

# 산업 안전·보건을 위한 자가관리형 디지털 자세 지표: 표식점 없는 비방사선 연속 평가 프레임워크

이도희, 김정훈\*, 최상일\*

대구가톨릭대학교 컴퓨터소프트웨어학부

e-mail: [dohee0728@cu.ac.kr](mailto:dohee0728@cu.ac.kr), [fainal2@cu.ac.kr](mailto:fainal2@cu.ac.kr), [sangilchoi@cu.ac.kr](mailto:sangilchoi@cu.ac.kr)

## Self-Managed Digital Posture Indices for Occupational Health: A Markerless, Non-radiographic Framework for Continuous Assessment

Dohee Lee, Junghun Kim\*, Sang-il Choi\*

Daegu Catholic University, School of Computer Software (Computer Engineering), Gyeongsan, 38430, Republic of Korea

### 요약

본 연구는 산업 안전·보건 현장에서 활용 가능한 표식점 없는 비방사선 연속 평가 체계를 제안한다. 범용 카메라로 획득한 후면 사진을 기하 기반 정규화로 일관화하고, 좌우 윤곽을 연속 신호로 기술하여 단일 지표로 요약함으로써 정량 평가를 가능하게 했다. 제안 체계는 모바일·키오스크 등 현장에 적합한 저비용·무장착·반복 측정 절차를 채택하고, 간단한 촬영 가이드와 결정론적 처리 파이프라인으로 사용자와 관리자가 재현성 있는 결과를 얻도록 설계되었다. 산출물은 단일 지표와 보조 곡선으로 구성되어 자가 점검-피드백-교정의 순환을 자연스럽게 지원한다. 또한 서로 다른 촬영 장치·거리·조명 차이를 공통 표현공간으로 정렬하여 조건 차이에 덜 민감한 비교가능성을 확보했고, 반복 관측 기반의 경과 추적을 수행할 수 있다. 대표 필요 사례로 척추측만을 논의하되 임상군에 한정되지 않고 일상적 자세 불균형 관리로 일반화할 수 있는 구조를 제시한다. 결과적으로 본 체계는 방사선·웨어러블 의존 없이도 개인 단위 근골격계 위험을 정량·일관되게 추적하고, 현장 의사결정에 바로 쓸 수 있는 실용적 기반을 제공한다.

### 1. 서론

산업 현장에서 개인의 근골격계 위험을 반복적으로 관리하려면, 저비용·무장착·비방사선이라는 요건을 동시에 만족하면서도 동일 대상 재촬영에 일관적으로 적용될 수 있는 지표가 필요하다 [4]. 그러나 실제 현장에서는 조명·촬영 거리·작의 상태 등 환경 변동성과 장비 착용이 야기하는 운영 부담이 공존하여, 저비용무장착·비방사선이라는 요건을 동시에 충족하는 지표 설계가 용이하지 않다. 이에 본 연구는 범용 카메라 영상에 기하학적 정규화를 적용해 좌우 정렬 비대칭의 경향을 안정적으로 추출하고, 이를 단일 척도로 환산하는 평가 체계를 제안한다. 제안 지표는 반복 촬영만으로 시간적 변화를 추적할 수 있어, 현장 적용성이 높은 자가 점검-피드백-교정 루프를 가능하게 한다. 기존 접근은 대체로 (i) 방사선 영상 기반 정량화, (ii) 관성·광학 웨어러블 기반 상태 추정, (iii) 일반 영상에서의 포즈/자세 추정으로 구분된다. 방사선 영상은 해부학적 정밀성이 탁월하나, 반복 관찰과 예방적 관리에는 비용·노출 부담이 크다. 웨어러블은 고해상도 동역학 정보를 제공하지만 장착 순응도와 유지·운영 비용이 실무 적용의 병목이 된다. 반면 일반 영상 기반 접근은 접근성과 확장성에서

강점을 보이나, 표식점 의존성, 복잡한 3D 복원 절차, 환경 요인에 대한 민감성이 실사용 장벽으로 지적되어 왔다[1,2,4]. 따라서 비방사선·무장착·경량 절차를 충족하면서 다양한 촬영 조건에서 견고하게 작동하는 “현장형 디지털 자세 지표”의 필요성이 분명하다[3,4].

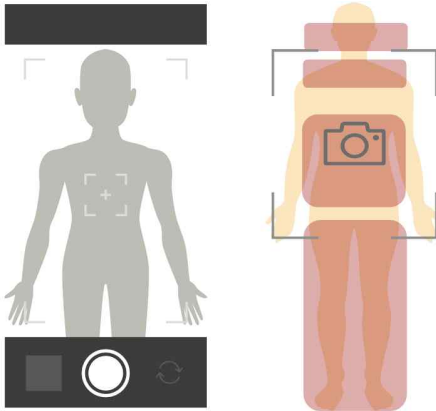
척추측만증(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)은 이러한 필요성을 선명히 보여주는 대표 사례다. 3D 표면 스캔과 모바일 촬영 등 비방사선 방법이 최근 선별과 경과 추적의 대안으로 떠올랐으나[1-3], 임상 판독을 전면적으로 대체하기보다는 현장에서의 연속 관찰과 자기관리를 지원하는 보조 지표로 자리매김하는 것이 타당하다 [4,5]. 이에 본 연구는 저비용 반복 모니터링을 위한 현장형 지표화에 초점을 둔다 [4]. 범용 카메라 영상에 대한 기하 기반 정규화를 통해 좌우 정렬 편차의 경향을 추출하고 이를 하나의 직관적 자세 지표로 요약함으로써, 동일 개인의 반복 촬영만으로도 시간적 추세를 해석할 수 있도록 설계하였다. 제안 프레임워크는 특정 임상군에 종속되지 않도록 구성하되, AIS를 대표적 필요 사례로 제시하여, 산업 현장에서의 자가 관리형 장기 모니터링 가능성과 활용 시나리오를 논의한다 [1-5].

## 2. 방법론

이 연구에 사용된 데이터는 윤리 지침(IRB 번호: KNUH 2025)에 따라 경북대학교병원 기관심사위원회(IRB)의 승인을 받은 후 수집되었습니다.

### 2.1 입력 및 촬영·품질 관리

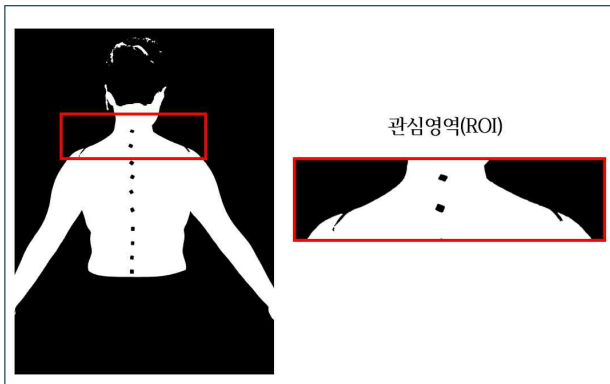
본 연구는 표식점이 불필요한·비방사선 조건을 전제로, 후면 상부 체간을 포함하는 단일 이미지를 입력으로 사용한다. 동일 개인의 반복 관측을 염두에 두고 촬영 단계에서 거리·각도·조명에 관한 간단한 가이드를 제시하여 구도 일관성을 확보하였으며, 과도한 회전·강한 그림자·프레임 절단 등은 부적합 프레임으로 분류해 재촬영 또는 제외하였다. 분석 데이터는 (i) 임상 X-ray로부터 후면 윤곽을 복원한 아바타 실루엣 188장과, (ii) 실제 후면 촬영을 수행한 대상자 7명의 이미지(반복 촬영 포함)로 구성된다.



[그림 1] 범용 카메라 기반 후면 촬영

### 2.2 전처리와 양측 정규화

전처리에서는 후면 상부 체간의 관심영역(ROI)을 설정한 뒤, 표준 영상처리 절차를 통해 좌·우 바깥 윤곽 경로를 얻는다. 이후 좌·우 반측을 동일 좌표계로 사상하고, 우측 윤곽을 좌측 기준으로 반사하여 높이축  $y$ 에서 1:1 대응이 이루어지도록 정렬한다.



[그림 2] 후면 상부 체간에서의 관심영역(ROI) 정의

### 2.3 비대칭 신호와 지표 정의

좌측 윤곽을  $L(y)$ , 우측 윤곽을  $R(y)$ 라 하자. 우측 윤곽은 좌우 반사와 좌표 정합을 거쳐 좌측 좌표계로 변환한 곡선  $R'(y)$ 로 표기한다. 이때 좌우 비대칭을 나타내는 차의 함수는

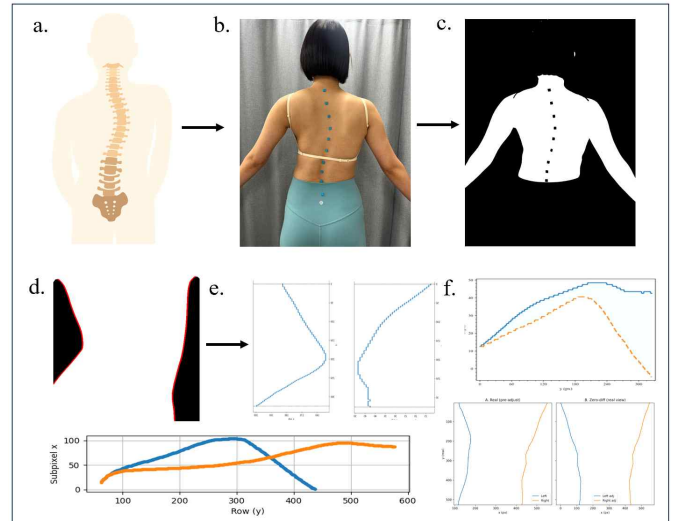
$\Delta x(y) = L(y) - R'(y), y \in Y$ 로 정의한다.

$\Delta x(y)$ 의 부호와 크기는 높이별 편위의 방향과 규모를 동시에 기술하며, 분포 형태를 통해 국소·전역 패턴을 해석할 수 있다.

본 연구의 단일 자세 지표  $A$ 는  $\Delta x(y)$ 의 절대 편차를 ROI 높이 구간  $Y$ 에서 요약한 값으로, 예컨대

$$A = \frac{1}{|Y|} \int_Y |\Delta x(y)| dy$$

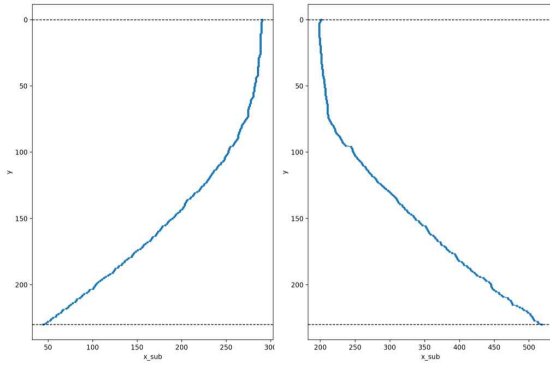
와 같이 정의할 수 있다. 단일 시점에서  $A$ 는 전역 불균형 정도를 제공하고, 동일 개인의 반복 시점에서는  $\{A_t\}$ 의 궤적을 통해 시간적 추세를 파악한다.



[그림 3] 비대칭을 정량화하기 위한 영상 기반 파이프라인

## 3. 결과

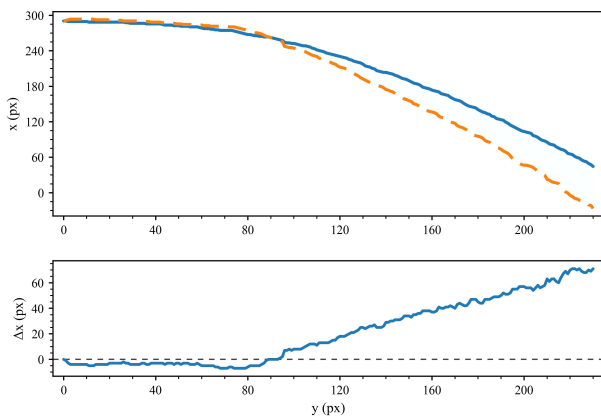
본 연구는 일반 후면 사진(비방사선, 표식점 없음)으로부터 좌측과 우측 어깨 윤곽을 각각 연속적인 함수 곡선으로 표현하였다.



[그림 4] 좌·우 어깨 윤곽선 추출 결과

[그림 4]는 그 결과를 예시하며, 동일한 좌표계에서 높이 축(y)과 표준화된 수평 위치( $x_{sub}$ )로 곡선을 제시했다. 이와 같은 함수화는 개별 픽셀이나 임의의 특징점에 기대지 않고 연속 분포를 보존하기 때문에, 시점 간 또는 대상자 간에 직접적인 수치 비교와 중첩 시각화가 가능하다. 즉, 한 장의 후면 사진으로도 좌우 어깨선의 형태를 정량적 신호로 다룰 수 있게 되었다.

함수 곡선은 촬영 조건의 미세한 차이에 덜 민감하면서도, 윤곽의 완전한 굴곡과 급격한 변화가 높이별로 연속적으로 나타난다. 이에 따라 개인 내 반복 촬영에서는 곡선의 형상 유지 여부와 변위 정도를 안정적으로 추적할 수 있고, 집단 비교에서는 곡선의 통계를 동일 축에서 제시함으로써 보고의 일관성을 확보할 수 있다. 또한, 곡선 기반 표현은 이후 필요한 요약치 (예: 구간별 평균 위치, 최대 편위가 나타나는 높이 등)를 후처리로 유연하게 산출할 수 있는 기반을 제공한다.



[그림 5] 어깨 윤곽선 정렬 및 비대칭 곡선 계산 결과

[그림 5]의 상단 패널은 좌우 어깨 윤곽을 겹쳐 보여주는 시각화이고, 해석의 기준은 하단에 제시된 비대칭 곡선이다. 이 곡선은 같은 높이에서 두 윤곽이 얼마나 다르게 위치하는지를 연속 신호로 표현한 것으로, 윤곽의 모양을 수치적 근거만으로 결과를 읽을 수 있게 한다.

하단 곡선이  $\Delta x=0$  기준선에 밀착된 구간은 해당 높이에서 좌우 차이가 미미함을 의미한다. 기준선에서 멀어질수록 그 높이대에

비대칭의 크기( $|\Delta x|$ )가 커짐을 시사한다. 곡선이 한동안 평탄하게 이어지면 대칭성이 유지되는 구간이며, 완전한 상승·하강은 높이를 따라 불일치가 서서히 누적되고 있음을 나타낸다. 반대로 짧은 구간의 급경사는 형상 차이가 제한된 높이 범위에 집중되어 빠르게 변화함을 뜻한다. 곡선의 극값은 전체 중 비대칭이 가장 두드러지는 높이를 지목하는 표식으로 활용된다.

이 지표는 단일 시점의 상태 파악은 물론, 반복 측정의 추세 추적에도 직접 사용된다. 동일 개인의 시계열에서 곡선 전체가 기준선 쪽으로 이동하면 전반적 개선으로, 특정 높이대만 변화하면 국소적 변화로 해석한다. 집단 분석에서는 비대칭 곡선의 평균 경로와 범위를 같은 축에서 제시함으로써 대상자 간 차이를 일관된 방식으로 비교할 수 있다. 필요하다면 본 곡선으로부터 전 구간의 이탈 정도를 하나의 값으로 요약하거나, 높이 구간별 요약치를 산출하는 등 후속 정량화로 손쉽게 확장된다.

#### 4. 결론

본 연구는 산업 안전·보건 현장을 위한 표식점 없는 비방사선 연속 평가 체계를 제안하고, 일반 후면 사진에서 좌우 윤곽을 연속 신호로 표상하여 단일 지표로 요약하는 절차를 정립하였다. 연속 신호는 국소 굴곡과 전역 추세를 동시에 보존하여, 한 번의 촬영으로도 “지금 상태가 어떤가”를 간결히 보고하고, 반복 촬영만으로 “어디가, 어떻게 변화했는가”를 일관된 기준으로 추적하게 한다. 현장 적용 측면에서는 범용 장비로 저비용·무장착반복 측정이 가능하고, 간단한 촬영 가이드와 결정론적 처리 파이프라인을 통해 작업자·관리자 누구나 재현성 있는 결과를 얻을 수 있다. 산출물은 현장 보고와 정기 점검서로 곧바로 전환 가능한 단일 지표와 보조 곡선 형식으로 제공되며, 촬영·해석·교정의 자가 관리 순환을 자연스럽게 지원한다. 또한 영상 기반 지표이면서 방사선·웨어러블 의존을 배제해 접근성과 수용성을 높였고, 다른 촬영 기기·환경에서도 동일한 함수공간으로 정규화되어 도메인 간 호환성이 우수하다. 결과적으로 본 연구는 전문 장비나 방사선 노출 없이도 일상적 자세 불균형을 정량·일관되게 추적하고 현장 의사결정에 즉시 연결되는 실용적 기반을 제시하였다.

본 결과물은 2025년도 교육부의 재원으로 경상북도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)-(로컬 맞춤형 R&D)의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

#### 참고문헌

- [1] Nada Mohamed, Liwen Li, Fan Gao, et al., “Three-dimensional markerless surface topography approach with convolutional neural networks for

- adolescent idiopathic scoliosis screening,” Scientific Reports, 제 15권, Article 8728, 3월, 2025년.
- [2] Q. Zheng, L. Xie, J. Xu, N. Xia, C. Z.-H. Ma, “A feasibility study of applying two-dimensional photogrammetry for screening and monitoring of patients with adolescent idiopathic scoliosis in clinical practice,” Scientific Reports, 제 13권, Article 14273, 8월, 2023년.
- [3] Y. Oquendo, I. Hollyer, C. Maschhoff, et al., “Mobile device-based 3D scanning is superior to scoliometer in assessment of adolescent idiopathic scoliosis,” Spine Deformity, 제 13권 2호, pp. 529-537, 3월, 2025년 (Epub 2024-12-12).
- [4] Su X., Dong R., Wen Z., Liu Y., “Reliability and validity of scoliosis measurements obtained with surface topography techniques: a systematic review”, Journal of Clinical Medicine, 제 11권, Article 6998, 2022년.
- [5] Banno T., et al., “Evaluation of the changes in waistline asymmetry using digital photography after corrective surgery for Lenke 5C/6C AIS”, Spine Deformity, 2024년.