

군집 무인기 네트워크를 위한 분산 다중 접속 프로토콜 성능 분석

이 민*, 이 호 진*, 유 영 빈*,
안 재 하**, 이 호 원°

Performance Analysis of Distributed Multiple Access Protocols for UAV Swarm Networks

Min Lee*, Hojin Lee*, Youngbin You*,
Jaeha Ahn**, Howon Lee°

요 약

수십에서 수백대 이상의 소형 무인기들로 구성된 군집 무인기 네트워크에서 무인기들 간 협업을 위한 정확하고 신속한 상호 정보 교환은 필수적이다. 본 논문에서는 군집 무인기 네트워크를 위한 간단하면서도 우수한 성능을 제공하는 분산 다중 접속 프로토콜을 제안한다. 또한, 시뮬레이션을 통해 제안 방안의 전송 성공률 및 평균 지연 성능을 분석한다.

Key Words : UAV swarm network, distributed multiple access protocol

ABSTRACT

In Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm networks composed of dozens to hundreds of small UAVs, accurate and fast information exchange is essential for collaboration between UAVs. In this paper, we propose a distributed multiple access protocol that is simple while providing excellent performance for UAV swarm networks. In addition, we evaluate the transmission success rate and

average delay performance of the proposed method through simulations.

I. 서 론

최근 각광받고 있는 군집 무인기 네트워크는 수십에서 수백대 이상의 소형 무인기들이 협업하여 주어진 임무를 효율적으로 수행할 수 있기 때문에 물류 배달, 농업, 지도 제작, 재난·재해 구호 뿐만 아니라 국방 안보 분야까지 다양한 분야에서 활용이 가능하다^[1,2]. 군집 무인기 네트워크는 무인기들 간 협업을 위한 상호 정보 교환을 지원하기 위해 중앙 제어 인프라 없이 동적 네트워크로 구축되며, 높은 확장성 및 유연성, 낮은 제작 및 유지보수 비용, 여러 분야로의 활용성 등 다양한 이점을 가진다. 군집 기능의 핵심 중 하나인 군집 비행은 철새가 무리를 지어 날아다니는 것 같이 서로 충돌하지 않고 일정 대형을 이루거나 일정 거리를 유지하며 이동하는 것이다^[3]. 이를 위해서는 무인기들이 자신의 현재 위치, 속도, 자세 등의 비행 정보를 주기적으로 인접 무인기들과 교환하고, 이 정보를 활용하여 분산적으로 군집 비행 제어를 수행함으로써 서로 충돌하지 않으면서도 일정 대형을 유지하며 임무 지역으로 비행할 수 있다^[4].

또한, 모든 노드들이 동등한 권한을 가진 비계층적 환경의 군집 무인기 네트워크를 위한 무선 채널 접근 기법으로 Carrier Sense Multiple Access (CSMA)이 많이 활용되고 있다^[2,5]. CSMA는 노드들이 중앙 제어 없이 분산적 채널 접근이 가능하고, 노드의 가입 및 탈퇴가 자유로운 장점이 있다. 그러나, 노드 수가 증가할수록 효율이 크게 저하될 수 있으며^[6], 특히 노드가 송신하기 위해 random backoff 시간을 대기하는 동안 다른 노드가 채널을 사용하면 대기 시간이 연장되므로 주기적인 패킷 송신에 있어서 해당 주기 시간을 초과할 수 있고, 이 경우 정보가 갱신된 새로운 패킷이 생성되고 이전의 패킷은 쓸모가 없어진다.

이에 따라, 본 논문에서는 전송 성공률을 높이면서 구현 복잡도가 낮은 Slotted Random Backoff (SRB)을 제시한다. 구체적으로 제안 방안은 송신할 패킷이 발생하면 송신 주기 내에서 random backoff 시간 동안 대기

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. (UG223047VD)

• First Author : LIG Nex1 Co. Ltd., min.lee@lignex1.com, 수석 연구원, 정회원

° Corresponding Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ., howon@ajou.ac.kr, 정교수, 종신회원

* LIG Nex1 Co. Ltd., {hojin.lee, youngbin.you}@lignex1.com, 정회원

** Agency for Defense Development, anjaha@add.re.kr

논문번호 : 202409-218-B-LU, Received September 25, 2024; Revised October 14, 2024; Accepted October 14, 2024

한 후 해당 패킷을 송신한다. 이를 통해, 패킷 충돌로 인한 전송 실패를 줄이면서 해당 송신 주기 내에서 해당 패킷을 전송할 수 있다. 또한, 동일한 비행 정보 패킷을 송신 주기 내에 반복 송신함으로써, 군집 무인기 네트워크의 다양한 조건(예: 노드 수, 송신 주기, 슬롯 길이 등.)에 따라 적응적으로 운용될 수 있다.

II. 시스템 모델 및 제안 방안

본 논문에서는 그림 1과 같이 다수의 무인기들이 주어진 임무를 수행하는 동안 상호 비행 정보 교환을 지원하는 군집 무인기 네트워크 환경을 고려한다. 또한, 제한된 주파수 자원 내에서 효율적인 송수신이 가능하며, 네트워크 확장이 용이하고, 높은 생존성을 제공하는 분산 네트워크에서 브로드캐스트 기반 패킷 전파 시나리오를 고려한다⁷⁾.

군집 무인기 네트워크를 구성하는 소형 무인기들은 지속적으로 이동하고 상태가 변하기 때문에 자신의 현재 상태를 지속적으로 인접 무인기들에게 알려야 하므로, 주로 유통되는 트래픽은 각 노드가 일정한 데이터 크기와 송신 주기로 생성하는 비행 정보 메시지이다⁸⁾. 이 비행 정보 메시지에는 무인기들 각각의 현재 위치, 속도, 자세 등 실시간 갱신된 정보가 담겨 인접 무인기들에게 전파되어야 하고, 현재 생성된 비행 정보는 다음 비행 정보 갱신 주기가 도래하기 전에 인접 노드에게 손실없이 전파되는 것이 중요하다. 만약 송신한 비행 정보 메시지가 전송을 실패하더라도 이미 과거의 정보가 된 메시지를 재전송하지 않고 다음에 새롭게 갱신된 비행 정보 메시지를 보내는 것이 군집 비행을 위해서는 더 효과적이다. 이에 따라, 이러한 트래픽 특성에 적합한 분산 다중 접속 프로토콜이 필요하다.

그림 2는 제안 방안인 SRB의 동작 예시를 나타낸 것이다. 그림 2-(a)를 참조하면, 노드는 송신 패킷 발생

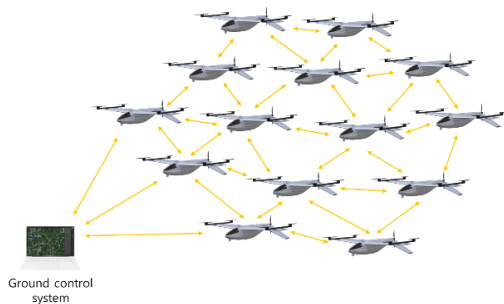


그림 1. 군집 무인기 네트워크 시스템 모델
Fig. 1. System model of UAV swarm networks

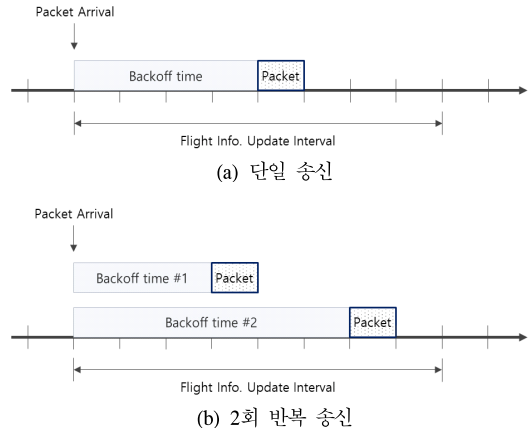


그림 2. SRB 동작 예시, (a) 단일 송신, (b) 2회 반복 송신
Fig. 2. An example of SRB protocol operation: a) single transmission, b) 2-time repetitive transmission

시 비행 정보 갱신 주기 내에서 random backoff 시간 동안 대기하고, backoff 시간이 만료되면, 즉각 패킷을 송신한다. 그에 따라 패킷은 항상 비행 정보 갱신 주기 내에 송신 가능하다. 또한, SRB는 네트워크 특성과 요구 성능에 따라 반복 송신을 지원하여 통신 성능을 조절할 수 있다. 그림 2-(b)와 같이 2회 반복 송신 시에는 노드가 송신할 패킷이 발생하면 비행 정보 갱신 주기 내에서 동일하지 않은 2개의 random backoff 시간을 추출하고 타이머를 시작한다. 해당 노드는 각 backoff 시간이 만료될 때마다 동일한 패킷을 송신한다. 이와 같은 방식으로 N 회 반복 송신이 가능하며, 이 경우에는 N 회 송신된 패킷 중 하나의 패킷만이라도 충돌없이 전송된다면 자신의 비행 정보를 제 시간에 인접 노드들에게 제공할 수 있게 된다. 이러한 SRB의 전송 성공 확률은 수학적으로 다음과 같이 표현된다⁹⁾.

$$P(n) = 1 - \left\{ 1 - \left(\frac{w-1}{w} \right)^{n(m-1)} \right\}^n \quad (1)$$

여기서, m 은 노드 수이고, w 는 정보 갱신 주기 동안의 슬롯 수이며, n 은 반복 송신 횟수이다.

III. 시뮬레이션 결과

노드 수 변화에 따른 제안 방안의 성능을 분석하기 위해 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. SRB의 단일 송신(SRB-1), 2회 반복 송신(SRB-2) 및 3회 반복 송신(SRB-3)에 대해 노드 수를 100, 200, 300, 400, 500대로 변화시키면서 각각 100번의 에피소드에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 비행 정보 갱신 주기는

20 Hz(0.05 sec)이고, 슬롯 길이는 100 μ s이다. 따라서, 비행 정보 갱신 주기 동안의 슬롯 수는 500개이다. CSMA를 벤치마크 방안으로 고려하여 Distributed Interface Frame Space (DIFS) 및 슬롯 길이를 100 μ s로 설정하고, Contention Window minimum (CWmin)은 전송 성공률 측면에서 최적의 성능을 제공하는 값을 찾아 노드 수 100대에서 127, 노드 수 200, 300, 400, 500대에서 63으로 선정하였다. 그림 3과 그림 4는 각각 노드 수에 따른 전송 성공률과 평균 지연 성능을 나타낸다.

그림 3은 노드 수의 증가에 따른 전송 성공률을 나타낸다. 노드 수가 증가함에 따라 충돌에 의한 패킷 손실이 발생할 확률이 높아지므로 전송 성공률은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 노드 수 200, 300대에서는 SRB-1보다 반복 송신을 통해 다이버시티 이득을 제공하여 일시적인 열악 채널에서 발생하는 패킷 오류를 극복할 수 있는 SRB-2, SRB-3의 전송 성공률이 높고, 노드 수 400대 이상에서는 반복 송신에 의해 망 부하가 포화되어 오히려 전송 성공률을 저하시키는 것을 확인할 수 있다. 노드 수가 100대인 경우 CSMA의 전송 성공률이 가장 높으나, 노드 수 200대 이상부터는 SRB-1, SRB-2 및 SRB-3의 전송 성공률이 CSMA보다 우수한 성능을 보인다. 노드 수 500대인 경우 SRB-1이 54.5%의 전송 성공률을 제공하는 것에 비해 CSMA는 38.0%의 낮은 전송 성공률을 갖는다. SRB는 송신 패킷 발생 시 결정된 backoff 시간이 만료되면 즉각적으로 패킷을 송신하지만, CSMA는 노드 수가 증가하여 경쟁이 심화될수록 backoff 시간이 길게 연장될 확률이 높고, 이로 인해 비행 정보 갱신 주기를 초과하는 패킷은 폐기되므로 전송 성공률이 크게 감소하게 된다.

그림 4는 노드 수의 증가에 따른 평균 지연을 나타낸다. 노드 수에 따른 평균 지연은 SRB-1과 CSMA이 유

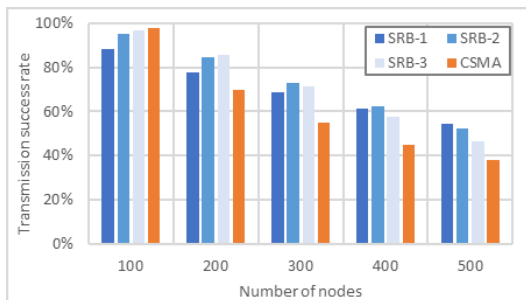


그림 3. 노드 수에 따른 전송 성공률 비교
Fig. 3. Comparison of transmission success rates according to the number of nodes

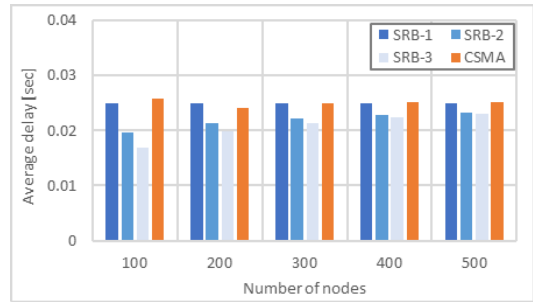


그림 4. 노드 수에 따른 평균 지연 비교
Fig. 4. Comparison of average delays according to the number of nodes

사하고, 그에 비해 SRB-2 및 SRB-3이 다소 우수한 평균 지연을 보인다. 특히, CSMA에서 패킷을 송신할 때 비행 정보 갱신 주기를 초과하는 패킷은 폐기하고 새로 생성된 패킷을 전송하므로 지연 성능은 유사하지만 전송 성공률이 감소하게 된다. 이로써, 시뮬레이션을 통해 제안하는 SRB가 CSMA와 비교하여 노드 수가 많을 때 전송 성공률 측면에서 우수한 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

수백대 이상의 소형 무인기들로 구성된 군집 무인기 네트워크는 다양한 활용성으로 인해 최근 많은 관심을 받고 있지만, 무인기들 간 협업을 위한 트래픽 특성을 고려하여 정확하고 신속한 상호 정보 교환을 지원하는 분산 다중 접속 프로토콜이 필요하다. 기존 CSMA는 노드 수가 증가할수록 전송 성공률 성능이 크게 저하되는 문제가 있다. 본 논문에서는 전송 성공률을 높이면서 구현 복잡도가 낮은 군집 무인기 네트워크를 위한 분산 다중 접속 프로토콜을 제안하였다. 제안 방안은 송신할 패킷이 발생하면 송신 주기 내에서 backoff 시간 동안 대기한 후 해당 패킷을 송신한다. 이를 통해, 패킷 충돌로 인한 전송 실패를 줄이면서 해당 송신 주기 내에서 해당 패킷을 전송할 수 있다. 또한, 동일한 비행 정보 패킷을 송신 주기 내에 반복 송신함으로써, 군집 무인기 네트워크의 다양한 조건에 따라 적응적으로 운용될 수 있다. 시뮬레이션을 통해 CSMA에 비해 노드 수가 많을 때 전송 성공률 측면에서 우수한 성능을 확인하였다.

References

- [1] H.-H. Choi, et al., "Idle-less slotted ALOHA protocol for drone swarm identification," *IEEE*

- Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8, pp. 11080-11085, Aug. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3261104>)
- [2] H. Myung, et al., "Research of small fixed-wing swarm UAS," *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, vol. 49, no. 12, pp. 971-980, Dec. 2021.
(<https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.12.971>)
- [3] S. Oh, et al., "Development of a simulator for validation of decentralized swarm flight control algorithm," in *Proc. KSAS 2019 Fall Conf.*, Jeju Island, Korea, Nov. 2018.
- [4] S. Lim, et al., "Decentralized hybrid flocking guidance for a swarm of small UAVs," in *Proc. Wkshp. RED UAS*, pp. 287-296, Nov. 2019.
(<https://doi.org/10.1109/REDUAS47371.2019.8999710>)
- [5] J. Ahn, et al., "Performance analysis of CSMA for drone swarm control networks," in *Proc. KICS Winter Conf. 2024*, Pyeongchang, Gangwon-do, Korea, Jan. 2024.
- [6] F. Wang, et al., "Analysis and compare of slotted and unslotted CSMA in IEEE 802.15.4," in *Proc. 5th Int. Conf. WiCom*, Sep. 2009.
(<https://doi.org/10.1109/WICOM.2009.5303580>)
- [7] Y. Kim, et al., "Performance analysis of probabilistic relay UAV selection method considering neighbor UAV characteristics in FANETs," *J. KICS*, vol. 49, no. 5, pp. 748-751, 2024.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2024.49.5.748>)
- [8] J. Jeon, et al., "HyPE: Online hybrid pseudo-Bayesian estimation method for S-ALOHA-based tactical FANETs," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 79957-79966, 2024.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3409779>)
- [9] T. S. Nunnikhoven, "A birthday problem solution for nonuniform birth frequencies," *The American Statistician*, vol. 46, no. 4, pp. 270-274, 1992.
(<https://doi.org/10.2307/2685309>)