

# MQTT 기반 통신 프레임워크를 사용한 대규모 UAV 네트워크의 저지연 디지털 트윈 연구

안도현, 주현태\*, 이동규\*, 김황남\*

고려대학교 스마트융합학과, \*전기전자공학부

{sinsiga1905, motern800, roylee6315, hnkim}@korea.ac.kr

## Enabling Low-Latency Digital Twins for Large-Scale UAV Networks using MQTT-Based Communication Framework

Dohyun An, Hyeontae Joo\*, Dongkyu 'Roy' Lee\*, Hwangnam Kim\*

Department of Smart Convergence, \*School of Electrical Engineering, Korea University

### 요약

최근 대규모 무인항공기 (UAV) 네트워킹에서는 실시간 위치 정보의 정확한 업데이트가 점점 중요해지고 있으며, 이를 지원하는 효율적인 통신 방법의 필요성이 증가하고 있다. 이에 본 논문에서는 시뮬레이션 환경을 통해 구축된 대규모 UAV 네트워크에서 위치 정보를 실시간으로 업데이트하기 위한 Message Queueing Telemetry Transport (MQTT) 기반의 프레임워크를 제안한다. 이 연구의 목적은 기존 소켓 통신과 비교하여 MQTT 기반 통신 프레임워크를 적용할 때, 위치 정보의 실시간 업데이트를 보장하는 데 있어 더 우수한 성능을 제공함을 입증하는 것이며, 실험 과정에서는 이를 위해 지연시간, 지터, 수율의 개선 여부 및 개선율을 검토한다. 결과적으로, MQTT 기반 통신 프레임워크는 위치 정보의 실시간 업데이트를 보장하는 데 있어 소켓 통신보다 뛰어난 성능을 제공함을 확인하였고, 이는 대규모 UAV 네트워크의 저지연 디지털 트윈을 위한 효과적인 네트워크 솔루션으로 활용될 수 있음을 보여준다.

### I. 서론

디지털 트윈(Digital Twin)은 특정 환경의 포괄적인 디지털 표현으로, 대규모 무인항공기(UAV) 네트워킹이 군사, 공공 및 민간 영역에서 다양하게 요구되기 시작하면서, 저지연 디지털 트윈을 위한 실시간 정보 전송에 관한 관심이 증가하고 있다. 특히, 제한된 리소스를 가진 UAV 노드들로 구성된 네트워크에서 노드들의 높은 이동성과 환경 변동성을 극복하고 신속하고 정확하게 데이터를 전송하는 것은 상당히 어려운 과제이다.[1, 2] 기존에 널리 사용되는 전송 제어 프로토콜(Transmission Control Protocol: TCP) 기반의 소켓 통신은 신뢰성 있는 데이터 전송을 제공하나, 연결 지향적인 특성으로 인해 처리량 저하, 네트워크 자원 활용의 비효율성, 데이터 전송 중 과도한 지연 및 중단 문제를 야기한다.[3] 이러한 문제들은 대규모 UAV 네트워킹에서 실시간 위치 정보 업데이트를 통한 임무 수행을 저해하는 요인이 된다.

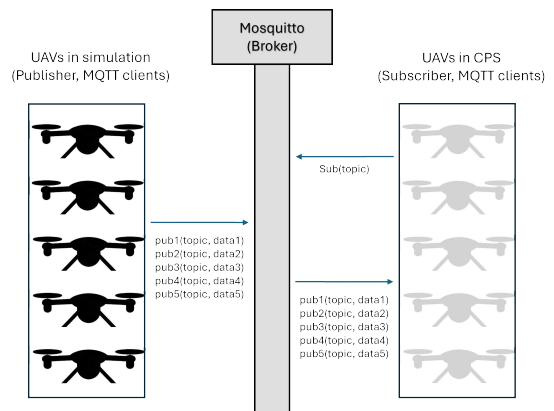
이에 반해, Message Queuing Telemetry Transport(MQTT)는 발행(publisher)-구독(subscriber) 모델을 기반으로 하는 경량 메시징 프로토콜로, 비동기적 메시지 전송을 지원하여 네트워크 상태가 불안정하거나 자원이 제한된 환경에서도 높은 수율과 낮은 대기 시간을 제공한다. [4] 또한, MQTT의 세션 지속성(session persistence) 기능은 UAV 노드가 이동 중이거나 네트워크 혼잡으로 인해 UAV 노드와의 연결이 끊기더라도 각 메시지를 독립적으로 처리하기 때문에 네트워크의 요구 사항에 따라 유연하게 데이터를 전송할 수 있도록 보장한다.[5]

본 논문에서 제안하는 중앙 집중식 MQTT 기반 통신 프레임워크(Centralized MQTT-based Communication algorithm: CMQC)은 성능 지표인 지연시간(latency), 지터(jitter), 수율(throughput)을 개선하여 대규모 UAV 네트워크에서 실시간 위치 정보 업데이트 성능을 효과적으로 향상할 수 있다. 이를 검증하기 위해, 대규모 UAV 네트워킹을 시뮬레이션하고 두 통신 방식의 성능을 비교 분석하였다.

### II. 본론

#### 2.1. 실험 개요 및 시뮬레이션 환경 구축

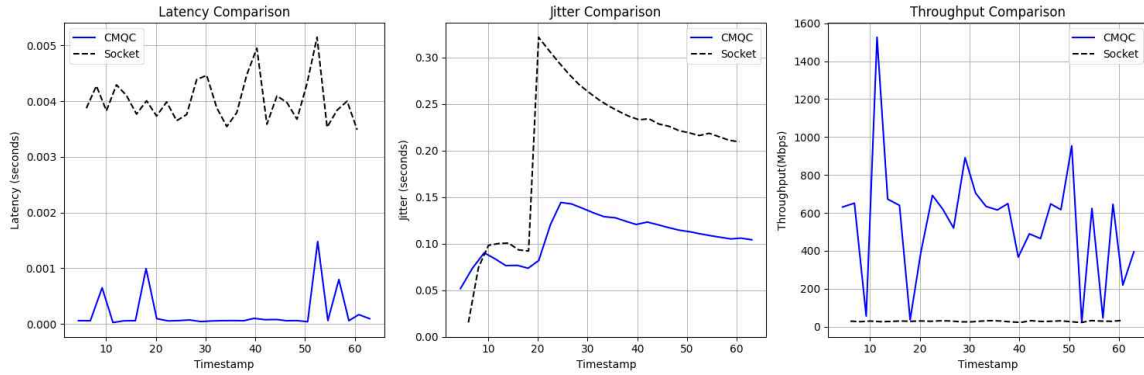
본 실험의 목적은 대규모 UAV 네트워크에서 CMQC와 TCP 소켓 통신의 성능을 비교 분석하는 것이다. 이를 위해, 윈도우에 설치된 Webots R2023a 소프트웨어를 사용하여 실시간 위치 정보의 업데이트를 처리하는 200대의 UAV가 포함된 복잡한 네트워킹 시나리오를 구축하였다. 브로커 역할을 수행하는 Mosquitto (2.0.18v)는 리눅스 기반 Ubuntu 22.04 시스템에 설치되어 MQTT 통신을 관리한다. [그림 1]에서도 확인할 수 있듯이 리눅스 환경에서는 전송된 위치 정보를 바탕으로 실시간 네트워크 업데이트를 진행하는 파이썬 기반의 MQTT 클라이언트 파일이 실행된다.



[그림 1] CMQC를 이용한 UAV 데이터 통신 구조

#### 2.2. CMQC 구현 및 데이터 수집

본 논문에서 제안된 CMQC는 중앙 컨트롤러를 사용하여 MQTT 프로토콜을 통해 200대의 UAV에서 수집된 위치 데이터를 실시간으로 처리하고



[그림 3] 소켓 통신 대비 CMQC 성능 평가 결과

```

drone_identifiers ← []
for i ← 1 to 200 do
  drone_id ← getFromDef("drone." + i)
  if drone_id is not None then
    drone_identifiers.append(drone_id)
  end
end
for drone_id in drone_identifiers do
  if current_time - drone_last_sent_time[drone_id] ≥ TWO_SECONDS
  then
    publish(mqtt_client, topic, data)
  end
end

```

Algorithm 1: CMQC: Centralized MQTT-based Communication

[그림 2] CMQC 구현

발행하는 방식으로 구현되었다. CMQC에 의해 각 UAV가 위치 정보는 일정 시간 간격으로 MQTT 브로커에게 발행된다. 데이터 수집은 클라이언트가 주제(topic)에 따라 브로커에게 저장된 메시지를 수신할 때마다 이루어진다. 수신 시 호출되는 콜백함수들에 의해 메시지는 JSON 형식으로 파싱되고, 이러한 데이터는 성능 분석 및 네트워크 실시간 업데이트에 사용된다.

### III. 성능 평가

본 연구에서는 CMQC 성능을 소켓 통신과 비교 및 평가하기 위해 지연 시간(latency), 지터(jitter), 그리고 수율(throughput)을 주요 성능 지표로 채택하였다. 각 지표의 계산은 실시간으로 수집된 데이터를 바탕으로 진행되었다. 지연시간은 메시지가 UAV에서 전송된 시점부터 리눅스 환경의 클라이언트에 도달하기까지의 시간을 측정하였다. 지터는 특정 드론의 데이터가 연속적으로 도착할 때 연속한 두 시간 차이의 표준 편차로 계산하였다. 수율은 타임스탬프당 첫 번째 데이터가 전송되기 시작했을 때부터 마지막 200번째 데이터의 전송이 완료되었을 때까지의 총 전송 시간을 구하고, 이 시간동안 전송된 총 데이터량을 기준으로 측정하였다. Wireshark를 통해 총 데이터량을 측정한 결과 CMQC의 경우 860kbytes, 소켓 통신의 경우 2688kbytes임을 확인했다.

[표 1]의 성능 지표들은 약 1분간 30회 정도의 간격으로 측정하였다. 지연시간과 수율의 경우 평균을 통해, 지터의 경우 연속된 두 시간의 차이가 누적되므로 가장 마지막 값을 기준으로 개선율을 계산하였다.

### IV. 결론

본 논문에서는 대규모 UAV 네트워크의 실시간 위치 정보 업데이트를 위한 중앙 집중식 MQTT 기반 통신 프레임워크(CMQC)를 제안하고, 이를 전통적인 소켓 통신과의 성능 비교를 통해 평가하였다. 실험 결과, CMQC는 지연시간, 지터, 수율 등 모든 주요 성능 지표에서 우수한 결과를 보여 저지연 네트워크 트윈을 위한 실시간 데이터 전송에 효과적인 프

성능 지표	CMQC	소켓	개선율
지연시간(ms)	.195	4.015	CMQC가 20.6배 낮음
지터(s)	.104	.210	CMQC가 50% 낮음
수율(Mbps)	550.683	28.451	CMQC가 19.4배 높음

[표 1] CMQC와 TCP 소켓 통신 성능 비교 및 평가

레이미워크임을 확인할 수 있었다. 이를 통해 추후 CMQC를 사용해 대규모 UAV 환경의 디지털 트윈을 구성하는 연구를 진행할 예정이다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업(IITP-2024-2021-0-01835), 그리고 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-23-041, LiDAR/RADAR 지원 엣지 AI 기반의 고신뢰 IR/UV FSO/OCC 특화연구실).

## 참고 문헌

- [1] S. Lee, H. Joo, and H. Kim, "Discovering Optimal Transmission Path Based on Genetic Algorithm for Time Sensitive Traffic in Software-Defined Networks," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 48, no. 7, pp. 816-825, 2023.
- [2] Botín-Sanabria et al., "Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review," Remote Sensing. 2022; 14(6):1335.
- [3] Ye Tian, Kai Xu and N. Ansari, "TCP in wireless environments: problems and solutions," in IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 3, pp. S27-S32, March 2005.
- [4] M. B. Yassein, M. Q. Shatnawi, S. Aljwarneh and R. Al-Hatmi, "Internet of Things: Survey and open issues of MQTT protocol," 2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), Monastir, Tunisia, 2017, pp. 1-6.
- [5] B. Mishra and A. Kertesz, "The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey," in IEEE Access, vol. 8, pp. 201071-201086, 2020.