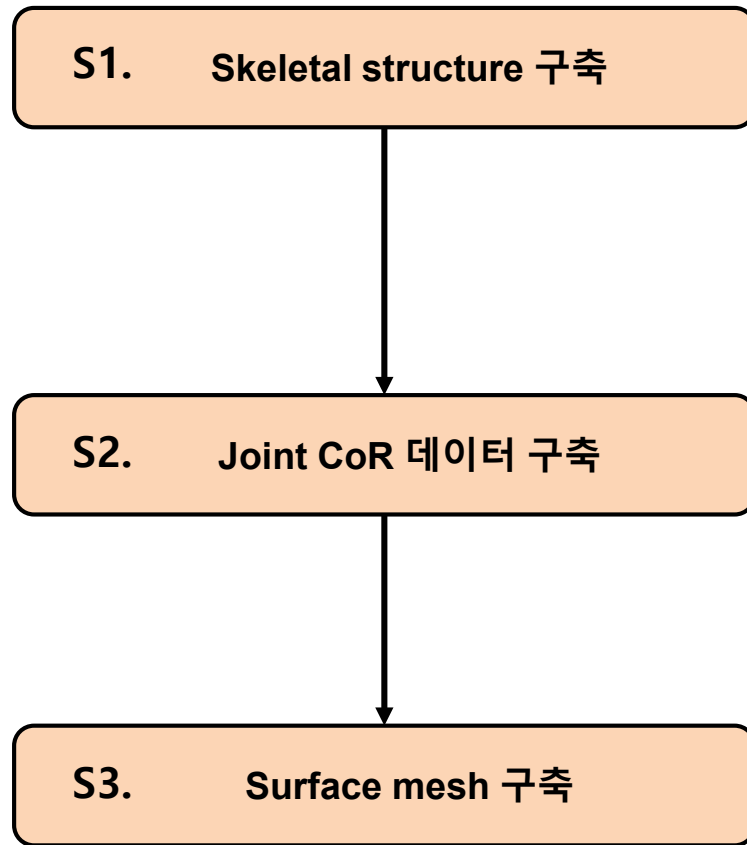


Hand model



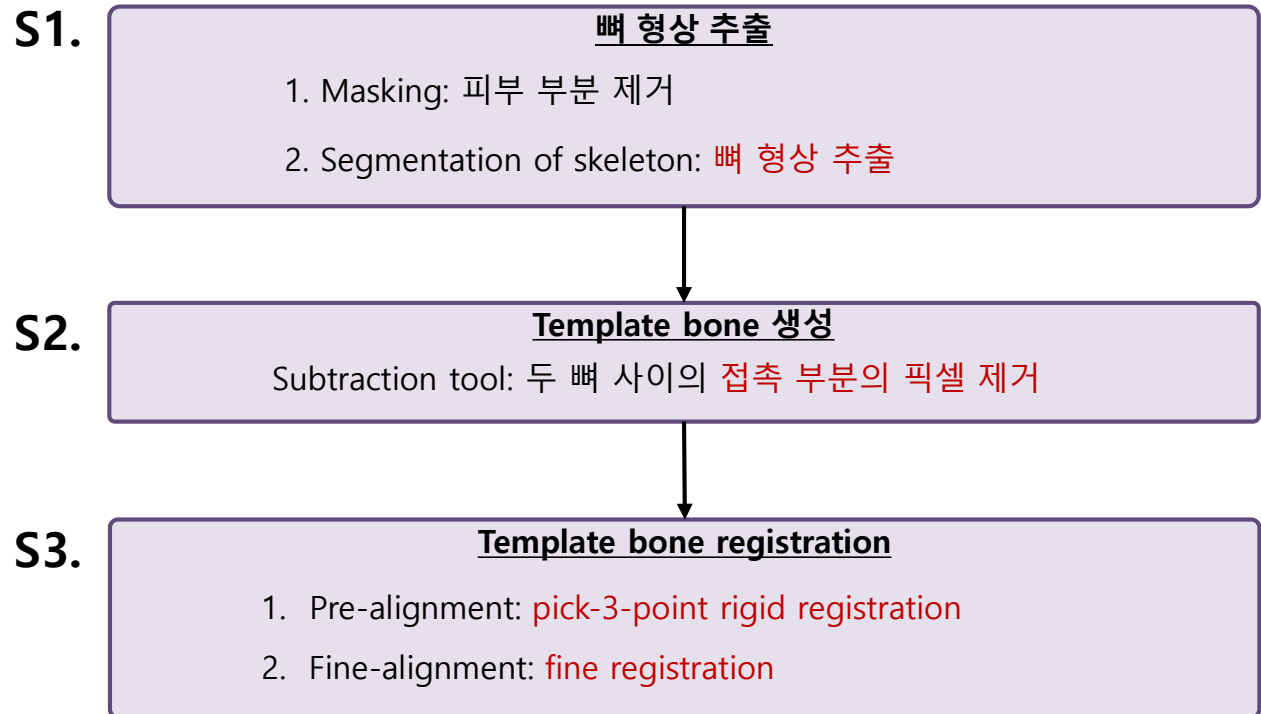
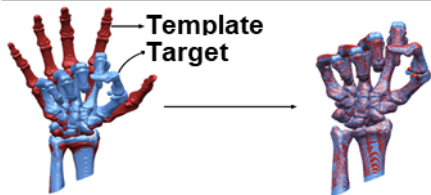
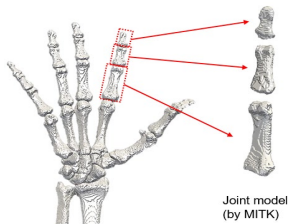
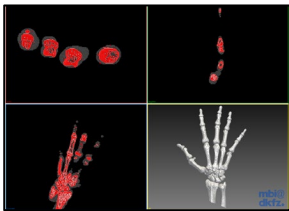
3차원 손 형상 데이터 구축 절차

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



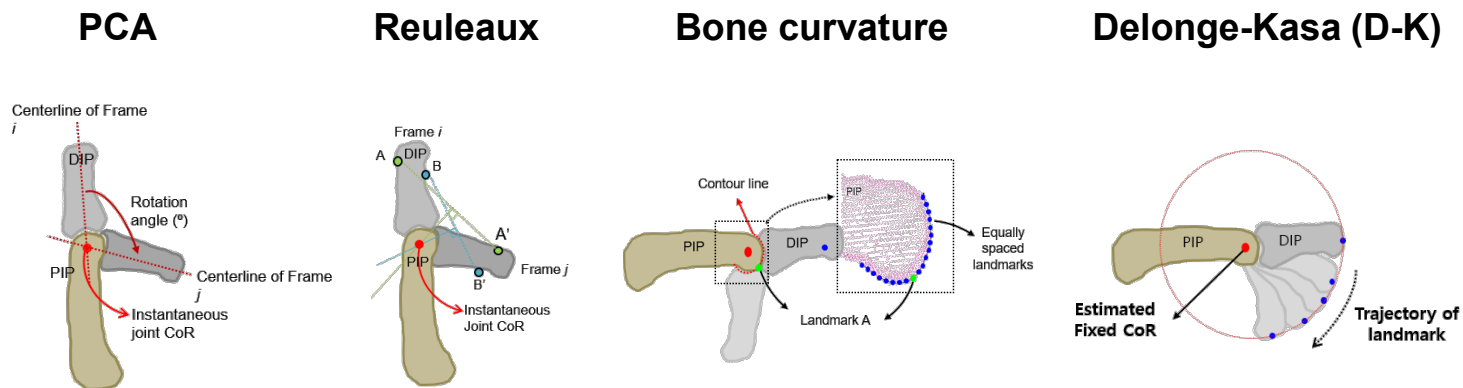
3차원 손 형상 데이터 구축: Skeletal Structure (1/2)

- CT scan 데이터 처리 프로그램(MITK; Nolden et al., 2013)을 사용하여 뼈 형상 추출
- **Posture 1(편 자세)**의 뼈 형상을 **template bone**으로 사용하여 나머지 자세에 적용



3차원 손 형상 데이터 구축: Fixed Joint CoR (1/2)

- **D-K method**를 활용하여 추정된 **fixed joint CoR** 데이터의 consistency가 가장 높음
 ⇒ **reference fixed joint CoR**로 구축



Mean distance

0.95

0.82

0.92

0.77

Consistency ↑

$$\text{Mean distance, mm} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{i \neq j}^N |X_i - X_j|^2}{C_N^2}$$



Mean distance



Consistency

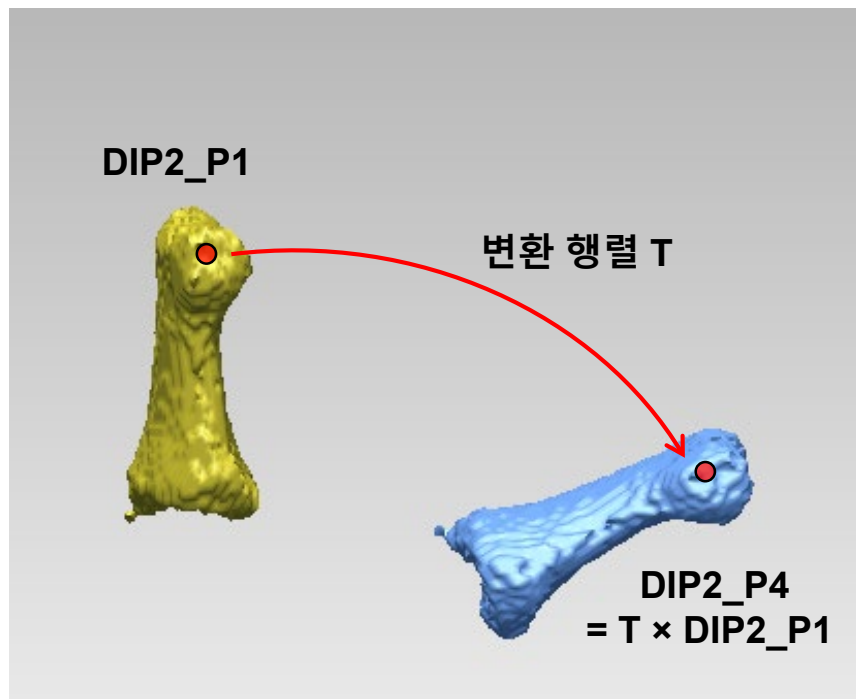
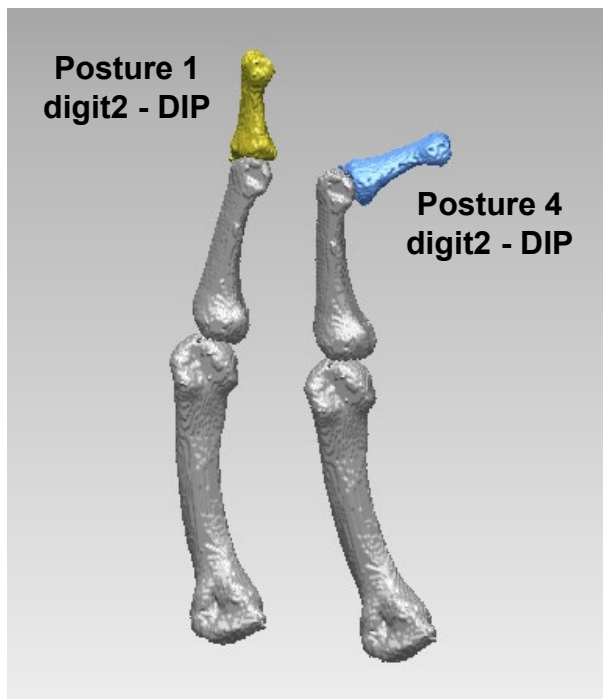
N = the number of postures used for joint CoR estimation

X_i = the estimated joint CoR for posture i

C_N^2 = the number of all possible combinations of two estimated joint CoRs chosen from N

3차원 손 형상 데이터 구축: Fixed Joint CoR (2/2)

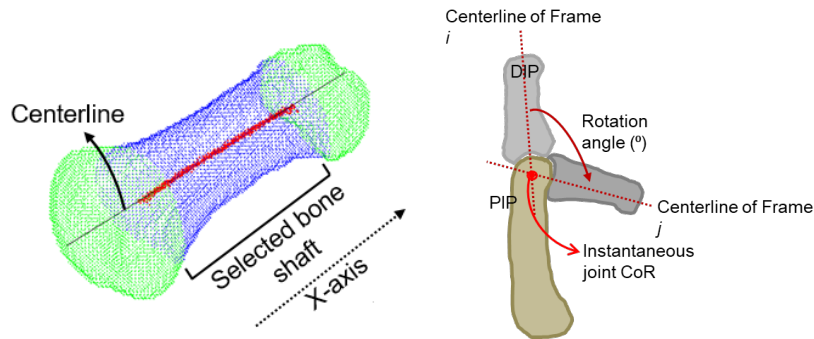
- Posture 1 (P1)에서 나머지 자세로 위치를 변환하는 **변환 행렬을 도출**하여 **posture 1~10 (P1 ~ P10)에서의 fixed joint CoR 데이터 구축**



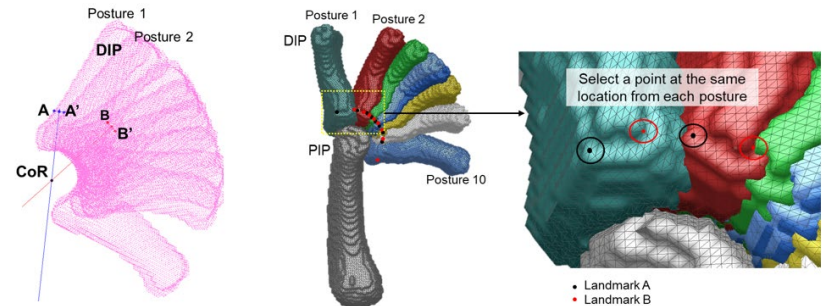
3차원 손 형상 데이터 구축: Instantaneous Joint CoR

- 선행 연구(Lim et al. 2018)의 Instantaneous CoR 추정 방법 중 **PCA method** (Figuroa et al., 2016)를 활용하여 추정된 **instantaneous CoR** 데이터의 consistency가 가장 높음
⇒ **reference instantaneous joint CoR**로 구축

Figuroa et al.'s method



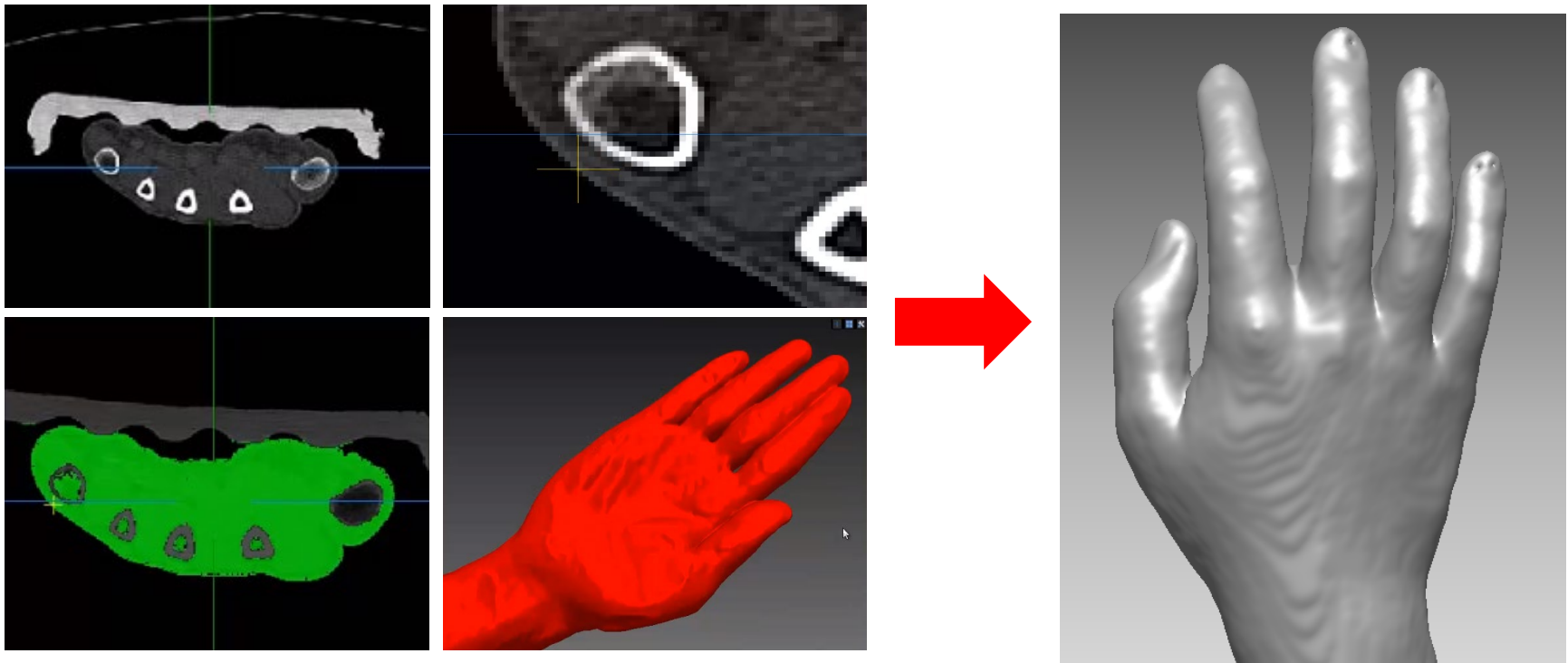
Reauleaux's method



Consistency ↑

3차원 손 형상 데이터 구축: Surface Mesh

- CT scan 데이터 처리 프로그램(MITK; Nolden et al., 2013)을 사용하여 **석고 부분과 뼈 부분을 분리**하고 **surface mesh 구축**



Surface Mesh 데이터 특성

- Mesh마다 vertex의 개수가 다르고 vertex 위치의 일관성이 없음
- **Template registration**을 통해 **vertex의 개수와 위치를 일관되게** 할 수 있음

of vertices = 77,092



of vertices = 55,890



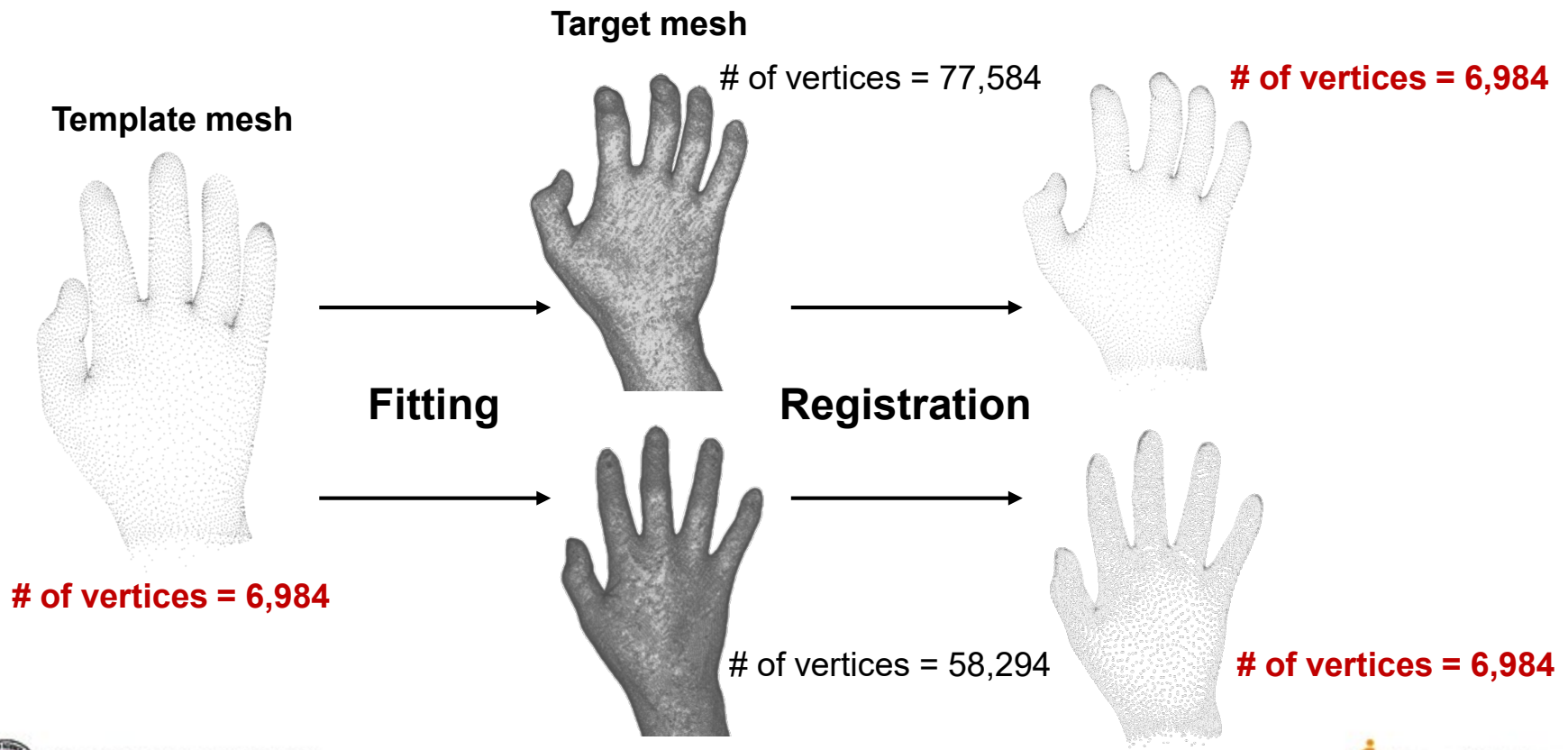
of vertices = 80,744



Hand Template Registration 필요성

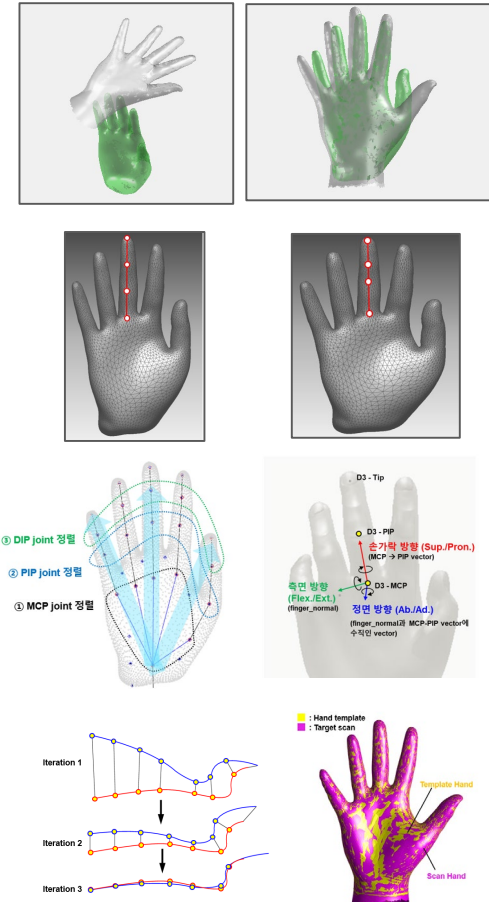
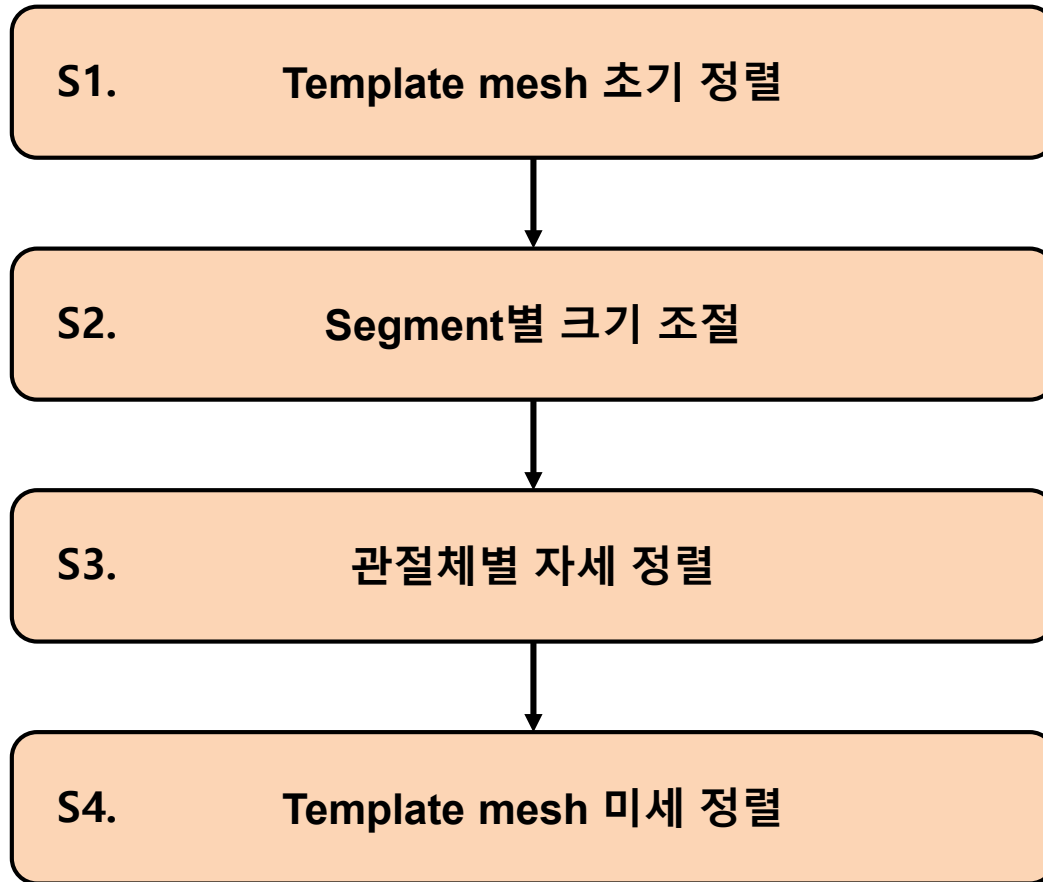
□ 소규모의 landmark set으로 template mesh를 target mesh에 fitting

- 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

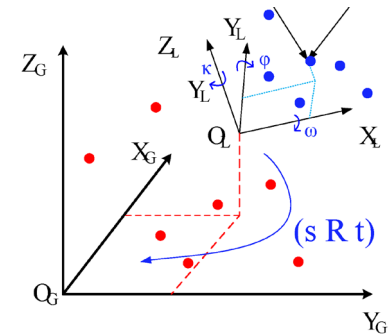
- 아래 점들의 공간 좌표
- n template landmarks
- n target landmarks

Minimize

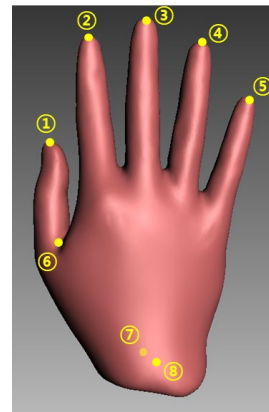
$$\sum_i ||R * A(:, i) + T - B(:, i)||^2$$

Output data

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

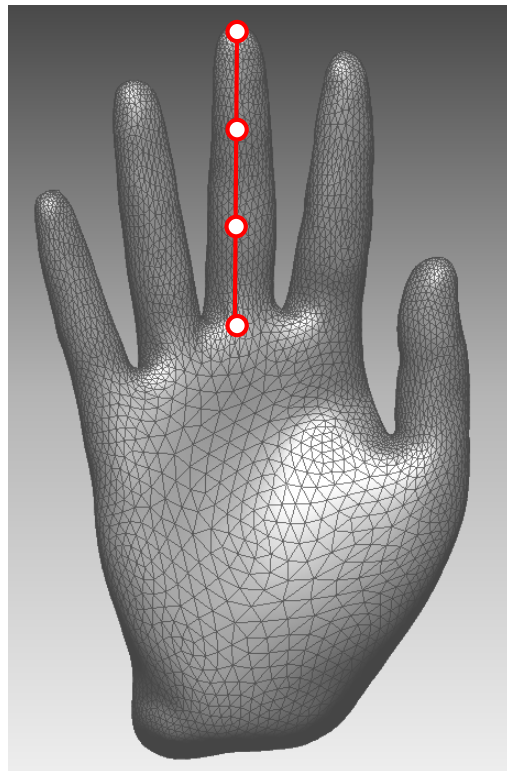


초기 정렬
과정



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



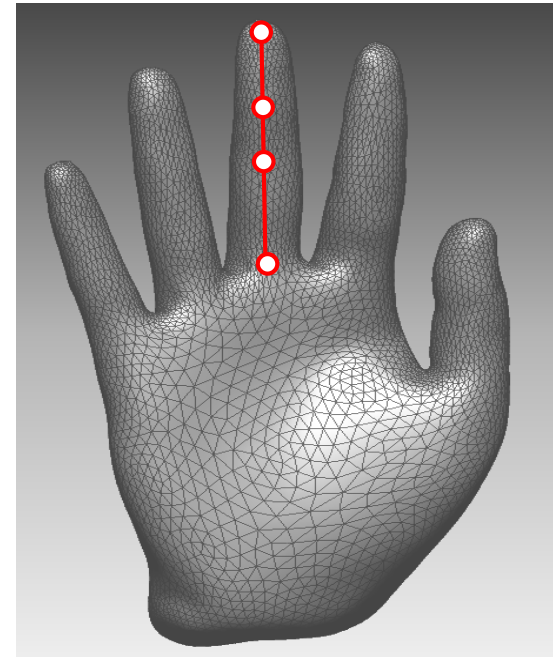
Template

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



Scan

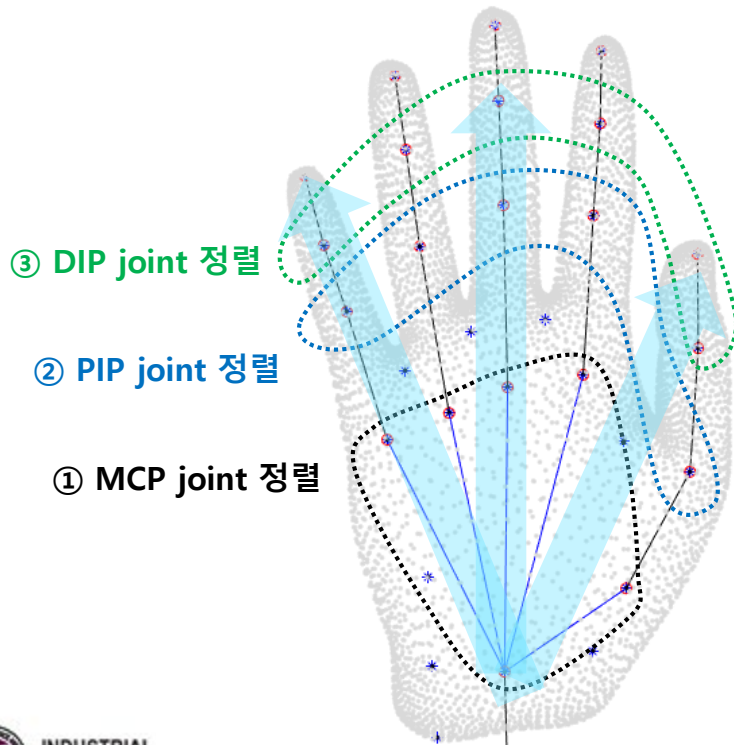
- A: 0.3
- B: 0.5
- C: 0.2



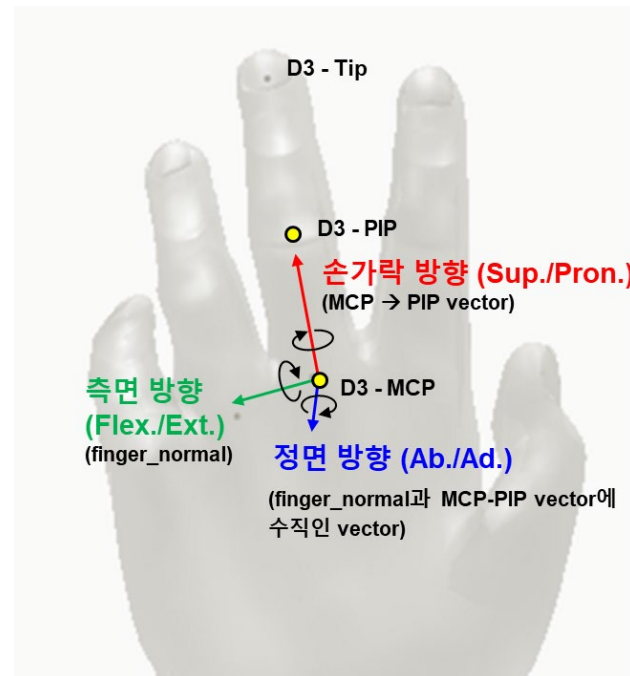
S3. 관절체별 자세 정렬

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

Hand Template 관절체 정렬 순서



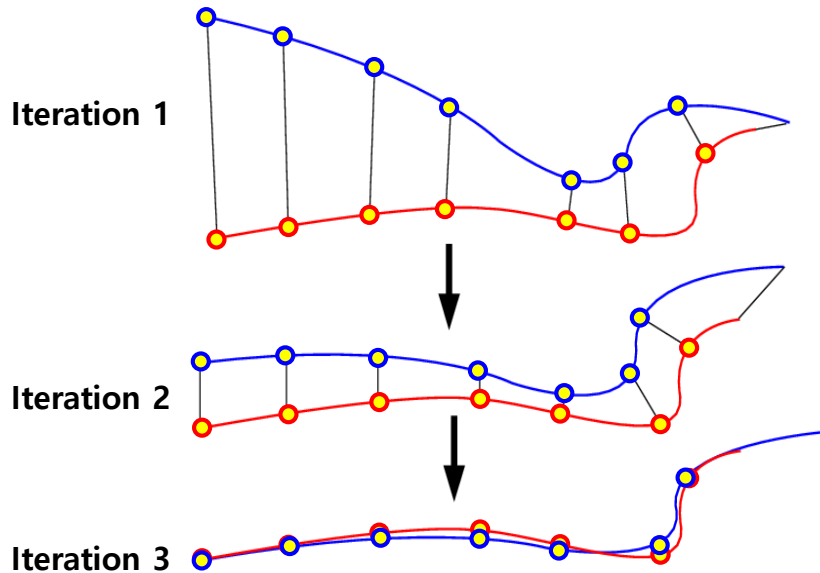
Hand Template 관절 회전축 구성 예시



S4. Template Mesh 미세 정렬

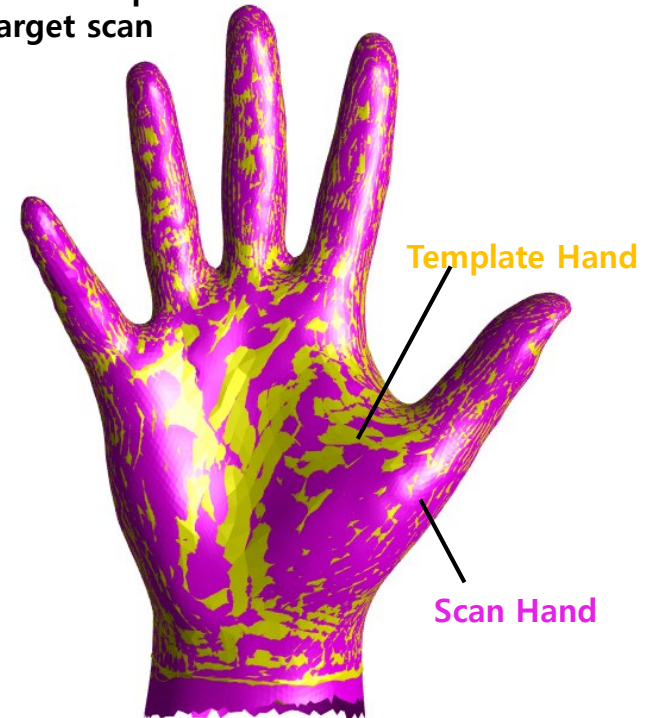
- 자세가 정렬된 template model은 **non-rigid ICP** 정렬 방법을 이용하여 **scan data에 미세 정렬됨**

Non-rigid Iterative Closest Point (ICP) registration



ICP registration 결과 예시

■ : Hand template
■ : Target scan

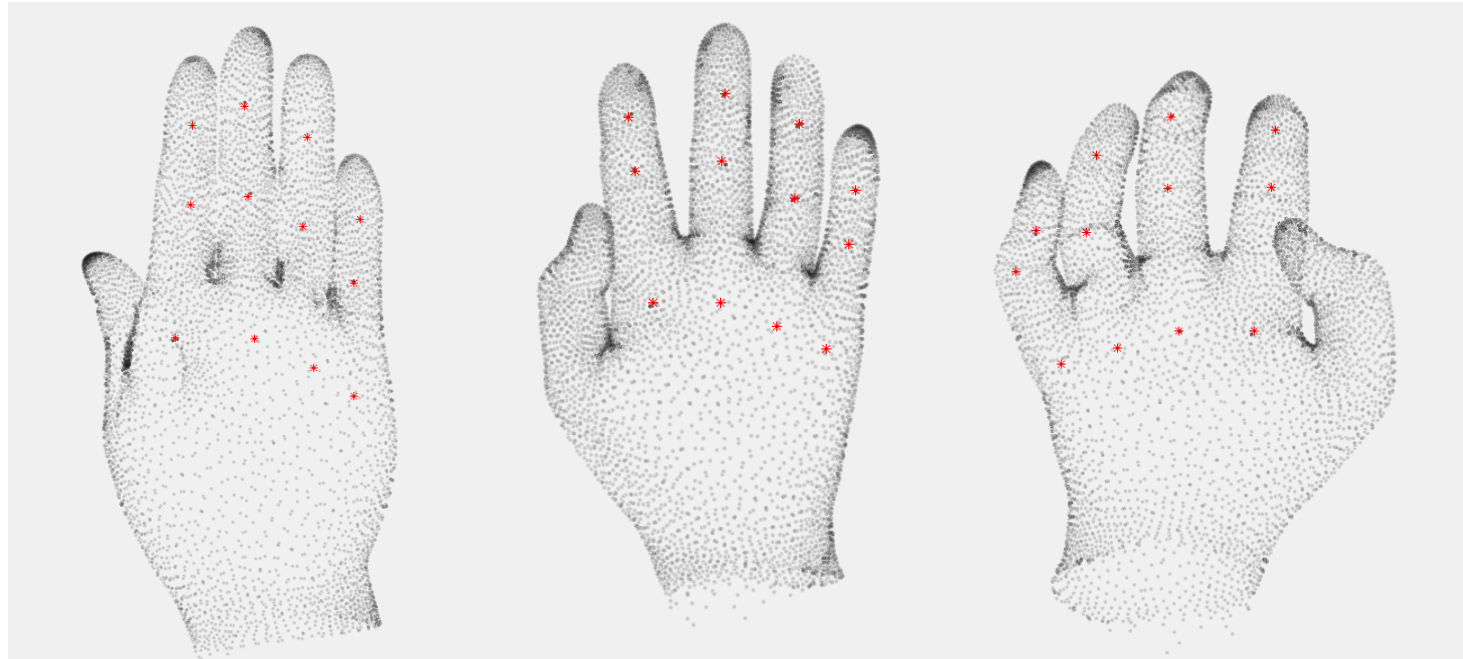


구축된 3차원 복합 손 형상 데이터

□ Template registration을 통해 최종적인 3차원 손 형상 데이터 구축

- 정형화된 **surface mesh**
- 자세별 **joint CoR**

구축된 3차원 손 형상 surface mesh & fixed joint CoR example



of vertices = 6,984

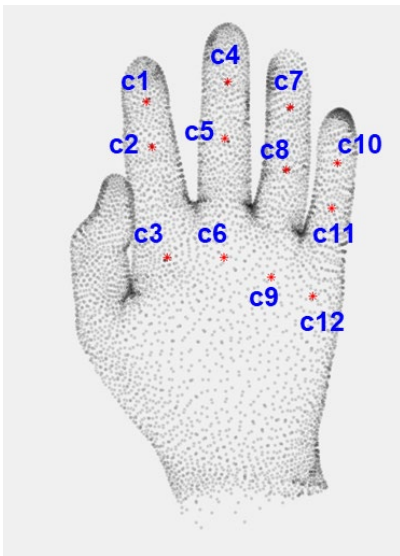
of vertices = 6,984

of vertices = 6,984

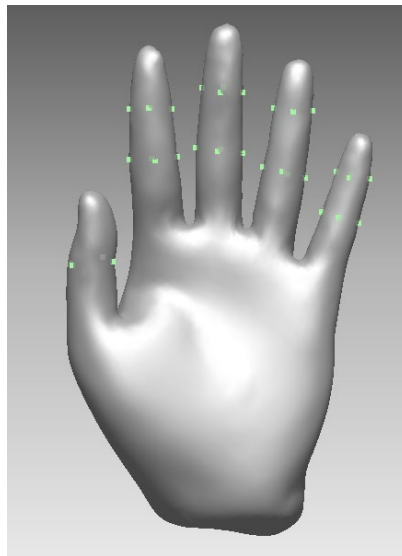
S2. Surface Landmarks 기반 CoR 추정 모델 개발

- 구축된 3차원 손 형상 데이터의 **CoR 위치 정보를 true CoR로 가정**하여 **surface landmarks**를 기반으로 **CoR의 위치를 추정하는 모델** 개발
- Digit 2(검지) ~ digit 5(소지)의 DIP, PIP, MCP 추정(총 12개의 CoR 추정)

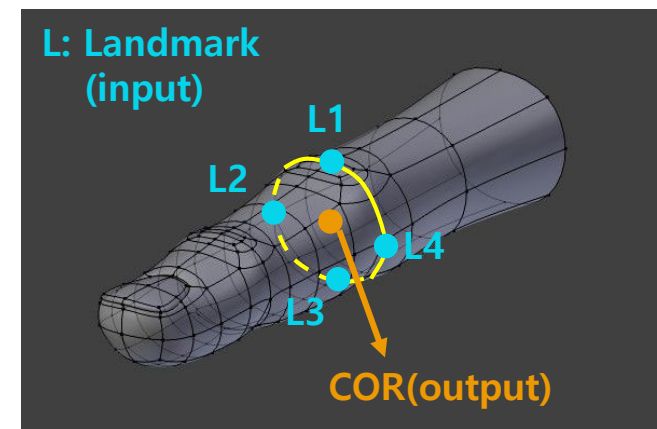
Joint CoR



Surface landmark example

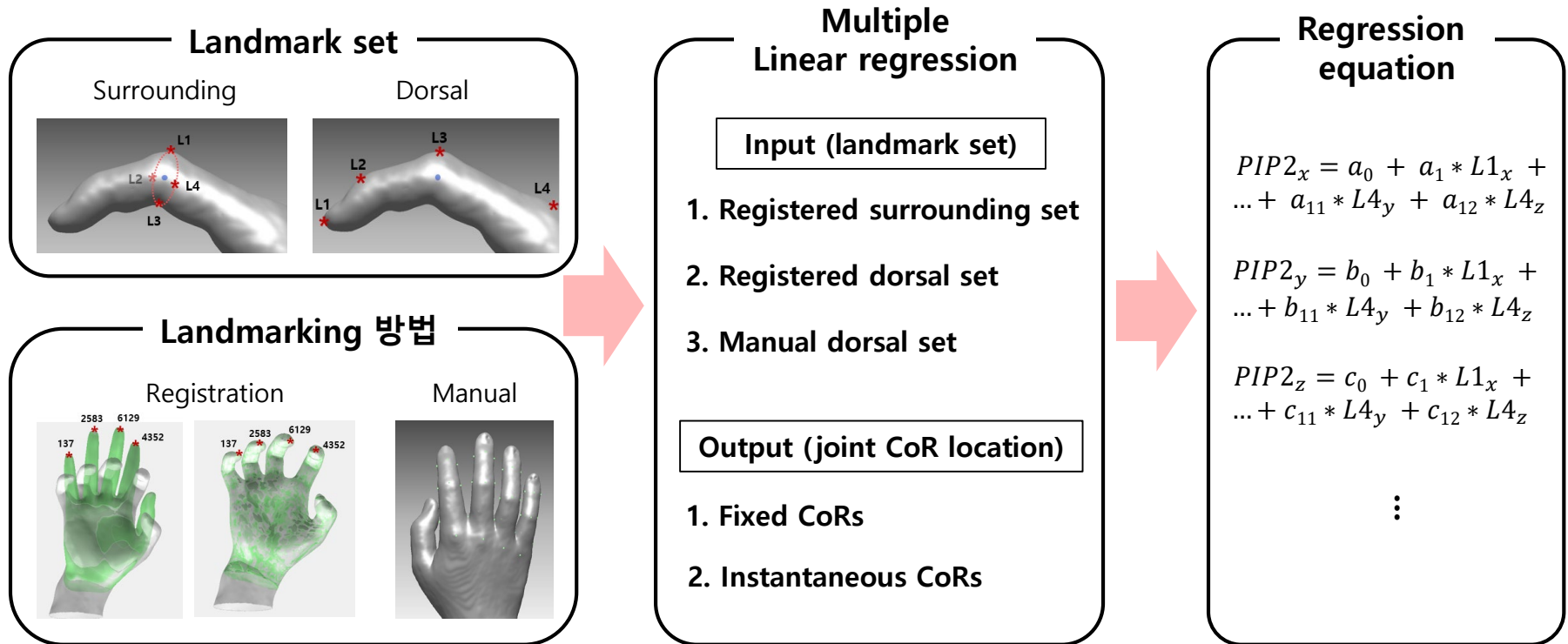


Input-output pair example



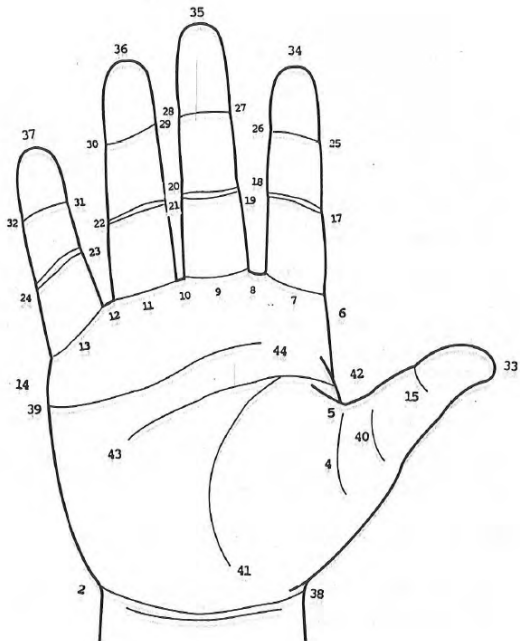
CoR 추정 모델 개발 개요

- **Landmark set**과 **landmarking 방법**을 다르게 하여 **3가지 input landmark set** 정립
- 정립된 **input (landmark set)**과 **output (CoR location)**을 **활용**하여 joint CoR 추정 **regression 모델** 개발



Landmark Set 정립

- 일반적으로 hand landmark는 **손의 뼈 구조 및 손 주름에 기반하여 정의됨**
- 선행 연구(Grenier, 1991)에서 정의된 hand landmark를 기반으로 **본 연구에서 joint CoR 추정을 위해 활용될 수 있는 hand landmark set (44개)이 정립됨**



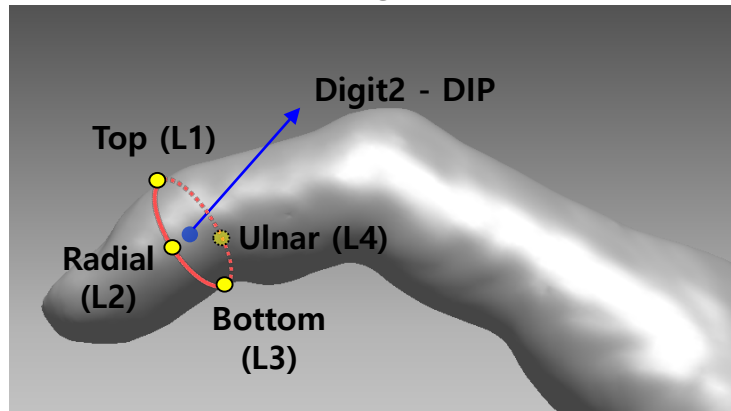
Grenier (1991)

No.	Name
1	Stylian (origin)
2	Ulnar edge of the distal wrist crease
3	Radial edge of the distal wrist crease
4	The base of digit 1
5	Crotch 1
6	Palm breadth – radial edge
7	The base of digit 2
:	:
44	Termination of the distal transverse crease

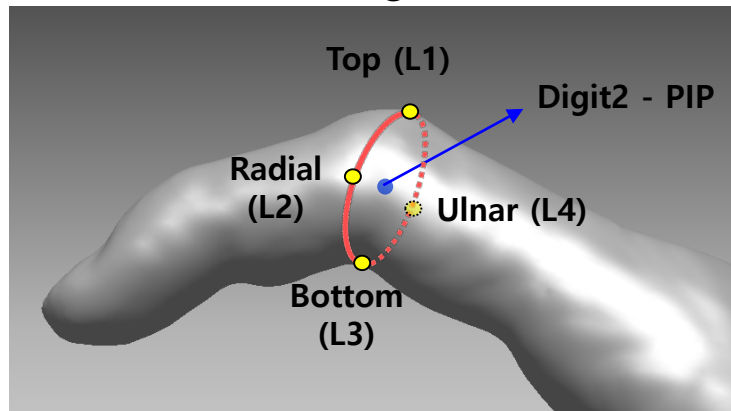
Landmark Set 1: Surrounding Landmark Set

- Surrounding landmark set: CoR 주변 **상하좌우 방향**의 landmark **4개**

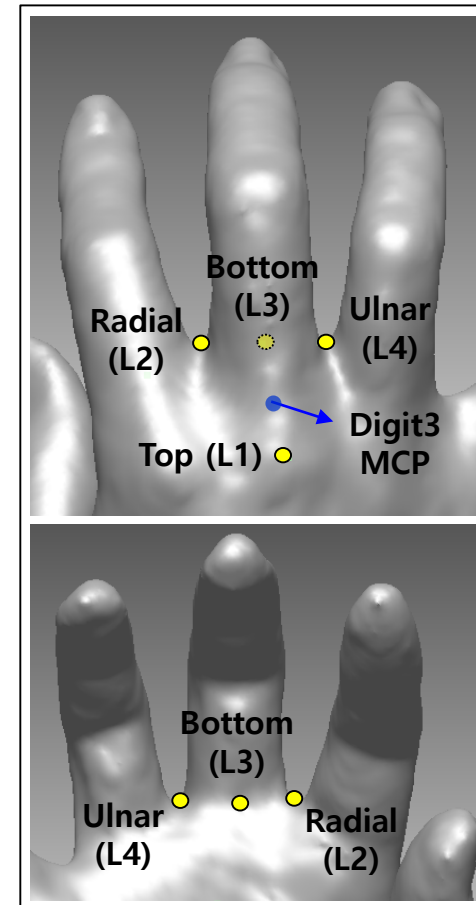
DIP surrounding landmark set



PIP surrounding landmark set



MCP surrounding landmark set



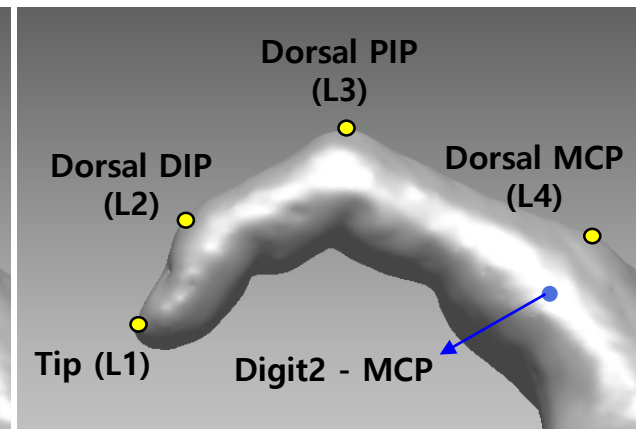
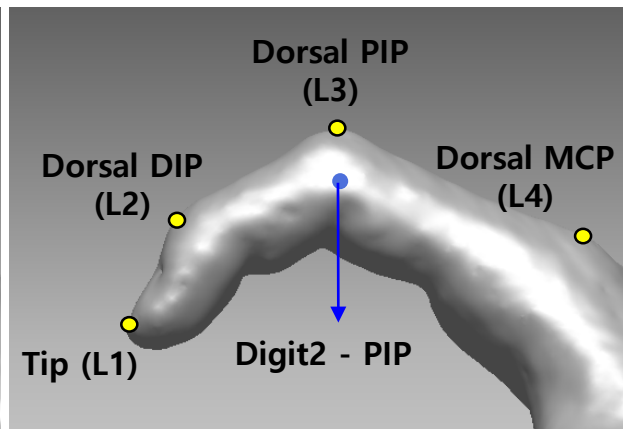
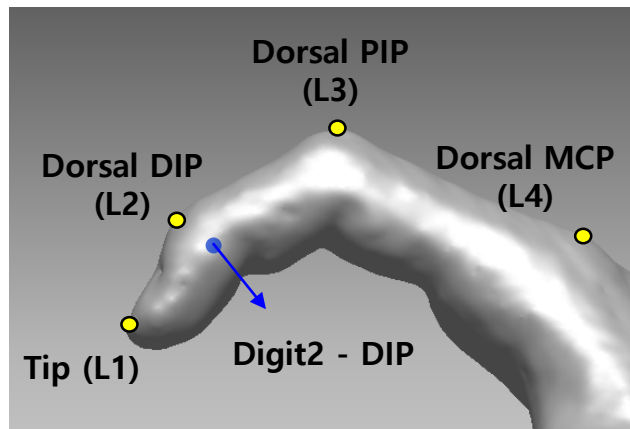
Landmark Set 2: Dorsal Landmark Set

□ Dorsal landmark set: **손등 면**의 landmark **4개**, **손가락별로 동일하게 적용**

DIP dorsal landmark set

PIP dorsal landmark set

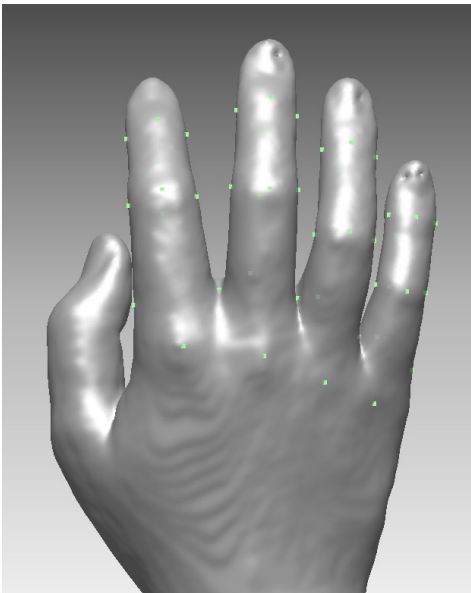
MCP dorsal landmark set



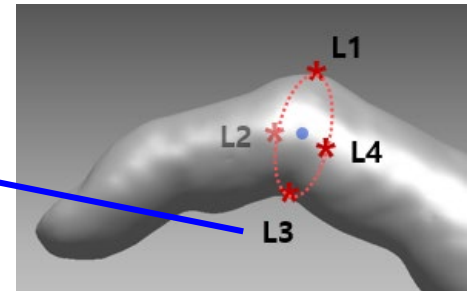
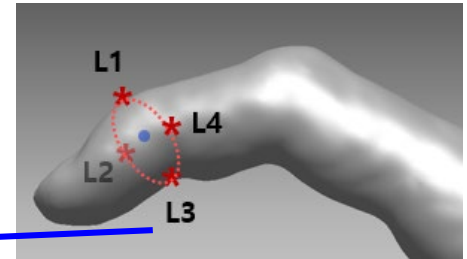
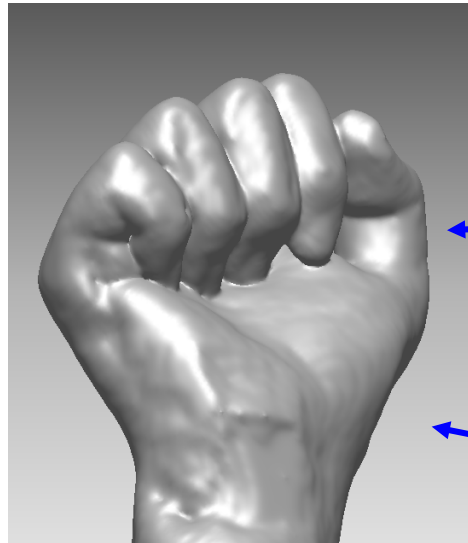
Landmarking Method: Manual Landmarking

- Surface mesh 상에 landmark를 manual하게 삽입하는 방법
- Surrounding set 삽입 시 일부 mesh에서 손바닥 면의 landmark 삽입이 불가능

Manual landmarking example

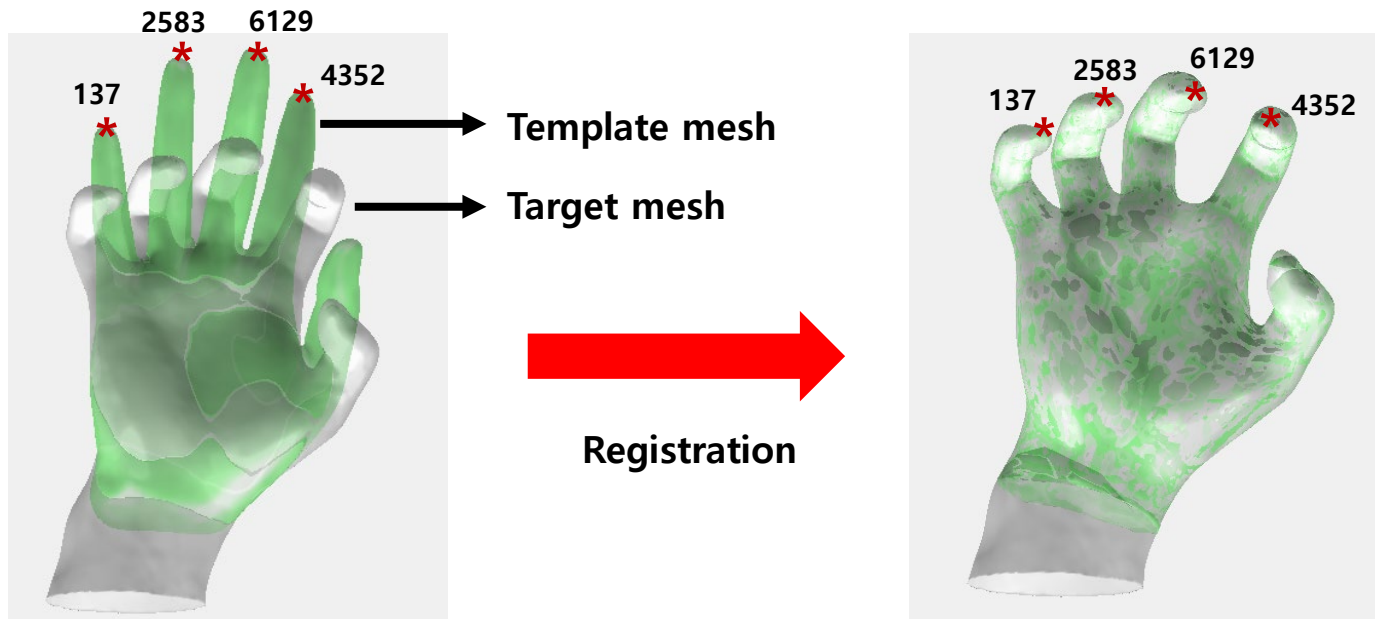


Manual landmarking이 불가능한 경우



Landmarking Method: Registration Landmarking

- Template registration이 완료된 mesh에서 **template landmark의 vertex index**를 통해 **landmark 위치 도출**
- Landmark를 직접 삽입하지 않아도 되므로 manual landmarking에 비해 **시간 단축**
- Surface mesh에 **직접 삽입할 수 없는 위치에도 landmarking 가능**



Joint CoR 추정 모델: Multiple Linear Regression

- **Dependent** variable: Joint CoR의 위치 좌표(x or y or z)
- **Independent** variable: 해당 CoR 추정을 위한 4개 landmarks의 x, y, z 좌표(**12 variables**)

Fixed joint CoR 추정 multiple linear regression model example (PIP2)

$$PIP2_x = a_0 + a_1 * L1_x + a_2 * L1_y + a_3 * L1_z + \dots + a_{10} * L4_x + a_{11} * L4_y + a_{12} * L4_z$$

$$PIP2_y = b_0 + b_1 * L1_x + b_2 * L1_y + b_3 * L1_z + \dots + b_{10} * L4_x + b_{11} * L4_y + b_{12} * L4_z$$

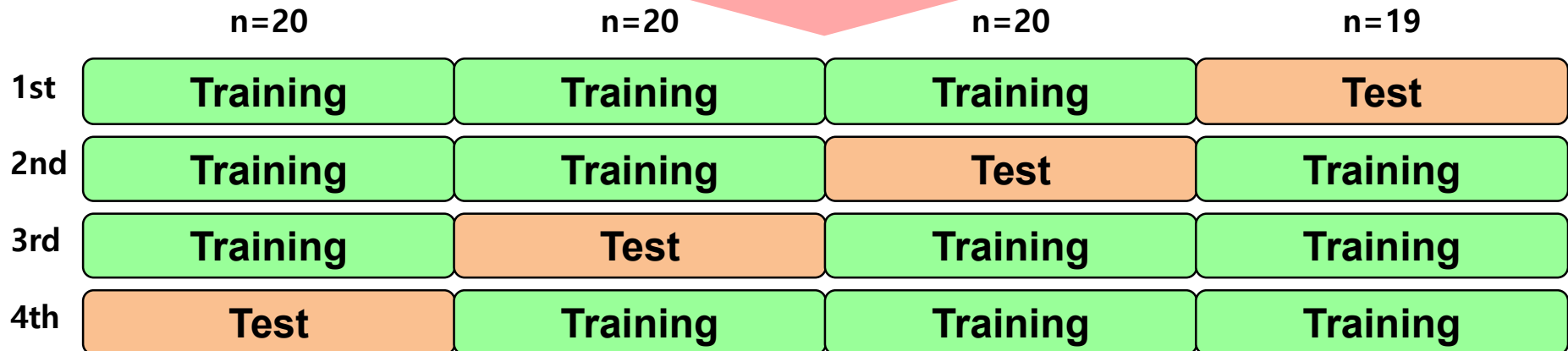
$$PIP2_z = c_0 + c_1 * L1_x + c_2 * L1_y + c_3 * L1_z + \dots + c_{10} * L4_x + c_{11} * L4_y + c_{12} * L4_z$$

Joint CoR 추정 모델 검증 및 평가

- 79개의 데이터를 4개의 set (20, 20, 20, 19)으로 나누어 **cross validation**
- 추정된 CoR과 true CoR과의 **mean distance (MD)**를 기준으로 **model의 성능 평가**

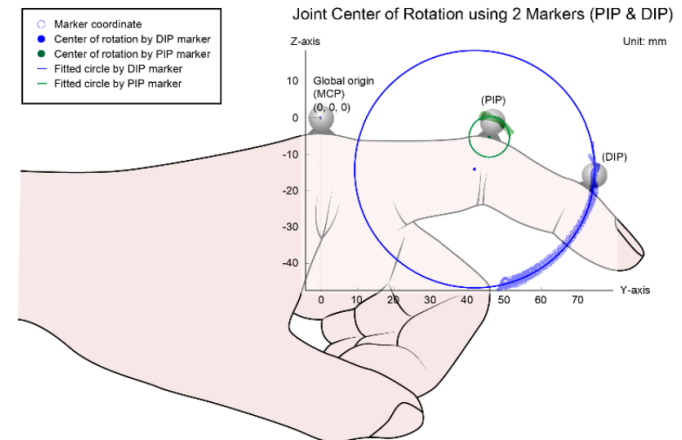
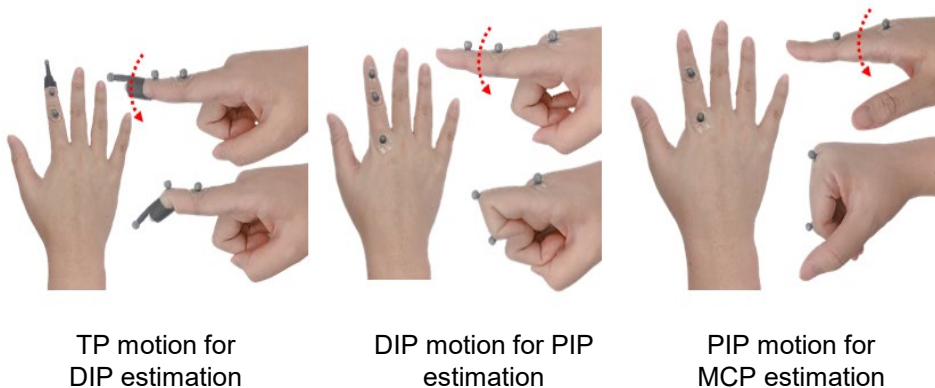


Cross validation



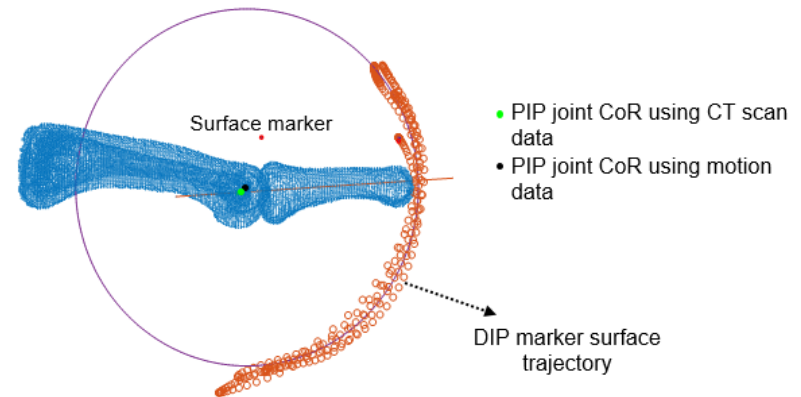
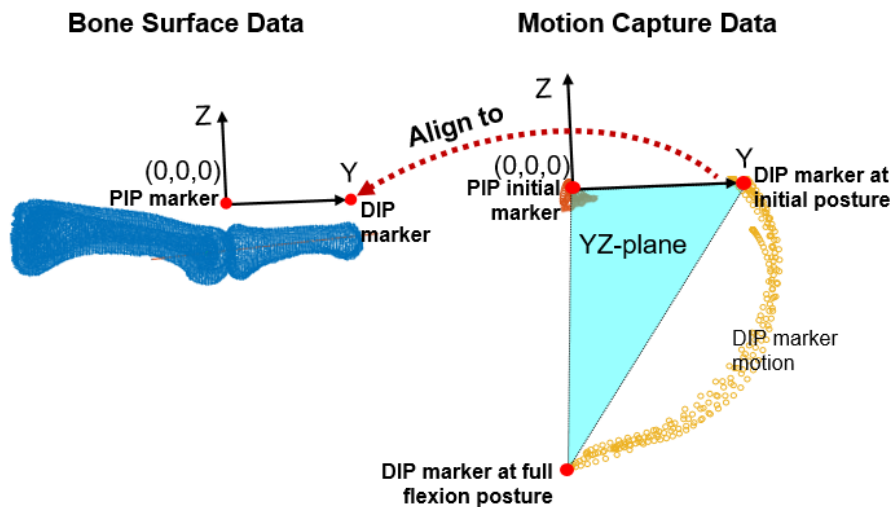
표면 기반 Fixed CoR 추정 모델 성능 비교 평가

- **선행 연구**(Lim et al. 2018)에서 **surface marker motion**을 활용하여 **fixed CoR 추정**
 - 본 연구는 해당 선행 연구에서 구축된 CT 기반 CoR 데이터를 true CoR로 활용함
 - 해당 선행 연구는 CT 기반 CoR 추정값과 surface marker motion 기반 CoR 추정값의 오차(mean distance)를 도출
- **본 연구**에서 제안한 **추정 방법과 오차 비교 평가**



선행 연구(Lim et al., 2018)의 Fixed CoR 추정 절차

- Motion camera를 활용하여 surface marker motion 데이터 획득
- **회전축을 정렬**하여 surface marker trajectory를 **한 평면 상의 trajectory로 변환**
- 정렬된 데이터를 기반으로 **circle fitting method**를 적용하여 **fixed CoR 도출**



Least square error criterion:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N (R_i - R)^2$$

* Where $R_i = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2$

(x_i, y_i) = Marker locations

(A, B) = Calculated joint CoR

R = Radius of the fitted circle over the trajectory of marker motion

Multiple Linear Regression 도출 결과 예시

Manual dorsal landmark set 기반 fixed joint CoR 추정식 예시

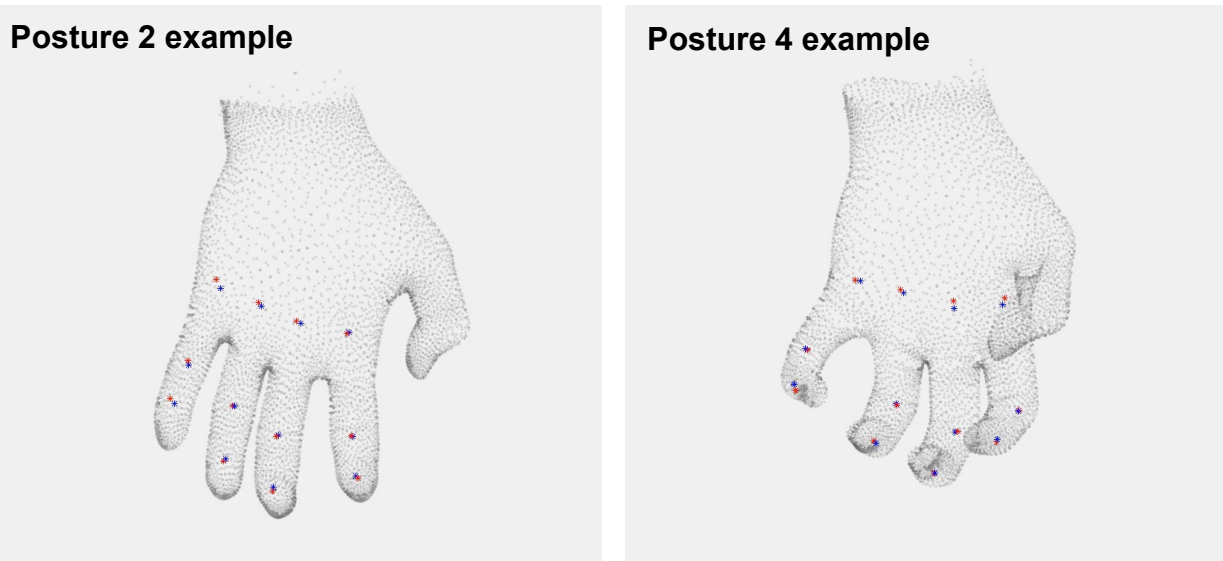
$$CoR_{x \text{ or } y \text{ or } z} = c + a_1 * L1_x + a_2 * L1_y + a_3 * L1_z + \dots + a_{10} * L4_x + a_{11} * L4_y + a_{12} * L4_z$$

		<i>c</i>	<i>a</i> ₁	<i>a</i> ₂	<i>a</i> ₃	<i>a</i> ₄	<i>a</i> ₅	<i>a</i> ₆	<i>a</i> ₇	<i>a</i> ₈	<i>a</i> ₉	<i>a</i> ₁₀	<i>a</i> ₁₁	<i>a</i> ₁₂	<i>Adj-r</i> ²	
Index finger	DIP	x	-0.52	0.20	-0.08	-0.02	0.55	0.09	-0.02	0.29	0.01	0.00	-0.08	-0.03	0.02	0.99
		y	-0.46	-0.01	0.03	-0.10	-0.06	0.82	0.03	0.11	0.15	0.00	-0.04	0.00	0.07	0.99
		z	-6.61	0.37	0.02	0.13	-0.49	0.15	0.58	0.17	0.00	0.25	-0.01	-0.16	0.05	0.99
	PIP	x	0.85	-0.05	-0.02	-0.08	0.15	0.01	0.16	0.81	-0.02	-0.12	0.04	0.02	0.03	0.99
		y	0.03	0.00	-0.07	-0.02	-0.03	0.12	-0.12	0.04	0.92	0.07	-0.02	0.03	0.08	0.99
		z	-1.51	0.07	-0.04	0.03	-0.13	0.09	-0.04	0.06	0.03	0.91	-0.03	-0.08	0.10	0.99
	MCP	x	3.95	-0.06	-0.03	-0.04	0.22	-0.08	0.13	-0.12	0.03	-0.14	0.85	0.07	0.03	0.99
		y	3.41	0.03	-0.02	0.05	-0.12	-0.03	-0.11	0.09	0.06	-0.09	-0.03	0.96	0.15	0.99
		z	6.05	0.14	-0.10	0.05	-0.37	0.24	-0.18	0.16	-0.03	0.32	0.05	-0.11	0.81	0.99

Multiple Linear Regression 추정 결과: Summary

- 전반적으로 **surrounding**과 **dorsal**은 MD 측면에서 **통계적으로 유의한 차이 없음**
- 전반적으로 MD 측면에서 **manual이 registered**보다 **23.1% 정도 유의하게 작음**
- 전반적으로 MD 측면에서 **본 연구가 선행 연구(Lim et al., 2018)보다 52.4% 정도 유의하게 작게** 나타나 기존 연구에 비해 **추정 성능 향상**

True CoR (blue)과 Regression model을 통해 추정된 CoR (red)



Fixed CoR MD 비교: Surrounding vs. Dorsal Set

□ 전반적으로 surrounding과 dorsal은 MD 측면에서 통계적으로 유의한 차이 없음

➤ 전체 12개 CoR 측면: surrounding $\approx 2.4\text{mm}$ < dorsal $\approx 2.6\text{mm}$

➤ Digit 3-DIP, digit 5-PIP 에서 유의한 차이: surrounding $\approx 2.3\text{mm}$ < dorsal $\approx 3.0\text{mm}$

MD 비교: registered surrounding set vs. registered dorsal set

■: Registered surrounding set

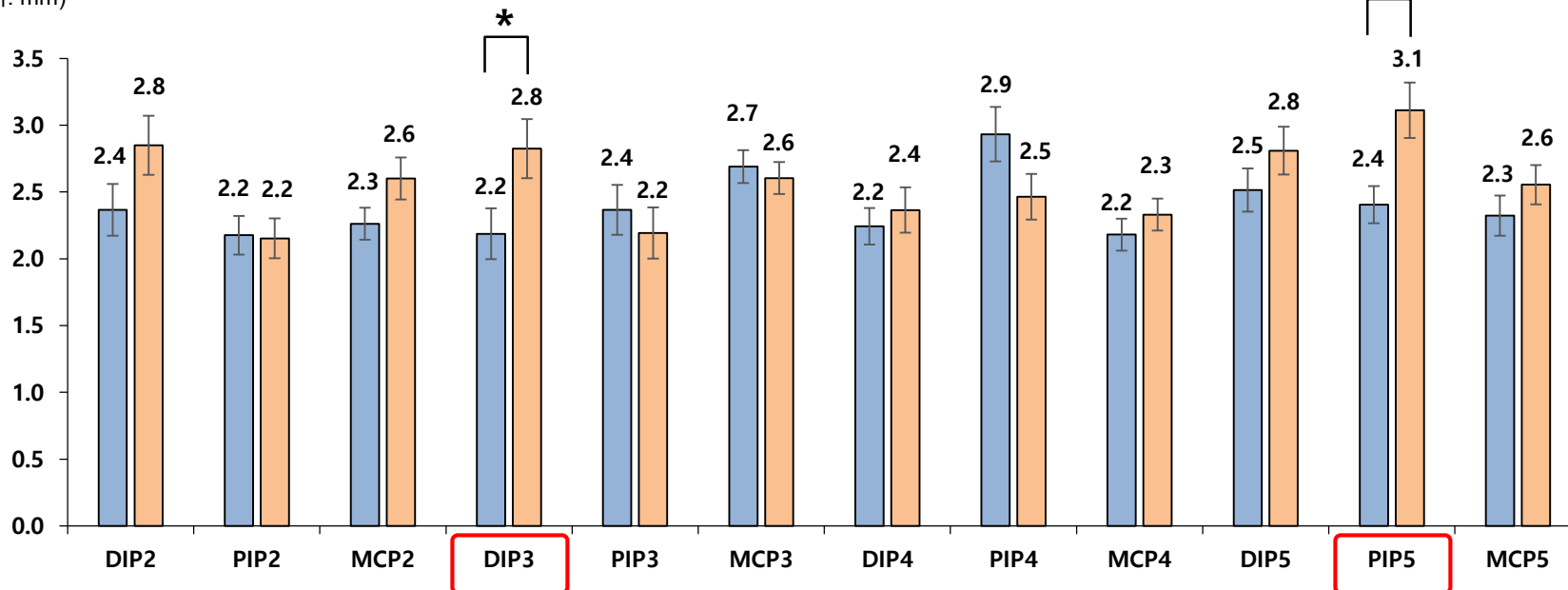
■: Registered dorsal set

* $p < .05$

** $p < .01$

SE

(단위: mm)



Fixed CoR MD 비교: Registered vs. Manual Set

□ 전반적으로 MD 측면에서 **manual이 registered보다 23.1% 유의하게 작음**

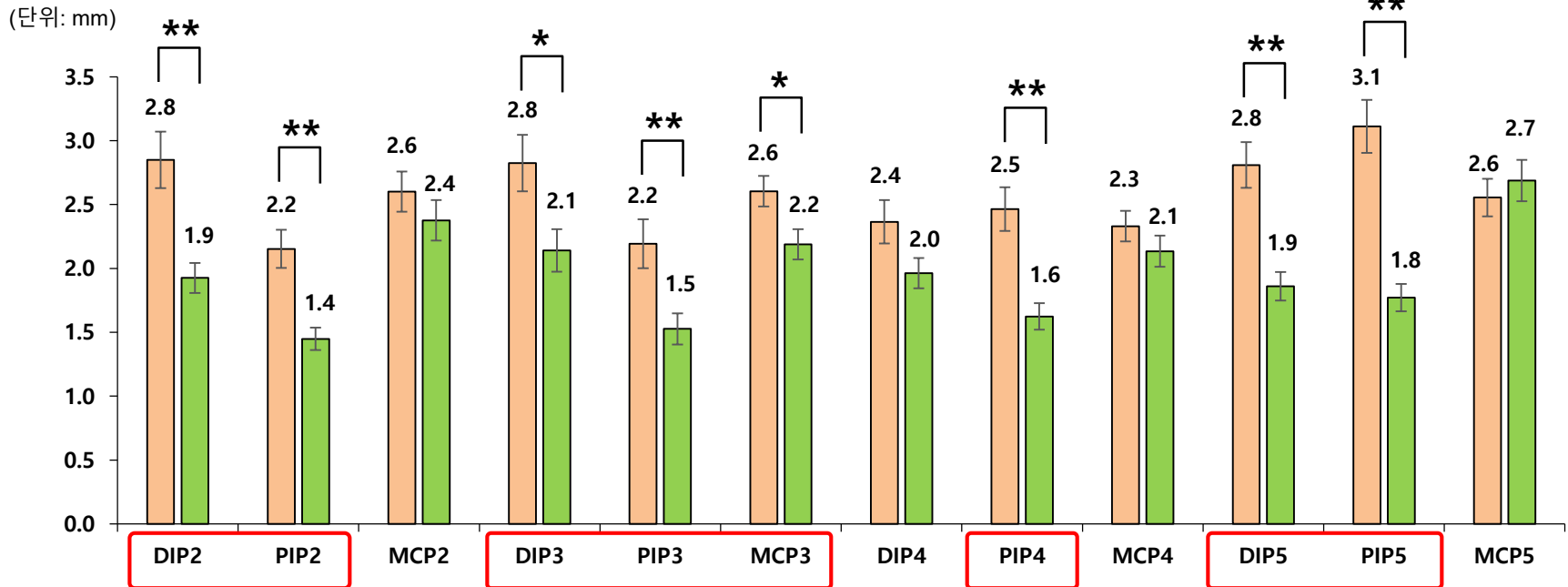
- 전체 12개 CoR 측면: **manual** \approx 2.0mm < **registered** \approx 2.6mm
- **8개의 CoR**에서 **유의한 차이**: **manual** \approx 1.8mm < **registered** \approx 2.6mm

MD 비교: registered dorsal set vs. manual dorsal set

■: Registered dorsal set
■: Manual dorsal set

* $p < .05$
** $p < .01$

| SE



Fixed CoR MD 비교: 본 연구(manual dorsal set) vs. Lim et al. (2018)

□ 전반적으로 MD 측면에서 **본 연구가 선행 연구보다 52.4% 유의하게 작음**

- 전체 12개 CoR 측면: **본 연구** $\approx 2.0\text{mm}$ < **Lim et al., (2018)** $\approx 4.2\text{mm}$
- **9개의 CoR**에서 **유의한 차이**: **본 연구** $\approx 2.0\text{mm}$ < **Lim et al., (2018)** $\approx 4.5\text{mm}$

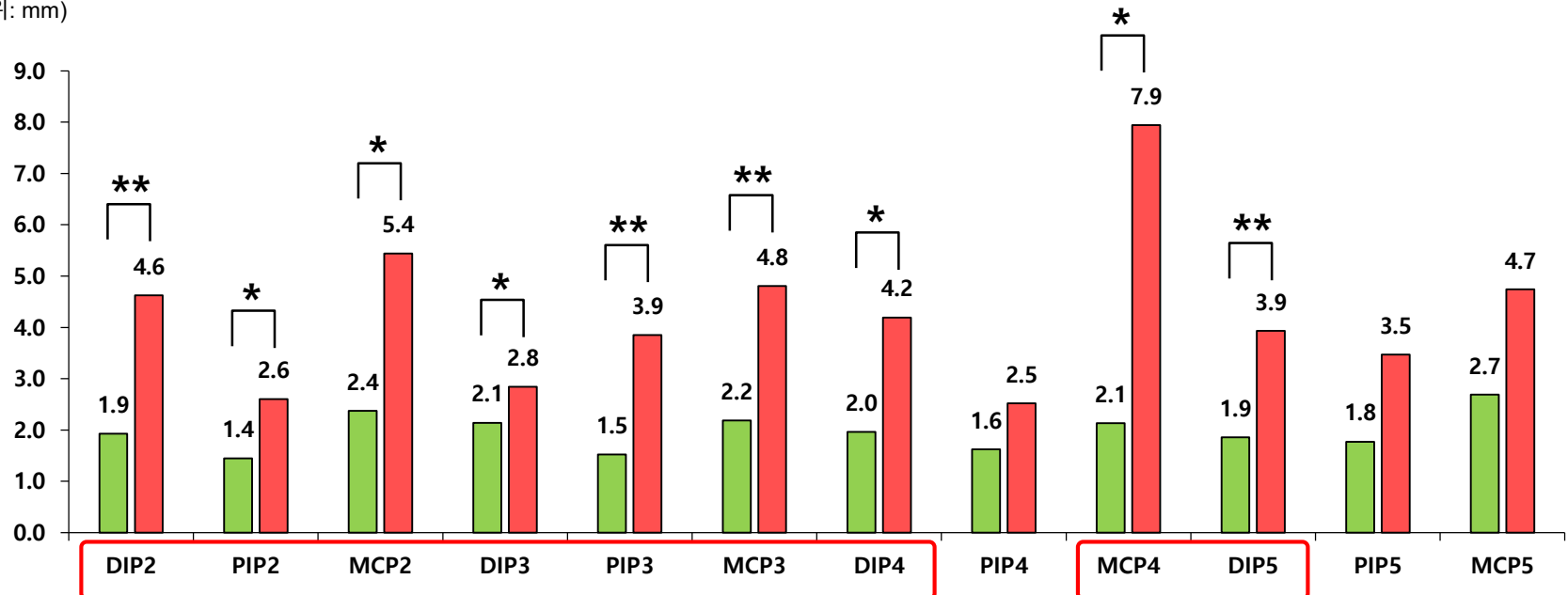
MD 비교: manual dorsal set vs. 선행 연구(Lim et al., 2018)

* $p < .05$

** $p < .01$

■: Manual dorsal set
 ■: 선행 연구(Lim et al., 2018)

(단위: mm)



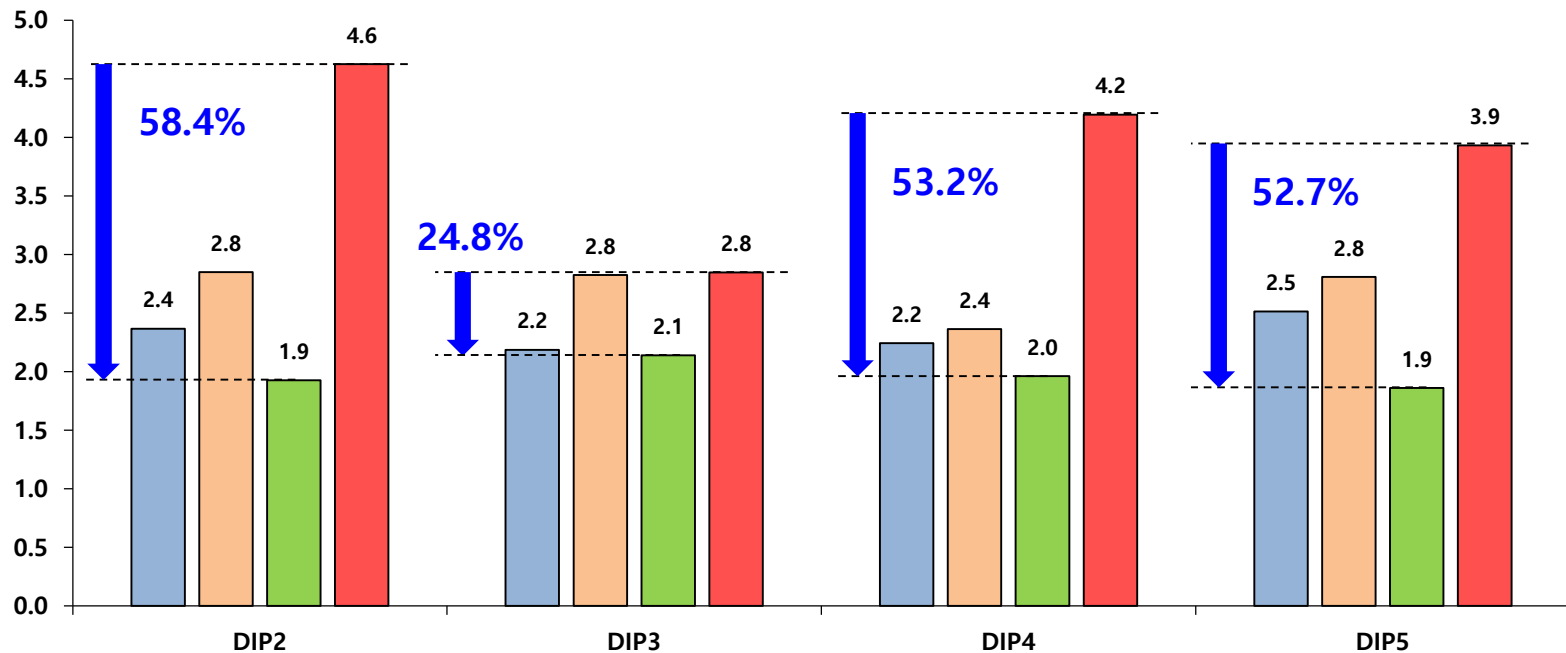
선행 연구(Lim et al. 2018) 대비 Fixed CoR 추정 오차: DIP

□ Manual dorsal set 기준으로 MD 측면에서 **24.8% ~ 58.4% 감소**

- : Registered surrounding set
- : Registered dorsal set
- : Manual dorsal set
- : 선행 연구(Lim et al., 2018)

Fixed joint CoR (DIP) 추정 모델 MD 비교:
본 연구 vs. 선행 연구(Lim et al. 2018)

(단위: mm)



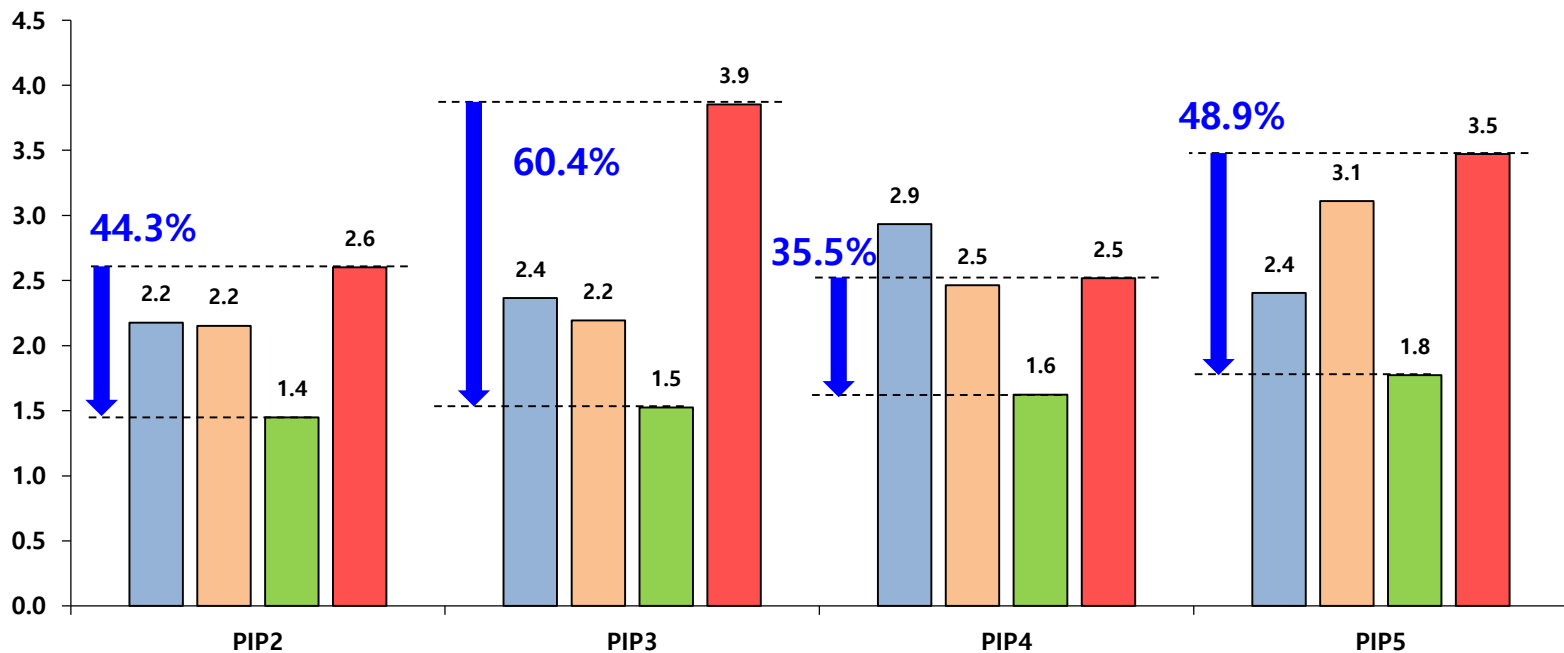
선행 연구(Lim et al. 2018) 대비 Fixed CoR 추정 오차: PIP

□ Manual dorsal set 기준으로 MD 측면에서 **35.5% ~ 60.4%** 감소

- : Registered surrounding set
- : Registered dorsal set
- : Manual dorsal set
- : 선행 연구(Lim et al., 2018)

Fixed joint CoR (PIP) 추정 모델 MD 비교:
본 연구 vs. 선행 연구(Lim et al. 2018)

(단위: mm)



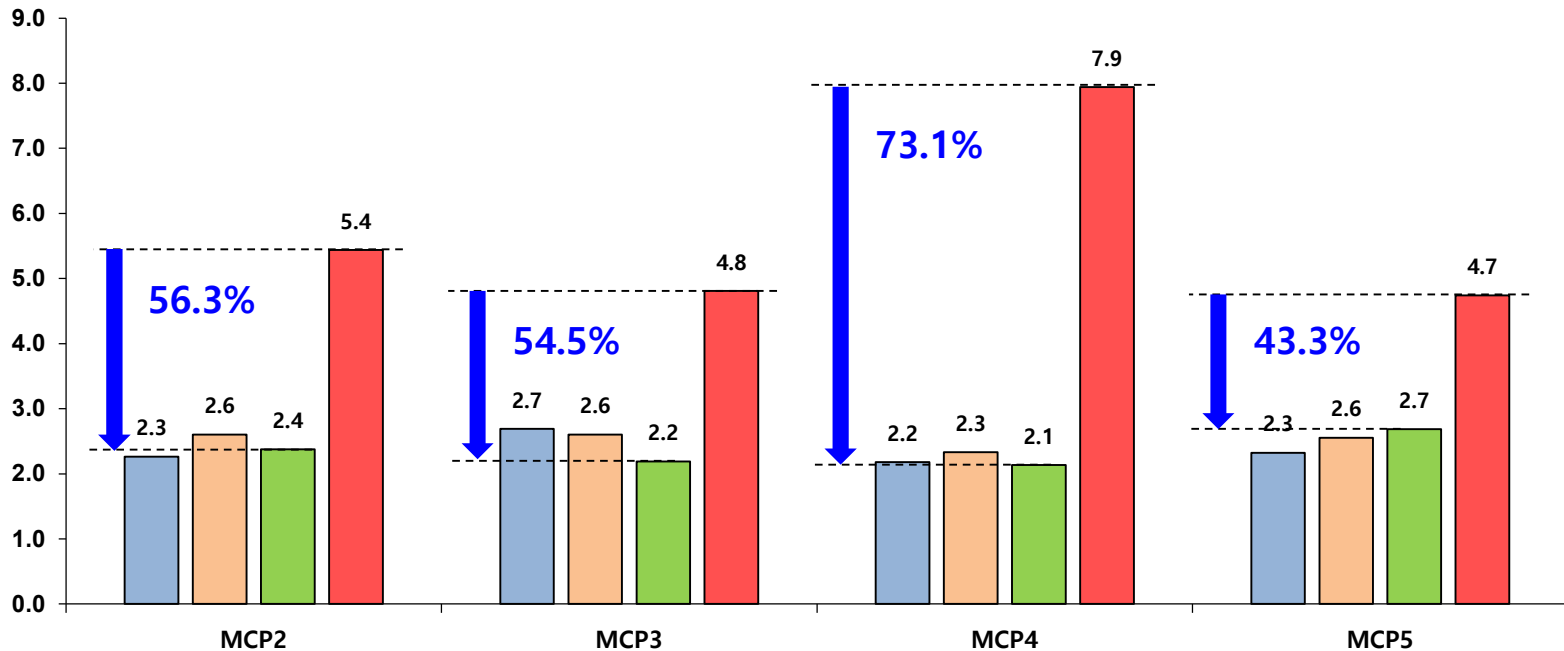
선행 연구(Lim et al. 2018) 대비 Fixed CoR 추정 오차: MCP

□ Manual dorsal set 기준으로 MD 측면에서 **43.3% ~ 73.1% 감소**

- : Registered surrounding set
- : Registered dorsal set
- : Manual dorsal set
- : 선행 연구(Lim et al., 2018)

Fixed joint CoR (MCP) 추정 모델 MD 비교:
본 연구 vs. 선행 연구(Lim et al. 2018)

(단위: mm)



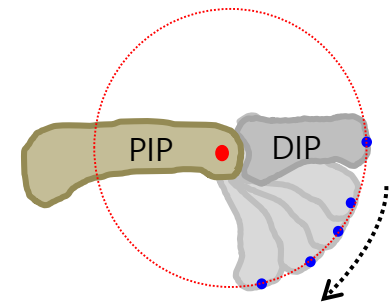
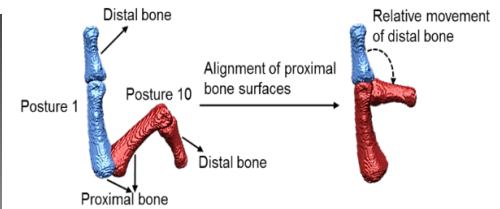
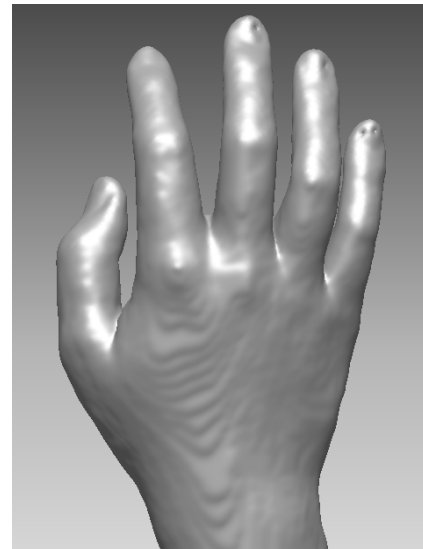
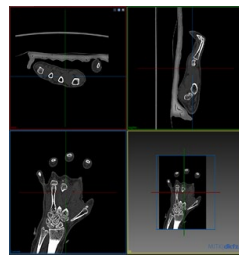
Discussion 1: 3차원 복합 손 형상 데이터 구축

□ Hand CT scan을 통한 10가지 자세의 3차원 손 형상 데이터 구축

- 9명 × 10 posture = 90개의 손 형상 데이터 구축
- 뼈 형상을 기반으로 자세별 CoR 위치 도출



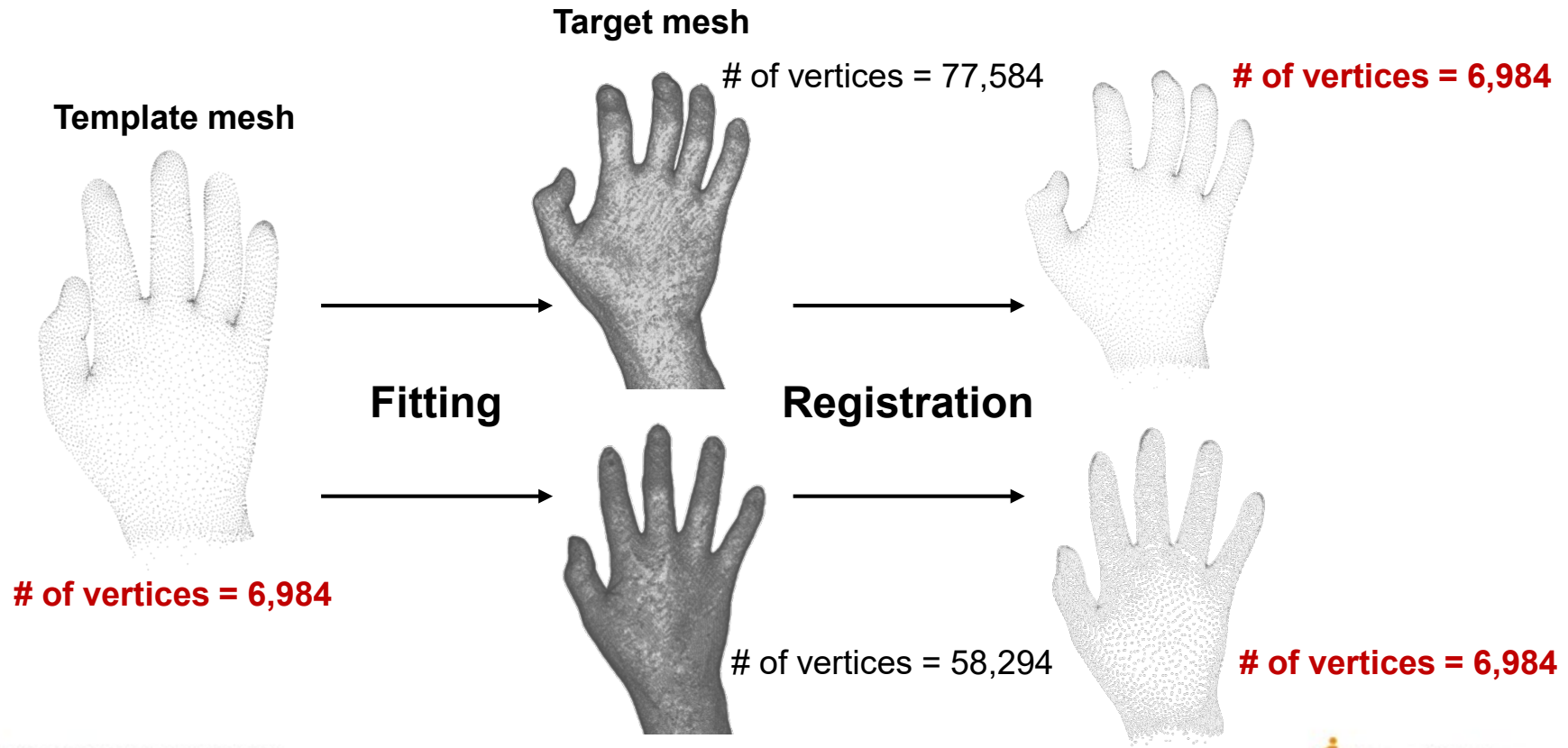
Custom-made hand fixing device



Discussion 2: 손 형상 데이터 정형화

□ Hand template registration을 활용하여 정형화된 손 형상 데이터 구축

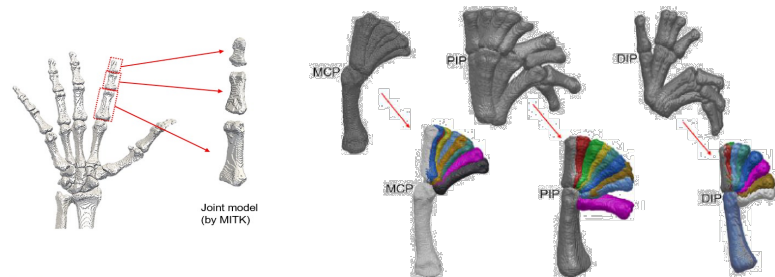
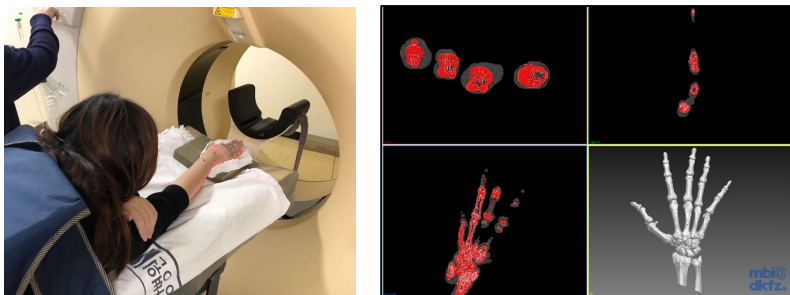
- Vertex 개수 동일화
- Index에 따른 vertex 위치의 일관성 향상



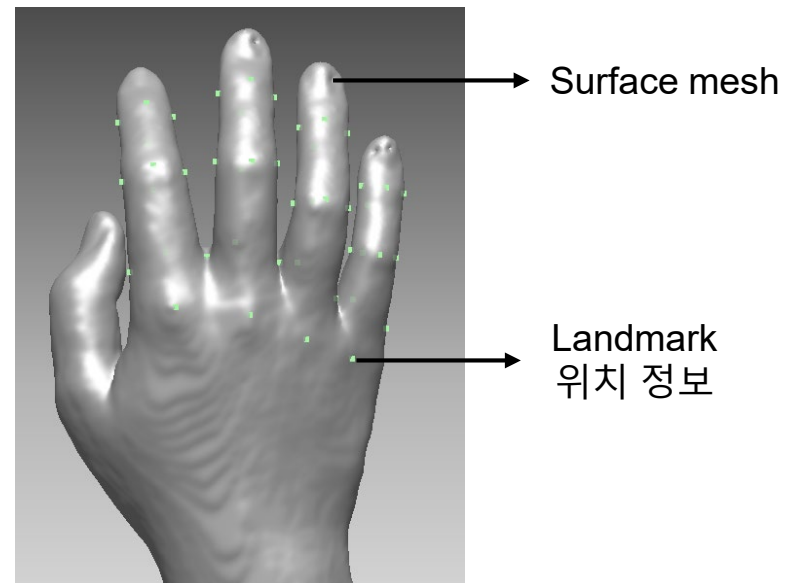
Discussion 3: 효율적인 Joint CoR 추정 방법 개발

- **Surface landmarks**를 기반으로 regression을 활용한 **새로운 CoR 추정 모델** 제안
 - CT scan 데이터 없이 surface scan 데이터를 활용하여 CoR을 추정할 수 있기 때문에 **비용과 방사선 위험 ↓**
 - 기존 CT scan 데이터 기반 CoR 추정 방법에 **데이터 도출 시간 50% ~ 81% ↓**

CT scan 데이터 기반 CoR 도출 과정



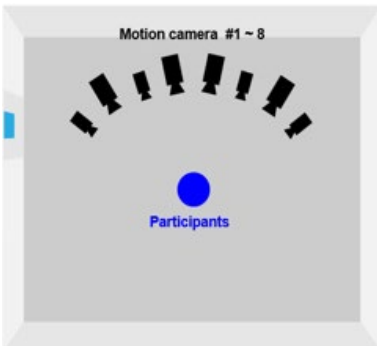
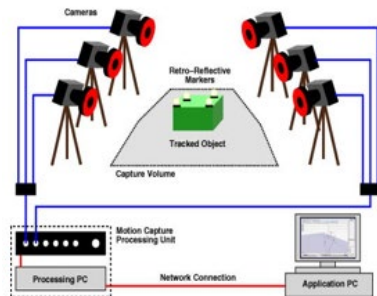
본 연구의 CoR 추정 모델에서 필요한 Input data



Discussion 4 : CoR 추정 정확도 향상

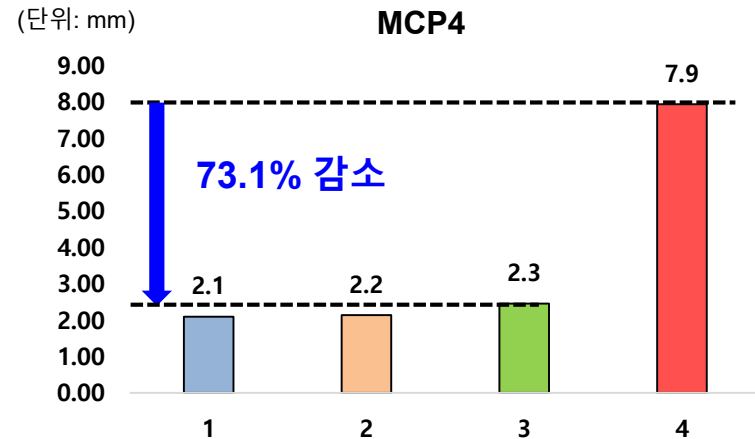
- **Surface landmarks**를 기반으로 regression을 활용한 **새로운 CoR 추정 모델** 제안
 - Motion capture data 기반 CoR 추정 방법에 비해 **데이터 도출 시간 ↓, 편의성 ↑**
 - 선행 연구(Lim et al. 2018)의 fixed joint CoR 추정 방법에 비해 **추정 오차 ↓**

동작 분석 데이터 분석을 위한 장비 및 세팅



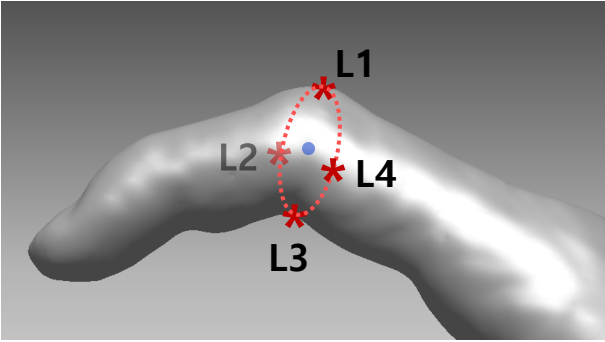
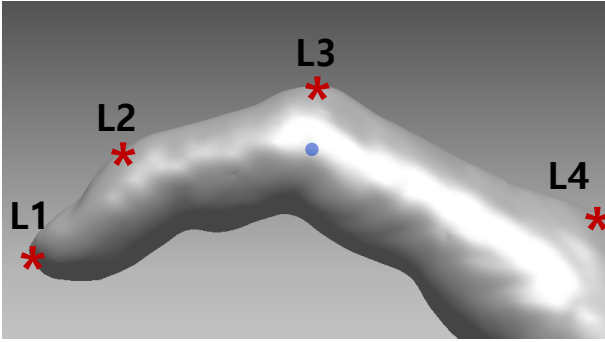
Fixed CoR 추정 모델 MD 비교:
본 연구 vs. 선행 연구(Lim et al., 2018)

- : Registered surrounding set
- : Registered dorsal set
- : Manual dorsal set
- : 기존 연구



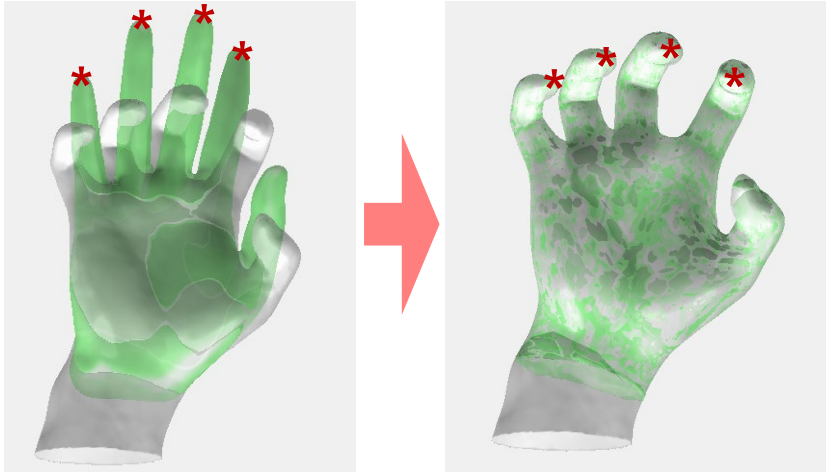
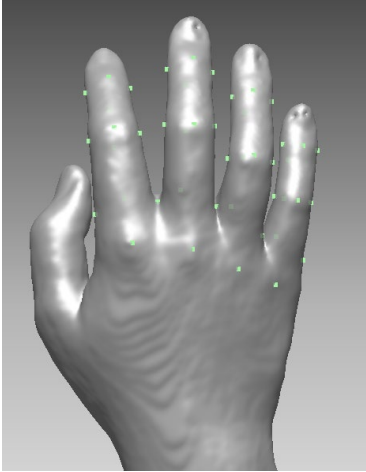
Application (1/3)

- Landmark set에 따른 추정 성능이 유의미한 차이를 보이지 않기 때문에 **필요에 따라 landmark set을 선택**하여 joint CoR 추정에 활용할 수 있음
- **Dorsal set**은 surrounding set에 비해 **데이터 처리 시간이 적고, 손바닥 부분의 landmark 삽입이 어려운 경우에도 활용 가능**

	Surrounding set	Dorsal set
		
평균 추정 오차	2.4mm	2.6mm
Landmark 개수 (손 형상 1개 기준)	45	16

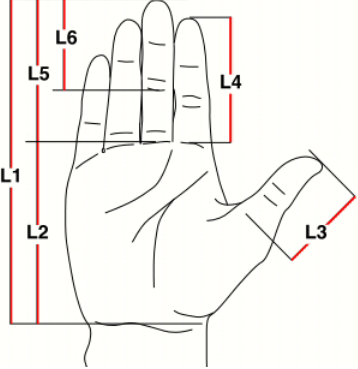
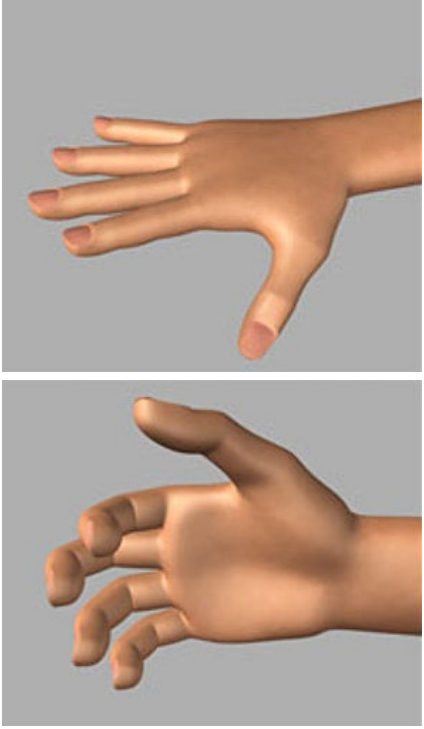
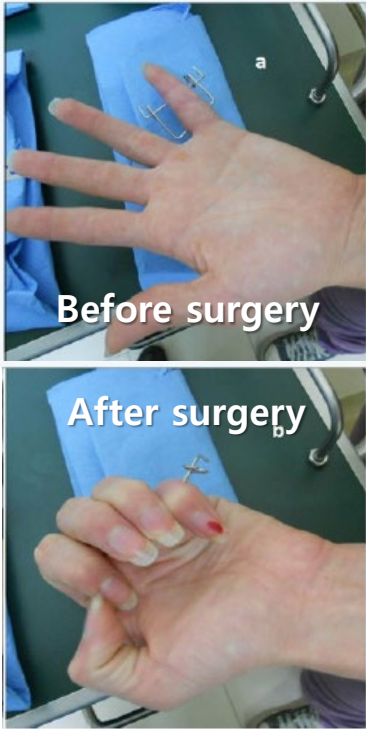
Application (2/3)

- 본 연구에서 개발된 joint CoR 추정 모델은 **추정 성능과 작업 효율성을 고려**하여 필요에 따라 **두 가지 landmarking 방법(registration, manual)**으로 활용될 수 있음

	Registration	Manual
		
평균 추정 오차	2.6mm	2.0mm
작업 효율성	↑	↓

Application (3/3)

□ 본 연구에서는 **fixed CoR과 instantaneous CoR 추정 모델이 개별적으로 개발되어**
의료용 평가, 관절 재활 수술, 애니메이션, 인간공학적 제품 설계 등에 활용 가능



Measured Items	Mean (SD) in mm		p-value
	D	I	
Hand length	D	169.21 ± 7.30	0.182
	I	168.93 ± 4.36	
Index finger Length	D	65.32 ± 3.61	0.655
	I	64.90 ± 1.61	
Medius finger length	D	72.75 ± 3.59	0.846
	I	72.54 ± 1.57	
Ring finger length	D	68.01 ± 3.88	0.246
	I	68.05 ± 2.14	
Little finger length	D	53.63 ± 3.98	0.54
	I	53.13 ± 1.28	
Palm length perpendicular	D	97.05 ± 5.09	0.854
	I	97.02 ± 3.15	
Hand breadth with thumb	D	76.91 ± 3.69	0.68
	I	75.84 ± 2.54	
Hand breadth with wrist	D	52.08 ± 3.16	0.15
	I	51.87 ± 2.58	
Hand thickness	D	26.29 ± 2.15	0.14
	I	26.14 ± 1.24	
Hand circumference	D	177.73 ± 9.0	0.94
	I	177.624 ± 2.1	

D: Direct measurement method, I: Indirect measurement method.



Limitation & Future Work

□ Limitation

- 제안된 COR 추정 **회귀 모형의 정확성**을 높이기 위해 **더 많은 dataset이 필요**
- **Manual landmarking** 시 **human error**가 발생할 수 있으며 **시간적 비용**이 발생

□ Future work

- 충분한 dataset을 확보하여 **artificial neural network(ANN)**를 기반으로 보다 정밀한 **joint CoR 위치 추정 모델 개발**
- 3D scan data의 기하학적 특성을 활용한 **automatic landmarking 기법 개발**
- Multiple linear regression 이외의 **다양한 통계 기법을 활용한 joint CoR 추정 모델 개발**

Q & A



경청해 주셔서 감사합니다. ☺

본 연구는 한국연구재단(NRF-2018R1C1B5047805, 2020R1F1A1050076)의 지원을 받아 수행되었습니다.

edt.postech.ac.kr
niceterran36@postech.ac.kr

Instantaneous CoR MD 비교: Surrounding vs. Dorsal Set

□ 전반적으로 **surrounding**과 **dorsal**은 MD 측면에서 **통계적으로 유의한 차이 없음**

➤ 전체 12개 CoR 측면: **surrounding** \approx 2.8mm < **dorsal** \approx 3.0mm

➤ **Digit 3-DIP, digit 5-PIP** 에서 **유의한 차이**: **surrounding** \approx 2.3mm < **dorsal** \approx 2.9mm

MD 비교: registered surrounding set vs. registered dorsal set

* $p < .05$

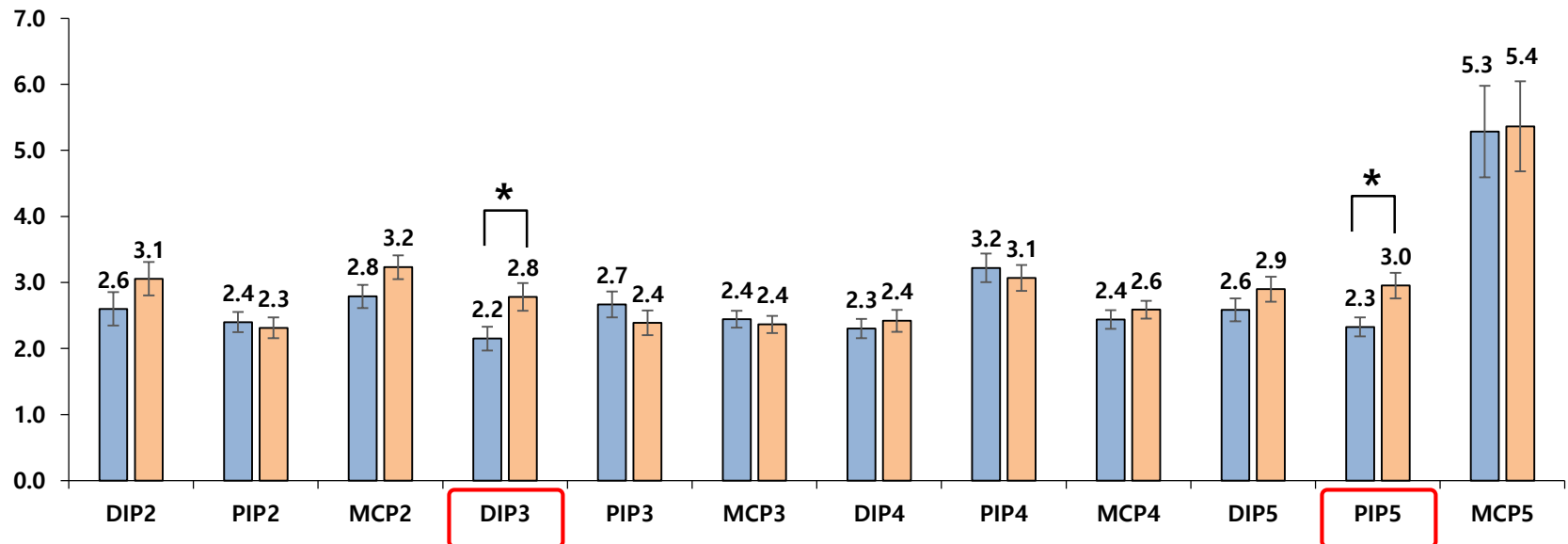
** $p < .01$

■: Registered surrounding set

■: Registered dorsal set

| SE

(단위: mm)



Instantaneous CoR MD 비교: Registered vs. Manual Set

□ 전반적으로 MD 측면에서 **manual**이 **registered**보다 **22.7%** 유의하게 작음

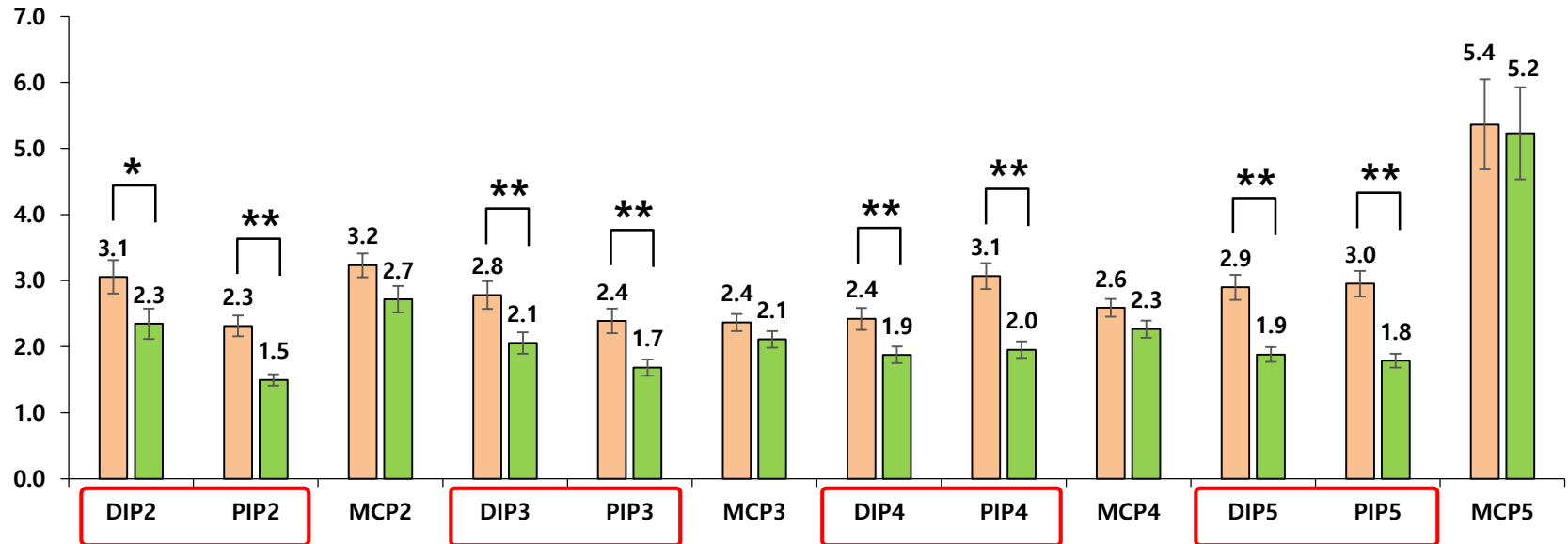
- 전체 12개 CoR 측면: **manual** \approx 2.3mm < **registered** \approx 3.0mm
- **8개의 CoR**에서 **유의한 차이**: **manual** \approx 1.9mm < **registered** \approx 2.7mm

MD 비교: registered dorsal set vs. manual dorsal set

■: Registered dorsal set
■: Manual dorsal set

* $p < .05$
** $p < .01$
| SE

(단위: mm)



Registered Surrounding Set MD 비교: Fixed CoR vs. Instantaneous CoR

□ 전반적으로 **fixed CoR** 추정 모델과 **instantaneous CoR** 추정 모델은 MD 측면에서 **통계적으로 유의한 차이 없음**

- 전체 12개 CoR 측면: **fixed** $\approx 2.4\text{mm}$ < **instantaneous** $\approx 2.8\text{mm}$
- **Digit 5-MCP** 에서 **유의한 차이**: **fixed** $\approx 2.3\text{mm}$ < **instantaneous** $\approx 5.3\text{mm}$

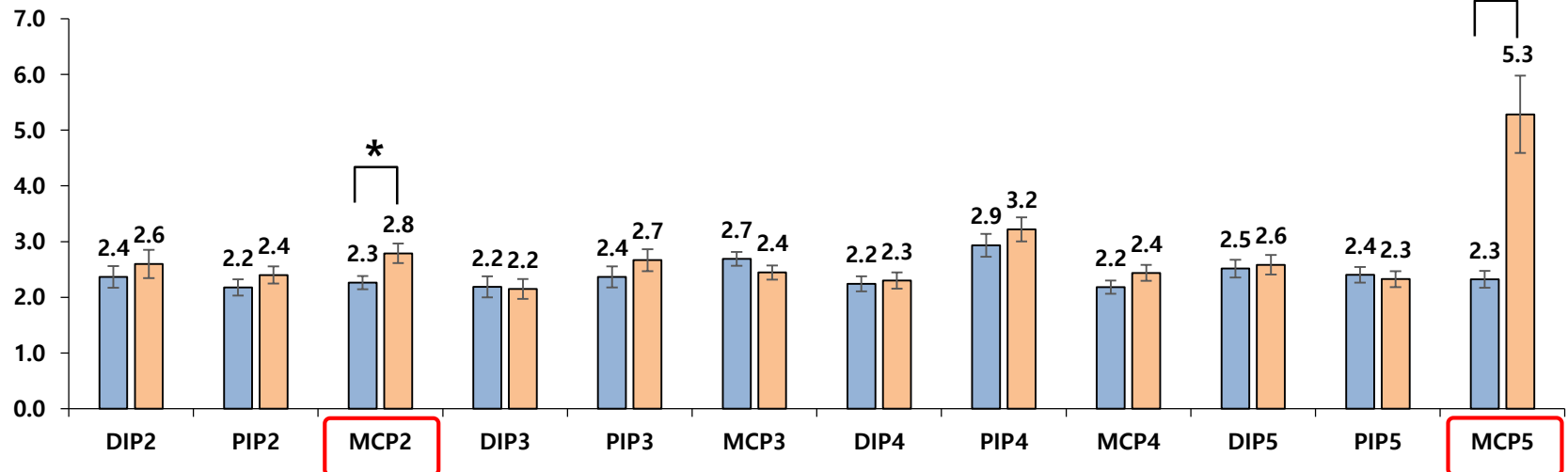
■: Fixed CoR
■: Instantaneous CoR

MD 비교: fixed CoR vs. instantaneous CoR
(register surrounding set)

* $p < .05$
** $p < .01$

| SE

(단위: mm)



Registered Dorsal Set MD 비교: Fixed CoR vs. Instantaneous CoR

□ 전반적으로 **fixed CoR** 추정 모델과 **instantaneous CoR** 추정 모델은 MD 측면에서 **통계적으로 유의한 차이 없음**

- 전체 12개 CoR 측면: **fixed** \approx 2.6mm < **instantaneous** \approx 3.0mm
- **Digit 5-MCP** 에서 **유의한 차이**: **fixed** \approx 2.6mm < **instantaneous** \approx 5.4mm

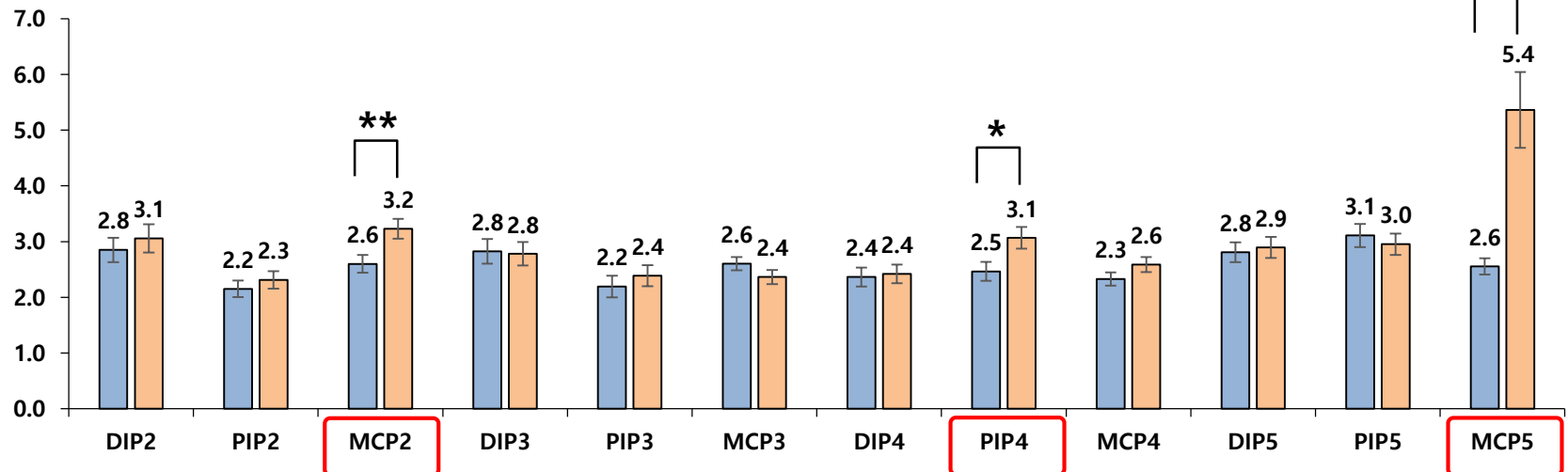
■: Fixed CoR
■: Instantaneous CoR

MD 비교: fixed CoR vs. instantaneous CoR
(register dorsal set)

* $p < .05$
** $p < .01$

SE

(단위: mm)



Manual Dorsal Set MD 비교: Fixed CoR vs. Instantaneous CoR

□ 전반적으로 **fixed CoR** 추정 모델과 **instantaneous CoR** 추정 모델은 MD 측면에서 **통계적으로 유의한 차이 없음**

- 전체 12개 CoR 측면: **fixed** \approx 2.0mm < **instantaneous** \approx 2.3mm
- **Digit 5-MCP** 에서 **유의한 차이**: **fixed** \approx 2.7mm < **instantaneous** \approx 5.2mm

■: Fixed CoR
■: Instantaneous CoR

MD 비교: fixed CoR vs. instantaneous CoR
(manual dorsal set)

* $p < .05$
** $p < .01$

| SE

(단위: mm)

