

비전 기반 몸통 추정 이용 사용자 보행 속도 추종 트레드밀 제어 시스템

A User Walking-Speed Tracking Treadmill Control System Using Vision-Based Torso Depth Estimation



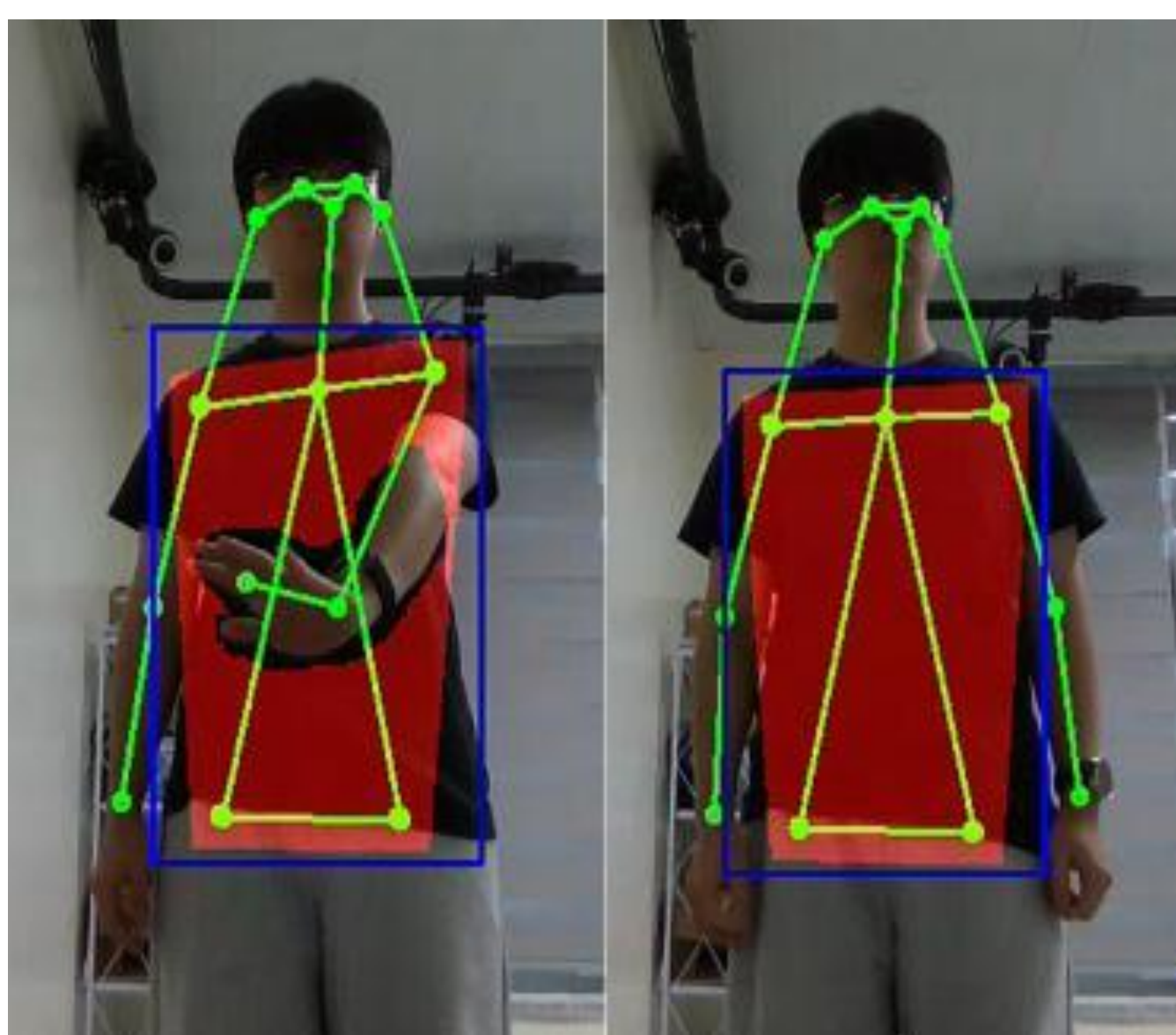
1)경상국립대학교 기계공학부 (TEL: 055-772-1620, E-mail: { wlsghrud001, youngjin.park }@gnu.ac.kr)

Treadmill control · Velocity feedforward · Depth estimation · PID control · Human-robot interaction

1. 연구 배경 (Motivation)

- ❖ 사전 설정 고정 속도 트레드밀
→ Over-ground 보행과 생리학적·지각적·역학적 차이 발생
- ❖ Over-ground 보행 재현을 위해 트레드밀 속도 제어 기술 필요
 - 비전 센서만으로 목표 위치·사용자 보행 속도 추정
 - 능동적 벨트 속도 제어
- ❖ 목표 : 비전 활용 순수 몸통의 위치 추정 기반 실시간 사용자 보행 속도 및 보행 위치 추종 트레드밀 제어 시스템 제작

3. 비전 기반 사용자 위치/속도 추정 (Vision-based Estimation of User Position/Velocity)



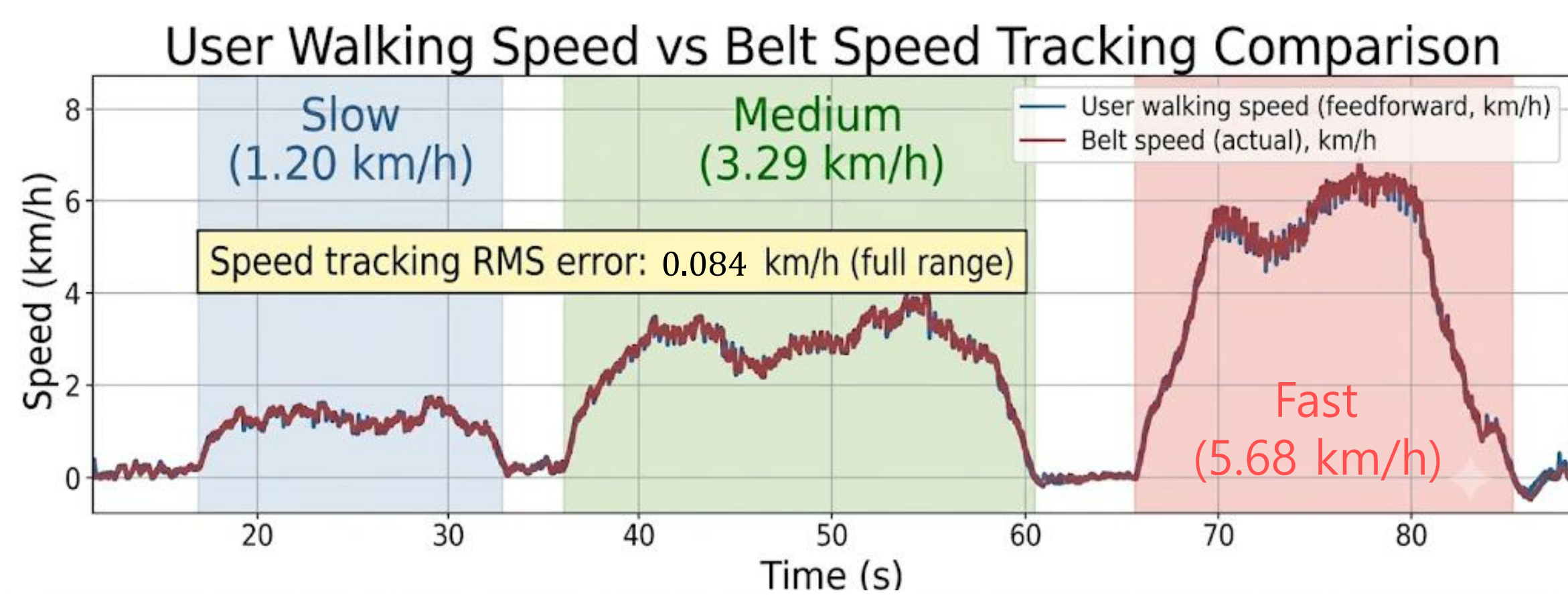
몸통 Segmentation

- ❖ 취득 영상에서 TRTPose 기술 이용 어깨·고관절 키포인트 4개 검출
→ 몸통 경계 박스 생성
→ NanoSAM 기술 이용 몸통 분할
- ❖ 사용자 몸통 영역의 픽셀 평균 깊이값 측정
→ 별도의 마커나 웨어러블 센서 없이 안정적인 사용자 위치 추정

- ❖ 비전의 연속된 두 프레임 사이의 시간 차 내 위치 변화량은 벨트 기준 사용자 보행 속도 의미함
- ❖ 지면 기준 사용자 보행속도
= 벨트 기준 사용자 보행속도 + 현재 벨트속도

5. 실험 방법 및 결과 (Experimental Setup & Results)

- ❖ 속도 추종 성능, 위치 추종 성능 총 2가지 실험으로 성능 검증
- ❖ 실험은 저속(약 1.20km/h), 중속(약 3.29km/h), 고속(약 5.68km/h) 세 구간에서 연속적으로 진행



속도 추종 성능 비교 그래프

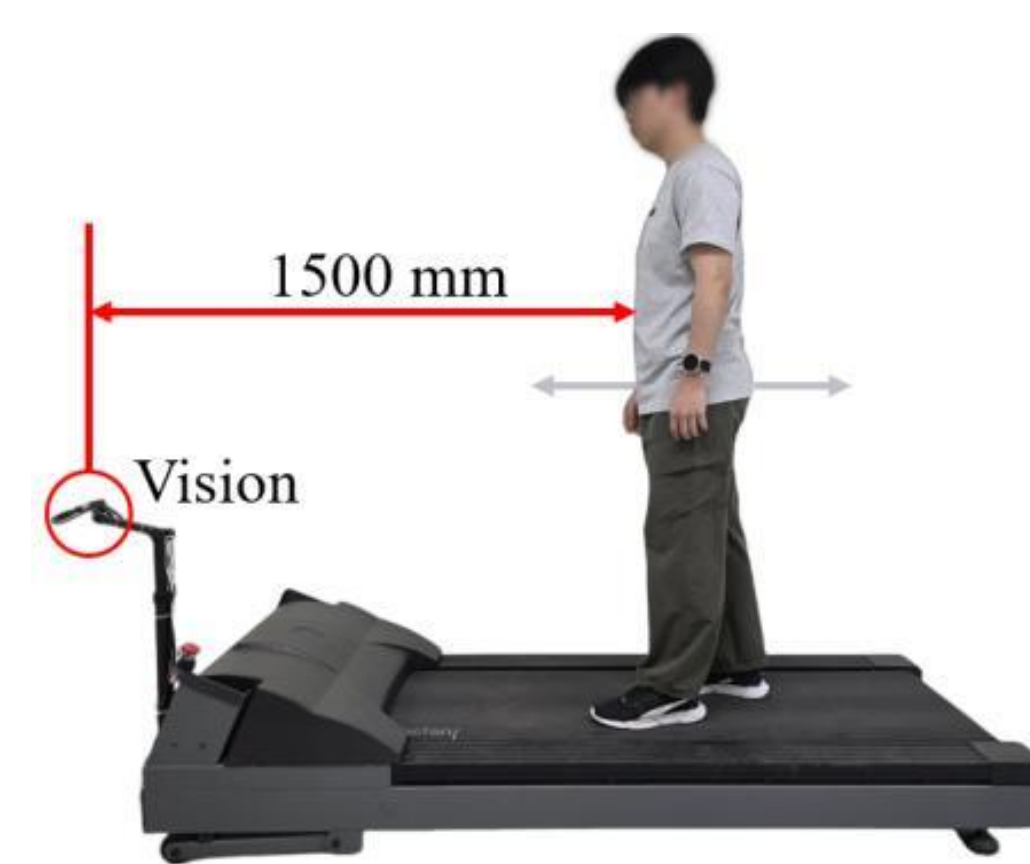


위치 추종 성능 비교 그래프

- ❖ 제안한 제어기가 산출한 속도가 비전을 통해 계산한 지면 대비 사용자 보행 속도를 우수하게 추종할 수 있음을 실험적으로 확인
- ❖ 사용자가 목표 위치로 수렴하는 함. 단, 고속일수록 위치 추종 성능이 저하되는 경향이 보임
- ❖ 보행속도 추종과 보행위치 유지는 별개의 작업으로 동시 달성이 어려운 상황에서 꽤나 안정적으로 위치를 추종하는 모습을 보임

2. 시스템 구성 (System Composition)

- ❖ 사용자는 트레드밀 목표 위치(1500mm) 기준 전후 자유롭게 보행 가능
- ❖ 비전 센서로 측정한 위치가 목표 위치 근방이 되도록 실시간으로 벨트 속도를 부드럽게 조절시켜 보행 유지

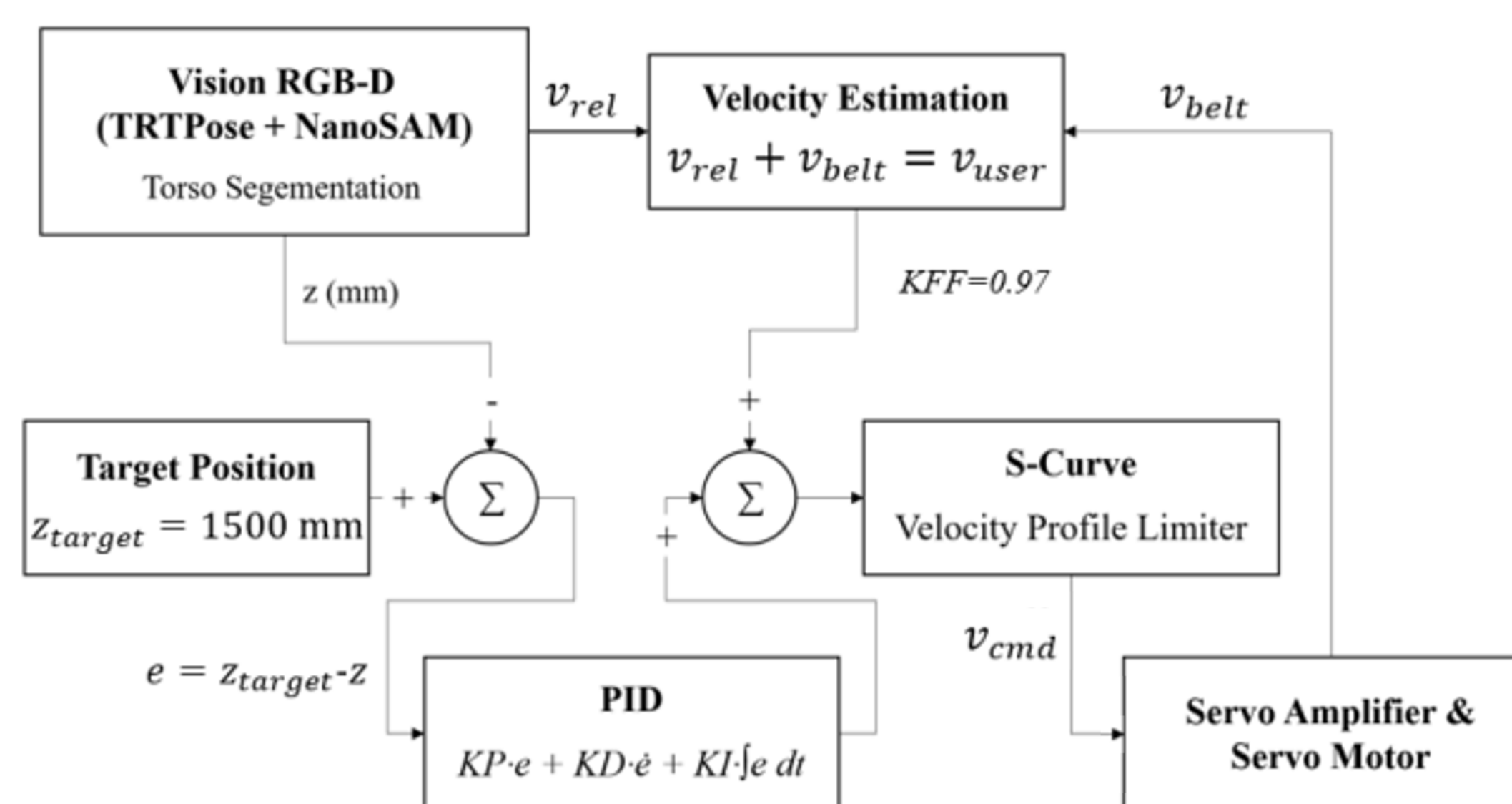


시스템 구현 모습

시스템 개략도

- ❖ 비전 센서(RGB-D, RealSense @ Intel) 이용 사용자 위치 측정
- ❖ 비전 처리 보드(Jetson Orin Nano, NVIDIA) 내 ROS2 통해 모터제어 보드(Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Ltd)로 데이터 송신

4. 트레드밀 벨트 속도 제어 (Treadmill Belt Speed Control)



제어 루프 블록 다이어그램

- ❖ 수신한 비전 데이터 기반 속도 피드포워드 + PID 제어 이용 모터 속도값 산출 및 EtherCAT 통신 통한 서보앰프 명령 하달 및 모터 구동
- ❖ 속도 피드포워드 출력(97%): 사용자 보행속도에 맞춰 안정적인 속도 출력을 위해 지면 기준 사용자 보행 속도의 97%를 선제적으로 출력
- ❖ PID 제어를 통한 속도 보정(3%): 사용자 보행위치가 목표위치 벗어나지 않도록 목표 대비 측정위치 오차 기반 PID 제어를 통해 위치 오차를 줄이는 보정 속도로 추가 출력
- ❖ 합산 속도는 S-Curve 프로파일을 거쳐 최종 속도값 산출(가속 시 시 1.5 m/s²(저크 10 m/s³), 감속 시 6.0 m/s²(저크 40 m/s³)로 출력 제한)

6. 결론 및 향후 계획 (Conclusion)

- ❖ 본 연구에서는 비전 센서와 몸통 깊이 추정으로 사용자의 절대 위치/보행 속도를 실시간 추정하여 속도 피드포워드+PID 제어기 적용으로 트레드밀 벨트속도를 제어하는 사용자-선호속도 기반 트레드밀 시스템 개발하였음
- ❖ 실험 결과 다양한 평균 보행 속도 구간에서 사용자 위치가 베이스라인 근방에 안정적으로 유지됨을 실험적으로 확인 → over-ground 보행과 유사한 효과 제공할 수 있음을 시사함
- ❖ 향후 본 시스템은 웨어러블 로봇의 정량적 성능 검증을 위한 표준화된 보행 플랫폼으로 활용할 예정

7. Acknowledgement

- ❖ 본 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20241K00000010, SMR 로봇활용 제작지원센터 구축)