

Wi-Fi 신호를 활용한 비접촉식 철근 구조물 감지 및 분류 기술

이운서, 표지성, 문정곤, 최재혁
가천대학교 AI·소프트웨어학부

{lyssva345, p990301, marco2443, jchoi}@gachon.ac.kr

Contactless Identification and Detection of Steel Frame Structures Using Wi-Fi Sensing

Yunseo Lee, Jisung Pyo, Junggon Moon, Jaehyuk Choi
School of Computing, Gachon University

요 약

본 연구는 Wi-Fi 신호의 CSI(Channel State Information) 위상 정보를 활용하여 철근 및 기타 구조물을 비접촉 방식으로 감지하고 분류하는 기술을 제안한다. 특히, 다중 경로 페이딩이 발생하는 무선 네트워크 환경에서 수신기 수에 따른 센싱 성능을 비교하여, 다중 수신기 구성이 보다 우수함을 실험적으로 입증하였다. 또한, 저비용으로 구현 가능한 Wi-Fi 기반 철근 탐지 기술의 실현 가능성을 확인하고, 프로토타입을 개발하여 수집된 데이터를 바탕으로 멀티태스크 모델을 학습시켰다. 본 연구는 실측 데이터를 활용한 Wi-Fi 센싱 기술의 실용성과 응용 가능성을 제시한다.

I. 서론

최근 다양한 건축물에서 발생한 붕괴 사고로 인해 건물 내부 철근의 구조를 손상시키지 않고 실시간으로 감지할 수 있는 기술의 필요성이 대두되고 있다. 철근은 건축물의 구조적 안정성을 확보하는 핵심 요소이다. 이를 효과적으로 감지하는 기술은 시설물의 안전 진단과 유지 보수 효율 향상에 직접적으로 기여할 수 있다. [1]

최근 Wi-Fi 기반의 센싱 기술은 기존 무선 통신 인프라를 활용하여 비접촉 방식으로 공간 내 물체의 존재를 추정할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. CSI의 위상 및 진폭 특성은 환경 변화에 민감하게 반응하여 건물 내부 구조 감지에 효과적으로 활용될 수 있다. [2]

본 연구에서는 Wi-Fi CSI의 위상 정보를 활용하여 철근 및 기타 구조물의 존재를 비접촉식으로 감지하고 분류하는 기법을 제안한다. 특히, 다중 경로 페이딩이 발생하는 무선 네트워크 환경에서 수신기 구성의 차이가 센싱 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하고, 다중 수신기 구성이 구조물 분류 정확도 향상에 기여함을 입증한다.

II. 본론

2.1 실험 환경 및 데이터 수집

본 실험에서는 저가형 IoT 디바이스인 Raspberry Pi 4B+ 장비를 활용하였으며 목적에 따라 송신기 및 수신기로 설정하였다. 실험 환경은 5GHz 주파수 대역 기반 채널 대역폭 20 MHz로 고정하여 진행한다. 실험은 송수신기를 두 가지 구성으로 설정한다. 그림 1을 보면, 구성 1은 단일 송수신기 형태이고, 구성 2는 송신기 하나와 수신기 두 개의 형태이다. 이는 위상 차이를 발생시키기 위한 구성이다. 송수신기 간 거리는 5GHz의 파장을 고려하여 최소 12cm 이상으로 유지하였다.

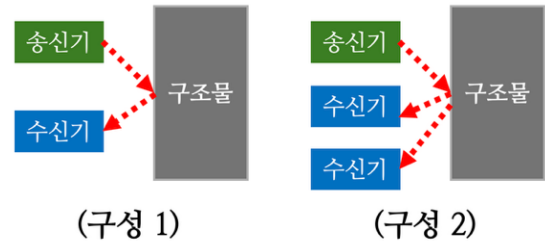


그림 1. 구성 1(단일 수신기) 및 구성 2(다중 수신기)

본 실험에서는 구조물의 종류(철근, 벽, 빈 공간, 문)와 실험 장치와 구조물까지의 거리(0cm, 20cm, 30cm, 50cm)를 달리하여 Wi-Fi 패킷 수집을 진행한다.



그림 2. 실제 테스트 보드

2.2 접근 방법

본 논문에서는 Wi-Fi CSI를 시간 영역에서 분석하기 위해 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 적용하여 CIR(Channel Impulse Response)을 계산한다. CIR은 각 신호 성분이 송신기로부터 수신기에 도달하는 데 걸리는 시간에 따른 세기 정보를 포함하고 있다. 이를 통해 신호가 어떤 경로를 통해 전파되었는지에 대한 시간적 정보를 추출할 수 있다. 그림 3에서 가장 큰 피크는 송수신기 간 직선 경로를 따라 LoS(Line-of-Sight)

신호를 나타낸다. LoS 신호는 타겟 물체나 장애물에 영향을 받지 않는 전파 경로이므로 해당 신호는 실험에서 타겟 물체의 영향을 구분하는 데 방해가 될 수 있어 이를 제거한다.

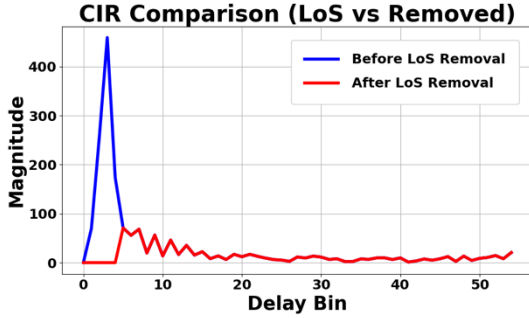


그림 3. LoS 신호 제거 전과 후의 CIR 값 비교

LoS 신호 제거 후 나머지 신호에 FFT(Fast Fourier Transform)를 적용해 주파수 영역으로 변환하고, 위상을 계산한다. 수신된 CSI의 위상 변화는 반사 경로의 길이뿐 아니라 반사체의 재질, 크기, 밀도, 위치 등의 구조적 특성에 따라 달라지므로 중요한 분류 지표로 작용한다. 이러한 위상 분석은 구조물의 분류뿐 아니라 거리 추정까지 수행할 수 있는 잠재력을 가진다.

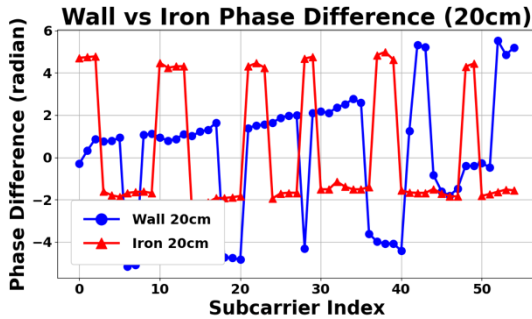


그림 4. 건물 내 철근과 가벽에 대한 CSI 위상 차이

그림 4를 보면, 철근과 가벽의 위상 차이 그래프는 서브 캐리어 전체에 걸쳐 위상 변화의 패턴과 범위에서 뚜렷한 차이를 보인다. 이는 단일 위상 정보를 사용하는 방식보다 위상 차이를 활용하는 방식이 구조물 분류에 더 유리함을 시사한다.

2.3 멀티태스크 모델

본 논문은 Wi-Fi CSI의 위상을 활용하여 구조물의 종류와 실험 장치로부터의 거리를 분류한다. 이를 위해 CNN과 트랜스포머의 장점을 결합한 ConvNeXt[3] 모델을 사용하였으며, ImageNet-1K로 사전 학습된 가중치를 기반으로 학습률 $1e-4$, 배치 크기 16으로 재학습하였다. 이를 통해 모델의 일반화 성능을 유지하면서, 철근 유무와 위치 식별에 특화된 특성을 추가로 학습하도록 하였다.

2.4 송수신기 구성에 따른 분류 성능

본 연구에서는 송수신기 구성 방식에 따른 분류 성능을 비교하고자 한다. 무선 네트워크 환경에서는 다중 경로 페이딩이 발생하는데, 이는 수신된 신호가 여러

경로를 통해 도달하면서 신호 간섭이나 위상 변화가 일어난다. 이러한 환경에서는 단일 수신기보다 다중 수신기 구성이 신호를 보다 효과적으로 처리할 수 있다. 그림 5의 구조물 종류의 분류에 대한 confusion matrix를 보면, 구성 2는 구성 1에 비해 약 1.47배 더 높은 분류 정확도를 나타냈다. 구성 1은 하나의 수신기에서 수신한 신호의 위상만을 이용하기 때문에 분류 성능에 있어 한계가 있는 것으로 판단된다. 반면, 구성 2는 두 수신기에서 수신된 신호 간의 위상 차이를 계산함으로써 보다 정밀한 분석이 가능하다.

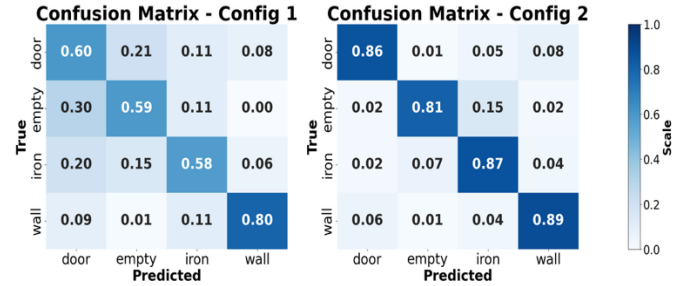


그림 5. 구성 1과 구성 2 구조물 분류에 따른 혼동 행렬

III. 결론

본 논문은 Wi-Fi CSI의 위상을 활용하여 건물 내부 구조물과 거리를 비접촉식으로 동시에 분류하는 기법을 제안하였다. 특히, 서로 다른 송수신기 구성에 따라 분류 성능이 어떻게 달라지는지를 비교 분석함으로써, 수신기 구성의 중요성을 실험적으로 검증하였다. 단일 수신기를 사용하는 구성 1은 다중 경로 페이딩의 영향을 충분히 반영하지 못해 분류에 한계가 있었다. 반면, 구성 2는 수신기 간 위상 차이를 활용함으로써 더 높은 분류 성능을 보였다.

본 논문에서 제안한 방법은 Wi-Fi 기반 센싱 기술이 저비용으로 구현 가능하면서도 높은 정확도를 확보할 수 있음을 입증하였으며, 기존의 접촉식 센서 기술을 보완하거나 대체할 수 있는 실질적인 대안을 제시한다. 향후 이 기술은 건물의 안전성을 점검하는 데 널리 활용될 수 있으며 스마트 빌딩 시스템 구축에 기여할 수 있는 중요한 기술로 자리 잡을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.RS-2023-00252039). 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 2025년도 SW 중심대학사업의 결과로 수행되었음 (2021-0-01389).

참고 문헌

- [1] He, Ting, et al. "Concrete classification using Wi-Fi channel state information and convolutional neural networks." Automation in Construction, 2024.
- [2] Ma, Y., Zhou, G., & Wang, S. (2019). WiFi sensing with channel state information: A survey. ACM Computing Surveys (CSUR), 52 (3), 1-36.
- [3] Liu, Zhuang, et al. "A convnet for the 2020s." Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2022.