

# 변형 가능한 손 모델을 이용한 3차원 손 스캔의 자세 분석

정하영(niceterran36@postech.ac.kr)<sup>1</sup>, 홍영기(ygh0152@postech.ac.kr)<sup>2</sup>,  
유희천(hcyou@postech.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>포항공과대학교 산업경영공학과

## ABSTRACT

Humans use their hands to perform various tasks, and the shape of tools and products used with hands affects the work efficiency, usability, and convenience. For ergonomic design of hand-used products, it is important to analyze hand posture and hand shape accordingly. The existing hand posture analysis method needs to be improved in terms of safety, efficiency, and accuracy. The purpose of this study is to develop a method of posture analysis for 3-dimensional hand using deformable hand model. Detailed 3D hand scan dataset, which contains hand surface, landmarks, and accurate finger joint CoRs, captured by CT-scan from 9 participants was established. Regression equations for estimation of finger joint CoRs were developed by stepwise regression procedure using 3D hand scan dataset. Hand posture analysis of 3D hand scans was performed by applying the regression equation developed in this study to the deformable 3D hand model. The hand model-based posture analysis method showed 230% to 300% improvement in posture accuracy and 52% improvement in CoR estimation performance compared to the existing surface marker motion-based posture analysis method. The deformable hand model-based posture analysis method developed in this study can be utilized for efficient hand posture analysis of 3D and 4D hand scan data. The newly developed hand posture analysis method is expected to be usefully utilized in real-time posture analysis, ergonomic product design, digital hand modeling and simulation fields.

## 1. Introduction

인간은 손을 이용해 다양한 작업을 수행하며 손으로 사용하는 도구 및 제품의 형상은 작업 능력, 사용성, 그리고 편의성에 영향을 준다. 작업 및 사용 환경을 고려하여 설계된 인간공학적 핸들은 적정 힘 사용을 유도하고 신체 부담을 줄이므로 작업 효율을 향상시킬 수 있다(Bohlemann et al., 1994; Dong et al., 2007; Jung et al., 2019). Jung et al. (2018)은 손 그립 자세를 고려하여 설계된 초음파 probe 핸들 형상은 주관적 만족도, 손목 자세 안락도, 근육 부하 측면에서 향상된 사용성을 보인다고 보고하였다. 따라서 손 사용 제품의 인간공학적 설계를 위해서는 손의 자세와 그에 따른 손 형상에 대한 분석이 중요하다.

손 자세를 분석하는 다양한 연구들이 수행되었으며, 최근에는 손 모델 및 알고리즘을 이용한 효율적인 손 자세 분석이 수행되고 있다. 기존 연구들은(Duchenne and Kaplan, 1959; Landsmeer, 1963) 수술 전후의 손 기능을 비교하기 위해 X-ray 이미지를 이용하여 손 자세를 분석하였다. Zhang et al. (2003)은 손가락 관절의 굴곡(flexion) 및 신전(extension) 동작 수행 시 손 표면에 부착된 21개의 reflective marker 좌표를 측정하여 손가

락 관절 회전 중심(Center of Rotation, CoR)을 추정하는 최적화 기반의 알고리즘을 개발하고 손 자세 분석을 수행하였다. 컴퓨터 비전 분야의 연구자들은(Premaratne et al., 2017; Stefanov et al., 2007) 실시간으로 제스처 인식 및 자세 분석을 수행하기 위해 영상이미지를 이용한 손 추적 알고리즘을 개발하였다. 한편, 다른 연구자들은(Coleca et al., 2015; Ge et al., 2008; Ho et al., 2011) 손의 구조 및 관절 자유도를 고려한 디지털 3차원 손 모델을 이미지에 mapping하여 손 자세를 분석하였다.

기존의 손 자세 분석 방법은 안전성, 효율성, 정확성 측면에서 개선될 필요가 있다. CT-scan과 같은 방법은 촬영 시 방사선에 노출되어 다회 촬영이 제한되며, MRI는 측정 시간이 길고 비용이 높은 한계를 지닌다. 손 표면 marker를 이용하는 방법은 표면에 부착된 marker가 자연스러운 동작을 방해할 수 있으며 유실 및 간섭된 marker 측정 결과의 후처리에 많은 노력이 소요된다. 실시간 출력을 목적으로 개발된 자세 분석 알고리즘은 요구되는 자세 분석의 정확도가 낮으며, 자세 분석의 정확성에 대한 검증이 수행되지 않았다. 한편, 변형 가능한 손 모델은 3차원 및 4차원 스캔의 효율적인 처리를 위해 활용되고 있으나(Romero et al., 2017) 이를 이용한 자세 분석은 부

제한 것으로 파악되었다.

본 연구는 3차원 손 스캔의 효율적인 분석을 위해 변형가능한 손 모델에 기반한 자세 분석 방법을 개발하고 자세 분석의 정확성을 기존 방법들과 비교하였다. 본 연구는 손 형상, 뼈 형상, 관절 CoR, 참조점(landmark)이 포함된 3차원 손 dataset을 구축하였다. 본 연구에서는 손가락 관절 CoR 추정식을 개발하고 변형 가능한 손 모델에 이를 적용하여 손 자세 분석 방법을 개발하였다. 마지막으로 CT-scan 기반, 손 표면 marker 기반, 손 모델 기반 자세 분석 방법을 비교 평가하여 신규 손 자세 분석 방법의 정확도를 검증하였다.

## 2. Method

본 연구는 (1) CT-scan 기반 손 dataset 구축, (2) 손가락 관절 CoR 추정식 개발, (3) 변형 가능한 손 모델 기반 자세 분석 방법 개발, (4) 손 자세 분석 방법 평가 및 검증의 4가지 절차를 통해 수행되었다.

### 2.1 CT-scan 기반 손 Dataset 구축

손 세부 형상의 CT-scan 실험을 위해 손 크기가 다양한 한국인 남녀 9명(한국인 손직선길이 기준 S, M, L별 각 3명)이 모집되었다. 본 실험은 에스 포항병원의 IRB 승인(37100475-201802-HR-002)을 받아 진행되었다. 실험참여자의 손등 표면 주요 관절부위에 지름 7 mm의 쇠구슬 21개가 부착되었다. 실험참여자의 손은 완전히 편 자세부터 주먹 쥐 자세까지 점진적으로 변하는 각기 다른 10가지 자세로 CT-scan 되었다. 각 자세별 손 스캔 데이터는 MITK (Nolden et al., 2013)를 이용하여 손 표면과 뼈 형상이 도출되었으며, 도출된 뼈 형상에 circle fitting 방법(Piazza et al., 2004) 및 PCA 방법(Figueroa et al., 2016)이 적용되어 검지에서 소지까지의 distal interphalangeal (DIP), proximal interphalangeal (PIP), metacarpophalangeal (MCP) 관절의 fixed 및 instantaneous 관절 CoR이 도출되었다. 손 자세 분석을 위한 손 dataset으로 손가락별 형상 구분이 어려운 데이터를 제외하고 79개가 선별되었다.

### 2.2 손가락 관절 CoR 추정식 개발

손가락 관절 CoR 추정식이 stepwise regression 분석을 통해 개발되었다. 손등면 참조점 위치, 손 치수, 관절 각도, 인접 관절의 CoR 위치가 손가락 관절 CoR의 추정 변수로 기존 연구와 손의 해부학적 특성을 고려하여 선정되었다(표 1). 추정 성능을 최대화하는 변수들이 stepwise regression 분석을 통해 선정되었으며 표 2과 같이

CoR 추정식이 개발되었다. 손 dataset 중 임의로 선정된 63개(80%)의 데이터가 추정식 개발에 활용되었고 나머지 16개(20%)의 데이터는 추정식 성능 검증에 활용되었다.

표 1. 손가락 관절 CoR 추정 변수

변수	설명	변수	설명
PL	Palm length	DIP <sub>Ly</sub>	DIP LM y coordinate
PLL	Proximal link length	DIP <sub>Lz</sub>	DIP LM z coordinate
MFA	MCP flexion angle	TIP <sub>Ly</sub>	Tip LM y coordinate
MLL	Medial link length	TIP <sub>Lz</sub>	Tip LM z coordinate
PFA	PIP flexion angle	eMCP <sub>y</sub>	est. MCP y coordinate
DLL	Distal link length	eMCP <sub>z</sub>	est. MCP z coordinate
DFL	DIP flexion angle	MCPD <sub>LC</sub>	MCP LM to eMCP distance
MCP <sub>Ly</sub>	MCP LM y coordinate	ePIP <sub>y</sub>	est. PIP y coordinate
PIP <sub>Ly</sub>	PIP LM y coordinate	ePIP <sub>z</sub>	est. PIP z coordinate
PIP <sub>Lz</sub>	PIP LM z coordinate	PIPD <sub>LC</sub>	PIP LM to eMCP distance

\*LM: landmark

표 2. 손가락 관절 CoR 추정식 예시

CoR	Regression Equation	Adj-R <sup>2</sup>	RM (mm)
D2-MCP <sub>y</sub>	$-4.61 + (0.429 \times PLL) + (1.03 \times MCP_{Ly}) - (0.127 \times PIP_{Ly}) - (0.286 \times PIP_{Lz})$	0.95	1.
D2-MCP <sub>z</sub>	$-24.17 - (0.029 \times PL) + (0.2111 \times MFA) + (0.2124 \times PIP_{Ly})$	0.53	0.
D2-PIP <sub>y</sub>	$3.54 + (0.823 \times PIP_{Ly}) - (0.08 \times PIP_{Lz}) + (0.014 \times DIP_{Ly}) - (0.035 \times DIP_{Lz}) + (0.19 \times eMCP_y)$	0.99	0.
D2-PIP <sub>z</sub>	$-3.62 + (0.113 \times MLL) + (0.031 \times PFA) + (0.109 \times DLL) + (0.954 \times PIP_{Lz}) + (0.092 \times DIP_{Ly}) - (0.121 \times eMCP_y) - (0.332 \times MCPD_{LC})$	0.98	0.
D2-DIP <sub>y</sub>	$20.53 - (0.141 \times MFA) + (0.21 \times MLL) + (0.089 \times PFA) - (0.214 \times DLL) - (0.078 \times DFL) + (0.554 \times DIP_{Ly}) - (0.345 \times DIP_{Lz}) + (0.068 \times TIP_{Ly}) + (0.137 \times TIP_{Lz}) - (0.175 \times eMCP_y) + (0.552 \times ePIP_y)$	0.99	0.
D2-DIP <sub>z</sub>	$1.22 - (0.192 \times MLL) - (0.024 \times PFA) + (0.757 \times DIP_{Lz}) + (0.0712 \times TIP_{Ly}) + (0.049 \times TIP_{Lz}) + (0.237 \times ePIP_z)$	0.99	0.
...	...	...	...

### 2.3 변형 가능한 손 모델 기반 자세 분석

선행 연구(Jung et al., 2021)에서 개발된 변형 가능한 손 모델이 활용되어 손 자세 분석이 수행되었다. 평균 손 크기의 3차원 polygon mesh로 구성된 손 모델은 그림 1과 같이 17개의 segment, 21개의 link 및 관절, 75개의 참조점 등으로 구성된다. 손 모델은 segment별 크기 조절, 자세 변경, 손 치수 자동 측정, 3차원 및 4차원 스캔 데이터로의 정렬 및 크기 변형이 가능하도록 개발되었다. 손 모델은 3차원 및 4차원 손 스캔에 정렬 및 변형되어 손가락 관절 CoR 추정에 활용되는 손 변수(e.g., 손바닥길이, 손가락마디사이길이 등)별 치수들이 측정된다. 손가락 관절 CoR 추정식에 손 모델을

통해 분석된 손 참조점 위치, 손 치수 정보가 적용되어 손가락 관절 CoR이 추정되었다(그림 2). 손 모델의 관절 CoR 정보를 추정식을 통해 도출된 값으로 갱신한 후 정의된 관절체 구조에 따라 관절별 각도가 측정되어 손 자세가 분석되었다.

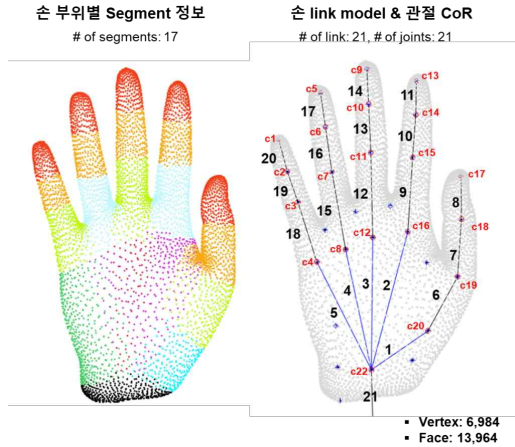


그림 1. 변형 가능한 손 모델 개발 예

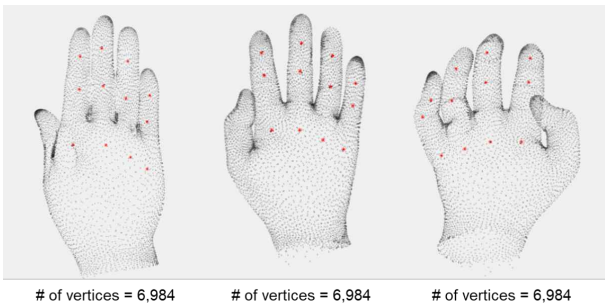


그림 2. 손가락 관절 회전 중심(CoR) 추정 및 변형 가능한 손 모델 적용 예

## 2.4 손 자세 분석 성능 비교 평가

손 자세 분석 방법의 성능 평가는 gold-standard인 CT-scan 기반 자세 분석 결과를 손 표면 marker 기반 자세 분석 결과 및 변형 가능한 손 모델을 이용한 자세 분석 결과와 비교하여 수행되었다. 특정자세의 손에 대하여 3차원 스캔, 손등 표면 marker 기반 자세 측정, 그리고 CT-scan을 동시에 수행할 수 없으므로, 본 연구에서는 CT-scan 데이터에 각 방법을 적용하여 자세 분석을 수행하고 결과를 비교하였다. 성능 검증의 기준이 되는 CT-scan 기반 방법은 구축된 dataset의 손가락 관절 CoR 정보를 이용하여 자세 분석을 수행하였다. 손등 표면 marker 기반 방법은 CT-scan 시 손등에 부착된 쇠구슬의 중심점 좌표위치와 이를 기준으로 circle fitting 방법을 통해 추정된 CoR을 이용하여 자세 분석이 수행되었다. 마지막으로, 변형 가능한 손 모델을 이용한 방법은 CT-scan의 손 표면 형상에 손 모델을 정렬한 후 모델로부터 분석된 손 치수 및 손가락 관절 CoR 정보를 이

용하여 자세 분석이 수행되었다. 본 연구는 (1) 손가락 관절 CoR 추정 오차(CT-scan 기반 CoR과 각 방법으로 추정된 CoR 사이 평균 거리), (2) 관절별 각도 차이(CT-scan 기반 관절 각도와 각 방법으로 분석된 관절 각도간 차이) 측면으로 손

자세 분석 방법의 정확도를 평가하였다.

## 3. Results

### 3.1 손가락 관절 CoR 추정 성능

본 연구에서 제안된 추정식 기반의 CoR 추정 오차는 손 표면 marker 기반 방법의 추정 오차 비해 평균적으로 52.4% 정도 유의하게 작은 것으로 파악되었다. 신규 추정식 기반 CoR 추정 오차는 모든 관절에서 평균적으로  $2.2 \pm 0.4$  mm 정도로 파악되었으며 검지에서 소지의 PIP 관절에서  $1.6 \pm 0.2$  mm로 가장 작고, MCP 관절에서  $2.4 \pm 0.4$  mm로 가장 높았다. 손 표면 marker 기반 CoR 추정 오차는 모든 관절에서 평균적으로  $4.2 \pm 1.5$  mm 정도로 파악되었으며 검지에서 소지의 PIP 관절에서  $3.1 \pm 0.7$  mm로 가장 작고, MCP 관절에서  $5.7 \pm 1.5$  mm로 가장 높았다. 손가락 관절 CoR 추정 오차는 약지의 PIP, 소지의 PIP, MCP 관절을 제외한 모든 관절에서 신규 추정식 기반 방법이 손 표면 marker 기반 방법에 비해 통계적으로 유의하게 작았다( $F_{(111,895)} = 76.7, p < .001$ ).

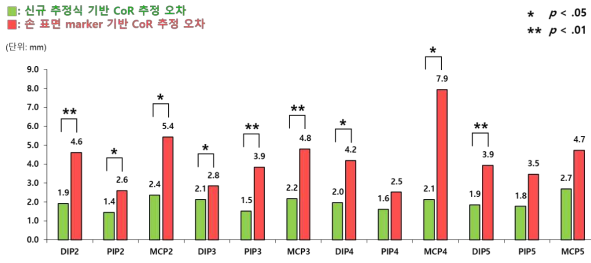
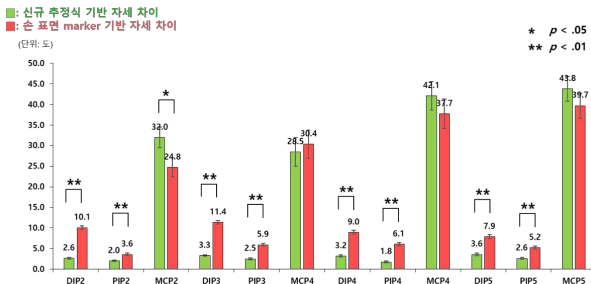


그림 3. 손가락 관절 회전 중심(CoR) 추정 오차 평가 결과

### 3.2 손 자세 분석 성능 비교

본 연구에서 제안된 손 모델 기반의 자세 분석 정확도는 손 표면 marker 기반 자세 분석에 비해 평균적으로 DIP 관절에서 3배, PIP 관절에서 2.3배 정도 유의하게 높은 경향이 파악되었다. 신규 손 모델 기반 자세 분석 결과는 기준 자세에 비해 평균적으로 DIP 관절에서  $3.2 \pm 2.1^\circ$ , PIP 관절에서  $2.2 \pm 1.8^\circ$ , MCP 관절에서  $36.6 \pm 27.4^\circ$  정도의 자세 차이를 보이는 것으로 파악되었다. 손 표면 marker 기반 자세 분석 결과는 기준 자세에 비해 평균적으로 DIP 관절에서  $9.6 \pm 4.2^\circ$ , PIP 관절에서  $5.2 \pm 3.0^\circ$ , MCP 관절에서  $33.1 \pm 27.6^\circ$  정도의 자세 차이를 보이는 것으로 파악되었다. 손 모델 기반 자세 분석 방법은 손



표면 marker 기반 자세 분석 방법에 비해 DIP 및 PIP 관절에서 2.3~3.0배 정도 유의하게 높은 성능을 보였다( $F_{(111,895)} = 97.9, p < .001$ ).

그림 4. 손 자세 분석 정확도 평가 결과

## 4. Discussion

본 연구는 변형 가능한 손 모델을 이용하여 3차원 및 4차원 손 스캔의 자세를 높은 정확도로 분석하는 방법을 개발하고 정확성을 검증하였다. 손 표면 및 뼈 형상, 손가락 관절 CoR 정보, 손 표면 참조점 정보가 포함된 3차원 손 형상 dataset을 구축하고 다중 선형회귀분석 방법을 적용하여 손가락 관절 CoR 추

정식을 개발하였다. 3차원 손 스캔에 효율적으로 정렬되는 변형 가능한 손 모델을 개발하고 손가락 관절 CoR 추정식을 적용하여 손 자세를 분석하는 방법을 개발하였다. 신규 제안된 손 모델 기반 자세 분석 방법은 손 표면 marker를 이용한 자세 분석 방법 보다 손가락 관절 CoR 측면에서 54%, 손 자세 측면에서는 DIP 및 PIP 관절에서 230%~300% 정도 더 높은 정확도를 보였다.

본 연구에서 개발된 손가락 관절 CoR 추정식은 손등만 스캔되거나 동작 없이 정적인 자세로 측정된 제한된 상태의 손 스캔에도 유용하게 적용 가능할 것으로 판단된다. 일반적으로 손 형상은 고유한 형태 및 다양한 관절체로 구성된 구조적 특성으로 인해 편 자세를 제외한 경우 손 바닥 부위가 포함된 온전한 손 형상을 3차원 스캔을 이용하여 획득하기는 어렵다. 다양한 손 자세에서도 가려지지 않고 노출되는 손등 영역은 3차원 스캔이 용이하기 때문에 기존 연구(Braido

and Zhang, 2004; Zhang et al., 2003)에서도 손 등에 참조점을 기입하거나 reflective marker를 부착하여 손가락 관절 CoR을 추정하는 연구들이 수행되었다. 본 연구도 이와 동일한 관점에서 손등 영역의 형상 정보를 이용하여 손가락 관절 CoR 추정 방법을 개발하고자 하였다. 기존 연구들은 손가락 굴곡 및 신전 등과 같은 동작이 포함된 경우에만 관절 CoR을 추정 및 자세 분석을 수행할 수 있었지만, 본 연구에서 개발된 방법은 정적인 상태에서도 손 스캔을 이용하여 손가락 관절 CoR을 추정하거나 자세 분석을 수행할 수 있다.

신규 개발된 손 자세 분석 방법은 실시간 자세 분석, 인간공학적 제품 설계, 디지털 손 모델링 및 simulation 분야에서 유용하게 활용될 것으로 기대된다. 본 연구에서 개발된 손가락 관절

CoR 추정 방법은 최적화 기반의 Zhang et al. (2008)의 방법에 비해 연산이 간단하여 매우 빠르게 손가락 관절 CoR을 추정하므로 실시간 손 자세 분석 및 추적 등에 활용될 수 있다. 신규 손가락 관절 CoR 추정 방법은 다양한 손 자세의 효율적인 분석을 지원하여 인간공학적 그립 및 핸들 제품 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 신규 손가락 관절 CoR 추정 방법은 변형 가능한 손 모델의 스캔 데이터로의 정렬 시 자세 및 크기 조절의 기능을 정교하게 구현하는 기반 기술로 디지털 손 모델 및 simulation 분야에서 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 MCP 관절의 자세 분석 결과가 CT-scan 기반 분석 결과에 비해 24.5° ~ 43.8° 정도의 비교적 큰 차이를 보이는 것은 MCP 관절 각도 분석에 활용되는 손목 중심에 대한 정확한 분석이 수행되지 못하였기 때문인 것으로 사료된다. 추후에는 손목 중심에 대한 측정을 병행하여 MCP 관절 자세 분석의 성능을 향상시킬 필요가 있다. 본 연구의 손가락 관절 CoR 추정식 및 자세 분석 방법은 한국인의 손 CT-scan 데이터를 이용하여 분석되어 다른 인종에 적용하기 위해서는 추가 연구가 필요하다. 본 연구는 검지에서 소지까지의 관절에 대해 고정된 개념의 CoR 추정식을 개발하였으므로 추후 엄지 관절 CoR 추정식 개발 및 instantaneous CoR 추정에 대한 추가 연구가 수행될 필요가 있다.

## Acknowledgements

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었다(NRF-2018R1A2A2A05023299).

## References

- Bohlemann, J., Kluth, K., Kotzbauer, K., and Strasser, H. (1994). Ergonomic assessment of handle design by means of electromyography and subjective rating. *Applied Ergonomics*, 25(6), 346-354.
- Braido, P. and Zhang, X. (2004). Quantitative analysis of finger motion coordination in hand manipulative and gestic acts, *Human Movement Science*, 22(6), 661-678.
- Coleca, F., State, A., Klement, S., Barth, E., and Martinetz, T. (2015). Self-organizing maps for hand and full body tracking. *Neurocomputing*, 147(1), 174-184.
- Dong, H., Loomer, P., Barr, A., LaRoche, C., Young, E., and Rempel, D. (2007). The effect of tool handle shape on hand muscle load and pinch force in a simulated dental scaling task. *Applied Ergonomics*, 38(5), 525-531.
- Duchenne, G., & Kaplan, E. (1959), *Physiology of Motion*, Saunders, Philadelphia (trans.).
- Figuerola, R., Armstrong, T., Sun L., Zhou, W., Woolley, C. (2016). Determining instantaneous centers of rotation for finger through different postures using the iterative closest point algorithm (ICP). *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60(1), 1469-1473. San Diego, CA.
- Ge, S.S., Yang, Y., and Lee, T.H. (2008). Hand gesture recognition and tracking based on distributed locally linear embedding, *Image and Vision Computing*, 26(12), 1607-1620.
- Ho, M.F., Tseng, C.Y., Lien, C.C., and Huang, C.L. (2011). A multi-view vision-based hand motion capturing system, *Pattern Recognition*, 44(2), 443-453.
- Jung, H., Lee, N., Moon, S., Yang, X., Lee, S., Moon, J., Ha, K., and You, H. (2018). An Ergonomic Grip Design Process for Vaginal Ultrasound Probe Based on Analyses of Benchmarking, Hand Data, and Grip Posture. *In Proceedings of the 20th Triennial Congress of the International Ergonomics Association*, Florence, Italy.
- Jung, H., Mun S., Lee, W., and You, H. (2019). Measurement of the Internal Shape of Power Grip in Wrist Ulnar/Radial Deviation. *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 63rd International Annual Meeting*, 63(1), 1149-1153, Seattle, WA.
- Jung, H., Lee, W., Jung, S., Hong, Y., and You, H. (2021). Development of a Hand Template Model for Ergonomic Grip Design. *In Proceedings of the 21st Triennial Congress of the International Ergonomics Association*, Vancouver, Canada.
- Landsmeer, J.M. (1963). The Coordination of Finger-Joint Motions, *The Journal of bone and joint surgery*, American volume 45, 1654-1662.
- Stefanov, N., Galata, A., and Hubbard, R. (2007). A real-time hand tracker using variable-length Markov models of behaviour, *Computer Vision and Image Understanding*, 108(1), 98-115.
- Nolden, M., Zelzer, S., Seitel, A., Wald, D., Müller, M., Franz, A. M., ... & Wolf, I. (2013). The medical imaging interaction toolkit challenges and advances. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 8(4), 607-620.
- Piazza, S.J., Erdemir, A., Okita, N., Cavanagh, P.R. (2004). Assessment of the functional method of hip joint center location subject to reduced range of hip motion. *Journal of Biomechanics*, 37(3), 349-356.
- Premaratne, P., Yang, S., Vial, P., and Ifthikar, Z. (2017). Centroid tracking based dynamic hand gesture recognition using discrete Hiddle Markov Models, *Neurocomputing*, 228(8), 79-83.
- Romero, J., Tzionas, D., and Black, M.J (2017) Embodied Hands: Modeling and Capturing Hands and Bodies Together. *ACM Transactions on Graphics*, 36(6). 245.
- Zhang, X., Lee, S.W., and Braido, P. (2003). Determining finger segmental centers of rotation in flexion-extension based on surface marker measurement, *Journal of Biomechanics*, 36(8), 1097-1102.