

DDS 기반 다중영상 실시간 스트리밍 제안

Proposal for Real-Time Streaming of Multiple Videos Based on Data Distribution Service (DDS)

김 예 찬¹ · 안 민 지² · 최 원 혁³

Ye-Chan Kim¹ · Min-Ji An² · Won-Hyuk Choi³

요 약

본 연구는 DDS 기반의 ROS2 통신 구조를 활용하여 도시항공교통 시스템의 이착륙 안정성을 위한 실시간 영상 감시 시스템의 실용성을 검증한다. 기존 중앙집중형 시스템은 다중 노드에 대한 데이터 처리 시 병목 현상에 의한 지연시간 급증의 한계를 가진다. 본 연구는 ROS2의 미들웨어인 DDS를 활용하여 영상 데이터 전송 시 지상 관제소와 UAM 간 분산 네트워크 환경을 설계하고 시뮬레이션을 통해 실시간성과 신뢰성을 검증하였다. 라즈베리파이에서 Ubuntu와 ROS2를 탑재한 실험 환경에서 다양한 시나리오로 성능을 평가한 결과, 데이터 신뢰성과 적은 지연시간을 확인하였다. 본 시스템은 UAM 운영 안정성 확보에 기여할 것으로 기대된다.

Abstract

This study demonstrated that a real-time video surveillance system could be used to ensure the safety of urban air mobility (UAM) systems during take-off and landing. The system used a data distribution service (DDS)-based ROS2 communication structure. Current centralized systems have two main problems. First, they are slow because they must process data from various sources. This study designed a network environment between the ground control center and UAM for video data transmission using DDS, the middleware of ROS2, and verified its real-time performance and reliability through simulations. We tested its effectiveness in different situations in an experimental environment with Ubuntu and ROS2 on a Raspberry Pi. This confirmed that the data were reliable and the respondents responded quickly. This system is expected to help keep UAM operational.

Key words: DDS, ROS2, UAM, Computer Vision, Ground Control

I. 서 론

최근 전 세계적으로 도시 내 교통 체증 해결과 효율적인 미래교통수단으로 UAM(urban automatic mobility)의 개

발이 가속되고 있다. 특히 UAM 시스템의 효율적이고 안전한 운영을 위해서 기존 항공기 체계에서 필수적인 CNS(communication, navigation, surveillance) 체계를 위해서 다양한 기술적, 규제적인 방안 개발이 활발하다. 특히

한서대학교 항공전자공학과(Department of Avionics, Hanseo University)

1: 학부생(<https://orcid.org/0009-0005-4939-173X>), 2: 학부생(<https://orcid.org/0009-0002-0971-6120>),

3: 부교수(<https://orcid.org/0009-0003-0754-2494>)

· Manuscript received June 17, 2025 ; Revised July 24, 2025 ; Accepted August 17, 2025. (ID No. 20250617-002S)

· Corresponding Author: Won-hyuk Choi (e-mail: whchoi@hanseo.ac.kr)

UAM 통신 및 감시 시스템이 운영되는 도심 무선 통신 환경은 다중 경로 페이딩과 다양한 전자파 간섭으로 인해 통신 품질 유지가 어려운 환경이다. 이러한 환경에서 신뢰성과 적은 지연시간을 보장할 수 있는 통신 설계가 시스템 안전성을 위해 매우 중요하다. 기존에는 WebRTC (web real-time communication), RTSP(real-time streaming protocol) 등 미디어 중심 프로토콜이 드론·로봇 영상 송수신에 널리 활용되어 왔다^[1]. 하지만 해당 시스템은 노드 증가 시 병목현상에 의한 지연 증가 및 보안 및 신뢰성 같은 구조적 약점을 가진다. 특히, 다수의 카메라 노드 환경에서 자동화된 노드 탐색과 유연한 신뢰성 조정이 어렵다. 따라서 ROS2(robot operating system 2)의 미들웨어로 사용되는 DDS(data distribution service) 프로토콜을 사용하여 문제점을 해결하고자 하였다. ROS2는 로봇 운영체제로서 실시간 분산 통신 구조를 제공하고 있으며 DDS는 QoS(quality of service)를 통한 높은 데이터 신뢰성과 실시간 통신 능력을 보장하는 미들웨어이다. 본 연구에서는 DDS 기반 ROS2 통신 구조를 활용하여 분산형 실시간 영상 감시 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

II. 본 론

2.1 기존 연구 및 한계

WebRTC, RTSP 기반의 기존 영상 송수신 시스템은 UDP(user datagram protocol) 기반 전송 프로토콜로 실시간성이 우수하다. 하지만 패킷 손실 및 사이버 보안에 취약하여 항공 보안 표준을 만족하기 어렵다. 특히 RTSP는 트래픽 부하에 민감하고 WebRTC는 QoS 설정에 제약이 있어 실시간성과 신뢰성 보장이 어렵다. 기존 연구에서 ROS2를 활용한 통신 구조를 설계하였지만 단일 노드 전송에 국한되었다^[2]. WebRTC 기반 다중 UAV 모니터링 시스템도 구현됐으나 5대 이상의 노드에서 지연시간이 250 ms를 초과하여 실시간성이 저하되었다^[3]. RTSP 기반 시스템도 최대 350 ms 이상의 지연시간과 프레임 드롭이 보고되었다^[4]. 이러한 문제점을 보완하기 위해 ROS2의 DDS 통신 구조를 활용하여 다수의 드론 카메라 노드가 실시간 영상을 발행하고, 지상 관제 시스템이 원하는 노드의 영

상을 동적으로 선택하여 수신할 수 있는 publish/subscribe 형태 아키텍처를 설계하였다. 이를 통해 분산 네트워크 환경에서 다중 노드 통합성과 실시간성, 신뢰성 측면에서 기존 스트리밍 시스템 대비 향상된 성능을 보임을 시뮬레이션으로 검증하였다.

2.2 ROS2-DDS 기반 다중영상 감시 시스템

DDS는 OMG(object management group) 표준의 실시간 publish/subscribe 기반 프로토콜이다. ROS2 패키지에 포함되어 기본 데이터 전송 프로토콜로 사용된다. DDS의 특징은 자동 노드 발견(discovery), QoS 설정을 통한 신뢰도 조정을 지원하며 미들웨어로 동작하여 운영체제 및 프로그래밍 언어에서 자유롭다는 것이다^[5]. 무선통신 환경에서 DDS의 QoS 설정은 전파 감쇠와 페이딩 등 채널 상태에 따라 성능에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 적절한 QoS 레벨을 설정하는 것이 중요하다. 이러한 QoS 정책을 통해 무선 채널 상태 변화에 따라 통신의 신뢰성과 효율성 간 균형을 맞출 수 있다. 제안하는 시스템의 전체 구조는 그림 1과 같다.

시스템은 다중 드론 카메라 노드들과 지상 관제 노드로 구성된다. 각 드론 노드는 마이크로컴퓨터를 기반으로 카메라를 연결하여 영상을 얻고 영상을 퍼블리셔 노드로 송신한다. 영상 데이터는 DDS를 통해 네트워크로 전송되어 처리된다.

III. 시뮬레이션

3.1 실험 환경 및 변수 설정

시스템 성능 평가를 위해 실험 시뮬레이션 환경을 표 1에

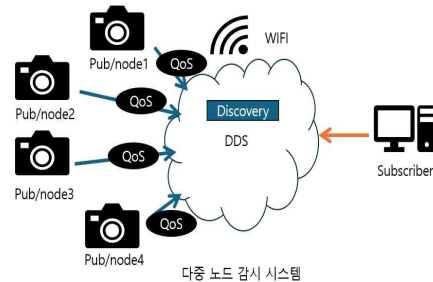


그림 1. DDS 기반 다중영상 감시 시스템 아키텍처
Fig. 1. DDS-based multi-video surveillance system architecture.

표 1. 시뮬레이션 조건표

Table 1. Simulation parameter table.

Camera node	Rassberry Pi 4B+camera(640 p)
Server	Ubuntu 20.04 based PC (radeon)
Network environment	802.11ac Wi-Fi (100 Mbps)
Video settings	Resolution: 640×480
DDS implementations	eProxima Fast-DDS v2.4.2
QoS settings	RELIABLE (reliability mode)

나타내었다. 실험 환경에서 역할과 실제 사용 장비 및 기술을 표기하였다. ROS2 통신을 위해 각 노드를 동일 DDS 메인으로 구성하였다. 카메라 노드는 Python 기반으로 작성하고 OpenCV(open-source computer vision) 라이브러리를 통해 주기적으로 영상 프레임 캡처를 실행하여 ROS2 토픽으로 이미지를 발행하였다. 지상 서버는 해당 토픽을 구독하여 영상을 수신 및 디코딩하고 수신된 영상을 실시간 표시하고 타임스탬프를 기록한다. WebRTC와 RTSP 기반 비교 실험을 위해서는 각각 Google Chrome 기반 WebRTC 스트리밍 서버와 VLC(videoLAN client) 기반 RTSP 서버를 구축을 가정하였고, 동일한 카메라 입력을 전송하는 환경을 설정하였다. 성능 평가지표로 전송 지연 시간과 패킷 손실률을 선택하였다. 총 전송 지연 시간(D_{max})은 식 (1)에 의해 카메라에서 프레임이 포착되어 지상관제 노드에서 디스플레이 될 때까지의 총 경과 시간을 의미한다. 이는 무선통신 과정에서 서비스 품질을 비교하여 실시간 무선통신이 중요한 스트리밍에서 중요한 평가지표로 사용할 수 있다. 패킷 손실률($Loss_p$)은 식 (2)에 의해 전송된 전체 영상 패킷 중 손실된 패킷의 비율로 정의한다. 이는 전파 감쇠, 페이딩, 간섭 등 무선 물리 계층 현상을 직접 반영하므로 채널 신뢰도와 시스템 효율성을 동시 평가할 수 있다.

표 2에서 식 (1) 및 식 (2)에 사용된 주요 파라미터의 의미를 정리하였다.

$$D_{max} = D_{ednc} + d_{tx} + T_{meta} + D_{sampling} \quad (1)$$

$$Loss_p = \frac{P_{loss}}{P_{total}} \quad (2)$$

표 2. 수식 파라미터

Table 2. Expression parameter table.

$D_{Sampling}$	Camera frame sampling delay
D_{ednc}	Video encoding + decoding delay
d_{tx}	Network transmission + propagation delay
T_{meta}	Data delay values by protocol
P_{loss}	Protocol packet loss
P_{total}	Protocol total packet volume

3-2 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 2는 노드 수 변화에 따른 평균 전송 지연 시간의 추이를 보여준다.

DDS는 노드 수가 증가해도 평균 지연시간 기울기가 완만하여 다수 노드 동시 운용 시에도 지연이 큰 폭으로 증가하지 않았다. 반면 그 외의 지연시간은 노드 수 증가에 따라 급격히 상승하는 경향을 보였다. 실시간성 기준에 대한 검증에 위해 단일 노드 기준의 절대 지연 시간도 측정하였다. 드론 카메라 노드 1대와 지상 서버 1대를 연결하여 영상 스트리밍을 수행한 결과, 평균 약 160~200 ms의 end-to-end 지연시간을 보였다. 이는 사람의 움직임 인지 한계로 제시되는 약 250 ms 이내의 수치로서 제안 시스템이 기본적으로 실시간 모니터링에 적합함을 알 수 있다⁶⁾. 그림 3은 프로토콜 종류별 패킷 손실률을 비교한 것이다. 패킷 손실률의 측면에서 DDS는 QoS를 통해 패킷 손실

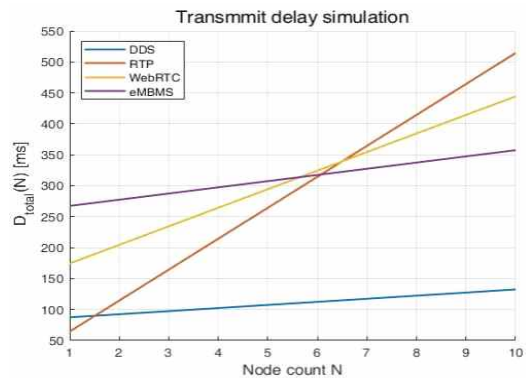


그림 2. 노드 당 지연시간 증가 폭 비교
Fig. 2. Compare latency growth per node.

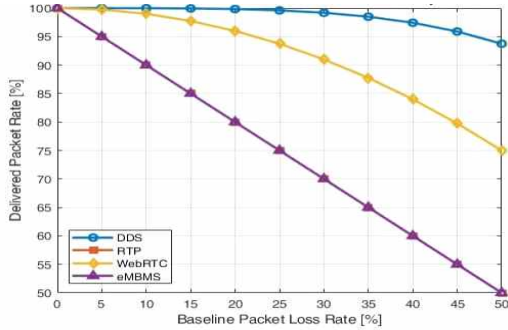


그림 3. 프로토콜 종류별 패킷 손실률 비교
Fig. 3. Compare packet loss rates by protocol type.

시 재전송이 가능하기 때문에 모든 실험 구간에서 0.5 % 미만의 매우 낮은 손실률을 유지하였다. 반대로 WebRTC와 RTSP의 경우 노드가 많아질수록 패킷 충돌 및 재전송 불가로 인해 손실률이 50 % 이상 증가하였다. 추가로 일시적인 네트워크 단절 상황의 경우 DDS 시스템의 전체 패킷 손실률이 0.53 % 상승하였지만 스트리밍 송출에는 큰 변화가 없었다. 반면 WebRTC와 RTSP는 재전송 기능 부재로 인해 해당 단절 구간의 데이터를 전달하지 못하여 영상 스트림이 일시적으로 끊기는 현상이 발생하였다. 다양한 시나리오에서도 제안 DDS 시스템이 경쟁 기법 대비 우수한 신뢰성과 실시간성을 유지함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 ROS2-DDS 통신 구조를 활용하여 다중 드론 영상 감시 통신 구조를 설계하고 그 성능을 평가하였다. 시뮬레이션에서는 제안 시스템과 기존 유사 시스템을 동일 조건에서 비교하여 지연 시간, 패킷 손실률 변화를 분석하였다. 그 결과 다양한 통신 구조적 이점을 통해 다수 노드 환경에서 다른 프로토콜 대비 전송 평균 지연 160~200 ms, 손실률 0.5 % 미만으로 우수한 성능을 나타내었다. DDS 프로토콜은 항공산업 도메인에서 표준 규격으로 채택되어 안전성이 입증되고 있으며, 실제 항공 소프트웨어 인증을 위한 DO-178C DAL A 준수 패키지와의 IMA(integrated modular avionics) 플랫폼 지원 등을 통해 향후 인증 가능성을 확보할 수 있다. 본 연구의 시뮬레이션은 비교적 제한된 실험실 환경과 노드 수로 이루어져

실제 도심 환경에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 향후 연구 방향으로서는 실제 도심 환경에서 10 개 이상의 다중 노드를 운용 및 대용량 영상 전송의 효율을 높이기 위해 영상 코덱 및 압축 알고리즘 최적화 및 DDS-security를 적용하여 UAM 운용 환경의 사이버 보안 및 통신 전반의 암호화 및 인증 기능을 강화할 예정이다. 최종적으로, 엣지 컴퓨팅 개념을 도입하여 드론 노드 단에서 AI(artificial intelligence) 기반 영상처리를 적용한 시스템 연구가 필요하다.

References

- [1] J. Jeon, D. Kim, J. Ko, and W. Moon, "Optical equipment utilization technology for UAM vertiport final approach path monitoring," *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 27, no. 6, pp. 804-814, Dec. 2023.
- [2] H. S. Mahdi, K. R. Kumar, and K. J. D. Christophe, "Real-Time drone communication system using ROS 2 and GStreamer with YOLOv8-Seg for face segmentation," *International Journal of Computer Engineering Science and Engineering Networks(IJCESEN)*, vol. 11, no. 2, pp. 3596-3605, May 2025.
- [3] F. Kilic, M. Hassan, and W. Hardt, "Prototype for multi-UAV monitoring-control system using WebRTC," *Drones*, vol. 8, no. 10, p. 551, Oct. 2024.
- [4] D. Mejias, Z. Fernández, R. Viola, A. Aramburu, I. Lopez, and A. Diaz, "Towards railways remote driving: Analysis of video streaming latency and adaptive rate control," in *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit(EuCNC/6G Summit)*, Antwerp, Jun. 2024.
- [5] G. Sciangula, D. Casini, A. Biondi, C. Scordino, and M. Di-Natale, "Bounding the data-delivery latency of DDS messages in real-time applications," in *35th Euromicro Conference on Real-Time Systems(ECRTS 2023)*, Vienna, Jul. 2023.
- [6] H. Hagiwara, K. Araki, A. Michimori, and M. Saito, "A study on the quantitative evaluation method of human alertness and its application," *Seishin Shinkeigaku Zasshi(Psychiatria et Neurologia Japonica)*, vol. 99, no. 1, pp. 23-34, Jan. 1997.