

NASM 오버헤드 스쿼트 평가 시스템 결과 보고서

Kim Daewon

2026-02-02

Contents

1	요약	1
1.1	핵심 요약	1
1.2	핵심 성과	1
2	프로젝트 개요	2
2.1	배경 및 목적	2
2.2	범위	2
3	수행 내용	2
3.1	주요 단계 요약	2
3.2	처리 파이프라인	2
3.3	적용 프리셋	2
4	결과	3
4.1	필터링 성능 비교 (Before/After)	3
4.2	무릎 내전 평가 결과	3
4.3	자세 평가 결과	3
4.4	시각화 결과	3
5	결론 및 제언	7
5.1	성과 요약	7
5.2	한계점	7
5.3	향후 발전 방향	7
6	부록	7
6.1	출력 파일 구조	7
6.2	실행 명령어	8

1 요약

1.1 핵심 요약

노이즈가 심한 3D 모션 캡처 데이터에서 통합 최적화 기법을 적용하여, 해부학적 일관성을 유지하면서 평균 39배의 노이즈 감소를 달성하고 신뢰할 수 있는 NASM 스쿼트 평가 결과를 도출했습니다.

1.2 핵심 성과

- 노이즈 감소:** 가속도 분산 기준 7~14배 개선 (고노이즈 데이터 최대 105배)
- 해부학적 정확성:** 뼈 길이 표준편차 0.15mm 이하로 시간에 따른 변동 최소화
- 적응형 처리:** 일반/고노이즈 데이터에 대한 프리셋 자동 적용으로 5명 피험자 전원 분석 성공

2 프로젝트 개요

2.1 배경 및 목적

NASM(National Academy of Sports Medicine) 오버헤드 스쿼트 평가는 근골격계 불균형을 식별하는 표준 기능적 움직임 평가입니다. 본 프로젝트는 3D 모션 캡처 데이터를 분석하여 다음 세 가지 핵심 지표를 자동으로 측정합니다:

평가 항목	관찰 시점	측정 내용
무릎 내전	전방	스쿼트 시 무릎이 안쪽으로 모이는 정도
허리 아치	측면	요추부 과전만 또는 평평해짐
상체 기울기	측면	몸통이 앞으로 숙여지는 정도

2.2 범위

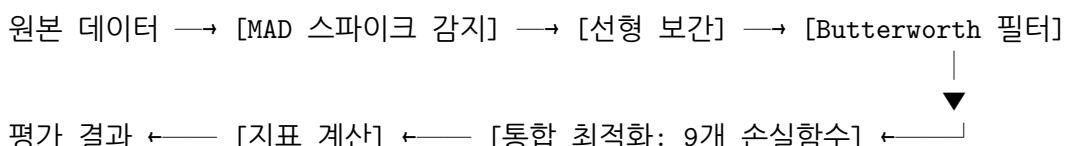
- 데이터: 5명 피험자, 각 피험자당 5회 스쿼트 사이클
- 관절점: 15개 (머리, 몸통, 허리, 어깨, 팔꿈치, 손목, 고관절, 무릎, 발목 × 좌/우)
- 샘플링: 30fps, 약 250~450 프레임/피험자

3 수행 내용

3.1 주요 단계 요약

단계	작업	목적
1	스파이크 감지 및 제거	센서 오류로 인한 이상치 처리
2	저역통과 필터링	고주파 노이즈 제거
3	통합 최적화	다중 제약조건 동시 충족
4	평가 지표 계산	무릎 내전, 자세 각도 산출
5	시각화 생성	그래프 및 애니메이션 출력

3.2 처리 파이프라인



3.3 적용 프리셋

프리셋	저역통과 Cutoff	적용 대상
default	3.0 Hz	Subject 1, 2, 3
high-noise	2.0 Hz	Subject 4, 5

4 결과

4.1 필터링 성능 비교 (Before/After)

피험자	RMSE (mm)	뼈 길이 σ (mm)	가속도 개선	최적화 반복
1	25.9	0.06	13.6x	4,049
2	16.7	0.11	12.2x	4,139
3	15.2	0.15	7.3x	4,089
4	51.4	0.30	57.3x	3,839
5	29.9	0.11	105.7x [†]	3,170
평균	27.8	0.15	39.2x	3,857

[†] Subject 5는 원본 데이터 끝 53프레임에 NaN이 포함되어 유효 프레임(365/418)만으로 계산

- RMSE: 원본과 필터링 결과의 평균 거리 (원본 형태 유지 정도)
- 뼈 길이 σ : 뼈 길이의 시간적 변동 (낮을수록 해부학적으로 정확)
- 가속도 개선: 원본 대비 필터링 후 가속도 분산 감소 비율

4.2 무릎 내전 평가 결과

피험자	왼쪽 최대	왼쪽 최소	오른쪽 최대	오른쪽 최소	판정
1	1.9°	-8.7°	3.7°	-4.7°	경미한 우측 내전
2	0.4°	-14.9°	0.7°	-13.0°	정상 (외전 우세)
3	2.5°	-4.6°	1.8°	-2.4°	정상
4	5.5°	-7.7°	9.5°	-6.9°	우측 내전 주의
5	6.4°	-2.5°	1.7°	-7.3°	좌측 내전 주의

- 양수(+): 무릎이 안쪽으로 (내전, valgus) - 5° 이상 시 주의
- 음수(-): 무릎이 바깥쪽으로 (외전, varus)

4.3 자세 평가 결과

피험자	허리 아치 최대	상체 기울기 최대	판정
1	64.9°	-17.7°	정상 범위
2	85.7°	-15.5°	정상 범위
3	58.1°	-16.5°	정상 범위
4	119.9°	-43.0°	과도한 전방 기울기
5	59.0°	-27.5°	전방 기울기 주의

- 상체 기울기 음수: 앞으로 숙여짐 (20° 초과 시 주의)
- 허리 아치: 상/하부 척추 각도 차이

4.4 시각화 결과

4.4.1 원본 데이터 노이즈 비교

아래 그래프는 필터링 전 원본 데이터의 노이즈 수준을 비교합니다. Subject 4(고노이즈)는 Subject 3(일반)에 비해 가속도 기준 약 8배 높은 노이즈를 보입니다.

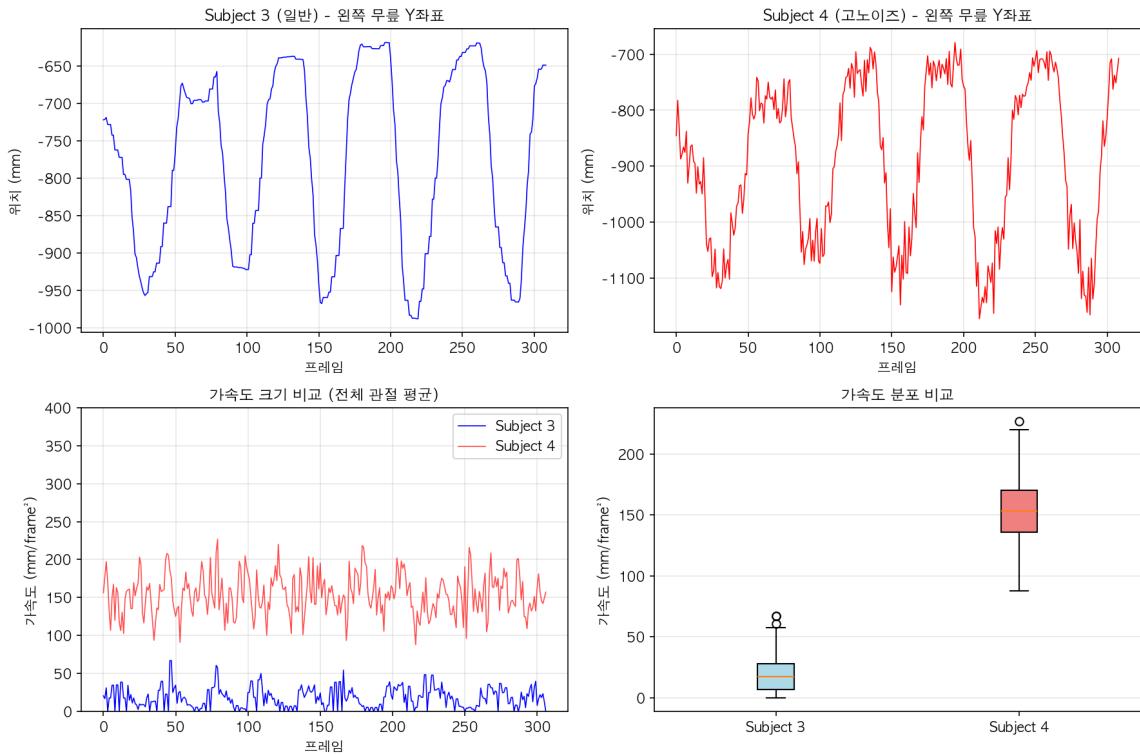


Figure 1: Subject 3 vs Subject 4 - 원본 데이터 노이즈 비교

4.4.2 필터링 후 데이터 비교

전처리 및 통합 최적화 적용 후, 두 피험자의 가속도가 유사한 수준($\sim 2.5 \text{ mm/frame}^2$)으로 수렴하여 노이즈가 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있습니다.

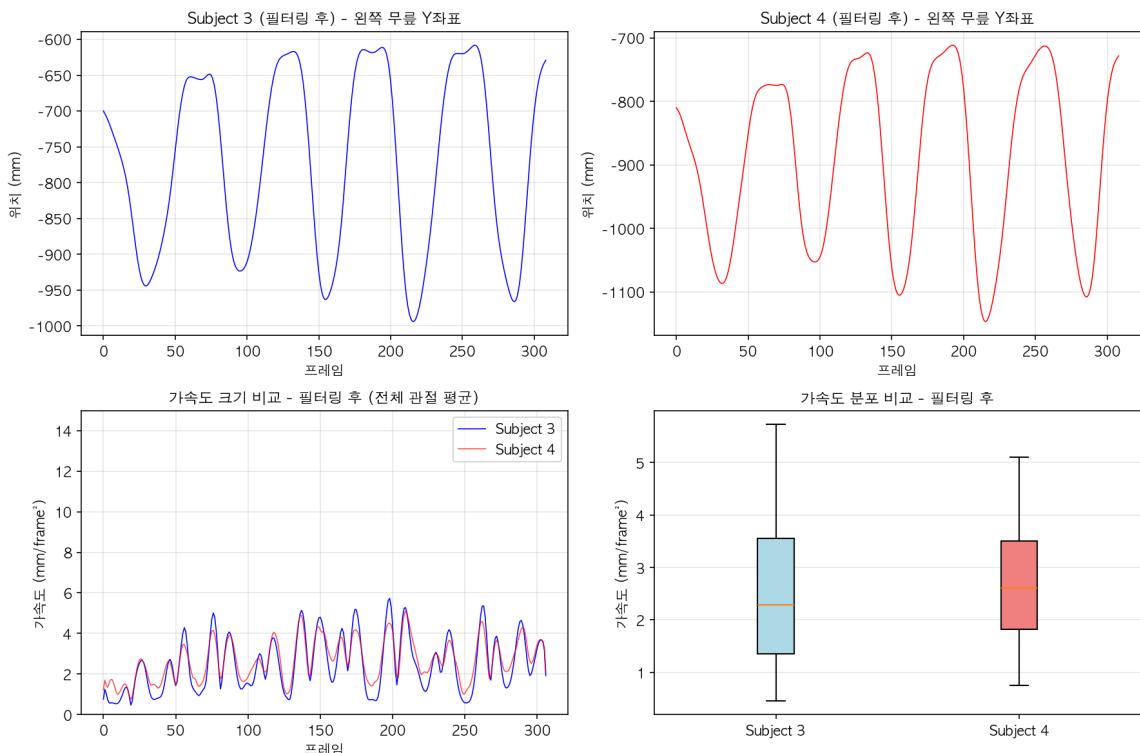


Figure 2: Subject 3 vs Subject 4 - 필터링 후 데이터 비교

4.4.3 Subject 3 - 필터링 후 평가 결과 (일반 데이터)

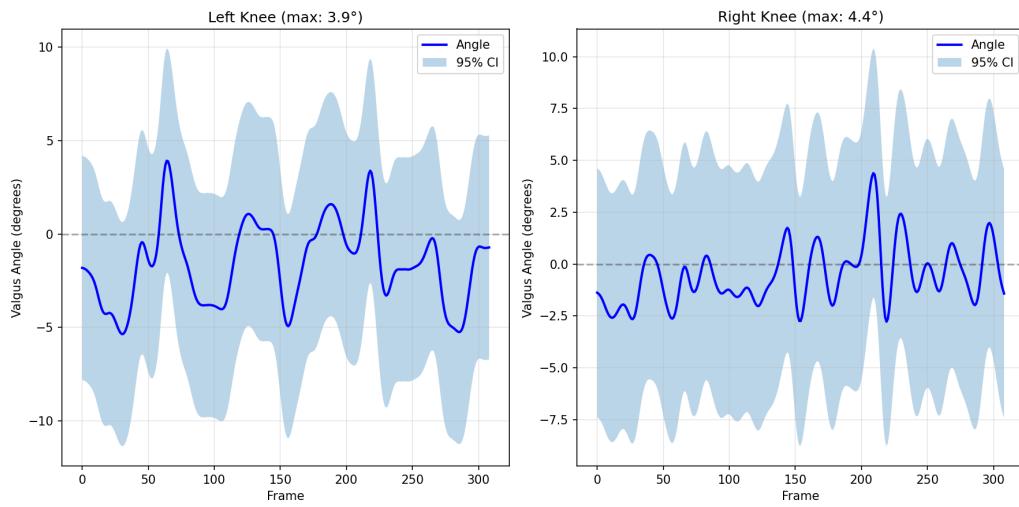


Figure 3: Subject 3 - 무릎 내전 분석 (전방 관찰)

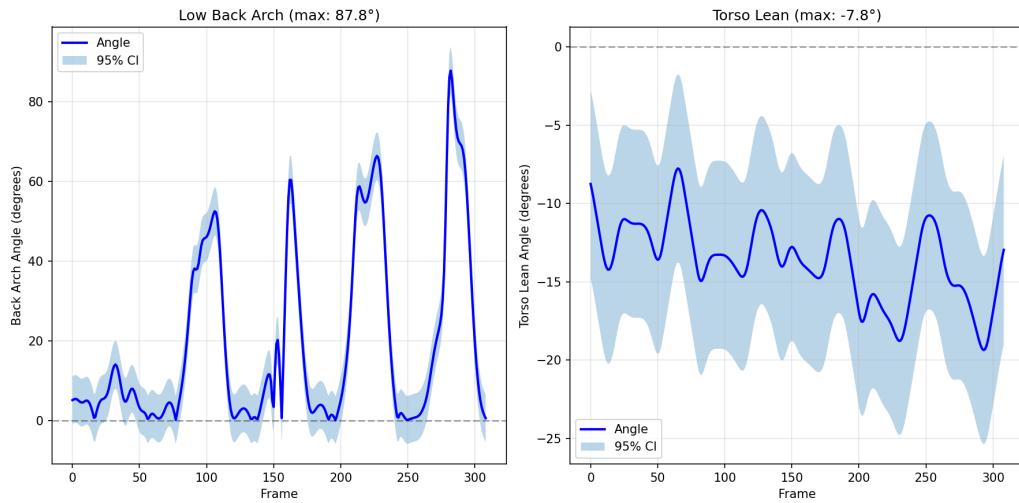


Figure 4: Subject 3 - 자세 분석 (측면 관찰)

4.4.4 Subject 4 - 필터링 후 평가 결과 (고노이즈 데이터)

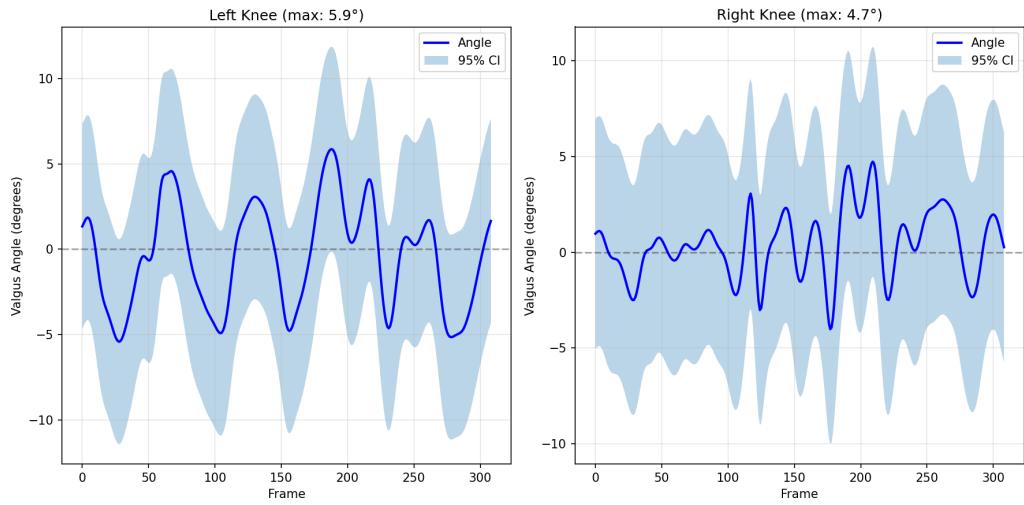


Figure 5: Subject 4 - 무릎 내전 분석 (전방 관찰)

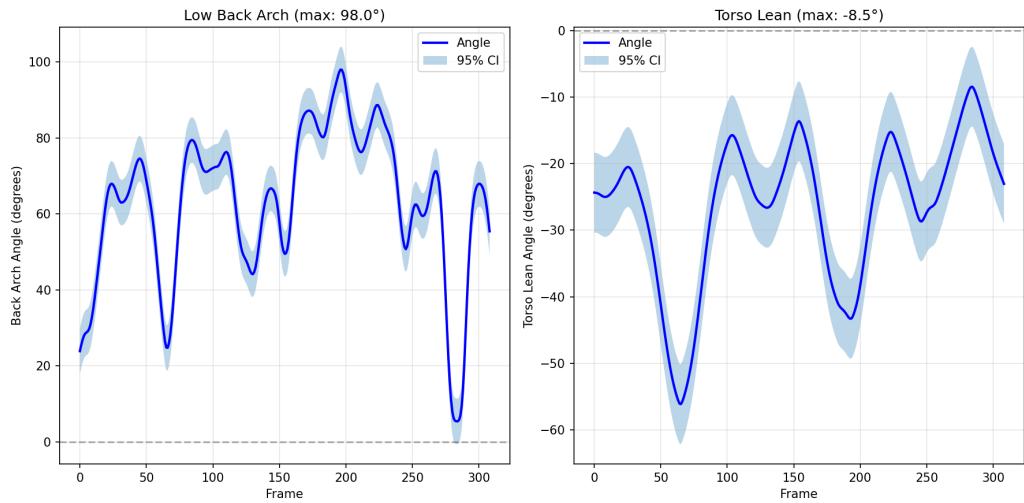


Figure 6: Subject 4 - 자세 분석 (측면 관찰)

5 결론 및 제언

5.1 성과 요약

1. 통합 최적화 프레임워크: 데이터 충실도, 뼈 길이, 관절 가동범위, 가속도, 저크, 각속도, 떨림, 방향 일관성, 척추 정렬 등 9개 제약조건을 손실함수로 표현하고 경사하강법으로 동시 최적화
2. 노이즈 처리 성공: 고노이즈 데이터(Subject 4, 5)에서도 해부학적으로 유효한 결과 도출 (가속도 기준 최대 105배 개선)
3. 해부학적 일관성: 뼈 길이 변동을 0.15mm 이하로 유지하여 비현실적 변형 방지
4. 정량적 평가: 무릎 내전, 허리 아치, 상체 기울기를 객관적 수치로 제공

5.2 한계점

한계	설명
2D 평가 의존	전방/측면 관찰만 사용, 3D 각도 계산 미적용
고정 임계값	5° 내전 등 판정 기준이 개인차를 반영하지 못함
실시간 처리 미지원	배치 처리 전용, 실시간 피드백 불가

5.3 향후 발전 방향

1. 3D 각도 계산: hip-knee-ankle 평면의 실제 3D 각도 측정으로 정확도 향상
2. 개인화 기준선: 피험자별 정상 범위 학습을 통한 맞춤형 평가
3. 실시간 처리: 스트리밍 데이터 지원으로 즉각적 피드백 제공
4. 추가 평가 항목: 발 외전(foot flattening), 팔 전방 이동(arms fall forward) 등 확장
5. 보고서 자동 생성: 평가 결과 기반 교정 운동 자동 추천

6 부록

6.1 출력 파일 구조

```
output/final/
├── subject_1/
│   ├── assessment.csv          # 필터링 좌표 + 평가 각도
│   ├── knee_valgus.png         # 무릎 내전 그래프
│   ├── posture.png              # 자세 평가 그래프
│   └── skeleton_comparison.gif # 원본/필터링 비교 애니메이션
└── subject_2/
    ...
    
output/refined_visualization/
├── 1_skeleton_comparison.gif  # 정제된 스켈레톤 애니메이션
├── 2_skeleton_comparison.gif
├── 3_skeleton_comparison.gif
├── 4_skeleton_comparison.gif
└── 5_skeleton_comparison.gif
```

정제된 애니메이션: output/refined_visualization/ 폴더에는 원본 스켈레톤과 필터링된 스켈레톤을 나란히 비교할 수 있는 애니메이션이 피험자별로 저장되어 있습니다.

6.2 실행 명령어

```
# 전체 분석 실행  
uv run python -m src.main --subjects 1 2 3 4 5 --output-dir output/final  
  
# 고노이즈 데이터 전용  
uv run python -m src.main --subjects 4 5 --preset high-noise --output-dir output/final
```