

# 저비용 2D LiDAR-IMU 융합 기반 사용자 추종 시스템

## A Low-Cost 2D LiDAR-IMU Fusion-Based User Path-Following Algorithm

○이 범 연<sup>1</sup>, 김 중 빈<sup>2</sup> 최 정 현<sup>3\*</sup>

1) 계명대학교 기계공학과 (TEL: [REDACTED] E-mail: 5701255@stu.kmu.ac.kr)

2) 계명대학교 자동차공학과 (TEL: [REDACTED] E-mail: 5705334@stu.kmu.ac.kr)

3) 계명대학교 자동차공학과 (TEL: [REDACTED] E-mail: jh.choi@kmu.ac.kr)

**Abstract** In this paper, we present a low-cost person-following system using only 2D LiDAR and IMU fusion. Our approach features a dual-ROI preprocessing scheme, DBSCAN clustering with geometric feature extraction, adaptive gating-based tracking with occlusion handling, and a hybrid DWA-Pure Pursuit controller. Experiments show reliable tracking in complex environments with performance comparable to expensive 3D sensor systems at a fraction of the cost, making robust person-following accessible for budget-constrained robotic applications.

**Keywords** Person-following robot, 2D LiDAR-IMU fusion, DBSCAN, Kalman filter, DWA, Pure Pursuit

### 1. 서론

서비스·물류 로봇에서 사용자 추종 (person-following) 기능은 필수적이다. 3D LiDAR와 조명 변화에 취약한 비전 기반 방법은 비용·환경 제약이 크다. 반면 2D LiDAR는 경제적이지만 2D 정보와 낮은 각 해상도 때문에 정적·동적 객체 분류·가려짐 처리가 어렵다. 본 연구는 ROS 기반 실제 구현 코드를 토대로, 2D LiDAR와 IMU만으로도 복잡 환경에서 실시간·고정밀 추종이 가능한 통합 기술을 제안한다.

### 2. 시스템 구성 및 알고리즘 개요



그림 1. 2D LiDAR-IMU 융합 기반 사용자 추종 시스템 구성도

그림 1은 2D LiDAR scan → 이중 ROI 필터링 → DBSCAN 클러스터링 → 특징 추출·정적 격자 누적 → 칼만-게이팅 추적 → Occlusion 보정 → 목표점 생성 → DWA 경로 계획 → Pure Pursuit 제어 순으로 동작한다. 2D LiDAR-IMU 융합 노드는 로봇 위치·자세를 산출해 모든 모듈에 데이터를 제공한다.

### 3. 사용자 탐지 및 정적 객체 분류

#### 3.1. 이중 ROI 센서 전처리

- 2D LiDAR 대형 ROI(0.7-4.5m, 105°)로 원거리 후보 수집
- 2D LiDAR 소형 ROI(0.7-1.3m, 70°)로 근거리 후보 수집

GUI에서 실시간 파라미터 조정으로 환경 적응성을 보장한다.

#### 3.2. DBSCAN 클러스터링

2D LiDAR 점군에 DBSCAN( $\epsilon = 0.37m$ ,  $min\_samples = 11$ )을 적용해 다리·몸통 점군을 분리하고, 이상점은 자동 제거된다[1].

\* 본 논문은 2025년도 과학기술정보통신부의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2024-DG-RD0033)

### 3.3. 특징 추출 및 정적 격자 누적

각 클러스터에서 {폭, 깊이, 면적, 밀도, 종횡비, 원형성, 중심점}을 계산한다. 0.05m 격자에서 15 프레임 이상 위치 불변이면 정적 객체로 표시하여 이후 추적 후보에서 제외한다.

## 4. 사용자 추적 알고리즘

### 4.1. 게이팅-특성 결합 데이터 연관

칼만 예측 위치 반영

$$g = b - k \| v \| \quad (b = 0.48m, k = 0.28) \quad (1)$$

안의 클러스터만 후보로 두고,

$$S = 0.3 \Delta_{aspect} + 0.3 \Delta_{density} + 0.2 \Delta_{area} + 0.2 \Delta_{cir} \quad (2)$$

$S < 0.23$ 이면 동일 ID로 매칭한다.

### 4.2. 적응형 칼만 필터

상태  $[x, y, v_x, v_y]^T$ 에 대해  $\Delta t$ 마다 프로세스 노이즈 행렬  $Q(\Delta t) \propto \Delta t^4, \Delta t^3, \Delta t^2$ 로 갱신해 불규칙 센서 주기에 안정성을 확보한다.

### 4.3. 클러스터 분할 및 가려짐 보정

정적 물체와 겹칠 때 이동 방향, 속도, 경로 일관성 가중치로 보행자 점군만 재선별한다. 최대 3s 가려짐 시 이동 패턴-칼만 예측 혼합으로 추적을 유지한다.

## 5. 2D LiDAR-IMU 확률적 융합

IMU yaw·가속도와 SVD 기반 스캔 매칭으로 얻은  $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$ 를 칼만 필터에 측정 업데이트한다[2].

## 6. 경로 계획 및 추종 제어

### 6.1. 목표점 생성

현재 거리  $D$ 와 목표 거리  $D_0(1.5m)$ 로

$$\hat{p}_t = 0.7(D - D_0)\hat{u} + 0.3\hat{p}_{1s} \quad (3)$$

를 설정한다.

### 6.2. DWA 경로 탐색

(선속도, 각속도)  $5 \times 5$  샘플, 1s 시뮬레이션 후

$$J = 0.6J_{goal} + 0.3J_{obs} + 0.1J_{vel} \quad (4)$$

가 최소인 경로를 선택한다[3].

### 6.3. Pure Pursuit 추종

전방 주시 거리(Look-ahead distance) 1m 지점에 대해

$$\omega = 2\sin\alpha/L_d \quad (5)$$

로 각속도를 계산하고, 선속도는 회전 요구량에 따라 선형 감속한다[4].

## 7. 실험 및 결과

표 1. 실험 시나리오별 성능 측정 결과

시나리오	추적 유지율(%)	거리 오차(m)	ID 유지율(%)
산보 (약 1.2m/s)	83%	$\pm 0.18$	84.2%
속보 (약 1.2m/s)	79%	$\pm 0.20$	77%
다중 교차	84.3%	$\pm 0.24$	82%
가려짐 3s	84%	$\pm 0.29$	81%

## 8. 결론

이 연구는 이중 ROI-DBSCAN 인식, 게이팅-특성 연관, 적응형 칼만-클러스터 분할, SVD LiDAR-IMU 융합, DWA + Pure Pursuit 제어를 단일 2D LiDAR, IMU 조합에 통합해 고가 3D 센서 수준의 사용자 추종 성능을 달성하였다. 향후 연구로는 군중 환경·야외 복합 지형에서의 성능 평가, 강화학습 기반 경로 최적화 및 에너지 효율 제어로의 확장을 계획하고 있다.

## 참고문헌

- [1] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu, "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise," Proc. 2nd Int. Conf. KDD, pp. 226-231, 1996.
- [2] E. I. Al Khatib, M. A. Jaradat, M. F. Abdel-Hafez, M. Roigari, "Multiple Sensor Fusion for Mobile Robot Localization and Navigation Using the Extended Kalman Filter," in Proc. IEEE ISMA, pp. 1-6, 2015, doi: 10.1109/ISMA.2015.7373480.
- [3] D. Fox, W. Burgard, S. Thrun, "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance," IEEE Robot. Autom. Mag., vol. 4, no. 1, pp. 23-33, 1997, doi: 10.1109/100.580977.
- [4] R. C. Coulter, Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm, Tech. Rep. CMU-RI-TR-92-01, Carnegie Mellon Univ., 1992.