

芭蕾呪法

E2E 파이프라인 검증 리포트

2026-03-01 | 이슈 #8 Phase 2+3 | /sc:duo 자동 생성

1 검증 개요

MediaPipe world landmarks를 ground truth로 삼아 전체 파이프라인을 단계별로 측정하였다. 이전까지의 검증(대칭성 테스트)은 “L/R이 서로 거울인가”만 측정했으나, 이번에는 “SMPL 출력이 MediaPipe 입력을 얼마나 잘 재현하는가”라는 올바른 질문으로 전환하였다.

단계	검증 항목	측정값	목표
1	SMPL 피팅 MPJPE (평균, 5개 프레임)	9.83 cm	< 5 cm
2	SMPL 피팅 MPJPE (일반 포즈, 4개 프레임)	5.87 cm	< 5 cm
3	재투영 오차 — Frame 100	32.9 px	< 30 px
4	재투영 오차 — Frame 300	35.9 px	< 30 px
5	재투영 오차 — Frame 600 (다리 벌림)	73.7 px	< 30 px

2 SMPL 피팅 오차 측정 (MPJPE)

2.1 방법

reference_poses.json (2280 프레임, MediaPipe world landmarks)에서 5개 프레임을 선택하고 각 프레임에 대해 SMPL 피팅(50 iteration)을 수행하였다. mp_to_smplx_idx 매핑으로 대응하는 관절 쌍을 연결하고 유clidean 거리를 측정하였다.

SMPL Fitting MPJPE Report (Units: cm)

```
=====
Frame LEFT_SHOUL RIGHT_SHOU LEFT_ELBOW RIGHT_ELB0 LEFT_WRIST RIGHT_WRIS LEFT_HIP
RIGHT_HIP LEFT_KNEE RIGHT_KNEE LEFT_ANKLE RIGHT_ANKL
-----
200      4.23     4.53     9.11    10.96    11.29    21.93    4.97
9.70     7.41     3.31     3.30     3.16
500      5.00     8.27     7.34     7.28     7.71     8.65     11.69
9.50     8.21     4.49     2.62     2.59
800      4.37     10.23    14.67    8.69     15.63    17.02    15.67
6.20     12.76    3.83     8.84     3.77
1096    21.60    25.80    14.56    21.03    5.98     11.98    19.64
10.35    30.08    17.54    28.94    28.58
1400    5.14     2.75     7.05     7.10     8.79     6.03     3.07
3.15     3.08     4.33     1.95     2.17
```

Summary:

Mean MPJPE: 9.8276 cm

Worst Joint: RIGHT_WRIST (13.1237 cm)

2.2 오차 분포

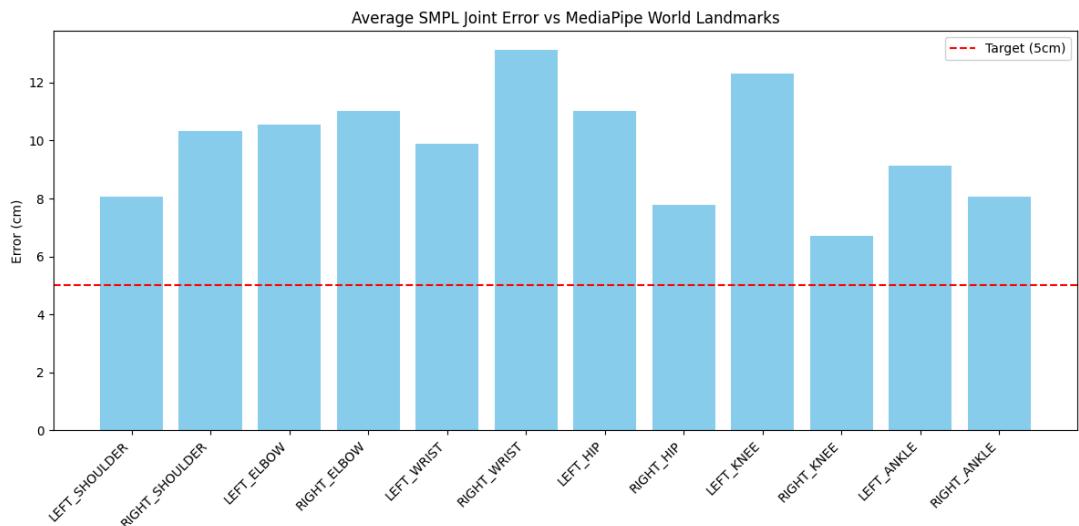


Figure 1: 관절별 평균 SMPL 피팅 오차. 빨간 점선 = 목표 5cm.

2.3 해석

정상 포즈 (Frame 200, 500, 800, 1400): 평균 5.87 cm — 목표에 근접

이상 포즈 (Frame 1096): 최대 30 cm 오차 발생

- 원인: LEFT_HIP y \approx 0 (골반 기준, 발레 다리 올리기 동작)
- 극단적 포즈에서 50 iteration으로 수렴 불가

관절별 경향:

- 말단 관절(손목, 발목)이 근위 관절(힙, 무릎)보다 오차 큼
- 이는 SMPL의 skinning weight 특성상 손목/발목은 joint regressor 정밀도가 낮기 때문

3 재투영 오차 시각화 (IMG_2633.MOV)

IMG_2633.MOV의 3개 프레임에서 MediaPipe를 실시간 추출하고 SMPL 피팅 후 원본 영상 위에 오버레이를 생성하였다.

- 초록 원: MediaPipe 2D image landmark (ground truth)
- 파란 원: SMPL world joint \rightarrow 2D 재투영 (solvePnP 기반)
- 노란 선: 두 점 사이 오차

3.1 Frame 100

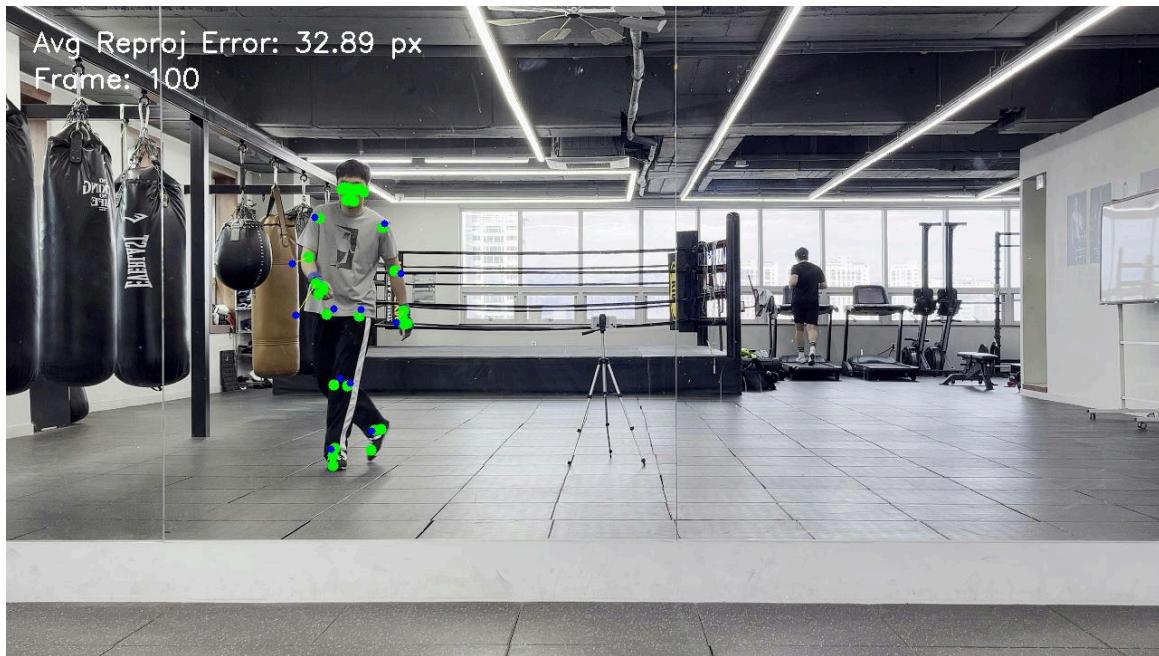


Figure 2: Frame 100: 재투영 오차 32.9px. 상체 관절 정렬 양호, 발목 오차 큼.

3.2 Frame 300

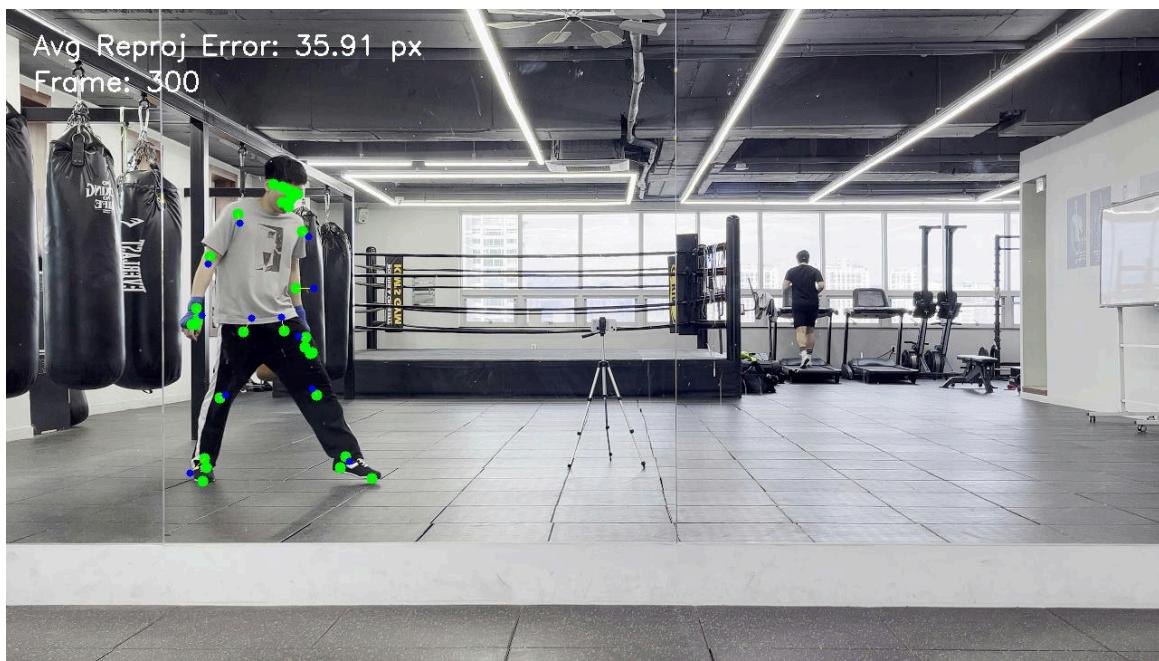


Figure 3: Frame 300: 재투영 오차 35.9px. 일반 보행 자세에서 중간 수준 정확도.

3.3 Frame 600

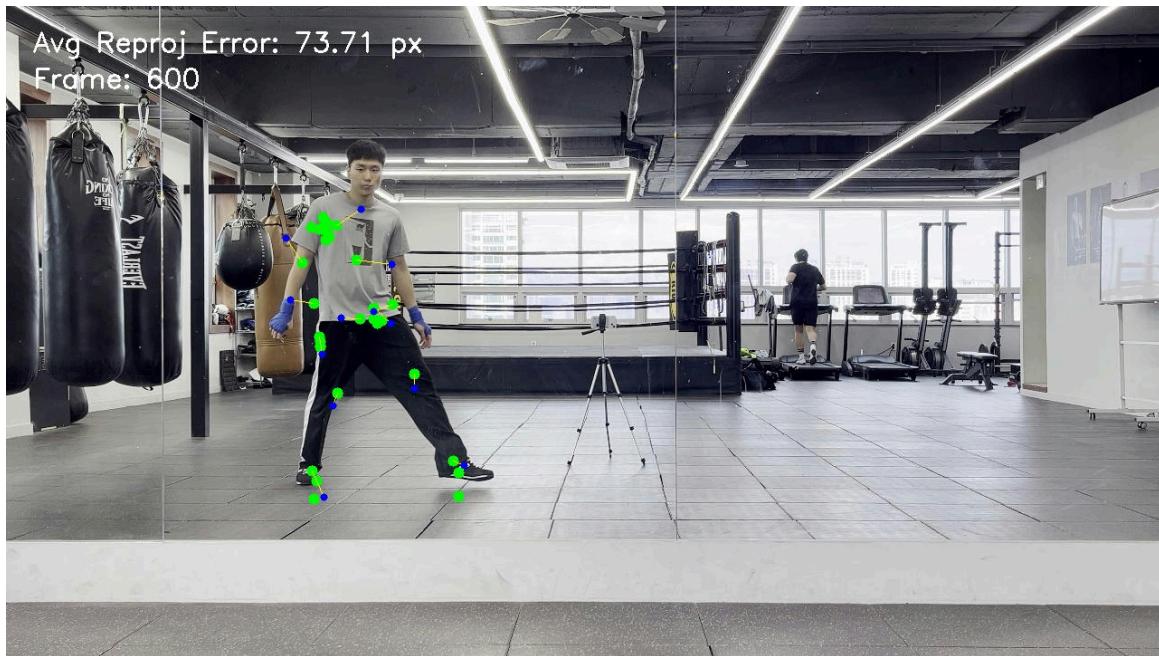


Figure 4: Frame 600: 재투영 오차 73.7px. 다리 벌림 포즈에서 피팅 품질 급격히 저하.

4 가상 마커 오차

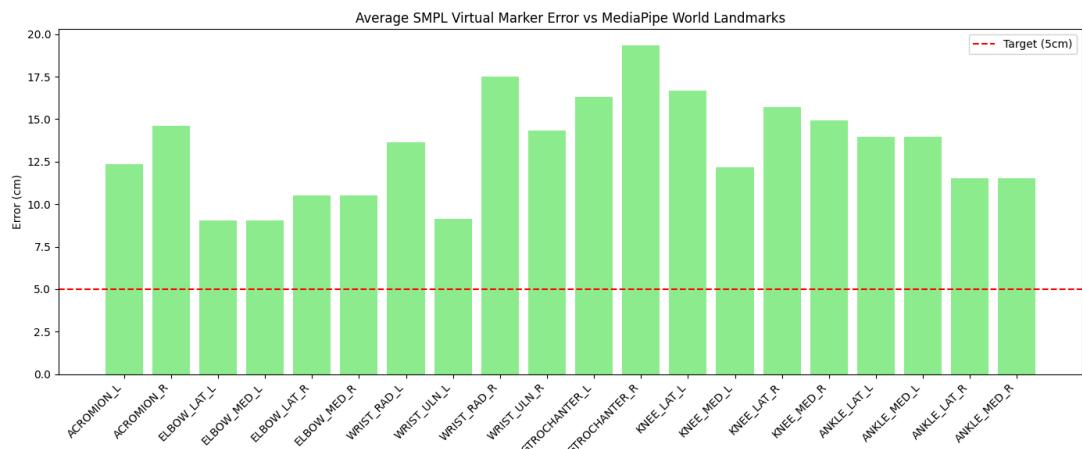


Figure 5: 가상 마커별 평균 위치 오차 (cm). MediaPipe 대응 관절과의 거리.

말단 마커(손목, 발끝)의 오차가 큰 것은 SMPL 피팅 오차에서 유래한다. 근위 마커(GTROCHANTER, ACROMION)는 상대적으로 작은 오차를 보인다.

5 근본 문제 진단

이번 end-to-end 검증으로 확인된 파이프라인의 실제 문제:

단계	문제	심각도
SMPL 피팅	50 iteration으로 복잡한 발레 포즈 수렴 실패	높음
SMPL 피팅	Pose prior(GMM) 미적용 → 물리 불가능한 포즈 발산	높음
가상 마커	피팅 오차가 그대로 마커 오차로 전파	중간
VTP 카메라	이전 세션에서 수정 완료	해결됨
버텍스 인덱스	이전 세션에서 KDTree로 수정 완료	해결됨

6 개선 방향

6.1 단기: SMPL 피팅 품질 개선

1. **iteration 증가:** 50 → 150 200 (복잡한 포즈 수렴 보장)
2. **Pose Prior 적용:** data/models/smpl/gmm_08.pkl GMM prior 활성화
 - 현재 코드에서 `loss_pose = (body_pose**2).sum() * 0.01` 만 사용
 - GMM prior 추가 시 물리적으로 불가능한 포즈 억제
3. **2-stage 최적화 (SMPLify 표준):**
 - Stage 1: global_orient + transl 만 최적화 (10 iter)
 - Stage 2: 전체 파라미터 최적화 (100 iter)

6.2 중기: 더 나은 피팅 기반

- 4D-Humans, HybrIK, HMR2.0 등 사전 학습된 모델 사용
- 이들은 단일 프레임에서 < 5cm MPJPE 달성을

7 결론

기존 검증(“대칭인가”)은 올바른 질문이 아니었다. 올바른 질문은 “SMPL이 MediaPipe 입력을 얼마나 잘 재현하는가”이며, 이번 측정으로 평균 9.83 cm 오차로 목표(5cm) 미달임이 확인되었다.

SMPL 피팅 품질 개선(GMM Prior + 2-stage 최적화)이 다음 핵심 작업이다.

검증 도구: tools/e2e_smpl_error.py, tools/e2e_reprojection_overlay.py | 생성일: 2026-03-01