

ITS 환경에서 실외 자율주행 플랫폼을 위한 기회형 Wi-Fi/LTE 연결 전략 분석

김형진, 김현범*
인천대학교 임베디드시스템공학과

ky9424000@inu.ac.kr, *hyunbumkim@ieee.org

*교신저자(corresponding author)

Analysis of Opportunistic Wi-Fi/LTE Connectivity Strategies for Outdoor Autonomous Driving Platforms in ITS Environments

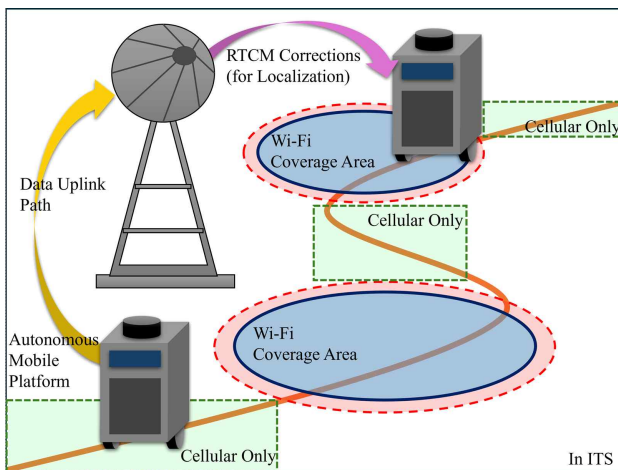
Hyeongjin Kim, Hyunbum Kim*
Dept. of Embedded System Engineering, Incheon National University

요약

실외 자율주행 플랫폼은 RTK-GNSS 보정을 위해 저지연 네트워크 연결이 필요하며, 동시에 카메라·LiDAR 등 대용량 데이터를 전송해야 한다. LTE는 안정적이나 비용과 지연의 한계가 있고, Wi-Fi는 저지연이지만 간헐적이다. 본 연구는 LTE-only와 Opportunistic Wi-Fi/LTE 두 정책을 비교하였다. Opportunistic 정책은 Wi-Fi 가용 시 LTE 대비 지연이 낮은 경로를 선택하고, 불가용 시 LTE로 폴백한다. 시뮬레이션 결과, Opportunistic 정책은 약 36%의 LTE 사용량 절감과 낮은 제어 지연을 달성하여, ITS 환경에서 효율적이고 신뢰성 있는 통신 전략임을 확인하였다.

I. 서론

실외 자율주행 플랫폼의 정밀 주행에는 RTK-GNSS(Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System) 기반의 위치 보정이 주로 사용되며, 매우 높은 수준의 정밀도를 가진다. 이를 위해 기준국에서 제공하는 RTCM(Radio Technical Commission for Maritime Services) 보정 데이터를 지속적으로 수신해야 한다. 이 보정 신호는 전송 용량은 작지만 지연에 민감하므로, LTE 또는 Wi-Fi와 같은 네트워크 연결이 유지되어야 한다. 동시에 카메라와 LiDAR와 같은 대용량 센서 데이터는 주행 중 서버로 업로드되어야 하며, 이는 네트워크 자원에 큰 부담을 준다. LTE-only 정책을 사용할 경우 전 구간에서 보정 신호와 센서 데이터를 안정적으로 전송할 수 있으나, 높은 비용과 에너지 소모, 그리고 셀 혼잡으로 인한 지연 증가라는 한계가 존재한다. 반면 Wi-Fi 인프라는 도심 환경에서 국소적으로만 제공되지만, 전송 비용과 지연 측면에서는 유리하다. 따라서 주행 경로 상에서 Wi-Fi를 기회적으로 활용할 수 있다면, LTE 사용량을 줄이면서도 제어 신뢰성과 보정 연속성을 유지할 수 있다.[1]



〈그림 1: 기회형 Wi-Fi/LTE 연결, 시스템 개념도〉

본 연구는 이러한 문제의식을 바탕으로, LTE-only 정책과 Opportunistic Wi-Fi/LTE 정책을 비교·분석한다. Opportunistic 정책은 패킷 생성 시점마다 각 링크의 예상 도착시간(ETA)을 계산해 더 빠른 경로를 선택하며, Wi-Fi를 사용할 수 없거나 더 느린 경우 즉시 LTE로 fallback한다. 두 정책 모두 Strict Priority 스케줄링을 적용해 제어 및 보정 트래픽의 안정성을 보장한다.

시뮬레이션에서는 Wi-Fi 품질을 액세스 포인트(Access Point) 반경 내 거리 및 가시선(LOS)에 따라 대역폭(Bandwidth), 지연(Latency), 지터(jitter), 손실률(Packet Loss Rate)이 동적으로 변하는 모델로 반영하였다. 환경은 도시 격자 지도를 기반으로 A* 알고리즘과 TSP 기반 웨이포인트 생성을 결합하여 구성하였으며, 액세스 포인트는 교차로와 광장 중심에 확률적으로 배치해 실제 ITS 환경을 모사하였다.

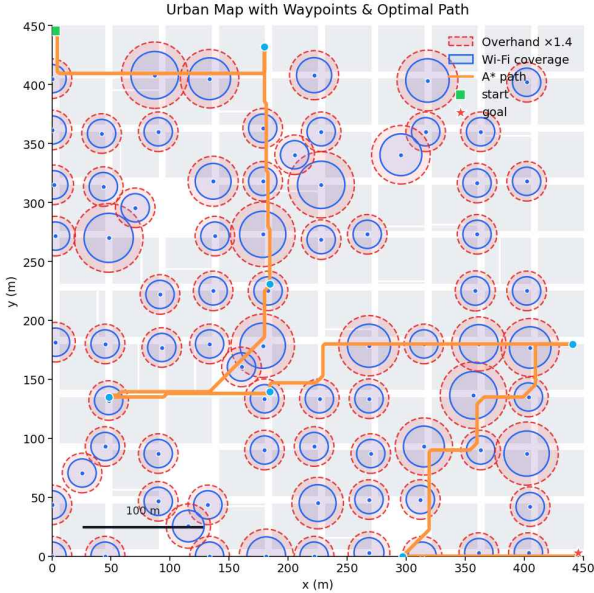
이러한 설정을 토대로, 본 논문은 Opportunistic 정책이 LTE-only 대비 LTE 사용량을 절감하면서도 제어 지연과 RTK 보정 연속성을 유지할 수 있는지를 정량적으로 규명한다. 분석 지표는 LTE 데이터 소비량, 제어 지연의 누적 분포(CDF), 경로상의 Wi-Fi 가용성의 세 가지를 중심으로 도출한다.

II. 본론

Access Point	교차로 설치 확률	0.65
	광장 설치 확률	0.40
	주파수 확률	0.75(5 GHz), 0.25(2.4 GHz)
	RSSI 임계값	-67 dBm
	경로손실지수(5GHz)	3.1
	경로손실지수(2.4GHz)	2.8
	송신 전력	18 dBm
	페이드 마진	10 dB
	반경 노이즈 표준편차	2.0 m
	광장 반경 보정	+2.0 m
로봇	최소 반경	12.0 m
	속도	1.4 m/s
트래픽 TOPICS	Control	50 Hz, 400 B, TTL 120 ms, Priority 0
	LiDAR	10 Hz, 150 KB, TTL 600 ms, Priority 1
	Camera	15 Hz, 120 KB, TTL 900 ms, Priority 2
	NTRIP	1 Hz, 300 B, TTL 1500 ms, Priority 0
링크 특성 (LINKS)	Wi-Fi	지연 8 ms, 지터 8 ms, 대역폭 60 Mbps, 손실률 1%, 비용 0 KRW/MB, 에너지 8 J/MB
	LTE	지연 45 ms, 지터 20 ms, 대역폭 8 Mbps, 손실률 1.5%, 비용 10 KRW/MB, 에너지 28 J/MB

〈 1: 시뮬레이션 파라미터〉

본 연구에서는 ITS 환경에서 실외 자율주행 플랫폼의 상향 연결 정책을 비교하기 위해 도시 격자 기반 네트워크 시뮬레이터를 구현하였다. 표 1은 주요 시뮬레이션 파라미터를 요약한 것이다.



〈그림 2: 도시 환경 시뮬레이션 맵〉

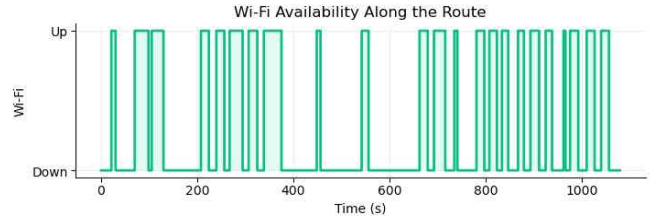
본 연구에서는 도시형 ITS 환경에서 이동하는 자율주행 플랫폼의 상향 연결 정책을 검증하기 위해 시뮬레이션을 구성하였다. 도시 지도는 300×300 셀의 격자 형태로 모델링되었으며, 각 셀은 1.5 m의 해상도를 가진다. 주요 도로는 30셀 간격으로 동서 및 남북 방향에 배치되며, 폭은 4셀로 설정하였다. 교차로와 블록 내부는 실제 도시 구조를 반영하기 위해 확률적으로 광장과 골목을 생성하여 플랫폼이 이동할 수 있는 경로 다양성을 확보하였다. 자율주행 플랫폼은 지도의 한쪽 끝에서 출발하여 대각선 반대편을 목표 지점으로 설정하고, 중간에 6개의 웨이포인트를 무작위로 배치한다. 전체 경로는 각 구간별로 A* 탐색을 통해 최단 경로를 산출하고, 웨이포인트의 순서는 TSP 최적화를 통해 결정하였다. 이동 속도는 1.4 m/s로 고정된다.

Wi-Fi 인프라는 교차로와 광장 중심에 확률적으로 배치된다. 교차로에는 0.65의 확률, 광장에는 0.40의 확률로 액세스 포인트(AP)가 설치된다. 주파수 대역은 5 GHz와 2.4 GHz가 각각 75%와 25%의 확률로 선택된다. Wi-Fi의 실제 커버리지는 송신 출력, 경로 손실, RSSI 임계값, 페이딩 마진 등을 고려하여 산출되며, 무작위 반경 변동과 공간적 보정을 통해 현실적인 커버리지를 반영한다. 또한 로봇과 AP 사이에 가시선이 확보된 경우에만 Wi-Fi가 “가용” 상태로 간주된다. Wi-Fi가 가용한 경우에도 위치에 따라 링크 품질은 동적으로 변화하며, AP 중심에서는 높은 대역폭과 낮은 지연을 제공하지만, 반경의 가장자리에 가까워질수록 대역폭은 감소하고 지연·손실률은 악화된다.

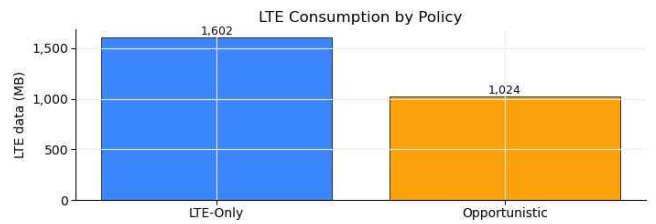
전송 트래픽은 플랫폼의 실제 센서 및 제어 트래픽을 모사하도록 설계되었다. 제어 신호는 작은 패킷 크기와 높은 주기로 생성되며, LiDAR와 카메라 데이터는 수십에서 수백 KB 규모로 주기적으로 발생한다. 또한 RTK 보정을 위한 NTRIP 메시지는 낮은 주기와 소량의 데이터지만 지연에 민감하게 처리된다. 모든 트래픽은 동일한 링크 스케줄러(Strict Priority)를 따르며, 제어와 보정 데이터가 항상 높은 우선순위를 갖도록 설정하였다.

III. 결론

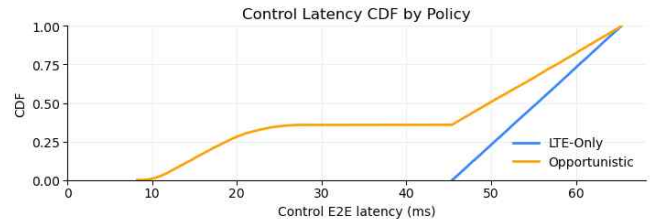
본 연구는 ITS 환경에서 이동하는 실외 자율주행 플랫폼을 대상으로, LTE-only 정책과 Opportunistic Wi-Fi/LTE 정책을 비교·분석하였다. 도시형 시뮬레이션을 통해 Wi-Fi 커버리지가 간헐적으로 제공되는 경로를 구성하고, 제어·센서·보정 데이터를 동시에 전송하는 상황에서 두 정책의 성능을 검증하였다.



〈그림 3: 경로상의 Wi-Fi 가용성〉



〈그림 4: LTE 데이터 소비량 비교〉



〈그림 5: 지연 시간 누적 분포 (CDF)〉

성능 분석 결과, 그림 3에서 확인할 수 있듯이 Wi-Fi는 전 구간에서 연속적으로 제공되지 않고 불규칙하게 가용성을 보인다. 그럼에도 불구하고 Opportunistic 정책은 Wi-Fi가 사용 가능한 순간을 효과적으로 활용하여 LTE-only 대비 약 36%의 LTE 트래픽 절감 효과를 달성하였다 (그림 4). 둘째, 그림 5의 제어 지연 CDF 분석에서 Opportunistic 정책은 LTE-only 대비 낮은 지연 분포를 보여, 제어 신뢰성을 저하시키지 않으면서도 네트워크 자원 활용 효율성을 높일 수 있음을 입증하였다.

이러한 결과는 ITS 환경에서 자율주행 플랫폼이 이동 경로 상의 Wi-Fi 인프라를 기회적으로 활용할 경우, LTE 의존도를 완화하고 비용·에너지 효율을 개선하면서도 실시간 제어와 정밀 보정의 요구사항을 충족할 수 있음을 보여준다. 따라서 Opportunistic Wi-Fi/LTE 연결 전략은 차세대 ITS 인프라에서 자율주행 플랫폼의 지속 가능한 통신 방안으로 유효한 대안이 될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원·학·석사연계ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00437024)

참고 문헌

- [1] A. Asadi and V. Mancuso, “Energy Efficient Opportunistic Uplink Packet Forwarding in Hybrid Wireless Networks,” Proceedings of ACM e-Energy 2013