

무선 멀티 홉 네트워크 환경에서 ROS 2의 신뢰성 있는 통신에 대한 중단 간 지연 분석

김태현, 이상훈, 박경준*
대구경북과학기술원

3nz85ag@dgist.ac.kr, leesh2913@dgist.ac.kr *kjp@dgist.ac.kr

End-to-End Latency Analysis of Reliable Communication in ROS 2 over Wireless Multi-hop Networks

Taehyun Kim, Sanghoon Lee, Kyung-Joon Park*
DGIST.

요 약

본 연구는 ROS2(Robot Operating System 2) 기반 무선 멀티 홉 네트워크 환경의 신뢰성 통신이 갖는 중단간 지연을 분석하고 그 원인을 규명한다. ROS2는 DDS(Data Distribution Service) 미들웨어의 QoS(Quality of Service) 정책을 통해 다양한 로봇 시스템의 서비스를 보장한다. 멀티 홉 네트워크는 여러 중계 노드를 통해 데이터를 송수신하는 방식으로, 기존의 통신 범위보다 넓은 범위를 사용할 수 있다. 본 논문에서는 실제 ROS2 기반의 멀티 홉 네트워크 환경을 설정하여 Subscriber의 수, 데이터 크기에 따른 중단간 지연을 비교 분석하고, 멀티 홉 멀티 노드 시스템의 최적화 연구의 필요성에 대해 제시한다.

I. 서 론

ROS(Robot Operating System)는 로봇 소프트웨어 개발을 간소화하고 효율적으로 만들기 위해 개발된 오픈소스 로봇 미들웨어로 로봇 연구와 개발 분야에서 널리 활용되어 왔다. 하지만 ROS는 실시간 시스템 지원의 미흡과 여러 로봇을 제어하는 분산 시스템에 대한 문제점이 존재하였다. 이를 해결하고자 2017년 ROS 2(Robot Operating System 2)이 배포되었으며, 실시간성과 확장성을 바탕으로 군집 비행, 해양 및 우주 탐사, 군사 응용 등 상황에서도 안정적이고 효율적인 제어를 위해 사용되고 있다[1].

무선 멀티 홉 네트워크는 데이터를 목적지까지 전달하기 위해 여러 개의 중계 노드를 거치는 구조로 통신 범위를 확장할 수 있는 장점이 있다. 하지만 각 홉을 지날 때 마다 통신 지연이 누적으로 증가하며, 이는 통신의 단절 상황의 원인이 되기도 한다[2]. 이와 같은 지연 누적 및 단절은 실시간성이 필수적인 로봇 시스템에 심각한 영향을 미친다[3].

본 연구에서는 ROS2 기반 멀티 홉 네트워크 환경에서 데이터 전송의 신뢰성을 제공하는 환경을 설정한다. 또한 중계 노드의 수와 패킷 데이터 크기에 따라 패킷 전송 실험을 수행하고, 이를 통해 중단간 지연을 측정하여 발생 원인을 분석하고자 한다.

II. ROS 2의 신뢰성 통신

ROS2는 DDS(Data Distribution Service) 미들웨어를 사용하여 노드 간 메시지 전달을 수행하며, 이를 통해 실시간성과 제공한다[4]. DDS는 토픽에 대해 데이터를 송신하는 Publisher와 수신하는 Subscriber 모델을 기반으로 데이터를 교환한다. 또한 다양한 로봇 시스템을 만족시키기 위해 7가지의 QoS(Quality of Service) 기능을 제공하고 있으며, 그 중 데이터의 신뢰성 보장과 관련 있는 기능은 Best Effort와 Reliable이다[5]. Best Effort는 실시간성을 중요 시 여겨 재전송 프로세스가 존재하지 않는 데이터를 송신 기술이다. Reliable는 신뢰성 보장을

위해 HEARTBEAT, ACKNACK 메시지를 이용한 재전송 메커니즘을 사용한다. HEARTBEAT 메시지는 Publisher를 통해 주기적으로 송신되며, Subscriber의 메시지 누락 여부를 물어본다. 만약 Subscriber가 토픽에 대한 데이터가 누락되었다면 HEARTBEAT의 응답인 ACKNACK 메시지에 누락된 데이터 번호를 Publisher에게 송신하여 누락된 메시지의 정보를 알린다.

그림1은 DDS의 Reliable 설정에서 데이터 손실이 발생했을 때 HEARTBEAT와 ACKNACK을 이용한 재전송 구조를 나타낸다. Publisher가 DATA 1, 2, 3을 Subscriber에게 송신하지만 Subscriber는 DATA 2, 3을 수신 받지 못한다. Publisher는 HEARTBEAT를 Subscriber에게 송신하고 Subscriber는 응답으로 수신 받지 못한 데이터 번호를 포함한 ACKNACK을 Publisher에게 송신한다. 이후 Publisher는 ACKNACK 값을 확인 후 누락된 DATA 2, 3을 재전송한다.

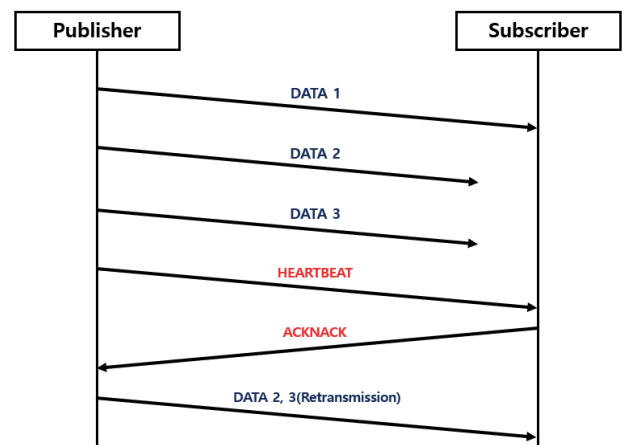


그림 1. 신뢰성 있는 ROS2 시스템

신뢰성 있는 멀티 홉 ROS2 네트워크 시스템은 그림 2와 같이 각 홉 간에 HEARTBEAT와 ACKNACK 메시지를 송수신하여 데이터 재전송한다. Publisher는 주기적

로 HEARTBEAT 메시지를 통해 Subscriber에게 전송 가능한 데이터 상태를 알리고, Subscriber는 수신하지 못한 데이터 번호를 ACKNACK 메시지로 알려 재전송을 진행한다. 재전송 과정은 각 홉에서 독립적으로 반복되어 데이터 누락을 방지한다. 이를 통해 최종 Subscriber까지 데이터가 신뢰성 있게 전달한다.

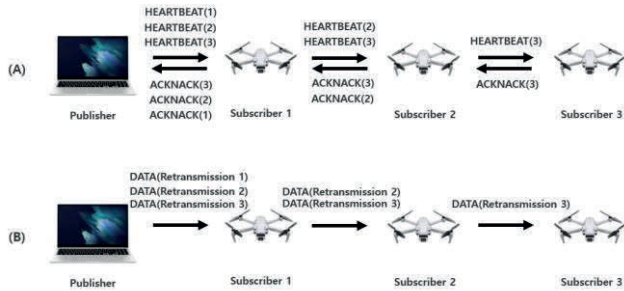


그림 2. 신뢰성 있는 멀티 홉 네트워크 시스템
(A) HEARTBEAT/ACKNACK, (B) 데이터 재전송

III. 신뢰성 있는 멀티홉 네트워크 중단간 지연 비교 분석

그림 2와 같은 구조로 ROS2 기반의 멀티 홉 네트워크 환경에서 중단간 지연을 실제 실험을 통해 분석한다. 무선 네트워크는 Ad-hoc모드(802.11n)로 구성하며, ROS2의 DDS 미들웨어로는 Fast-DDS(2.6.9v)를 사용한다. 또한 데이터의 신뢰성 보장을 위해 QoS는 Reliability의 Reliable로 설정하고, 3개의 Publisher가 각각 64KB, 128KB, 160KB 크기의 데이터를 100개 송신하여 Subscriber 데이터를 수신할 때의 중단간 지연을 측정한다.

표 1. 실험 환경

구분	상세 구분
Network	Ad-hoc(802.11n)
DDS	Fast-DDS(2.6.9v)
QoS	Reliability (Reliable)
Subscriber N	3
DATA size	64KB, 128KB, 160KB
DATA N	100

그림 3은 Subscriber의 수와 데이터 크기에 따른 중단간 지연을 나타내는 그래프로, 데이터 크기와 Subscriber 수가 증가할수록 중단간 지연이 비례적으로 증가하는 경향을 보인다. 데이터 크기가 64KB인 경우, 손실이 발생하지 않아 데이터 재전송 과정이 생기지 않고, 중계 노드의 처리 과정에서만 중단간 지연이 발생한다. 반면 128KB 데이터 크기의 경우에는 누락된 데이터의 재전송 과정이 발생하여 중단간 지연이 증가하지만, 증가폭은 상대적으로 작아 크게 유의미하지 않다. 그러나 160KB 데이터 크기에서는 첫 번째 Subscriber의 평균 지연이 약 1.9ms였으나, 두 번째 Subscriber에서는 약 7.9ms로 급격하게 증가하였다. 특히 세 번째 Subscriber에서는 네트워크의 포화상태로 인해 데이터가 도착하지 않아 지연을 측정할 수 없었으며, 이는 Subscriber 수와 데이터 크기의 증가로 인해 중계 노드의 부하와 패킷 손실로 인해 재전송 메시지 및 누락된 데이터 전송 횟수의 빈도가 급격히 증가했기 때문이다.

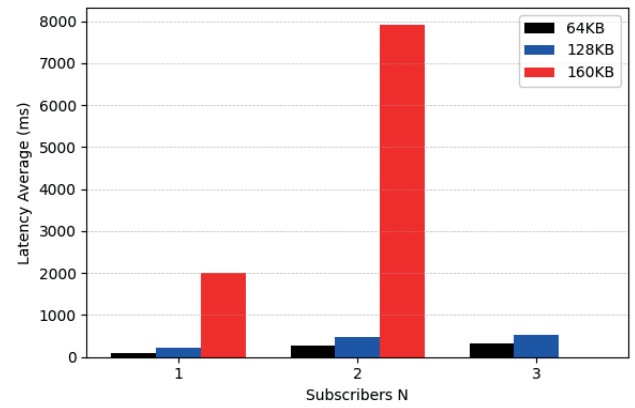


그림 3. 신뢰성 있는 멀티 홉 ROS2 시스템 중단 간 지연

IV. 결론

본 논문은 신뢰성 있는 ROS2 기반의 멀티 홉 네트워크 환경에서 홉 수 증가에 따른 재전송 메커니즘과 중단간 지연 증가를 실험적으로 분석한다. DDS 미들웨어의 HEARTBEAT와 ACKNACK 메시지를 이용한 재전송이 홉 수의 증가 및 데이터 크기 증가에 따라 지연을 급격히 상승시키는 주요 원인임을 확인한다. 실험 결과, 큰 데이터 크기(160KB)에서는 subscriber 수가 증가함에 따라 비선형적으로 지연이 증가하였으며, 이는 재전송에 의한 네트워크 포화상태 때문임을 확인하였다. ROS2를 활용한 멀티 홉 네트워크 시스템을 설계할 때는 데이터 크기, Subscriber 수, QoS 설정 등을 종합적으로 고려하여 지연 증가를 최소화하는 전략이 요구된다. 향후 연구로는 QoS 최적화 및 재전송 메커니즘 최적화 알고리즘을 통해 멀티 홉 네트워크에서 성능 저하를 효과적으로 관리할 수 있는 방안을 보장하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] Macenski, Steven, et al. "Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild." Science robotics 7.66 (2022): eabm6074.
- [2] Park, Hyung-Seok, Sangheung Lee, and Kyung-Joon Park. "Wireless sdn self-recovery for unmanned swarm cyber-physical systems." 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2021.
- [3] Son, Sunghwa, Gwangjin Wi, and Kyung-Joon Park. "Situation-aware survivable network design for tactical environments." Applied sciences 12.13 (2022): 6738.
- [4] Pardo-Castellote, Gerardo. "Omg data-distribution service: Architectural overview." 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings.. IEEE, 2003.
- [5] Park, Hyung-Seok, Sangheung Lee, Doosik Um, Hyunho Ryu and Kyung-Joon Park. (in press). "An Analytical Latency Model of the Data Distribution Service in ROS 2." IEEE INFOCOM 2025-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2025.