

EGO-Planner 기반 UAV의 실시간성 향상을 위한 적응형 Sector Filtering 기법 연구

나우엽, 신수용*

국립금오공과대학교

2025210278@kumoh.ac.kr, *wdragon@kumoh.ac.kr

A Study on Adaptive Sector Filtering for Enhancing Real-time Performance of EGO-Planner based UAV

Na Woo Yeob, Shin Soo Young*

Kumoh National Institute of Technology.

요약

본 논문은 3D LiDAR 기반 EGO-Planner를 활용한 UAV 자율비행 시 발생하는 온보드 연산 부하를 완화하기 위한 적응형 (Adaptive) Sector Filtering 기법을 제안한다. EGO-Planner는 경사하강법 기반의 궤적 최적화를 수행하므로, 장애물 밀도와 입력 포인트 데이터의 양이 늘어날수록 연산 시간이 급격히 증가하여 실시간 제어 주기를 확보하는 데 어려움이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제 해결을 위해 정상 비행 시에는 기체의 주행 방향을 중심으로 하는 협소 시야각(Sector) 필터를 적용하여 데이터 양을 경량화하고, 최적화 실패나 장애물 고밀도 구간 진입 등 재탐색이 필요한 상황에서만 시야각을 일시적으로 확장하는 기법을 제안한다. 이를 통해 EGO-Planner의 연산 효율성을 제고하고, 복잡한 환경에서의 경로 탐색 능력을 유연하게 확보하는 구조를 제시한다.

I. 서론

UAV의 자율 주행을 위한 EGO-Planner 프레임워크는 지도를 생성하지 않거나 국부적인 정보만을 활용하여 경사하강법 기반의 최적 궤적을 생성하는 효율적인 알고리즘이다 [1], [4]. 그러나 3D LiDAR를 주 센서로 사용할 경우, 매 프레임 발생하는 고밀도 포인트클라우드가 실시간 궤적 최적화 과정에서 상당한 연산 부하를 유발하는 원인이 된다. 특히 복잡한 장애물 환경에서는 포인트클라우드 필터링의 효율성이 전체 시스템 성능의 핵심 요소로 작용한다.[2]

EGO-Planner의 총 비용 함수 J_{total} 내 장애물 회피 항 J_{obs} 는 참조되는 포인트의 개수 N 에 비례하여 계산량이 결정된다.

$$J_{obs} = \sum_{i=1}^N f(d(p_i)) \quad (1)$$

여기서 포인트 개수 N 이 방대해질수록 비용 함수 계산 시간이 늘어나 시스템의 실시간성을 저해할 가능성이 있다. 이에 본 논문에서는 비행 상황에 맞춰 N 을 동적으로 조절하는 적응형 Sector Filtering 기법을 제안한다.

II. 본론

2.1 EGO-Planner 호환 Sector Filter 설계

EGO-Planner는 주로 국부적인 거리장(Distance Field) 정보를 참조하므로, 연산 효율을 위해 LiDAR 데이터를 구면 좌표계로 투영한 뒤 특정 영역만을 추출하는 Sector Filter를 설계한다[5], [6]. 이는 기존의 섹터 기반 스캐닝 방식[3]을 발전시킨 형태이다. 입력 포인트 p_i 에 대해 거리(r_i), 수평각(θ_i), 수직각(ϕ_i) 조건을 정의하고, 주행 방향 벡터 \vec{v} 를 기준으로 하는 가변 필터링 범위를 설정한다.

$$\theta_i \in [\theta_v - \Delta\theta, \theta_v + \Delta\theta], \quad \phi_i \in [\phi_v - \Delta\phi, \phi_v + \Delta\phi] \quad (2)$$

그림 1은 제안하는 시스템의 전체적인 데이터 흐름과 아키텍처를 보여준다. 3D LiDAR로부터 획득된 원시 포인트클라우드(Raw Points)는 Adaptive Sector Filter를 거치며 현재 비행 상태에 최적화된 데이터로 정제되어 EGO-Planner에 입력된다. EGO-Planner는 생성된 궤적의 품질과 최적화 수렴 속도 등 상태 정보를 필터로 피드백(Feedback)함으로써, 실시간으로 필터링 파라미터를 조절하여 연산 효율성과 안전성을 동시에 확보한다.

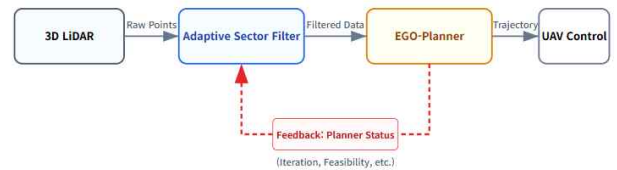


그림 1 시스템 아키텍처 및 데이터 흐름

2.2 EGO-Planner 상태 기반 시야각 전환 구조

제안하는 기법은 EGO-Planner의 궤적 최적화 수렴 여부에 따라 파라미터 $\Delta\theta$ 를 동적으로 업데이트한다.

1. Efficiency Mode (FLY 상태): 최적화가 안정적으로 수행될 때 활성화되며, 협소 시야각($\Delta\theta_{narrow}$)을 통해 데이터 유입량을 최소화한다.
2. Safety/Recovery Mode (RE-SEARCH 상태): 최적화 반복 횟수 (Iteration)가 임계값을 초과하거나 궤적이 'Infeasible' 판정을 받을 때 활성화되며, 시야각을 $\Delta\theta_{wide}$ 로 확장한다.

$$\Delta\theta(t) = \begin{cases} \theta_{narrow} & \text{if Optimization is Success} \\ \theta_{wide} & \text{if Optimization is Failed/Stuck} \end{cases} \quad (3)$$

그림 2는 시스템의 제어 흐름을 도식화한 것이다. LiDAR 데이터가 필터링을 거쳐 EGO-Planner에 입력되면, 플래너는 현재 궤적의 충돌 가능성 및 최적화 수렴 속도를 판단한다. 만약 복잡한 지형으로 인해 최적화가 지연될 경우, 해당 상태 정보를 필터로 피드백하여 즉각적으로 인지 영역을 확장함으로써 새로운 회피 경로를 찾을 수 있도록 돕는다.

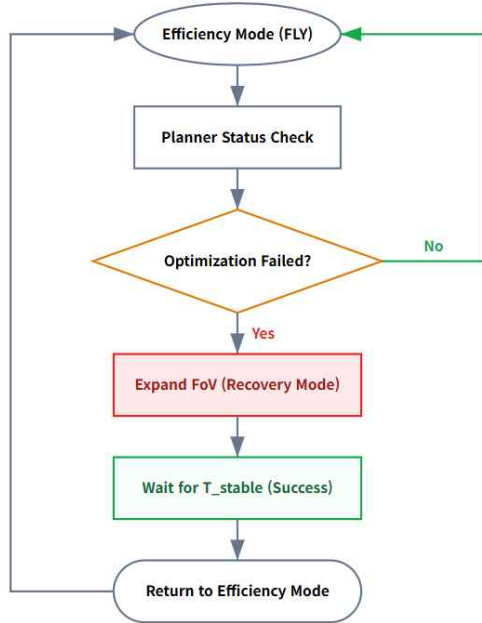


그림 2 EGO-Planner 상태 피드백을 활용한 시야각 전환 로직

2.3 전환 안정화를 위한 지연 복귀 메커니즘

복잡적인 장애물 환경(예: 숲, 좁은 통로)에서 시야각이 빈번하게 전환되는 헌팅(Hunting) 현상을 방지하기 위해 지연 시간(T_{stable})을 도입한다. 시야각의 잦은 변경은 입력 포인트클라우드의 밀도와 분포를 급격하게 변화시키며, 이는 EGO-Planner의 비용 함수 표면(Cost surface)에 불연속성을 초래하여 궤적의 요동을 유발할 수 있다. 따라서 안정적인 상태 복귀를 위해 다음과 같은 조건을 정의한다.

$$S(t + \Delta t) = \text{Efficiency} \quad \text{iff} \quad \forall \tau \in [t - T_{stable}, t], \text{ Planner} = \text{Success} \quad (4)$$

식 (4)와 같이 일정 시간 동안 플래너의 최적화가 연속적으로 성공할 때만 효율 모드로 복귀하도록 설계함으로써, 일시적인 장애물 통과 직후에 발생할 수 있는 데이터 단절 오류를 방지한다. 이는 기체가 복잡한 구간을 완전히 벗어난 것이 확인된 시점에서 시야각을 축소함으로써, 데이터 급변으로 인한 플래너의 수렴 불안정성을 최소화하고 비행의 매끄러움(Smoothness)을 유지하기 위함이다.

III. 결론

본 논문에서는 3D LiDAR 기반 자율주행 UAV의 실시간 궤적 생성 효율을 극대화하기 위한 상태 전환형 Sector Filtering 기법을 제안하였다. 제안된

알고리즘은 EGO-Planner의 내부 최적화 상태를 실시간으로 모니터링하여, 안정적인 주행 상황에서는 인지 데이터의 범위를 전략적으로 제한하고 비상 상황에서만 인지 시야를 확장하는 가변 구조를 채택하였다.

연구의 주요 기여도는 다음과 같다. 첫째, 고밀도 LiDAR 데이터의 선택적 수용을 통해 EGO-Planner의 핵심 연산인 장애물 회피 비용 함수 계산량을 획기적으로 절감할 수 있는 논리적 근거를 제시하였다. 둘째, 지연 시간 기반의 복귀 메커니즘을 도입함으로써 센서 데이터의 급격한 변동이 궤적 평활도에 미치는 악영향을 최소화하고 비행 안정성을 확보하였다.

본 연구는 연산 자원이 극도로 제한된 소형 온보드 컴퓨터 환경에서도 고성능 궤적 플래너가 실시간성을 유지하며 동작할 수 있게 한다는 점에서 중요한 의미가 있다. 향후 연구에서는 제안 기법을 실제 임베디드 하드웨어에 탑재하여, 장애물 밀도가 다른 다양한 실제 환경에서의 CPU 점유율 변화 및 재계획(Replanning) 성공률을 정량적으로 분석하고 검증할 예정이다. 또한, 기체의 속도 벡터뿐만 아니라 가속도 및 회전 각속도를 고려한 정밀 필터링 기법으로 확장하여 급격한 기동 시에도 안전성을 보장할 수 있는 지능형 인지 시스템으로 발전시키고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2025-00553810, 50%)

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2018R1A6A1A03024003, 50%)

참 고 문 헌

- [1] Zhou, Xin, et al. "Ego-planner: An esdf-free gradient-based local planner for quadrotors." IEEE Robotics and Automation Letters 6.2 (2020): 478-485.
- [2] Zhang, Dongbo, et al. "Pointfilter: Point cloud filtering via encoder-decoder modeling." IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 27.3 (2020): 2015-2027.
- [3] Asmoro, Krisma, and Ryan Febriansyah. "Real-Time 3D LiDAR-Based Obstacle Avoidance for UAV Using Sector-Filtering Algorithm." (2025).
- [4] Zhou, Boyu, et al. "Robust and efficient quadrotor trajectory generation for fast autonomous flight." IEEE Robotics and Automation Letters 4.4 (2019): 3529-3536.
- [5] Han, Luxin, et al. "Fiesta: Fast incremental euclidean distance fields for online motion planning of aerial robots." 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2019.
- [6] Oleynikova, Helen, et al. "Voxblox: Incremental 3d euclidean signed distance fields for on-board mav planning." 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017.