

Wi-Fi CSI 기반 감지 기술의 스마트 TV 적용을 위한 분석

김영민, 박세웅

서울대학교 뉴미디어통신공동연구소

ymkim@netlab.snu.ac.kr, sbahk@snu.ac.kr

Analysis of Wi-Fi CSI-Based Sensing Technology for Smart TV

Youngmin Kim and Saewoong Bahk

Seoul National University, Institute of New Media and Communications

요약

본 논문은 Wi-Fi CSI 기반 사람 활동 인식 기술을 스마트 홈 환경에 적용할 때 발생할 수 있는 현실적 제약을 실험적으로 분석한다. 스마트 TV와 셋톱박스가 밀접하게 설치되는 실제 사용자 환경에서는 기존 연구와 달리 인식 성능이 크게 저하되는 문제가 확인되었으며, 이는 이상적인 실험 조건과 실제 소비자 환경 간의 차이에서 비롯된 한계를 보여준다. 이를 통해 향후 다양한 사용자 환경을 고려한 인식 성능 개선 연구의 필요성을 강조한다.

I. 서론

사람 활동 인식 HAR(Human Activity Recognition) 기술은 최근 다양한 산업 분야와 학계에서 큰 주목을 받고 있다. 특히 스마트 홈, 헬스케어, 보안 모니터링 등 인간의 행동을 자동으로 감지하여 서비스를 제공하는 시스템에서 HAR은 핵심 기술로 간주된다.

기존의 HAR 시스템 [1]은 주로 카메라, 적외선 센서, 이미지 센서 등 영상 기반의 기술을 활용해왔다. 그러나 이러한 방식은 몇 가지 본질적인 한계를 갖는다. 첫째, 프라이버시 침해 문제 [2]와 보안 위협에 취약하며, 해킹이나 데이터 유출과 같은 사고가 발생할 수 있다. 둘째, 고가의 하드웨어 설치가 필요하여 상용화에 따른 비용 부담이 크다는 단점이 존재한다.

이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 통합 감지 및 통신 ISAC(Integrated Sensing and Communication) 기술 [3]이 활발히 연구되고 있으며, 특히 Wi-Fi 채널 상태 정보 CSI(Channel State Information)를 활용한 비접촉 방식의 HAR 기술이 주목받고 있다. CSI는 Wi-Fi 전파의 다중 경로 전파(Multipath Propagation) 특성을 반영하며, 환경 내의 미세한 변화나 움직임에 민감하게 반응하는 특징을 지닌다. 이러한 기술은 추가적인 센서 설치 없이 기존 무선 네트워크 인프라만으로 사람의 존재 여부나 활동 패턴을 감지할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구는 Wi-Fi CSI 기반 HAR 기술을 스마트 홈 환

경에 적용하는 데 있어서, 특히 스마트 TV와 AP 내장형 셋톱박스가 근접 배치되는 실사용 환경에서 기술이 직면하게 되는 성능 저하 문제를 실험적으로 분석하는 것을 목적으로 한다.

스마트 홈에서는 HDMI 케이블 연결 등의 물리적 제약으로 인해 송신기(AP)와 수신기(TV)가 50cm 이내로 밀접하게 배치되는 경우가 일반적이며, 이러한 구조는 기존 연구에서 가정하는 조건과 상이하다.

본 논문은 이러한 실제 사용자 환경에서의 문제를 실험적으로 확인하고, 향후 개선 방향을 제시하기 위한 기초 연구를 수행한다.

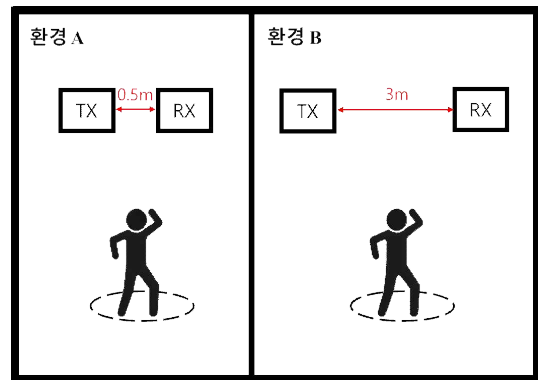


그림 1. 실험 환경

II. 본론

(1) 실험 환경 구성

본 연구에서는 실제 스마트 홈 환경을 모사한 조건과, 기존 연구에서 일반적으로 채택하는 실험 조건을 비교 분석하기 위해 그림 1과 같이 일반적인 스마트 TV와 셋톱박스의 실제 설치 환경 반영한 환경 A와 CSI의 다중 경로 정보를 풍부하게 확보할 수 있는 조건의 환경 B, 두 가지 실험 환경을 설계하였다.

환경 A: 송신기(TX)와 수신기(RX) 50cm 이내 배치

환경 B: 송신기(TX)와 수신기(RX)의 거리 3m 유지
각 실험 환경에서 사람은 NLOS(Non-Line-of-Sight) 경로 상에 위치하여 1m, 2m, 3m 거리에서의 감지 여부를 측정하였으며, 두 가지 클래스로 활동을 구분하였다.

Presence: 사람이 NLOS 경로상에 존재하는 경우

Absence: 사람이 해당 경로에 존재하지 않는 경우
각 조건에서의 사람 부재 여부를 정확히 인식할 수 있는지 판단하기 위해 Convolutional Neural Network(CNN) 기반 모델을 활용하여 학습 및 검증을 수행하였다.
기타 세부 실험 조건은 표 1과 같다.

Parameter	Value
Packet Interval	1 ms
TX Antenna	1
RX Antenna	2
Stream	1
Center Frequency	6.145 GHz
Bandwidth	80 MHz
# of Subcarrier	2002
Training Sample	620
Testing Sample	100

표 1. 실험 조건

(2) 실험 결과

실험 결과, 환경 B에서는 인식 정확도가 100%에 달한 반면, 환경 A에서는 인식 정확도가 65%로 측정되어 약 35%의 성능 저하가 발생하였다.

이러한 성능 저하의 원인은 송신기와 수신기가 근접하게 위치하면서 발생하는 강한 LOS(Line-of-Sight) 신호의 영향 때문이다. 실내 무선 통신에서는 일반적으로 다중 경로(Multipath) 구성 요소, 특히 NLOS 경로의 변화가 환경 변화 감지에 주요한 역할을 한다. 그러나 송수신기가 가까운 경우, AGC(Automatic Gain Control) 회로가 강한 LOS 신호를 기준으로 보정되면서 NLOS 성분의

상대적 영향력이 감소한다.

또한, 감지 대상 객체(사람)가 위치하는 영역이 NLOS 경로상일 경우, 그 움직임이나 존재 여부가 CSI 신호에 미치는 영향이 작아지게 되며, 이는 곧 HAR 성능 저하로 이어진다. 본 실험은 Wi-Fi CSI 기반 HAR 기술이 실사용 환경에서 직면하는 구조적 한계를 입증하며, 스마트 홈 내 상용 제품 구성에서 발생하는 기술적 문제를 실질적으로 확인한 사례라 할 수 있다.

III. 결론

본 연구에서는 Wi-Fi CSI 기반 사람 감지 기술이 스마트 홈 환경에서 직면할 수 있는 기술적 제약을 실험적으로 검증하였다. 특히, 실제 사용자 환경에서는 송신기와 수신기의 근접 배치가 불가피하며, 이로 인해 기존 연구 조건에서는 확인되지 않았던 인식 정확도 저하 문제가 발생함을 확인하였다.

기존 연구 대부분은 송수신기 간 일정한 거리를 확보하고 객체가 LOS 경로 상에 위치하는 이상적인 조건을 가정하고 실험을 진행해왔다. 그러나 본 논문은 현실적인 사용자 환경을 반영한 실험을 통해, Wi-Fi CSI 기반 HAR 기술이 상용화되기 위해서는 다양한 사용자 케이스와 물리적 제약을 반영한 추가 연구가 필요함을 시사하였다.

향후 본 연구는 사람 부재뿐만 아니라 다양한 형태의 활동을 포함하여 인식 정확도 개선에 대한 연구로 확장할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Aggarwal and M. Ryoo, "Human Activity Analysis: A Review," ACM Comput. Surv., vol. 43, no. 3, Apr. 2011.
- [2] H-B. Zhang, Y-X. Zhang, B. Zhong, Q. Lei, L. Yang, J-X. Du, and D-S. Chen, "A Comprehensive Survey of Vision-Based Human Action Recognition Methods," Sensors, vol. 19, no. 5, p. 1005, 2019.
- [3] A. Liu, Z. Huang, M. Li, Y. Wan, W. Li, T-X. Han, C. Liu, R. Du, D. K-P. Tan, and J. Lu, "A Survey on Fundamental Limits of Integrated Sensing and Communication," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 2, pp. 994 - 1034, 2022.