

불규칙 작업 경계에서 살포 효율을 개선하는 UAV 경로 생성 및 가장자리 제어 기법에 관한 연구

하성욱, 이주형, 남해운*

모빌리티랩, *한양대학교

suha@mobilitylab.kr, ovlxxlvo@mobilitylab.kr, *hnam@hanyang.ac.kr

A Study on UAV Route Generation and Boundary Control Strategies to Enhance Spraying Efficiency in Irregularly Shaped Fields

Ha Sung Uk, Lee Joo Hyung, Nam Hae Woon*

MobilityLab, *Hanyang Univ.

요약

본 논문은 불규칙한 작업 경계를 갖는 농경지에서 무인항공기(UAV) 살포 작업의 누락을 저감하는 경로 생성 및 가장자리 제어 기법을 제안한다. 제안 시스템은 실제 경계에서 일정 거리 안쪽으로 전체 살포 영역을 오프셋하고, 불규칙 경계부에 대해 가장 가까운 두 직선 경로의 중간선을 기준으로 별도의 가장자리 살포 영역을 정의한 뒤, 비행 고도와 속도를 가변 제어함으로써 균일한 커버리지와 외부 비산 방지를 달성한다. 시뮬레이션 결과, 기존 지그재그 경로 대비 누락률을 24.3% 저감하였다.

I. 서론

농업용 멀티로터 드론은 노동력 부족과 지형 제약 해소 수단으로 빠르게 확산되며, 비행 고도·속도·노즐 종류 등 운전 파라미터 최적화 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 최근 연구들은 패턴네터를 이용해 유효 살포폭과 분포 균일도(CV)를 정량화하고, 드론 스프레이 패턴을 분석하는 방법을 제시해 왔다[1-4]. 그러나 이러한 연구는 주로 직선 또는 직사각형 경계를 가정하며, 일정 살포폭 기준의 지그재그 경로에서 스와스 중첩과 CV를 분석하는 데 초점을 맞추고 있다.

실제 농경지·과수원·방제 대상지는 복잡한 지형과 불규칙한 외곽 경계를 갖는 경우가 많아, 기존 직선 지그재그 경로를 그대로 적용하면 경계부에서 살포 중복(overlap)과 누락(skip)이 동시에 발생하고, 약제량 편차가 커지며, 일부 구간에서는 과살포·미살포 문제가 발생할 수 있다[2,5]. 또한, UAV가 경계선을 따라 비행할 때 외부로 약제 비산(drift) 리스크가 증가하지만, 현행 가이드라인은 주로 고도·노즐·풍속에 따른 평균적 드리프트 특성에 초점을 두고 있어, 경계 형상 자체를 고려한 제적·파라미터 설계 방법은 충분히 제시되지 못하고 있다.

본 연구는 불규칙 작업 경계에서 발생하는 이러한 문제를 해결하기 위해, (1) 실제 경계 안쪽으로 전체 살포 영역 오프셋, (2) 가장 가까운 두 번째 직선 경로의 중간선 기반 가장자리 영역 정의, (3) 가장자리 영역 폭에 따른 고도·속도 가변 제어 알고리즘을 통합한 새로운 UAV 살포 시스템을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 그 효과를 검증한다.

II. 본론

2.1 제안 시스템 구조

제안 시스템은 다음 4단계로 구성된다:

(1) 경계 오프셋 및 전체 살포 영역 정의

실제 작업 영역 경계 B_a 에서 일정 거리 d_{offset} 만큼 안쪽으로 전체 살포 영역 경계 B_s 를 설정한다.

$$B_s = \{p \in B_a | d(p, \partial B_a) \geq d_{offset}\} \quad (1)$$

여기서 ∂B_a 는 경계선을 의미하며 p 는 평가 대상 좌표점을 의미한다.

(2) 지그재그 경로 생성

비행고도 h 에 대응하는 살포반경 r_s 를 기준으로, B_s 영역에 평행 직선 경로를 생성한다. 경로 간 간격은 중첩을 최소화 하도록 $2r_s$ 로 설정한다.

(3) 가장자리 살포 영역 정의

전체 경계 중 불규칙 경계 구간 B_i (곡선, 꺾임, 다각형 등)를 식별하고, 각 경계 상의 샘플링 점 $b \in B_i$ 에 대해 가장 가까운 직선 경로 $L_1(b)$ 와 두 번째로 가까운 경로 $L_2(b)$ 를 찾는다. 이 때 중간 위치의 가상 경계선 L_m 을 아래와 같이 계산한다.

$$L_m(b) = \frac{L_1(b) + L_2(b)}{2} \quad (2)$$

그 결과 가장자리 살포 영역 A_{edge} 는 B_i 와 L_m 사이 영역으로 정의되며 이 영역의 폭 w_{edge} 는 아래와 같이 계산된다.

$$w_{edge}(b) = d(b, L_m(b)) \quad (3)$$

(4) 가변 파라미터 제어

A_{edge} 영역을 비행할 때, 폭 w_{edge} 에 따라 비행고도 h 와 속도 v 를 동적으로 조절한다.

$$h_{edge}(b) = h_{base} (1 - \alpha \frac{w_{edge}(b)}{r_s}) \tag{4}$$

여기서 h_{base} 는 기본 영역 비행 고도, $w_{edge}(b)$ 는 경계점 b 의 가장자리 영역 폭, r_s 는 기본 살포 반경 그리고 α 는 보정 계수를 의미한다.

2.2 시뮬레이션 설정 및 결과

제안 기법의 성능을 검증하기 위해 Gazebo 시뮬레이션 환경에서 임의의 논지 대해 실험을 수행하였다. 비교 대상은 (A) 기존 고정 지그재그 경로 (고정 고도 2.5m, 속도 3.5m/s), (B) 제안 기법(경계 오프셋 + 가변 제어)이다. 평가 지표는 누락률 이다.

표 1. 시뮬레이션 드론 파라미터 설정

| 지표 | 단위 | 설정 범위 |
|-------|-----|-----------|
| 분사 고도 | m | 2.0~4.0 |
| 분사 폭 | m | 5.14~6.78 |
| 비행 속도 | m/s | 2.0~4.0 |



그림 1 시스템 앱 화면(좌) 와 Gazebo 시뮬레이션 화면(우)

표 2. 기존 경로와 제안 기법 성능 비교

| 지표 | 기존 지그재그 (A) | 제안 기법 (B) | 개선율 (%) |
|---------|-------------|-----------|---------|
| 누락률 (%) | 30.8 | 23.3 | 24.3 |

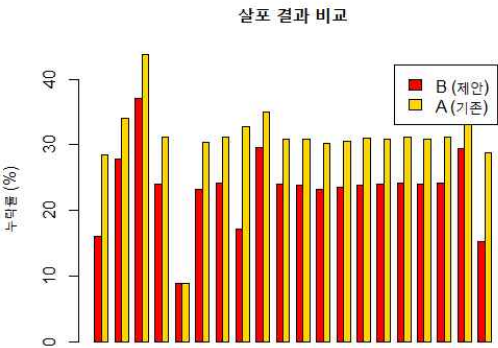


그림 2 기존 지그재그 경로 살포 결과(우) 와 제안 기법을 사용한 살포 결과(좌)

시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존 경로 대비 누락률 각 24.3% 저감하였다.

III. 결론

본 논문은 불규칙 작업 경계 조건에서 UAV 살포의 누락 문제를 해결하는 경로 생성 및 가변 파라미터 제어 기법을 제안하였다. 제안 시스템은 경계 오프셋, 중간선 기반 가장자리 영역 정의, 고도·속도 가변 제어의 3단계 전략을 통합하여, 기존 지그재그 경로 대비 누락률 24.3% 저감이라는 정량적 성능 향상을 달성하였다. 향후 실제 농경지 환경에서의 필드 테스트와 풍속·지형 변수를 반영한 adaptive control 알고리즘 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] D. Yallappa, R. Kavitha, A. Surendrakumar, B. Suthakar, A. P. Mohan Kumar, B. Kannan, and M. K. Kalarani, "Improving agricultural spraying with multi-rotor drones: a technical study on operational parameter optimization," *Front. Nutr.*, vol. 11, Dec. 2024.

[2] S. Dhakad, R. C. Salunkhe, K. L. Dabhi, and P. Gupta, "Agricultural drone spraying efficiency enhancement via patternater-based effective swath width determination," *The Pharma Innovation Journal*, vol. 12, no. 10, pp. 952-961, 2023.

[3] C. Byers, S. Virk, G. Rains, and S. Li, "Spray deposition and uniformity assessment of unmanned aerial application systems (UAAS) at varying operational parameters," *Frontiers in Agronomy*, vol. 6, Jun. 2024.

[4] T. Houston, "Optimization of nozzle, application height, and speed for UAAS pesticide applications," M.S. thesis, Dept. Agron. Hortic., Univ. Nebraska Lincoln, Lincoln, NE, USA, 2022.

[5] OECD Working Party on Pesticides, "State of the knowledge literature review on unmanned aerial spray systems in agriculture," OECD Drone Sub-Group, Paris, France, Jun. 2021.

[6] Y. Liu, W. Yao, S. Guo, H. Yan, Z. Yu, S. Meng, D. Chen, and C. Chen, "Determination of the effective swath of a plant protection UAV adapted to mist nozzles in mountain Nanguo pear orchards," *Frontiers in Plant Science*, vol. 15, Jun. 2024.

[7] Y. Liu, Y. Ru, L. Duan, and R. Qu, "Model and design of real-time control system for aerial variable spray," *PLOS ONE*, vol. 15, no. 7, Jul. 2020.

[8] D. E. Martin and M. A. Latheef, "Payload capacities of remotely piloted aerial application systems affect spray pattern and effective swath," *Drones*, vol. 6, no. 8, p. 205, Aug. 2022.