

산업 현장의 무인 이동 로봇을 위한 IEEE 802.11 기반의 멀티-홉 네트워크 구축에 관한 연구

정우성, 윤태현, 유대승

한국전자통신연구원

{woosung, thyoon0820, ooseyds}@etri.re.kr

Research on the construction of IEEE 802.11 based multi-hop network for unmanned mobile robot in the industrial environment

Woo-Sung Jung, Taehyun Yoon, and Dae Seung Yoo

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

고위험 산업 현장에서 이동 로봇을 활용한 모니터링 작업은 점차 확대되고 있다. 무인 로봇의 운용을 위해서는 로봇 스스로 상황을 판단하는 AI 기능도 필요하지만, 기본적으로 원격지에 있는 관제 센터와의 정보 교환을 위한 네트워크가 필수적으로 요구되고 있다. 하지만 산업 현장에서는 다양한 구조물로 인한 통신 방해 등으로 인하여 셀룰러 네트워크 이외에도 ISM 대역의 보조 네트워크 활용이 요구된다. 본 논문에서는 로봇을 위한 Wi-Fi의 현 표준 및 추가 고려 사항에 관해서 확인해 본다.

I. 서론

고위험 산업 현장의 안전사고 예방 및 작업의 효율성 향상을 위해서 작업자의 간섭 없이 운용이 가능한 무인 로봇의 현장 적용 요구가 커지고 있다. 전력을 위한 지하 공동구에서 모니터링을 위한 무인 로봇의 운용 [1]과 조선소 위험 작업 현장의 무인 로봇 운용 [2] 등은 이러한 요구에 맞추어 무인 로봇을 작업 현장에 적용한 대표적인 예이다. 무인로봇의 확산은 5G 네트워크와 같은 초고속 저지연 특성을 가지는 네트워크의 적용으로 점차 가속화 되고 있다. [3] 이와 더불어 기존 네트워크의 통신 음영 지역으로 인하여 무인 로봇의 운용이 어려웠던 환경에 대해서도 다양한 이기종 네트워크를 같이 활용함으로써 로봇 운용 가능 지역도 점차 확대되어 가고 있다. [4]

네트워크 음영지역의 감소를 위해서는 고정된 통신 기반 시설의 설치와 더불어 현장 상황에 맞추어 가변적인 통신 시설의 구성이 필수적으로 요구되고 있다. 이러한 요구를 충족하기 위해서 주파수 사용에 비용이 드는 면허 대역보다는 현장의 필요에 따라 자유롭게 설치와 이동이 가능한 비면허 대역을 활용하는 네트워크 운용이 중요하다. 영상과 같은 고용량의 데이터를 무선으로 전송하기 위해서는 높은 대역폭을 지원할 수 있는 무선 멀티 홉 네트워크의 운용이 요구되고 있으며, 통신 기반 시설과 무인 로봇 사이의 끊어짐 없는 연결성을 제공하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 산업 현장에서 비면허 대역의 주파수를 이용하여 무인 로봇 운용을 위한 네트워크 실험 결과를 토대로 네트워크의 요구되는 기능에 대해서 분석하고 추후 무인 로봇을 위한 네트워크 운용의 필수 기능 구축을 위한 사항을 확인해 본다.

II. 본론

무선 백본 네트워크 구축을 위해서는 IEEE 802.11s, Wi-Fi Alliance의 Easy Mesh 및 Fast Roaming을 기반으로 네트워크 구축을 진행하였다. 본 표준에 기반한 실험 결과를 분석하고 최근 IEEE 802.11be의 멀티 링크 기능에 대한 간단한 소개 및 적용 가능성에 대해서 알아본다.

1) Wi-Fi Mesh Network (802.11s)와 Wi-Fi Easy Mesh

IEEE 802.11s 표준 [5]은 무선랜을 기반으로 한 멀티 홉 네트워크 구성을 위해서 정의된 표준이다. Layer 2에서 멀티 홉을 위한 라우팅 기능을 수행하며, 일반적인 Wi-Fi 네트워크 클라이언트는 별도의 라우팅 프로토콜이 없이도 2-홉 이상의 네트워크 단말에 MAC 프레임 전달할 수 있도록 기존 장비들의 네트워크 확장을 지원한다. MAC에서 지원하는 라우팅 프로토콜은 HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)를 사용하며, 움직임이 적은 백본 네트워크를 위한 Proactive 방식과 이동하는 노드를 위한 On-demand 방식의 경로 생성 기법을 제공한다. Wi-Fi Easy Mesh [6]는 Wi-Fi Alliance에서 Wi-Fi 기반의 메시 네트워크를 구축하기 위한 인증 프로그램으로 IEEE 802.11s와 마찬가지로 다수의 액세스 포인트를 이용하여 네트워크 구축을 위한 표준을 정의한다. 그러나 IEEE 802.11s가 서로 다른 공급업체 간의 서로 다른 구현으로 인하여 동일한 수준의 상호 운용성을 보장하지 못함으로써 나타나는 문제를 해결하기 위해서 만들어져 상호 운용성 및 네트워크의 확장성을 동시에 제공한다. Wi-Fi 6, 6E와 같은 최신 Wi-Fi 표준과 함께 작동할 수 있도록 만들어졌다.

2) Fast Roaming

이동 로봇이 네트워크 확장을 위해 다수의 액세스 포인트가 설치된 지역을 지나갈 때, 특정 시간에는 하나의 액세스 포인트에 연결이 되며, 이동에 따라 주변의 다른 액세스 포인트로 연결을 전환해야 한다. 일반적으로 다른 액세스 포인트에 연결을 하기 위해서는 기존에 연결된 액세스 포인트와 연결을 끊고 다시 연결 과정을 수행하는데 이 경우 네트워크의 단절이 일시적으로 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Wi-Fi 클라이언트가 하나의 액세스 포인트에서 다른 액세스 포인트로 이동하면서 연결 전환을 하는 방법이 사용된다. 이런 연결 전환을 신속하게 수행할 수 있도록 하는 방법이 Fast Roaming이며, 단말과 액세스 포인트 간의 인증을 신속히 수행함으로써 단절을 느끼지 못할 정도로 통신 대상이 되는 액세스 포인트를 변경하는 방법이다. 이러한 기능 수행을 위해서는 단말과 액세스 포인트 모두 해당 기능을 지원해야 한다.

3) 메시 네트워크 기반의 현장 성능 실험

무선 멀티 홉 네트워크의 성능 실험을 위해서 밀폐된 선박의 Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) 기반의 네트워크 카드를 사용하는 최대 3 홉의 무선 메시 네트워크를 구축하고 영상 전송 및 네트워크 품질을 측정하였다. 백본 망 구성을 위해서 Easy Mesh 기능을 활용하였으며, 클라이언트의 핸드오버는 특정 조건 없이 default 변경을 수행하여 접속 액세스 포인트와의 신호 레벨이 떨어지면 자동 변경되도록 설정하였다. 2.4GHz 대역은 40MHz, 5.8GHz 대역은 80MHz를 밴드를 사용하여 데이터를 전송하였다. 5dBi 안테나 4개를 장착한 액세스 포인트가 실험에 사용되었으며, Iperf를 활용한 데이터 전송 실험이 수행되었다. 실험에 사용한 데이터는 100MB의 데이터를 iperf의 기본 TCP 윈도우 크기를 이용하여 전송하였다.

표 1은 선박 갑판으로부터 엔진룸으로 이동하면서 얻은 통신 처리량 결과를 나타낸다. 실험 1은 선박 갑판에서 최하층의 엔진룸까지 3홉의 네트워크 구성을 한 결과이며, 실험 2는 선박 갑판에서 컨트롤 룸 내부의 단말로 성능을 비교한 결과이다. 두 실험의 결과를 보면 양방향 화상 회의가 가능한 속도를 제공하고 있으며, 무인 로봇이 이동하는 주변 영상을 촬영하여 원격지의 컨트롤 센터로 전달하고, 해당 영상을 AI 분석에 활용이 가능한 수준의 네트워크를 보여준다.

표 1 Iperf를 이용한 실험 결과

구분	평균	최소	최대
실험 1	49.9Mbps	29.7Mbps	64.6Mbps
실험 2	52.8Mbps	31.2Mbps	80.5Mbps

위 실험에서 평균 네트워크 지원 속도는 양호한 결과를 보였으나, 일부 구간에서는 전송속도 저하 및 지연 시간의 증가로 네트워크 성능이 떨어지는 결과를 보여주는 구간이 있다. 이는 클라이언트 단말이 현재 접속하고 있는 액세스 포인트에서 주변의 액세스 포인트로 이동하면서 일부 데이터가 지연되었다가 들어오는 현상으로 무선 액세스 포인트를 변경하는 구간의 인증 등으로 인한 연결 갱신 부분의 성능 저하를 확인할 수 있는 부분이다.

4) IEEE 802.11be 멀티 링크

위 성능 실험에서 확인한 성능 저하는 현재 연결된 액세스 포인트에서 다른 액세스 포인트로 이동할 때, 핸드 오버를 위한 연결 과정에서 데이터가 전달되지 못하기 때문에 지연이 발생하여 생기는 문제이다. 단말의 이동과 저지연 네트워크의 특성을 동시에 만족하기 위해서 IEEE802.11be[7]에서는 다중 액세스 포인트와 연결이 가능한 멀티 링크 오퍼레이션 (MLO)에 대해서 기능을 정의하고 있다. 멀티 링크 오퍼레이션은 클라이언트가 주변의 액세스 포인트와 다수 개의 연결을 만들어 관리할 수 있으며, 연결된 링크를 통하여 동시, 개별적인 네트워크 운용이 가능하다. QoS를 위한 트래픽 분산을 위하여 제안되었으나, 필요에 따라 서로 다른 주파수, 서로 다른 액세스 포인트와의 연결을 지원하기 때문에 이동하는 로봇

등 단말이 주변의 필요한 액세스 포인트와 미리 연결할 수 있으므로 로밍을 위한 지연시간을 줄일 수 있다. 추가적으로 연속적인 네트워크 밴드에 대해서만 통신에 사용할 수 있는 한계를 극복하기 위해서 불연속적인 네트워크 블록을 활용할 수 있는 자원 할당 기법이 정의 되어 간섭이 많은 환경에서도 더욱 안정적인 데이터 전송이 가능하게 되었다. 그림 1은 IEEE 802.11be 및 Wi-Fi 7의 표준화 계획에 대한 타임라인을 나타낸다. 표준화 일정에 지연이 있으나 다음 표준에서는 이동 단말에 대한 지원이 가능해져 액세스 포인트 간 로밍에 성능 저하가 완화될 수 있을 것으로 판단 된다.

III. 결론

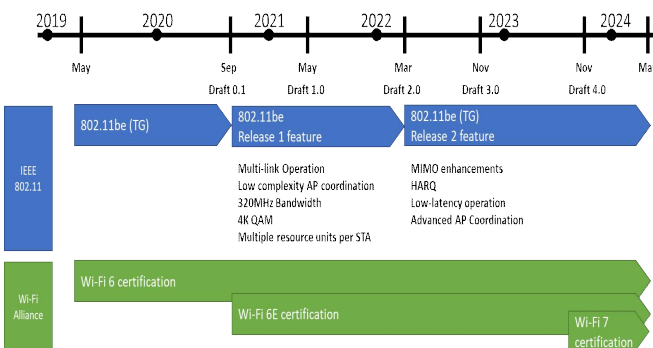
본 논문에서는 무인 로봇을 운용하는 산업 현장에서 Wi-Fi 기반의 무선 멀티 홉 네트워크 구축을 위한 표준 및 실험 결과를 분석하였다. 무선 멀티홉 네트워크 구성을 위해서는 네트워크의 음영 지역을 줄이기 위한 위치 선정이 필요하며, 액세스 포인트와 이동 로봇이 연결을 변경하는 지점에서 미리 연결할 액세스 포인트와의 인증 등을 수행하는 방법도 고려해야 한다. 향후 안정적인 무선 네트워크 운용을 위해서 현재 표준에서 논의되는 멀티 링크 기능과 다중 리소스 할당 기술을 적용하게 되면 기존의 액세스 포인트 간의 로밍에 사용되는 시간을 절감할 수 있을 것으로 생각된다. 다만, 어떤 링크를 어떻게 사용할지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 추후 무선 로봇의 안정적인 네트워크 지원을 위해서 멀티 링크의 기능을 현장 실험에 적용하고, 영상 등 응용 서비스의 요구조건을 만족하기 위한 연구가 이루어질 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 울산시-ETRI 2차 공동협력사업의 일환(24AB1600, 제조 혁신을 위한 주력산업 지능화 기술 개발 및 산업현장에서의 사람-이동체-공간 자율협업지능 기술 개발)으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 고병성, 김석태, 박재현, 류서현, "실외이동로봇 안전기준을 통한 전력 구 무인로봇의 안전성 및 운용 신뢰도 검증." 전기학회논문지 Vol. 73. No. 3 pp. 646-654, 2024
- [2] Y. Hwang, W.-S. Jung, and D. Yoo. "Study on the Possibility of Advancement for Shipyard Workplace Safety Management System Using Drone Images." 2023 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). IEEE, 2023. pp. 1493-1496
- [3] W.-S. Jung and D. S. Yoo, "Industrial humanless monitoring system over 5g networks in the shipyard environment," in 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2022, pp. 19 - 24.
- [4] W.-S. Jung, T. Yoon, and D. Yoo. "Experimental Study of Data Network in Confined Space of Vessel: Opportunities and Challenges." 2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). IEEE, 2023. pp. 368-373
- [5] IEEE, IEEE Std 802.11-2012(Revision of IEEE Std 802.11-2007)
- [6] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi Easy Mesh", Web available: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-easymesh>
- [7] A. Garcia-Rodriguez, D. López-Pérez, L. Galati-Giordano and G. Geraci, "IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 Strikes Back," in IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 4, pp. 102-108, April 2021



(그림 1) IEEE 802.11be, Wi-Fi 7 표준화 일정