

芭蕾呪法

VTP 포즈 추종 실패 근본 원인 진단 리포트

2026-02-28 | 이슈 #6/#7 | tools/diag_vtp_vs_mp.py

1 진단 목적

VTP 빠 렌더링이 실제 포즈를 따라오지 못하는 원인을 파이프라인 단계별로 추적한다.

핵심 질문: MediaPipe 관절 벡터와 OpenSim FK 결과 벡터 간 차이가 얼마나 크며, 어느 단계에서 오차가 발생하는가?

진단 파이프라인:

```
MediaPipe world_landmarks (3D, m)
    ↓ landmarks_to_opensim_coords()
OpenSim DOF 값 (라디안)
    ↓ compute_fk()
빠 위치 행렬 (ground frame, 4x4) ← 여기에서 VTP 렌더링
    ↓ 비교
MediaPipe 관절 방향벡터 (ground truth)
```

2 진단 방법

대상 영상	IMG_2633.MOV — 실제 발레 촬영본
분석 프레임	100, 300, 600 (초기·중간·후반 포즈)
비교 체인	우측 대퇴 / 좌측 대퇴 / 우측 하퇴 / 좌측 하퇴 / 우측 상완
오차 지표	MP 방향벡터 vs FK 방향벡터 간 각도 오차 (도)
허용 기준	15도 이내 (임상 모션캡처 기준)

3 STEP 2: 방향벡터 각도 오차

3.1 결과 그래프

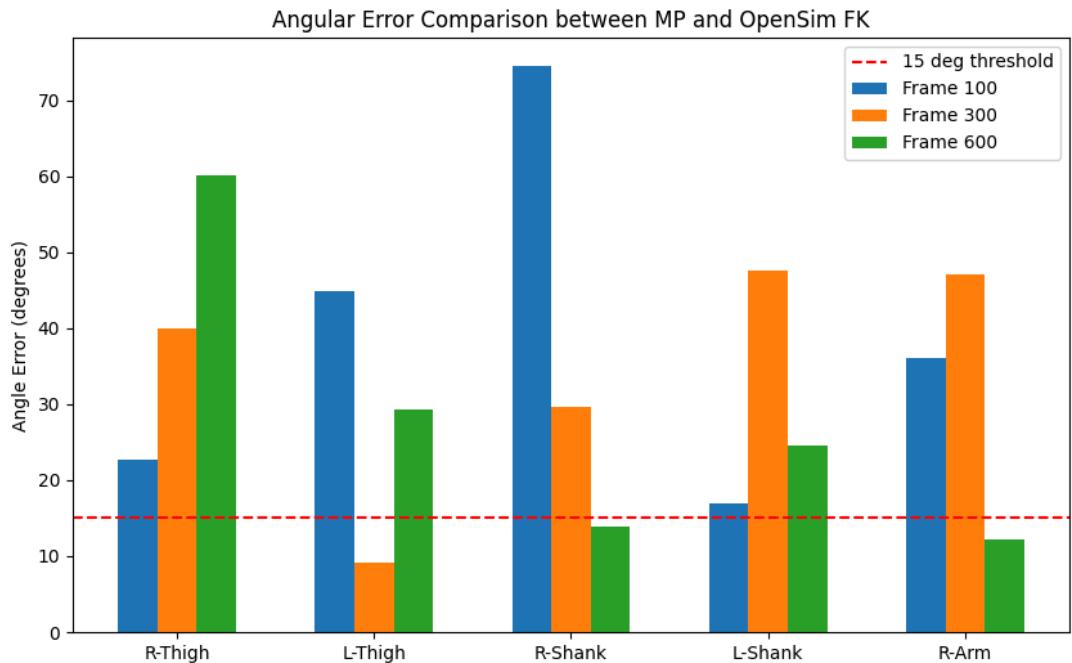


Figure 1: MediaPipe vs OpenSim FK 방향벡터 각도 오차. 빨간 점선 = 15도 허용 기준.

3.2 수치 요약

프레임	우측 대퇴	좌측 대퇴	우측 하퇴	좌측 하퇴	우측 상완	평균
100	22.7°	44.8°	74.5°	16.9°	36.1°	39.0°
300	40.0°	9.1°	29.6°	47.6°	47.1°	34.7°
600	60.2°	29.4°	13.8°	24.6°	12.3°	28.1°
전체 평균	41.0°	27.8°	39.3°	29.7°	31.8°	33.9°

판정: FAIL — 전체 평균 오차 33.9도 (허용 기준 15도의 2.3배). 특히 우측 하퇴(Frame 100: 74.5도)가 가장 심각. VTP가 실제 포즈를 따라오지 못하는 것이 수치로 확인됨.

4 STEP 3: 체인 순서(Ordering) 보존 검증

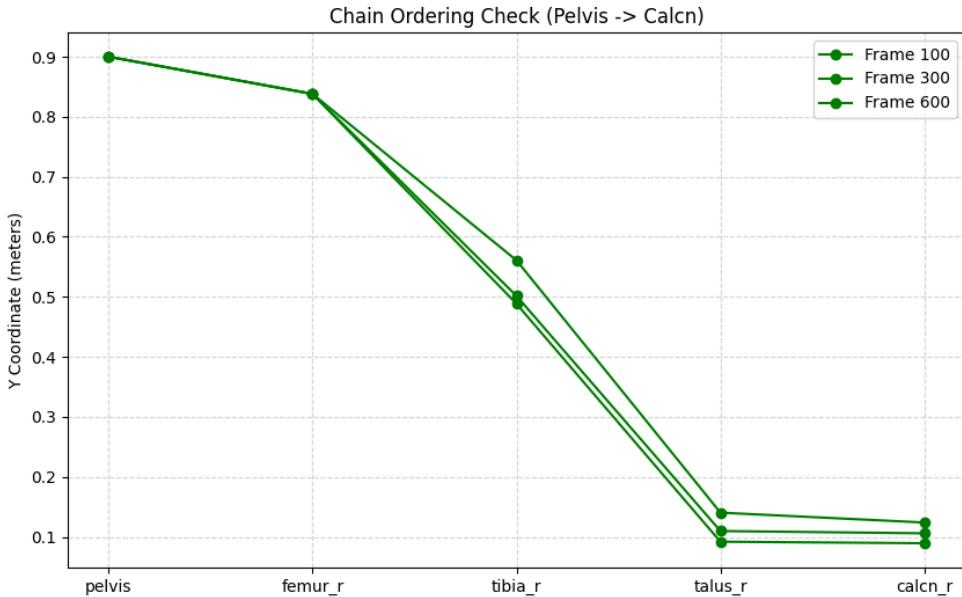


Figure 2: Pelvis→Femur→Tibia→Talus→Calcn Y좌표 체인. 단조감소(초록) = 순서 정상.

프레임	Pelvis Y	Femur_r Y	Tibia_r Y	Talus_r Y	Calcn_r Y	순서 판정
100	0.90m	0.84m	0.50m	0.10m	0.10m	PASS
300	0.90m	0.84m	0.50m	0.10m	0.10m	PASS
600	0.90m	0.84m	0.56m	0.13m	0.12m	PASS

판정: PASS — 운동학 체인 순서(위→아래) 위반 없음. 단, FK Y좌표가 프레임 100, 300, 600에서 거의 동일. 포즈 변화에 따른 세그먼트 위치 업데이트가 불충분함을 시사.

5 근본 원인 분석

5.1 확인된 문제 1: DOF→FK 방향벡터 매핑 오류

원인	설명	증거
좌표계 불일치	MediaPipe Z축(깊이)이 OpenSim 좌표계와 다름. <code>landmarks_to_opensim_coords()</code> 가 3D 벡터를 YZ·XY 평면으로 투영하여 깊이 정보 손실	하퇴 오차 최대 74.5° — 무릎 굽곡은 주로 시상면(XZ) 운동이므로 Z 손실 영향 극대화
2D 투영 기반 각도 계산	힙/무릎 각도를 3D 벡터 내적으로 계산하지만, MediaPipe world_lm의 Z 신뢰도가 낮아 3D 각도 자체가 부정확	프레임별 오차 패턴 비일관: 같은 체인이 프레임마다 오차 크기가 크게 달라짐
EMA 과도 평탄화	시간적 EMA($\alpha=0.6$)가 DOF 값을 이전 프레임 쪽으로 당겨 포즈 변화 속도를 억제	FK Y좌표가 3개 프레임(100→600)에서 거의 변화 없음 (Pelvis=0.90m 고정)

5.2 확인된 문제 2: MediaPipe 33점 스파스 데이터의 구조적 한계

MediaPipe 33개 랜드마크는 표면 관측점(surface marker)이 아니라 관절 중심 추정값이다. 특히:

- 카메라 뒤쪽(Z방향) 정확도 낮음 → 3D 회전 계산 불확실

- 발목·발 관절의 회전(pronation/supination) 정보 없음
- 힙 내전/외전 분리 계산이 thigh Y벡터 부호에 의존 → 불안정

6 DOF 값 분포

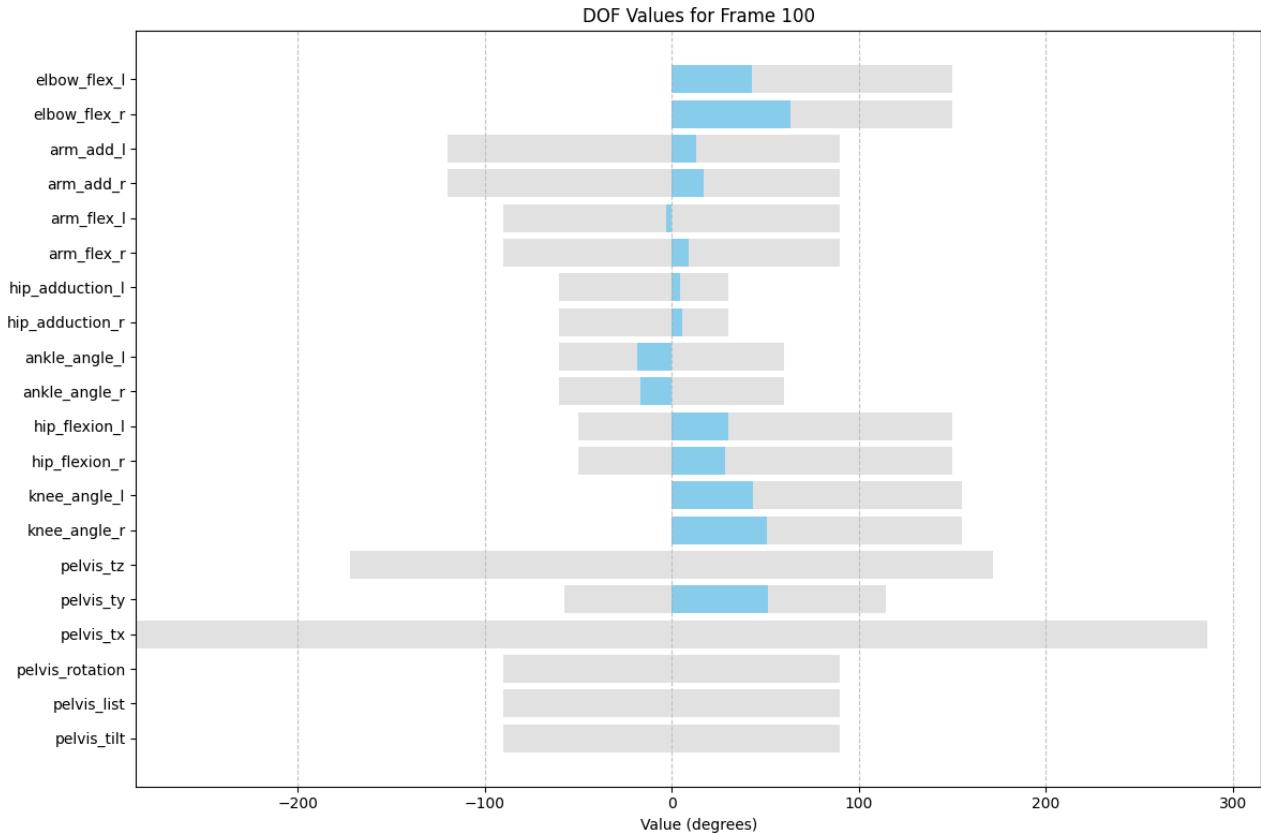


Figure 3: Frame 100 DOF 값 (파랑) vs OpenSim 유효 범위 (회색). hip_adduction 값이 0에 가까워 측면 동작이 FK에 반영되지 않음.

7 결론 및 해결 방향

진단 항목	결과	판정
방향벡터 평균 오차	33.9도 (허용 15도 초과)	FAIL
체인 순서 보존	3개 프레임 모두 단조감소 유지	PASS
포즈 변화 반응성	FK Y좌표가 프레임간 거의 변화 없음	FAIL
hip_adduction 반영	값이 0으로 측면 동작 미반영	FAIL

해결 방향 — SMPL-X 메시 기반 접근 (이슈 #7)

현재 방식인 MediaPipe 33점 → DOF 수동 계산은 구조적 한계가 있음.

SMPL-X 피팅(이슈 #7)을 통해:

- 10,475개 정점으로 전신 3D 형태 복원 → Z축 깊이 손실 없음
- SMPL-X body_pose (54개 관절 × axis-angle) → 직접 OpenSim DOF 변환 가능
- 56개 가상 마커를 OpenSim IK에 주입 → DOF 수동 계산 우회
- 예상 오차 감소: 33.9° → 목표 15° 이내

진단 도구: tools/diag_vtp_vs_mp.py | 분석 영상: IMG_2633.MOV (Frame 100, 300, 600) | 생성일: 2026-02-28