



Received: 2026/08/11
Revised: 2026/08/22
Accepted: 2026/09/10
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Gisung Ko

298, Daeseong-ro, Cheongwon-gu, Cheongju-si,
28503, Republic of Korea

Tel: +82-43-229-7842

E-mail: kogilove03@cju.ac.kr

다중 LiDAR 기반 조류 충돌 방지 분산 협업 대응 시스템

Multi-LiDAR-Based Distributed Collaborative Response System for Bird Strike Prevention

서영욱¹, 이병하¹, 왕세영¹, 조태현¹, 고기성^{2*}

¹청주대학교 항공기계공학과 학부생

²청주대학교 항공기계공학과 조교수

Yeonguk Seo¹, Byeongha Lee¹, Seyeong Wang¹, Taehyun Cho¹, Gisung Ko^{2*}

¹Undergraduate student researcher, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Cheongju University

²Assistant professor, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Cheongju University

Abstract

본 연구에서는 조류 충돌 예방을 위해 다중 라이다·짐벌 카메라·순찰 로봇을 연동한 분산 협업 조류 탐지·대응 시스템을 제안하고 가상환경(Gazebo)에서 검증하였다. 라이다 융합 기반 DBSCAN·칼만필터로 조류를 탐지·추적하고 비전으로 재확인하였으며, 추격 제어기로 PN(비례항법유도)·pure pursuit·슬라이딩 모드 제어(SMC)를 비교하였다. 그 결과 SMC가 거리·조향 부드러움·재현성에서 우수해 최종 채택되었고, 실주행 궤적으로 근접 추격 유지를 확인하였다.

This paper proposes a distributed collaborative bird detection and response system integrating multiple LiDARs, a gimbal camera, and a patrol robot, validated in Gazebo. LiDAR-fused DBSCAN clustering and a Kalman filter detect and track birds, as confirmed visually via a gimbal camera. Proportional navigation, pure pursuit, and sliding mode control (SMC) were compared as pursuit controllers, and SMC was adopted for its superior distance, smoothness, and repeatability, with RViz2 trajectories confirming close pursuit.

Keywords

조류 충돌 방지(Bird Strike Prevention),
다중 라이다 융합(Multi-LiDAR Fusion),
객체 추적(Object Tracking),
슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control),
DBSCAN 클러스터링(DBSCAN Clustering)

Acknowledgement

이 논문은 2026년도 한국해군과학기술학회
하계학술대회 발표 논문임.

1. 서론

항공기 조류 충돌(bird strike)은 이착륙 과정에서 엔진 흡입구 및 동체 손상을 일으켜 대형 인명 피해로 이어질 수 있는 항공 안전 위협 요소이다. 항공 교통량 증가와 군 항공 작전 임무 수행으로 조류 충돌 위험이 계속 커지고 있어 공항 주변의 철저한 조류 감시·대응 체계가 필수적이다. 그러나 대다수 민간·군 공항은 육안 관측, 조류퇴치반 순찰, 음향 경보기 등 인력 의존적 대응에 머물러 있어 탐지 능력에 한계가 있고 새를 발견해도 차량으로 현장까지 이동해야 해 신속한 대응이 어렵다. 일부 공항이 도입한 조류 탐지 레이더 역시 근거리 정밀 3차원 좌표를 제공하지 못하고 고정 물체와의 오탐 가능성이 있으며, 탐지 정보가 즉각적인 대응으로 이어지지 못하는 한계가 있다. 본 연구에서는 라이다의 좁은 탐지 범위를 보완하고 사고 빈도가 가장 높은 이착륙 지점에서 정밀한 3차원 조류 탐지·인식·추적을 수행하기 위해 다중 라이다, 짐벌 카메라, 이동 순찰 로봇을 연동한 분산 협업 무인 탐지 대응 시스템을 제안 및 검증한다.

2. 다중 센서 기반 공항 탐지 체계

본 연구에서 제안하는 실제 공항 환경 적용 개념은 Fig. 1과 같이 다중 라이다, 비전 카메라, 지상 순찰 로봇의 연동 체계로 구성된다.

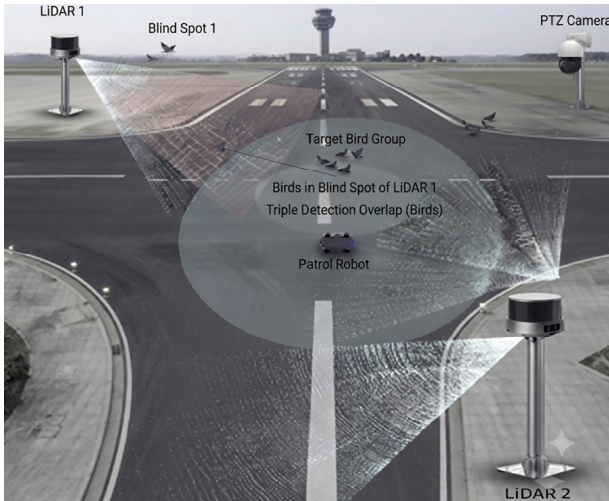


Fig. 1. Multi-sensor operational architecture for airport obstacle detection

단일 라이다는 시야각·수직 센싱 레이어·점군 밀도의 물리적 한계로 조류처럼 작고 이동성이 높은 객체를 고신뢰성으로 검출하기 어렵다. 이를 극복하기 위해 서로 다른 위치에 배치된 다중 라이다의 교차 스캐닝을 적용했으며, 두 고정 라이다와 비전 카메라의 탐지 범위가 겹치는 중앙 영역에서는 라이다-비전 중첩 탐지로 인식 정밀도가 향상된다. 실제 상용화 시에는 Ouster 사의 Ouster OS1 Max와 같이 128채널급 장거리 라이다가 이상적이지만[1] 본 연구에서는 대용량 포인트 클라우드에 따른 연산 부하를 줄이기 위해 비반복 스캐닝 방식의 Livox Mid-360을 채택했다.

3. 시스템 설계

3.1 전체 아키텍처 개요

본 시스템은 Fig. 2와 같이 순찰과 추적 두 상태를 전환하며 동작한다. 평상시 로봇은 사전에 정의된 웨이포인트를 따라 순찰하다가 조류가 검출되면 로봇은 즉시 추적 상태로 전환하여 검출된 표적 위치를 바탕으로 수평면 상에서 조류를 추격한다. 동시에 집별

카메라가 라이다의 추정 좌표를 조준하고 YOLO 기반 비전인식으로 표적을 재확인한다. 표적이 2초 이상 연속으로 검출되지 않으면 추적을 종료하고 로봇은 현재 위치에서 가장 가까운 웨이포인트부터 순찰을 재개한다.

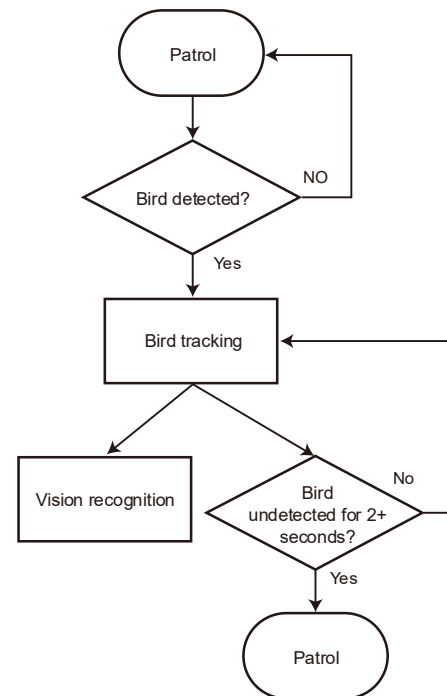


Fig. 2. Patrol-to tracking state transition diagram

3.2 좌표계 통합 및 포인트 클라우드 융합

본 시스템은 고정 라이다 2개와 로봇에 탑재된 라이다로부터 각각 포인트 클라우드를 수집하여 하나의 융합 클라우드로 통합한다. 융합을 위한 공통 기준 좌표계로는 전역 좌표계 대신 오도메트리(odom) 좌표계를 채택하였다.

조류 탐지·추적·추격은 로봇 기준 상대 위치만을 요구하므로 전역 위치 정보가 불필요하며, 전역 좌표계는 사전에 정의된 웨이포인트를 따르는 순찰 경로 계획에만 사용한다. 두 고정 라이다의 위치는 odom 프레임을 기준으로 한 정적 변환으로 등록하였다. 세 라이다는 서로 다른 주기로 비동기 발행되며 ROS 2(Robot Operating System 2)의 근사 시간 동기화 기인 ApproximateTimeSynchronizer를 이용하여 세 소스의 타임 스탬프를 ROS 2 message_filters의 파라미터인 slop(허용 오차) 이내로 정합하는 시간

동기화를 적용하였다. Table 1은 전체 파이프라인 구동 중 60초간 허용오차 값을 다르게 하여 측정한 동기화 결과이며, 개별 소스 발행률의 약 88%에 해당하는 $slop=0.07\text{ s}$ 를 최종 채택했다.

3.3 포인트 클라우드 클러스터링

융합된 포인트 클라우드는 클러스터링과 후처리 필터를 거쳐 표적 후보로 압축된다. 밀도 기반 클러스터링 기법인 DBSCAN(density-based spatial clustering of applications with noise) 적용 전에 두 단계의 전처리를 수행한다. 높이 기준 필터링으로 벽 높이 이하의 포인트를 제거해 지면·벽 반사를 배제하고 로봇 위치 중심의 동적 경계 상자도 로봇 자신의 반사를 제거한다. 전처리된 포인트에 DBSCAN을 적용해 클러스터를 생성한 뒤 각 클러스터의 크기와 높이를 기준으로 표적 후보 여부를 판별하는 후처리 필터를 Table 2와 같이 적용하였다. DBSCAN 자체는 형태·크기 정보를 반영하지 못하기 때문이다. Fig. 3는 전처리부터 추적까지의 전체 처리 파이프라인이며, Fig. 4는 전체 파이프라인을 거쳐 추적된 조류를 ROS 2의 3D 시각화 도구인 RViz2에서 bounding box를

Table 1. Point cloud time-synchronization results for different slop tolerances

Slop tolerance (s)	Matched frames	Matching rate (Hz)	Ratio to individual source
0.35	450	7.49	93.3%
0.07	424	7.06	87.9%
0.03	424	7.06	87.9%

Table 2. DBSCAN clustering, target-candidate filtering, and tracking parameters

Category	Parameter	Value
DBSCAN	eps / min_samples	0.6 m / 3
Target-candidate filter	Max. bounding box size (x, y, z)	2.0 m / 2.0 m / 1.5 m
Target-candidate filter	Min. centroid height	2.0 m
Track matching	Track-to-detection matching distance	8.0 m
Track retention	Locked-target missed-detection limit	40 frames

친 결과이다.

표적 후보로 판별된 클러스터는 등속 운동 모델 기반 칼만 필터로 추적되며 매 프레임 가장 가까운 검출과 매칭해 위치·속도를 보정한다[2].

3.4 시뮬레이션 실험 플랫폼

실제 적용 대상은 청주공항이나 공간 스케일과 실험 환경의 제약을 고려해 Fig. 5와 같이 Gazebo 상에

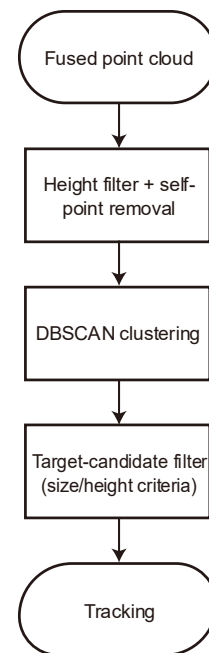


Fig. 3. Detection-to-tracking processing pipeline

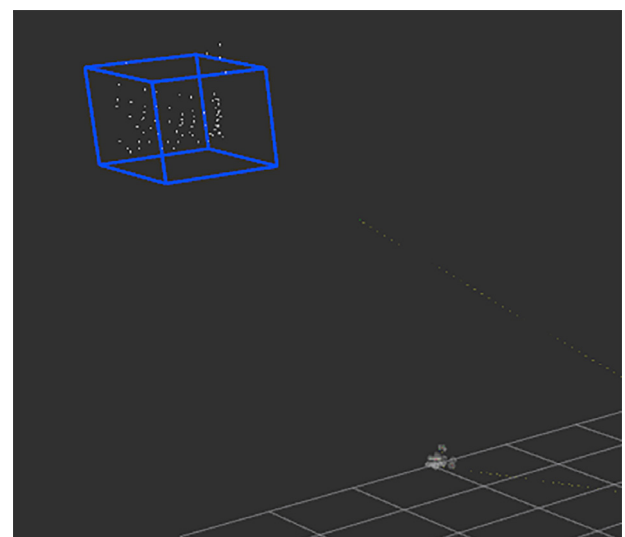


Fig. 4. Tracked bird visualized with a bounding box in RViz2

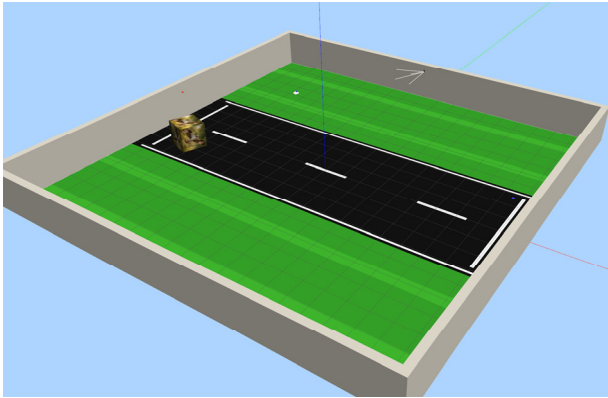


Fig. 5. Simulated runway environment in Gazebo



Fig. 6. YOLO-based bird detection with digital zoom crop

축소된 활주로 환경을 구축하여 실험 플랫폼으로 사용했다.

3.5 비전 인식

라이다 기반 탐지·추적과 별도로 벽면 고정 짐벌 카메라와 YOLO를 이용해 표적을 시각적으로 재확인하는 보조 체계를 구성했다. 라이다가 제공하는 조류의 좌표로 카메라 앵글을 1차 조준한 뒤 종 식별에 강점이 있는 비전으로 재확인하는 2단계 구조이다.

원거리 표적은 화면에 작게 맺혀 인식률이 낮아지므로, 화면 중앙 30%를 잘라 확대한 뒤 추론한다.

4. 실험 및 성능 평가

4.1 실험 시나리오 설계

표적인 조류의 회피 기동을 재현하기 위해 불규칙 방향전환과 물리적으로 타당한 선회율 제한이 있는 비행 패턴을 실험 시나리오로 설계했다. 표적은 최대

비행속도 1.2 m/s, 최대 선회율 120 °/s 이내에서 임의의 방향전환을 반복하며 회피 기동을 모사한다. 로봇은 20 m × 20 m의 시뮬레이션 맵에서 3-LiDAR 융합 기반 탐지·추적 결과를 입력으로 받아 추적 제어를 수행한다.

4.2 추적 제어 3자 비교 실험

본 연구는 계산량이 적고 이동 표적 요격에 직접 대응하는 유도 법칙인 비례항법 유도(Proportional navigation, PN)[3]와 pure pursuit[4], 그리고 표적 기동을 크기가 제한된 외란으로 간주해 강인하게 대응하는 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control, SMC)를 조향 후보로 선정했다. 세 조향 법칙을 동일 조건에서 비교하기 위해 각 방식마다 동일한 표적 비행 모델로 3회씩 반복 실험했다. 평가지표는 Table 3와 같다.

Table 3. Evaluation metrics for pursuit control comparison

Metric	Definition	Direction
Average distance (m)	Mean horizontal distance between robot and target during tracking mode	Lower is better
Time within 2.5 m (%)	Fraction of tracking-mode time the distance stayed within 2.5 m	Higher is better
Steering angular velocity variability (°/s)	Standard deviation of robot yaw angular velocity	Lower is better

추적 모드 구간 데이터를 집계한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Comparison of pursuit control methods

Metric	SMC	Pure Pursuit	PN
Average distance (m)	2.92±0.21	3.81±0.39	2.83±0.34
Time within 2.5 m (%)	39.5±3.1	25.7±12.7	51.2±3.1
Steering angular velocity variability (°/s)	24.7	37.1	32.0

Pure pursuit는 근접 유지율이 가장 낮고 회차간 편차가 가장 커 세 방식 중 가장 열세였다. SMC는 조향 부드러움·반복 재현성에서 우위였고 PN은 2.5 m 이내 유지율에서 앞섰는데 구동계 부담과 재현성을 함께 고려해 본 연구에서는 SMC를 최종 추적 제어기로 채택했다.

4.3 SMC 원리 및 적용 방법

슬라이딩 모드 제어(SMC)는 시스템 상태를 설계한 슬라이딩 면 $s=0$ 위로 유한시간 내에 올린 뒤 그 위에 묶어두어, 외란·모델 불확실성에도 강인성을 보장하는 비선형 제어기법이다. 1차 SMC는 불연속 스위칭 $k \cdot \text{sign}(s)$ 로 구현돼 $s=0$ 근방에서 고주파 진동인 채터링이 발생하며, 이를 완화하는 경계층 근사는 채터링을 정상상태 오차와 맞바꾸는 방법일 뿐이다. 본 연구는 불연속성을 적분항에만 두어 제어 입력 자체는 연속으로 유지하면서도 $s=0$ 으로의 유한시간 수렴을 이론적으로 보장하는 2차 슬라이딩 모드 기법, super-twisting algorithm(STA)을 채택했다[5].

PN 열세의 핵심 원인이 시선각 변화율($\dot{\lambda}$)의 미분 의존이었다는 점에 착안해, 미분이 필요 없는 1차 항인 로봇 기준 표적 방위각(β) 자체를 수식 (1)과 같이 슬라이딩 면으로 삼았다.

$$s = \beta \quad (1)$$

제어 법칙은 수식 (2)와 같이 정칙화된 STA를 사용했다. 원래 STA의 비례항 $\sqrt{(|s|) \cdot \text{sign}(s)}$ 은 $s=0$ 근방에서 기울기가 발산해 작은 오차에도 과민 반응하므로, 분모에 ϵ 를 더해 정칙화했다. u_1 은 적분 항으로 수식 (3)처럼 갱신하되, 이미 최대 각속도로 포화된 상태에서 $\text{sign}(s)$ 가 그 방향을 더 키우면 적분을 멈추는 조건부 적분(anti-windup)을 적용했다. $|s| < \delta b$ 인 정렬이 완료된 상태이면 비례항을 끄고 u_1 도 매 스텝 0.8배씩 감쇠시켜, 작은 오차에서도 적분이 쌓여 과회전하는 문제를 완화했다. 수식 (2)의 $k_d \cdot \omega_r$ 은 순수 STA 이론에는 없는 항으로, 회전 관성이 계속 이어지는 것을 억제하는 보정이다.

$$\omega_{SMC} = k_1 \cdot \frac{s}{\sqrt{|s| + \epsilon}} + u_1 - k_d \cdot \omega_r \quad (2)$$

$$u_1(t + \Delta t) = u_1(t) + k_2 \cdot \text{sign}(s) \cdot \Delta t \quad (3)$$

본 연구에서 사용된 SMC 파라미터는 Table 5와 같다.

4.4 시스템 동작 검증

채택된 SMC 조향으로 실제 추적이 설계대로 동작하는지 RViz2 화면으로 확인했다. Fig. 7은 추적 중 표적(초록), 로봇(빨강)의 실 주행 경로를 나타낸다. 표적이 급격히 방향을 바꾸는 구간에서도 로봇이 근접한 경로로 따라붙는 것을 확인할 수 있다. 로봇 경로가 표적 경로보다 상대적으로 매끄럽게 이어지는 것은 SMC 조향의 낮은 조향 각속도 변동성과 일치하는 결과이다.

Table 5. SMC parameters

Symbol	Value	Description
k_1	1.5	Proportional gain
k_2	0.2	Integral (switching) gain
ϵ	0.05	Regularization constant
δb	0.05 rad	Alignment deadband
u_1 limit	1.0 rad/s	Integral term saturation limit
k_d	1.0	Angular velocity damping gain

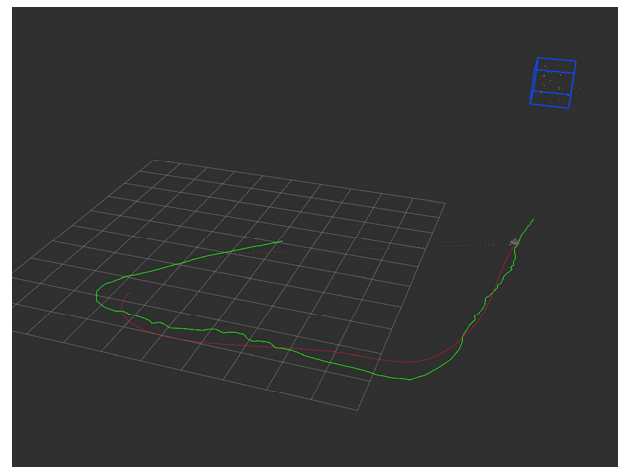


Fig. 7. RViz2 visualization of bird (green) and robot (red)

5. 결론

본 연구에서는 청주공항을 적용 대상으로, 고정 라이다 2대와 온보드 라이다 1대의 3중 융합 기반 조류 탐지·추적, 짐벌 카메라 비전 재확인, 자율 이동로봇 추격 제어를 결합한 분산 협업 조류 충돌 방지 시스템을 제안하고 Gazebo 환경에서 검증했다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) odom 프레임 기반 좌표계 통합으로 map/odom 순환 의존 문제를 회피하며 3대 라이다를 시간 동기화·융합했고, DBSCAN+칼만필터 기반 탐지·추적으로 순찰·추적 상태기계가 안정적으로 동작함을 확인했다.

(2) PN, pure pursuit, SMC를 동일 조건에서 3회씩 반복 비교한 결과 SMC가 조향 부드러움·재현성에서 종합적으로 우수해 최종 채택했다. 이는 미분에 의존하는 PN이 불규칙한 표적 기동에서 이론적 강점을 살리지 못하는 반면, 방위각 오차만으로 외란을 거부하는 강인 제어기법이 실질적으로 우위에 있음을 실측으로 보여준다.

(3) RViz2 실주행 궤적을 통해 SMC 조향이 표적의 급격한 방향전환에도 근접 추격을 유지함을 본 시스템에서 확인했다.

다만 검증이 시뮬레이션 단계에 머물러 있고, 표적을 등방 정육면체로 단순화했으며, 맵 규모(20 m ×

20 m)도 실제보다 축소돼 있다는 한계가 있다. 향후 실제 스케일 검증, 로봇 동역학 기반 파라미터 정밀화, 실물 PTZ 카메라 연동, 탐지·추적 파이프라인의 재현성 강화를 계획하고 있다.

참고문헌

- [1] Karl Montalban, Christophe Reymann, Dinesh Atchuthan, Paul-Edouard Dupouy, Nicolas Riviere & Simon Lacroix, 'A Quantitative Analysis of Point Clouds from Automotive Lidars Exposed to Artificial Rain and Fog,' Atmosphere, VOL. 12, NO. 6, 2021, Article 738.
- [2] Su-Jin Baek, A-Hyeon Kim, Young-Lim Choi, Sang-Jun Ha & Jong-Wook Kim, 'Development of an Object Tracking System Using Sensor Fusion of a Camera and LiDAR,' Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, VOL. 32, NO. 6, 2022, pp. 500–506.
- [3] 김경중·권철·이희진·박민용, '미사일 유도 시스템의 비례항법의 해에 관한 연구,' 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집, 제21권 2호, 1998, pp. 445–448.
- [4] Hyungjin Joo & Kibeom Lee, 'Changes in Path Tracking Performance of Autonomous Vehicle According to Design Feedback Gain and Look-Ahead Distance of Pure-Pursuit Algorithm,' Transactions of KSAE, VOL. 29, NO. 9, 2021, pp. 839–846.
- [5] Arie Levant, 'Sliding Order and Sliding Accuracy in Sliding Mode Control,' International Journal of Control, VOL. 58, NO. 6, 1993, pp. 1247–1263.