추종로봇을 위한 UWB-RGB 센서 융합 기반의 사용자 위치 추정 방법

최낙원, 이준구, 오지용*
한국전자통신연구원

nwchoi@etri.re.kr, leejg01679@etri.re.kr, *jiyongoh@etri.re.kr

Target Person Position Estimation via UWB-Vision Fusion for Robotic Following

Nak-Won Choi, Joon-Goo Lee, Jiyong Oh*
Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

요 약

본 논문에서는 추종로봇을 위해 UWB 센서와 RGB 카메라를 융합하여 사용자의 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 Jetson Orin Nano 기반 ROS 환경에서 구현하였으며, Stereolabs 사의 ZED 2i 카메라와 Markerfabs 사의 ESP32 UWB 통신 모듈을 탑재한 Husky A200 로봇을 통해 검증하였다. 실험 결과, UWB-RGB 융합 방식은 평균 거리 오차 약 0.1 m, 방향 오차는 0.03 rad 이하로 UWB 단일 센서 대비 향상된 방향 정확도를 보였으며, 모바일 로봇 추종 실험에서도 20 회 전 구간 성공을 달성하였다.

Ⅰ. 서 론

추종로봇은 의료 분야에서 의료진의 부담을 경감하고, 물류 분야에서 작업 효율과 안전성을 향상시키는 등 사회적·산업적 환경에서 인간을 보조하기 위해 설계된다. 이러한 추종로봇은 작업자를 정확하게 인지하는 것이 중요하며, 이를 위해 다양한 센서를 활용한 위치 추정 연구가 진행되고 있다. 기존 연구에서 활용된 LiDAR 및 RGB-D 센서 기반 위치 추정은 비용과 환경 제약의 한계가 있으며[1], UWB(Ultra-Wideband) 센서는 저비용으로 약 0.1 m 수준의 거리 정확도를 제공하지만 앵커 배치에 따라 방향 오차가 발생한다[2]. 한편, RGB-D 카메라는 거리와 방향에 대해서 낮은 오차를 보여주지만, 높은 비용으로 인해 실용성이 제한된다[3]. 이에 본 연구에서는 UWB 의 거리 정확도와 RGB 카메라의 방향 정확도를 결합한 UWB-RGB 센서 기반 위치 추정 방법을 제안한다. 두 센서는 각각 거리와 방향 추정에서 상호보완적 특성을 가지며, 융합 시 거리와 방향 모두 정확도가 향상된다(표 1). 또한 제안한 위치 추정 방법을 실제 모바일 로봇에 적용하여 실환경 주행 실험을 통해 그 성능을 검증한다.

표 1. UWB 와 RGB 센서의 위치 추정 특성 비교

측정 방법	r (거리)	θ (방향)
UWB	$\leq 0.15\,m$	$\leq 0.2\,rad$[2]
RGB	불가	$\leq 0.02\,rad$[3]
UWB-RGB	$\leq 0.11\,m$	$\leq 0.03\,rad$

Ⅱ. 본론

1. 시스템 구성

본 논문에서 제안하는 시스템 구성도는 그림 1 과 같으며, 전체 시스템은 ROS(Robot Operating System) 환경에서 구현한다. Jetson Orin Nano 보드는 ZED 2i RGB 카메라와 DWM1000 UWB 모듈을 USB 로 연결하여 ROS 토픽 통신을 통해 각각 RGB 이미지 토픽과 거리 토픽을 수신한다. 본 논문에서는 향후 GT(Ground Truth)와 추론 결과를 동일한 조건에서 비교하기 위해 ZED 2i 를 사용하며, 제안하는 방법에서는 RGB 정보만 사용한다. 거리 토픽은 사용자가 소지한 UWB 태그와 로봇에 부착된 앵커 모듈 간의 측정한 거리 값을 사용한다. RGB 이미지 토픽은 YOLO(You Only Look Once)v5 모델[5]을 통해 사람을 검출하며 검출에 사용된 픽셀 좌표계 기준의 바운딩 박스 중점 좌표를 추출한다. 사용자 위치 추정은 바운딩 박스의 중점 좌표와 앵커 모듈로 측정한 거리 정보를 사용하여 카메라 좌표계로의 변환을 통해 계산한다. 추정된 좌표는 Clearpath Robotics 의 Husky A200 로봇의 base_link 좌표계로 변환되며, 이를 바탕으로 선각속도를 산출하여 로봇 제어 입력에 사용한다.

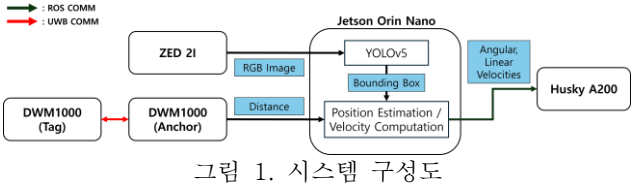


그림 1. 시스템 구성도

2. UWB-RGB 센서 기반 위치 추정

2D 이미지에서 추출된 좌표를 3D 공간에 재투영하기 위해 먼저 카메라 내부 파라미터를 이용하여 픽셀 좌표를 카메라 좌표로 변환한다. 카메라 좌표계에서 대상까지의 깊이 값을 Z라 하면, 카메라 좌표계 기준 추종 대상의 위치 (X, Y)는 식 (2)와 같이 계산된다. 식 (2)에서 f_x, f_y는 초점 거리이고 c_x, c_x는 이미지 중점 좌표이다.

$$X = \frac{u - c_x}{f_y} \cdot Z, Y = \frac{v - c_y}{f_y} \cdot Z \qquad (2)$$

본 논문에서는 (u, v)를 바운딩 박스의 중점좌표로 사용하며, Z를 UWB 센서로 측정된 거리 값으로 사용한다. 카메라 내부 파라미터는 zed-ros2-wrapper 패키지에서 제공된 파라미터를 사용한다[4]. 식 (2)를 통해 얻은 대상의 위치는 Husky A200 로봇의 base_link 좌표계로 변환을 수행한 뒤 최종적인 위치 좌표를 산출한다.

3. UWB-RGB 센서 기반 위치 추정 실험

본 논문에서는 UWB-RGB 센서의 위치 추정 성능을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험은 UWB 태그를 소지한 사람을 Husky A200 로봇의 base_link 직교좌표계(전후 X 축, 좌우 Y 축)에서 정의한 6 개 고정 위치에 배치하여 2.2 절에서 기술한 방법에 따라 위치를 추정하였다. 추정 위치 좌표와 기준 좌표는 Husky A200 로봇의 제어 입력에 사용되는 극좌표계 (r, θ)로 변환한 뒤 평균 거리 오차 (Δr)와 방향 오차 $(\Delta\theta)$를 계산하였다. 여기서 $r(m)$은 base_link 의 원점으로부터의 거리를 의미하고 $\theta(rad)$는 base_link 의 $+X$ 축 반시계 방위각이다. UWB 단일 센서 기반 위치 추정 성능과의 비교를 위해 기존 연구[2]에서 3 개 앵커를 이용한 삼변측량 결과를 동일한 극좌표계로 변환하여 사용하였다.

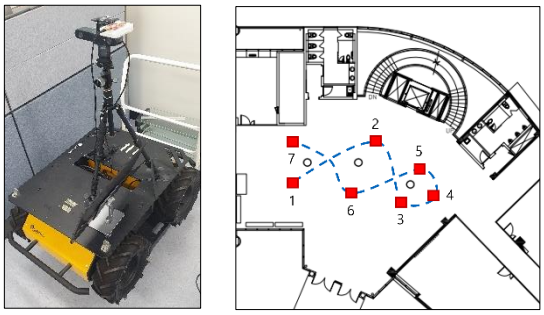
표 2. UWB와 UWB-RGB 평균 거리 및 방향 오차 비교

기준 좌표 (X, Y) (m)	UWB 오차 $\Delta r(m), \Delta\theta(rad)$	UWB-RGB 오차 $\Delta r(m), \Delta\theta(rad)$
(1.0, 0.25)	0.04, 0.21	0.11, 0.01
(1.5, 0.25)	0.04, 0.15	0.03, 0.03
(2.0, 0.25)	0.04, 0.02	0.07, 0.01
(2.5, 0.25)	0.15, 0.03	0.04, 0.02
(3.0, 0.25)	0.05, 0.02	0.06, 0.03
(3.5, 0.25)	0.06, 0.04	0.07, 0.02

표 2 와 같이 두 방법의 평균 거리 오차(Δr)은 모두 약 0.063 m 로 유사하게 나타났다. 반면 UWB-RGB 기반 위치 추정 방법의 평균 방향 오차는 약 0.020 rad 로, UWB 단일 센서(0.078 rad) 대비 약 4 배 감소하여 이를 통해 방향 추정 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

3. 모바일 로봇 주행 실험

모바일 로봇은 그림 2(a)와 같이 Husky A200 로봇에 ZED 2i 카메라와 UWB 센서를 장착하여, 주행 실험을 수행하였다. 모바일 로봇의 이동 경로는 그림 2(b)에 제시된 바와 같이 한국전자통신연구원 대경권연구본부 1 층 로비에서 설정된 경로를 따르며, UWB 태그를 소지한 자를 추종하도록 20 회 반복하였다. 본 연구에서는 로봇이 전체 경로에서 사용자를 이탈하지 않고 종료 지점에 도달한 경우를 성공으로 정의한다. 실험 결과, 20 회 모두 성공하여 제안한 방법의 안정적인 추종 성능을 입증하였다.



(a) (b)

그림 2. (a) 실험용 모바일 로봇, (b) 로봇 이동 경로

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 UWB 센서와 RGB 카메라를 융합하여 사용자 위치를 추정하는 방법을 제안하였으며, 실제 모바일 로봇 플랫폼에서 그 성능을 검증하였다. 실험 결과, UWB 단일 센서 대비 위치 추정 오차가 감소하였으며, 로봇 추종 실험에서도 안정적인 성능을 확인하였다. 이는 위치 추정 정확도의 개선이 실제 로봇 추종 성능 향상으로 이어질 수 있음을 보여주었다. 향후 연구는 RGB-D 카메라 기반 위치 추정 성능과 본 논문에서 제안한 UWB-RGB 센서 기반 위치 추정 성능을 비교할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 한국전자통신연구원 연구운영지원사업 [25ZD1130, 대경권 지역산업 기반 ICT 융합기술 고도화 지원사업(로봇)] 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 과학기술사업화진흥원의 지원을 받아 수행 되었음('학연협력플랫폼구축 시범사업' RS-2023-00304776).

참 고 문 헌

[1] A. Eirale, M. Martini and M. Chiaberge, "Human Following and Guidance by Autonomous Mobile Robots: A Comprehensive Review," IEEE Access, vol. 13, pp. 42214-42253, 2025.

[2] Nak-Won Choi, Joon-Goo Lee and Jiyong, “A Study on UWB-Based User Position Estimation Method for Following Robots,” Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences, 2025.

[3] Hyun-sik Son, Deok-keun Kim, and Seung-hwan Yang, "Development of Following Algorithm for Human-Following Robots using Deep-Learning Technology and Depth Camera," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 28, no. 2, pp. 95-101, 2022.

[4] zed-ros2-wrapper: ROS 2 wrapper for the ZED SDK, [online] Available: https://github.com/stereolabs/zed-ros2-wrapper.

[5] R. Khanam and M. Hussain, “What is YOLOv5: A deep look into the internal features of the popular object detector,” 2024, arXiv:2407.20892.