

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

○진 호 경¹, 박 영 진^{1*}

¹⁾ 경상국립대학교 기계공학부 (TEL: 055-772-1621; E-mail: {wlsghrud001, youngjin.park}@gnu.ac.kr)

Abstract This paper presents a treadmill tracking control system designed to automatically adjust the belt speed, ensuring the user remains safely in the center of the treadmill regardless of their walking speed. By utilizing vision-based torso depth estimation, the system accurately estimates the user's position and absolute walking speed in real-time. This estimated speed is implemented as a feedforward input alongside a PID position controller to provide smooth and proactive belt control. Experimental results demonstrate that the proposed control strategy accurately tracks the user's varying walking speeds and stably maintains their position near the target center.

Keywords Treadmill control, Velocity feedforward, Depth estimation, PID control, Human-robot interaction

1. 서론

일반적인 트레드밀은 사전에 설정된 속도로 동작하여 사용자가 기기의 속도에 맞춰야 하므로 지면에서 걷는 것과 효과가 다르다[1]. 트레드밀 위에서도 흡사 지면을 걷듯이 사용자가 원하는 속도로 걷도록 하기 위해서는 사용자의 보행 속도에 맞춰서 벨트 속도를 조절해 줄 수 있어야 한다[2]. 본 논문에서는 비전 센서를 활용하여 사용자의 위치와 속도를 추정하여 over-ground와 유사한 효과를 낼 수 있는 사용자-선호속도 기반 트레드밀 시스템을 소개한다.

2. 시스템 구성

제안 시스템에서 사용자는 목표 위치를 기준으로 앞 또는 뒤로 보행할 수 있다. 제어 시스템은 사용자 보행 속도와 상관없이 비전 센서를 통해 얻은 위치가 목표 위치(1500 mm) 근방이 되도록 실시간으로 부드럽게 벨트를 이동하여 보행을 유지한다. (그림 1. 참고)

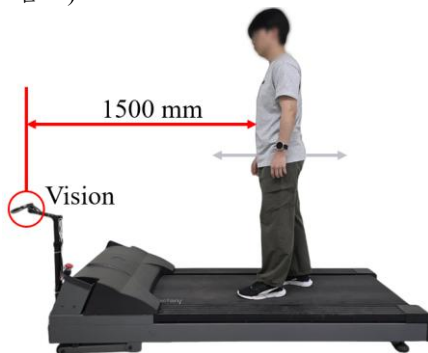


그림 1. 시스템 구현 모습

제어 시스템을 설명하자면 비전 센서(Realsense, Intel)를 이용하여 사용자의 위치를 측정하고 프로세싱 보드(Jetson Orin Nano, NVIDIA)에서 ROS2를 활용하여 제어보드(Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Ltd)로 데이터를 송신한다. 제어보드는 비전 데이터를 수신한 뒤 이를 바탕으로 속도 피드포워드 + PID 제어를 통해서 모터 속도값을 산출하여 EtherCAT 통신으로 서보앰프에 명령을 하달하여 모터를 구동시킨다. (그림 2. 참고)

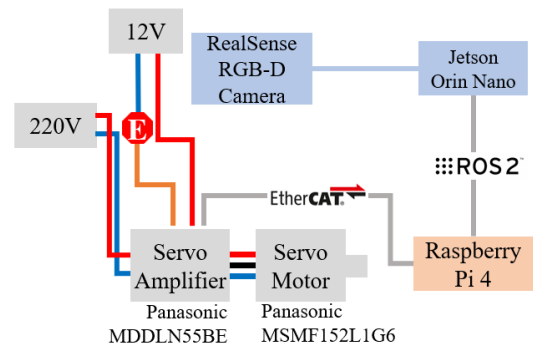


그림 2. 시스템 개략도

3. 비전 기반 몸통 깊이 추정

취득한 영상에서 TRTPose 기술[3]을 통해 어깨·고관절 키포인트 4개를 검출하여 생성한 몸통 경계 박스를 NanoSAM 기술[4]을 통해 몸통 영역만을 분할한다. 분할된 몸통 영역 픽셀의 평균 깊이(z , mm)를 사용자 위치로 추정한다. (그림 3 참고)

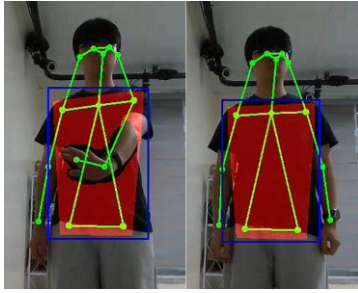


그림 3. 몸통 Segmentation

4. 속도 피드포워드 + PID 제어기

4.1 제어기

비전센서가 트레드밀 프레임에 고정되어 있으므로 연속된 2 개의 프레임 시간 차이에 대한 연속된 2 개의 위치의 차이는 벨트 기준 사용자 보행 속도를 나타내며 여기에 현재 벨트 속도를 합산하면 지면 기준 사용자 보행 속도로 변환된다. (그림 1. 참고)

트레드밀이 사용자 보행 속도에 맞춰서 안정적인 속도를 출력하기 위해 선제적으로 지면 기준 사용자 보행 속도의 97%를 피드포워드로 출력한다. 그리고 속도 출력의 나머지 3%는 사용자 보행 위치가 목표 위치를 벗어나지 않도록 하기 위하여 목표 위치 대비 측정 위치의 차이를 입력으로 받아 PID 제어를 통해 사용자의 위치 오차를 줄이기 위한 속도로 추가로 출력한다. 속도 피드포워드와 PID 제어로 산출된 속도값을 가속 시 1.5 m/s^2 , 저크 10 m/s^3 , 감속 시 6.0 m/s^2 , 저크 40 m/s^3 으로 제한하여 S-Curve 프로파일을 거쳐서 부드러운 속도로 재산출하여 서보앰프에 속도값을 하달한다. (그림 4. 참고)

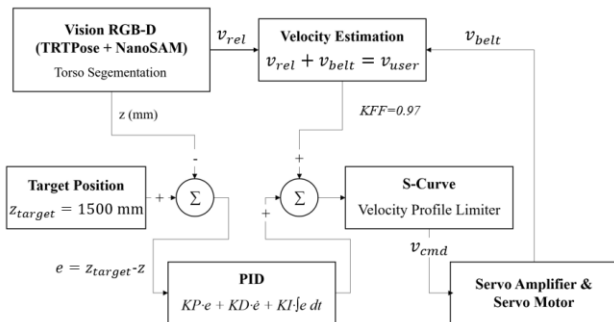


그림 4. 제어 루프 블록 다이어그램

4.2 실험 결과

제어 시스템 테스트는 속도 추종 성능과 위치 추종 성능 총 2 가지로 진행했다. 속도 추종 성능 테스트는 저속(약 1.20 km/h), 중속(약 2.79 km/h), 고속(약 4.68 km/h)의 세 구간에 걸쳐 제안한 제어기가 산출한 속도가 지면 대비 사용자 보행 속도를 잘 추종하는지 확인하기 위한 실험이다. 실험 결과 전 속도 범위에서 속도 추종 RMS(Root Mean Square) 오차는 0.084 km/h 로 안정적으로 추종함을 확인하였다. (그림 5. 참고)



그림 5. 속도 추종 성능 비교

위치 추종 성능 테스트는 사용자의 트레드밀이 사용자 보행 속도를 우수하게 추종해도 보행 위치가 베이스라인에서 벗어날 수 있기 때문에 사용자 위치가 목표 위치를 잘 추종하는지 확인하기 위한 실험이다. 실험 결과 전체 위치 오차 RMS는 64.9 mm 이며 $\pm 50 \text{ mm}$ 이내 유지 비율은 52.7%이다. 이를 통해 제안한 제어 전략이 다양한 보행 속도에서 사용자를 트레드밀 베이스라인 근방에 안정적으로 유지함을 확인하였다. (그림 6. 참고).



그림 6. 위치 추종 성능

5. 결론

본 논문에서는 사용자의 위치와 속도를 추정하여 over-ground와 유사한 효과를 낼 수 있는 사용자-선택 속도 기반 트레드밀 시스템을 개발하였다. 비전센서(RGB-D 카메라)와 NanoSAM을 통해 사용자의 위치 및 보행 속도를 추정하고, 속도 피드포워드 + PID 제어기에 적용하여 트레드밀의 벨트속도를 제어하였다. 실험결과 평균 보행 속도에 사용자 위치가 트레드밀 베이스라인 근방에 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있었다.

향후 웨어러블 로봇의 정확한 성능 검증에 사용할 예정이다.

참고문헌

- [1] D. M. Vickery-Howe, et al., "Physiological, perceptual, and biomechanical differences between treadmill and overground walking in healthy adults: A systematic review and meta-analysis," *Journal of Sports Sciences*, 2024.
- [2] N. T. Ray, et al., "Walking speed changes in response to novel user-driven treadmill control," *Journal of Biomechanics*, vol. 78, pp. 143-149, 2018.
- [3] https://github.com/NVIDIA-AI-IOT/trt_pose
- [4] <https://github.com/NVIDIA-AI-IOT/nanosam>