

멀티 카메라를 이용한 3 차원 인체 자세 추정 기반 관절가동범위 측정 방법

김수민¹, 김휘강^{2*}, 이상범², 김광용²

¹ 단국대학교, ² 한국전자통신연구원

suum10200@gmail.com, {hwigangkim*, sblee230, kimky}@etri.re.kr

Range of motion measurement method based on 3D human pose estimation using multi-camera

Sumin Kim¹, Hwi-Gang Kim^{2*}, Sangbeom Lee², Kwang-Yong Kim²

¹ Department of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University,

² Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

본 논문은 비전 기반의 인체 자세 추정 기술을 활용한 관절가동범위 측정 자동화 방법과 관련한 것으로, 관절가동범위 측정에 있어 카메라를 이용한 인체 자세 추정 기술의 적용은 매우 효과적일 수 있으나, 하나의 카메라를 사용하는 경우 운동면 및 수행 동작에 따라 일부 관절의 깊이 정보를 제대로 알 수 없으므로 사용자의 관절 각도를 정확하게 측정하는 것이 불가능하다. 이와 관련하여 본 논문에서는 두 개의 카메라를 사용하여 인체의 3 차원 자세를 추정하고 이를 활용하여 보다 정확하고 효율적인 관절가동범위 측정 방법을 제안한다. 이를 위하여 본 연구에서는 하나의 정면 카메라를 기준으로 좌우 두 개의 카메라를 배치하는 카메라 구성을 제안하고, 어깨 관절가동범위 측정 동작 수행 시 관절 각도의 변화를 그래프로 표현함으로써 단일 및 멀티 카메라의 사용에 따른 인체 자세 및 관절 각도 추정 정확도를 비교하였다.

I. 서 론

관절가동범위(ROM, Range of Motion)의 측정은 재활 의료 및 헬스케어 분야에서 매우 중요한 과제 중 하나로, 근골격계 질환의 진단 및 치료에 있어 관절의 움직임에 영향을 미치는 요소를 발견하고 환자의 기능장애에 정도를 객관적으로 파악하고 평가하기 위한 수단이다 [1]. 다만 기존 관절가동범위의 측정은 각도계를 사용한 수동 측정 방식으로 숙련된 전문가들에 의하여 수행되는데, 이 때, 평가자에 따라 시행오차가 발생할 수 있으며, 측정 결과 또한 주관성이 포함될 수 있어 객관적인 검사라고 보기 어렵다. 또한 평가 대상인 환자의 입장에서 매번 병원 방문을 통한 검사가 진행되어야 하는 불편이 있고, 이에 따른 시간 및 비용의 소모 또한 단점에 해당한다 [2].

이와 관련하여, 최근 인공지능의 발달로 영상 기반의 인체 자세 추정 기술 및 이를 활용한 연구들이 활발하게 진행되고 있으며, 위 설명한 문제들을 해결하기 위해 관절가동범위 측정에 이러한 영상 AI 기반의 자세 추정 기술의 적용은 매우 효과적일 수 있다 [1, 2].

다만 카메라를 사용한 관절가동범위 측정 시, 사용자가 직접 동작을 수행하는 모습을 직접 보며 측정하는 것이 가장 효과적이고 편한 방법이지만, 하나의 카메라만을 사용하게 되면 운동면 변화에 따라 일부 동작에서 특정 관절의 깊이 정보를 제대로 알 수 없어서 동작 수행 중 관절 사이의 각도를 정확하게 측정하는 것이 불가능하다.

따라서 본 논문에서는 두 개의 카메라를 사용해 인체 3 차원 자세를 추정하고, 각 관절의 깊이 정보를 활용한 정확하고 효율적인 관절가동범위 측정 자동화 방법을 제안하였다. 또한 하나의 정면 카메라 및 좌우로 두개의 카메라를 배치하여 이로부터 획득한 어깨 관절가동범위 측정 동작 영상들을 바탕으로 어깨 관절 각도의 변화를 그래프로 표현한 뒤, 각 그래프들의 형태가 사전 예측한 기준 그래프와 얼마나 유사한지 확인함으로써 카메라 사용 개수에 따른 관절 각도 추정 정확도를 비교 확인하였다.

II. 본 론

해부학적 자세에서 인체의 3 가지 운동면은 그림 1 과 같이 이마면, 시상면, 수평면이며, 어깨 관절가동범위 측정을

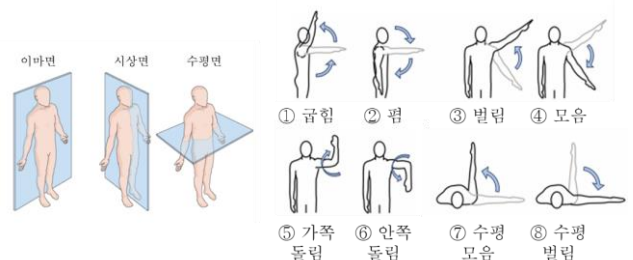


그림 1. 해부학적 인체 운동면 (이마면/시상면/수평면) 및 어깨 관절가동범위 측정 동작 (어깨관절 ① 굽힘, ② 펴기, ③ 벌림, ④ 모음, ⑤ 가쪽돌림, ⑥ 안쪽돌림, ⑦ 수평모음, ⑧ 수평벌림)

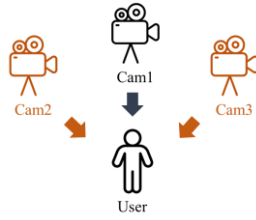


그림 2. 카메라 구성 (Cam1: 단일, Cam2+ Cam3: 멀티 카메라)

위해 사용되는 동작들론 크게 8 가지(어깨관절 굽힘, 펌, 벌림, 모음, 가쪽돌림, 안쪽돌림, 수평모음, 수평벌림)를 들 수 있다 [3]. 앞서 서술한 것과 같이 운동면에 따른 일부 동작들의 경우, 정면에 위치한 한 대의 카메라를 바라보고 본인의 모습이 출력되는 화면을 보면서 동작을 수행할 때 각 관절의 깊이 정보들을 알 수 없어 관절의 각도를 정확하게 파악할 수 없으며, 정확한 각도 측정을 위하여 사용자가 몸을 측면으로 돌아 동작을 수행하게 되면 (굽힘, 펌 등) 도리어 본인의 모습을 직접 볼 수 없어 자신이 제대로 동작을 수행하고 있는지를 확인하는 것이 어렵게 된다. 특별히 수평면의 경우 사용자의 위 또는 아래에서 각도를 측정해야 하는 동작들이며, 이는 정면 한 대의 카메라로는 측정이 불가능하다.

따라서 본 논문에서는 위 그림 2 와 같이 정면 한 대의 카메라 외 좌우 일정 간격으로 두 개의 카메라를 추가로 배치하여 그림 1 의 어깨 관절가동범위 측정 동작 수행 영상을 획득하였으며, 단일 카메라 영상으로부터 추정된 자세와 좌우 두 개의 멀티 카메라 영상으로부터 추정된 자세를 바탕으로 동작 수행 중 어깨 관절 각도의 변화를 그래프로 표현하여 관절 각도 측정 정확도를 평가하였다. 이 때, 자세 추정에는 대표적인 영상 AI 기반 자세 추정 모델 중 하나인 MediaPipe [4]를 사용하였으며, MediaPipe 의 경우, 골반 중간 지점을 원점으로 한 각 관절의 상대적인 깊이 정보인 z 좌표값을 제공하기 때문에 멀티 카메라로부터 추정된 3 차원 자세 추정 정보와 그 결과를 비교하기에 적합한 모델이라 할 수 있다. 또한 동작 수행 시 각 동작들에 대한 가이드 시퀀스를 제시했으며, (예를 들어 굽힘 동작의 경우, 5초 정지 → 5초 수행 (가동범위, $0^\circ \sim 180^\circ$) → 5초 유지 → 5초 수행 ($180^\circ \sim 0^\circ$) → 5초 정지) 가이드에 맞게 동작을 수행했을 때 예측 가능한 관절 각도 변화 그래프 형태를 기준으로, 단일 또는 멀티 카메라를 사용한 3 차원 자세 추정 결과로부터 산출한 관절 각도 변화 그래프 형태의 유사도를 확인하였다. 이 때 동작 수행 시 발생할 수 있는 속도 차이에 의하여 각 그래프의 형태 비교 시 발생할 수 있는 오차를 방지하기 위해, 본 논문에서는 시간 및 속도 차이에도 두 그래프의 형태 비교가 가능한 DTW (Dynamic Time Warping) 알고리즘을 사용하여 두 그래프의 유사도를 정량적으로 측정하고 제안한 방법의 정확도를 평가하였다 [5]. DTW 알고리즘은 두 시계열 데이터를 비교함에 있어 데이터 내 배열 순서를 고려해 가장 유사한 형태를 갖는 부분을 매칭하여 두 그래프 간의 상관관계를 찾는 알고리즘으로 두 데이터 사이의 차이를 의미하므로 그 값이 작을수록 유사한 그래프라 판단할 수 있으며, 가이드 시퀀스로부터 그린 그래프와 더 유사한 형태의 그래프를 갖는 카메라 구성 방법이 관절가동범위 측정에 더 적합한 방법이라 할 수 있다.

$$Accuracy(A_S \text{ or } A_M) = DTW(A_S \text{ or } A_M, A_G) \quad (1)$$

$$\text{where } A_{S,M,G} = \frac{a_{S,M,G}}{\max(a_G)}, \quad a = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n\}$$

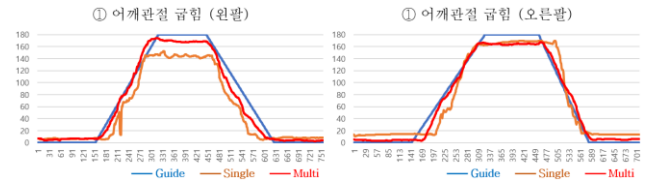


그림 3. 어깨 관절가동범위 측정 동작 수행 각도 변화 그래프의 예 (① 굽힘, 왼팔 및 오른팔)

따라서 각 영상의 프레임별 어깨 관절 각도의 집합을 a 라 하고 집합 내 각도들을 관절가동범위 최대값으로 정규화한 각도값의 집합을 A 라 할 때, 수식 1 과 같이 가이드 시퀀스 각도값들과 단일 또는 멀티 카메라 자세 추정 결과로부터 산출한 각도값들 사이의 DTW 값을 계산함으로써 각 방법의 정확도를 산출할 수 있다. 수식 1 에서 아래 첨자 S, M, G 는 각각 단일 및 멀티 카메라, 가이드 시퀀스를, n 은 각 영상의 프레임 개수를 의미한다.

III. 시험 결과

본 논문에서는 그림 1 의 어깨 관절가동범위 측정 동작 8 가지에 대하여 왼팔, 오른팔을 모두 수행한 16 개의 영상들을 대상으로, 위 설명한 것과 같이 가이드 시퀀스 각도 변화 그래프와 단일 및 멀티 카메라로부터 추정된 자세로부터 산출한 어깨 관절 각도 변화의 그래프 간의 형태를 비교하고, DTW 값을 계산함으로써 제안한 방법의 성능을 평가하였다. 먼저 위 그림 3 에서 볼 수 있듯이 어깨관절 굽힘 동작 시 가이드 시퀀스의 각도가 0° 에서 180° 로 변화할 때, 멀티 카메라를 이용해 추정된 3 차원 자세로부터 산출한 각도 변화의 그래프가 단일 카메라의 각도 변화 그래프보다 그 형태가 유사한 것을 확인할 수 있다. 또한 아래 표 1 는 그림 3 에 대한 단일 및 멀티 카메라 방법의 DTW 값을 기록했으며, 표 1 에서와 같이 멀티 카메라를 사용한 방법에서 DTW 값이 현저히 작은 것을 확인할 수 있었으며, 이는 관절가동범위의 측정에 있어 멀티 카메라를 사용하는 것이 보다 정확한 각도 측정이 가능한 방법임을 의미한다. 이와 더불어 사용자가 운동면에 따라 카메라를 향해 몸을 돌리지 않고 화면을 바라보며 동작을 수행할 수 있으므로 편리하고 효율적인 관절가동범위 측정을 가능하게 한다. 추가로 모든 영상에 대한 그래프의 형태 및 DTW 값 결과들은 아래 그림 4 및 표 2 에서 확인할 수 있으며, 모든 영상에 대한 결과 역시 제안한 멀티 카메라 사용 방법에서 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

표 1. 그림 3 의 DTW 값 결과 (① 굽힘, 왼팔 및 오른팔)

	Single camera		Multi-camera	
	좌	우	좌	우
어깨관절 굽힘	36.1	30.0	11.9	20.0

IV. 결론

본 논문에서는 두 개의 카메라를 이용한 인체 3 차원 자세 추정 기반의 관절가동범위 측정 자동화 방법을 제안했으며, 어깨 관절가동범위 측정 동작 수행 시 각도 변화 그래프 간의 형태 유사도를 DTW 값을 계산하여 비교함으로써 제안한 방법의 성능을 평가하였다. 또한 이 방법은 사용자가 운동면의 변화에 관계없이 직접 화면을 바라보며 동작을 수행할 수 있다는 장점도 있어서 보다 정확하고 효율적인 관절가동범위 측정 시스템의 개발 및 재활의료 서비스의 제공이 가능할 것으로 기대된다.

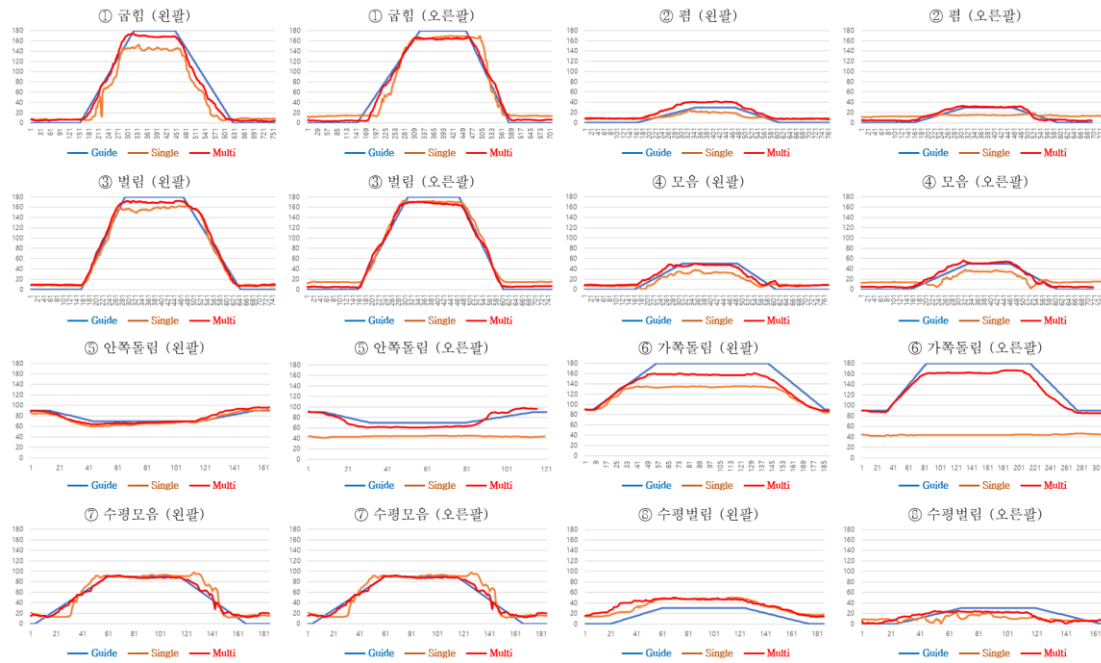


그림 4. 어깨 관절가동범위 측정 동작 수행 각도 변화 그래프 (어깨관절 ① 굽힘 좌/우, ② 펴 좌/우, ③ 벌림 좌/우, ④ 모음 좌/우, ⑤ 안쪽돌림 좌/우, ⑥ 가쪽돌림 좌/우, ⑦ 수평모음 좌/우, ⑧ 수평벌림 좌/우)

표 1. 그림 3의 DTW 값 결과 (① 굽힘, 왼팔 및 오른팔)

	Single camera		Multi-camera	
	좌	우	좌	우
① 굽힘	36.1	30.0	11.9	20.0
② 펴	116	218	154	38.6
③ 벌림	30.6	33.7	21.3	14.6
④ 모음	107	158	52.0	27.0
⑤ 안쪽돌림	6.67	147	4.41	14.0
⑥ 가쪽돌림	28.0	245	11.5	12.5
⑦ 수평모음	11.6	11.3	9.46	4.39
⑧ 수평벌림	82.8	36.4	89.0	16.5

[5] C. Park, H. Kim, S. Lee, K. Kim, and S. Lee, “비전 기반 실내 스포츠를 위한 동작 특징 분석 및 동작 분류 방법,” 제 3 회 한국인공지능학술대회, pp.47-49, 2022.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국전자통신연구원 연구운영지원사업의 일환으로 수행되었음. [24ZD1140, 대경권 지역산업 기반 ICT 융합 기술 고도화 지원(의료)]

참 고 문 헌

- [1] J. Ji, C. Lee, and Y. Park, “영상처리를 이용한 관절가동범위 측정의 자동화 및 휴대용 시스템,” 2021년도 한국통신학회 동계종합학술발표회, pp. 0883-0884, 2021.
- [2] G. Noh, J. Ahn, and B. Jeoung, “Enhancing the Measurement of the Range of Motion Using Multi-camera Learning Approaches,” *ICOST: International Conference on Smart Homes and Health Telematics*, pp. 282-291, 2023.
- [3] L. S. Lippert, “Clinical Kinesiology and Anatomy,” F. A. Davis Company, 5th Edition. 2014.
- [4] C. Lugaresi et al., “Mediapipe: A framework for building perception pipelines,” *Third Workshop on Computer Vision for AR/VR at 2019 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019.