

NASM 오버헤드 스쿼트 평가 (OHS)

결정론적 생체역학 알고리즘 문서

프로젝트 제목

3D 모션 캡처 데이터를 이용한 NASM 오버헤드 스쿼트의 결정론적 생체역학 평가

1. 개요 (Overview)

본 프로젝트는 3D 모션 캡처 관절 좌표 데이터를 기반으로 NASM 오버헤드 스쿼트 (OHS) 를 평가하기 위한 규칙 기반(rule-based) 생체역학 평가 시스템을 구현한다.

본 시스템의 목적은 머신러닝을 사용하지 않고, NASM 기준에 정의된 대표적인 움직임 보상 패턴(movement compensations) 을 자동으로 탐지하고 분류하는 것이다.

주요 평가 항목

정면(Frontal, Anterior) 관점

- 무릎 편차 (내반/외반, Valgus / Varus)

측면(Sagittal, Lateral) 관점

- 과도한 요추 신전 (허리 아치)
- 과도한 상체 전방 기울기

본 시스템은 다음 요소들을 통합한다.

- Crenna 기준에 정렬된 생체역학 신호 필터링
- 벡터 기반 기하학적 관절 각도 모델링
- 동작 단계(Phase) 기반 분석
- 임계값 기반 NASM 분류 규칙
- 해석 가능성을 위한 3D 스켈레톤 시각화

모든 출력 결과는 수치적으로 재현 가능하며, 생체역학적으로 해석 가능하고, 시각적으로 검증 가능하다.

2. 알고리즘 파이프라인 (Algorithm Pipeline)

본 분석 파이프라인은 완전한 결정론적 구조를 가지며, 총 7단계의 순차적 처리 과정으

로 구성된다.

Step 1: 데이터 수집 (Data Ingestion)

- 입력 데이터는 모션 캡처 시스템으로부터 획득된 3D 관절 좌표의 시계열 데이터이며, Excel 파일 형식으로 저장된다.
- 모든 관절 이름은 소문자 및 공백 제거를 통해 표준화되어 수치 연산의 일관성을 보장한다.
- 각 파일은 독립적으로 처리되어 실험 데이터의 무결성을 유지한다.

Step 2: 생체역학 신호 필터링 (Crenna 정렬)

관절 궤적의 생체역학적 타당성을 확보하기 위해 영위상(Zero-phase) Butterworth 저역통과 필터를 적용한다.

방법 (Method)

- 4차 Butterworth 저역통과 필터
- 차단 주파수(Cutoff frequency): **6 Hz**
- 샘플링 주파수(Sampling rate): **30 Hz**
- 전·후방 필터링(filtfilt)을 사용하여 구현

적용 근거 (Rationale)

- 모션 캡처 데이터에 포함된 고주파 노이즈 제거
- 위상 왜곡 없이 시간 정렬 유지
- 인간 움직임 분석을 위한 Crenna 등의 생체역학 신호 처리 권고안 준수

참고 문헌 (Reference)

Crenna, F., Rossi, G. B., & Berardengo, M. *Filtering Biomechanical Signals in Movement Analysis*

Step 3: 스쿼트 최하단 구간 검출 (Phase-specific Squat Depth Detection)

NASM에서 정의하는 대부분의 보상 패턴은 스쿼트 최하단 깊이에서 가장 뚜렷하게 나타난다.

검출 전략 (Detection Strategy)

- 허리의 수직 변위(waist_y)를 기준으로 분석
- 전체 구간 중 **수직 위치 하위 20% 프레임**을 선택
- 해당 프레임만을 사용하여 생체역학 평가 수행

목적 (Purpose)

- 임상적으로 가장 의미 있는 동작 구간에 분석 집중
- 비핵심 구간으로 인한 변동성 감소

Step 4: 기하학적 관절 각도 모델링 (Geometric Joint-Angle Modeling)

모든 생체역학 지표는 **벡터 기반 운동학(vector-based kinematics)** 을 사용하여 계산되며, 이는 결정론적이며 해부학적으로 해석 가능한 결과를 보장한다.

4.1 무릎 편차 (Knee Deviation, Frontal Plane)

- 정면면에서 엉덩이–무릎–발목 벡터를 사용하여 계산
- 중립 무릎 정렬에서의 편차 각도를 의미
- 값이 클수록 내반 또는 외반 움직임이 증가함을 의미

4.2 요추 신전 (Lumbar Extension, Sagittal Plane)

- 몸통–허리–엉덩이 벡터를 사용하여 계산
- 스쿼트 중 과도한 허리 아치(요추 과신전)를 추정
- 좌우 안정성을 위해 양측 엉덩이의 중간 지점을 사용

4.3 상체 전방 기울기 (Forward Torso Lean)

- 몸통 벡터와 전역 수직축(global vertical axis) 사이의 각도
- 직립 자세 대비 상체의 전방 기울기를 정량화

구현 방식 (Implementation)

- 모든 각도는 정규화된 벡터 내적(dot-product) 방식으로 계산
- 출력 단위는 **도(degree)**
- 최종 값은 스쿼트 최하단 구간 프레임들의 평균값

Step 5: NASM 규칙 기반 분류 (Rule-Based NASM Classification)

각 생체역학 지표는 NASM 기준에 정렬된 명시적 임계값을 사용하여 분류된다

분류	기준
NORMAL	허용 가능한 정렬 범위
MILD	경미한 편차
FAULT	과도하거나 보상적인 움직임

주요 특징

- 머신러닝 또는 통계적 추론 미사용
- 완전한 결정론적 판단 로직
- 데이터셋에 관계없이 완전한 재현성 보장

Step 6: 3D 스켈레톤 시각화 (3D Skeletal Visualization)

해석 가능성과 정성적 검증을 위해 프레임 단위 3D 스켈레톤 GIF를 생성한다.

시각화 특징

- 해부학적으로 연결된 관절 세그먼트
- 고정된 직교 투영(Orthographic projection)
- 일관된 공간 스케일
- 프레임 인덱스 및 라벨 표시

목적

- 탐지된 보상 패턴의 시각적 확인
- 보고서 및 프레젠테이션 지원
- 알고리즘 판단의 투명성 확보

Step 7: 종단 간 파이프라인 실행 (End-to-End Execution)

각 모션 캡처 데이터셋에 대해 다음 절차가 수행된다.

1. 관절 좌표 데이터 로드 및 표준화
2. Crenna 정렬 신호 필터링 적용
3. 스쿼트 최하단 구간 검출

4. 기하학적 관절 각도 계산
5. NASM 규칙 기반 분류 수행
6. 3D 스켈레톤 시각화 생성

모든 입력 파일은 자동으로 처리된다.

3. 핵심 설계 원칙 (Key Design Principles)

결정론적 아키텍처

- 동일한 입력에 대해 항상 동일한 출력
- 임상, 교육, 연구 환경에 적합

생체역학적 타당성

- 신호 필터링 및 각도 모델링이 기준 생체역학 문헌과 정렬

해석 가능성

- 모든 수치 결과는 물리적으로 의미 있는 지표
- 시각화를 통해 인간 검증 가능

4. 요약 (Summary)

본 시스템은 다음 요소들을 통합하여 완전한 결정론적 NASM 오버헤드 스퀘트 평가 프레임워크를 제공한다.

- Crenna 기준 생체역학 신호 처리
- 벡터 기반 생체역학 모델링
- 동작 단계 기반 분석
- 규칙 기반 NASM 분류
- 해석 가능한 3D 시각화

본 알고리즘은 원시 3D 관절 궤적 데이터를 임상적으로 의미 있는 움직임 평가 결과로 변환하며,

스포츠 과학, 재활, 인간 동작 연구 분야에 적합한 견고성, 투명성, 재현성을 보장한다.