

IR-UWB 레이더를 이용한 벽 너머 호흡 관측을 통한 거리 추정 실험

박성우, 김승구*

*충북대학교

psw209@cbnu.ac.kr, *kimsk@cbnu.ac.kr

Experimental Distance Estimation via Through-Wall Respiration Observation Using IR-UWB Radar

Park Seong Woo, Kim Seung Ku*

*Chungbuk National Univ.

요약

재난·폐쇄 공간처럼 비가시 환경에서 벽 너머 사람의 존재와 거리를 비접촉으로 판단하기 위해 단일 IR-UWB 레이더 기반 실험을 수행하였다. 나무문·파티션·금속문·가벽·콘크리트 등 다양한 재질·두께의 벽을 대상으로, 레이더-벽 1 m, 벽-사람 1 m 조건에서 raw data를 기록하고 40초로 정규화해 분석하였다. 분석 과정에서 호흡 대역(0.2 - 0.5 Hz) 필터링 후 분산 기반으로 호흡이 가장 뚜렷한 거리 bin을 선택하고, 5초 블록 단위 재선택과 추적으로 거리 변화를 따라가도록 구성하였다. 그 결과 FFT에서 저주파 호흡 대역 피크가 확인되어 벽 너머에서도 호흡 성분 관측이 가능함을 보였다. 또한 벽 재질·두께에 따라 거리 추정 오차가 달라지며, 반사·감쇠 특성이 강한 조건에서는 편향이 커질 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

재난 현장이나 폐쇄된 공간에서는 구조 대상자가 벽 너머에 존재할 수 있다. 구조자는 짧은 시간 안에 사람이 있는지와 어느 정도 거리에 있는지를 판단해야 한다. 이때 가장 흔한 탐지 수단인 카메라는 벽이나 문으로 시야가 차단되면 원천적으로 관측이 불가능하고, 조명·연기·가림에도 크게 영향을 받는다. 또한 웨어러블 센서는 대상자가 스스로 착용해야 하므로, 무의식·부상·고립 상황에서는 적용이 어렵다. 즉, 가시선이 확보되지 않는 환경에서도 비접촉으로 사람의 존재를 확인할 수 있는 감지 방식이 필요하다. 이러한 요구를 만족하는 대안으로 IR-UWB(Impulse-Radio Ultra-Wideband) 레이더가 주목받고 있다. IR-UWB 레이더는 인체 표면에서 반사되는 신호의 미세한 변화를 이용해 호흡 같은 작은 움직임도 비접촉으로 추정할 수 있으며, 벽을 사이에 둔 비가시 조건에서도 사람의 호흡 검출 및 거리 추정 가능성이 보고되었다[1]. 하지만 실제 적용을 고려하면 성능은 벽의 재질과 두께, 그리고 설치 거리 조건에 크게 좌우된다. 예를 들어 동일한 사람·동일한 센서라도 나무·파티션/가벽/콘크리트/금속문처럼 재질이 달라지면 감쇠와 반사가 달라져 호흡 신호의 품질과 거리 추정 안정성이 변할 수 있다. 기존 연구는 특정 벽 조건에 집중하거나, 실생활에서 흔한 다양한 벽/문 조합을 같은 실험 조건에서 체계적으로 비교한 자료가 상대적으로 부족하다. 따라서 본 논문은 단일 IR-UWB 레이더 1대만을 사용하여, 서로 다른 종류와 두께의 벽 너머에서 사람의 호흡을 검출하고 레이더-사람 간 거리 추정 결과를 비교하는 실험 연구를 수행한다. 실험은 모든 조건에서 레이더-벽 거리 1 m, 벽-사람 거리 1 m로 고정하였고, 레이더 raw data를 기록한 뒤 동일한 길이로 정규화하기 위해 각 세션을 40초 구간으로 절단하여 분석하였다. 벽 조건은 나무 문(3.5 cm, 5 cm), 파티션(5cm, 10cm, 15 cm), 금속 문(5 cm), 가벽(11 cm), 콘크리트(20 cm), 가벽+콘크리트(총 30 cm)로 구성하였다. 본 연구의 기여는 상용 IR-UWB 단일 센서 기반으로 현실적인 벽/문 조건을 폭넓게 포함한 비교 실험을 제공하고, 동일한 기하 조건에서 벽 종류/두께 변화가 호흡

기반 거리 추정에 미치는 영향을 관찰하며, 재난·보안·돌봄 환경에서의 벽 너머 생체 신호 기반 탐지에 대해 실험적 기초 자료를 제시하는 데 있다.

II. 본론

본 연구는 단일 IR-UWB 레이더로 벽 너머의 호흡 신호를 관측하고, 호흡 성분이 가장 뚜렷한 거리 구간을 선택하여 레이더-사람 간 거리를 추정하는 실험을 수행하였다. 모든 실험은 레이더-벽 거리 1 m, 벽-사람 거리 1 m로 고정하여 조건을 통일하였다. 벽 조건은 나무 문(3.5 cm, 5 cm), 파티션(5 cm, 10 cm, 15 cm), 금속 문(5 cm), 가벽(11 cm), 콘크리트(20 cm), 가벽+콘크리트(총 30 cm)로 구성하였다. 실험에 사용한 레이더는 X4M06이다. 각 실험 세션의 raw data는 분석 구간을 통일하기 위해 40초 길이로 절단하여 프레임×거리 bin 형태로 저장하였다. raw data는 시간(프레임)×거리(bin) 2차원 배열이다. 먼저 호흡이 주로 존재하는 대역(0.2 - 0.5 Hz)을 통과시키는 bandpass 필터를 시간축 방향(axis=0)으로 적용하여, 거리별로 호흡에 해당하는 느린 흔들림 성분을 강조하였다. 고정 bin 기준선은 Khan et al.[1]의 방법을 참고하여 구현하였으며, 초기 100프레임에서 분산이 가장 큰 bin을 선택해 고정 bin으로 사용하였다. 이 bin을 고정으로 두고 1차 호흡 신호를 얻는다. 하지만 벽 환경에서는 다중 경로 반사나 자세 변화로 인해 호흡이 가장 잘 보이는 bin이 시간에 따라 조금씩 이동할 수 있다. 이를 보완하기 위해 40초 구간을 5초 블록으로 나눈 뒤, 각 블록에서 분산이 큰 bin을 다시 선택한다[2]. 매 블록마다 완전히 다른 bin으로 튀는 것을 막기 위해 ROI(Region Of Interest) 범위 안에서만 탐색하고, 이전 블록에서 선택된 bin 주변 ± 40 cm 범위 안에서만 재선택하도록 하였다. 이렇게 얻은 블록별 호흡 신호를 이어 붙여 processing 신호를 구성한다. processing과 호흡 신호 각각에 대해 FFT를 계산하고, 0.1 - 1.0 Hz 범위에서 최대 피크를 호흡 주파수로 선택하여 bpm으로 변환한다. 거리의 경우, processing에서 선택된 블록별 bin을 cm로 변환하여 블록별 거리 시퀀스를 만들었다. processing과 respi 신호

표 1. 벽 종류/두께에 따른 호흡 관측을 통한 거리 추정 오차

| | LOS | 나무 (3.5cm) | 나무 (5cm) | 파티션 (5cm) | 파티션 (10cm) | 파티션 (15cm) | 금속 (5cm) | 가벽 (11cm) | 콘크리트 (20cm) | 가벽+콘크 리트(30cm) |
|---------------|-------|---------------|-------------|--------------|---------------|---------------|-------------|--------------|----------------|-------------------|
| 실제 거리 (cm) | 200 | 203.5 | 205 | 205 | 210 | 215 | 205 | 211 | 220 | 230 |
| 추정 거리 (cm) | 200.1 | 209.1 | 210.3 | 198.2 | 205.2 | 212.35 | 230.1 | 211.7 | 260.85 | 261.1 |
| 오차(cm) | 0.1 | 5.6 | 5.3 | -6.8 | -4.8 | -2.65 | 25.1 | 0.7 | 40.85 | 31.1 |
| 오차율 (%) | 0.05 | 2.75 | 2.59 | 3.32 | 2.29 | 1.23 | 12.24 | 0.33 | 18.57 | 13.52 |

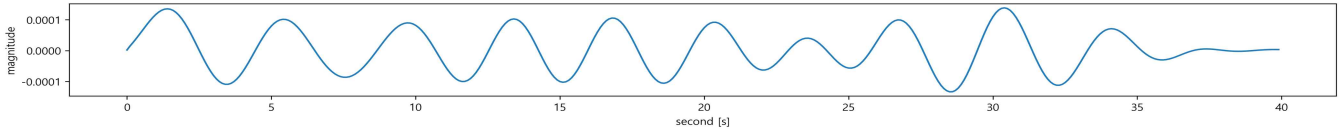


그림 1. 시간에 따른 호흡 성분 파형(bin 재선택 + 추적)

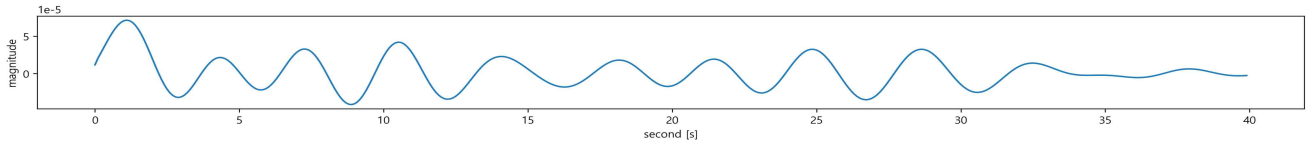


그림 2. 시간에 따른 호흡 성분 파형(고정 bin)

의 FFT 결과 모두 저주파 호흡 대역 영역에 뚜렷한 피크가 나타나, 벽 너머에서도 호흡 성분이 관측 가능함을 보인다. 특히 processing은 블록 재선택을 통해 신호가 약해지는 구간에서 상대적으로 호흡이 잘 보이는 bin을 따라가도록 구현되었으며, 고정 bin 방식과 비교해 환경 변화에 대한 민감도를 완화하는 경향을 보였다. 그림 1과 그림 2는 시간 영역에서의 호흡 신호이다. 고정 bin 방식과 블록 재선택+추적 방식 모두 유사한 주기성을 보이며, 40초 구간 동안 호흡 패턴이 연속적으로 추출됨을 확인할 수 있다. 이는 본 파이프라인이 호흡이 존재하는 거리 구간을 잡아내고, 해당 구간의 느린 흔들림을 호흡 신호로 복원한다는 목적에 부합한다. 표 1은 벽 조건별 실제 거리와 추정 거리, 그리고 거리 오차를 정리한 결과이다. 실제 거리는 실험 배치인 레이더 - 벽 1 m, 벽 - 사람 1 m를 기준으로 200 cm에 벽 두께를 합산하여 계산하였다. 추정 거리는 processing 기반 평균 거리를 사용하였다. 이러한 정리는 서로 다른 벽 재질 및 두께 조건에서 거리 추정이 어떻게 달라지는지 비교할 수 있게 하며, 특히 벽 두께가 달라지거나 반사 특성이 강한 재질이 포함될 때 추정 거리의 편차가 커질 수 있음을 보여준다.

III. 결론

본 연구에서는 단일 IR-UWB 레이더 1대를 사용하여, 서로 다른 재질·두께의 벽 너머에서 사람의 호흡 성분을 관측하고, 호흡 성분이 가장 뚜렷하게 나타나는 거리 bin을 선택함으로써 레이더 - 사람 간 거리를 추정하는 실험을 수행하였다. 모든 실험은 레이더 - 벽 1 m, 벽 - 사람 1 m로 조건을 고정하여 벽 종류/두께에 따른 영향을 비교 가능하도록 구성하였으며, 각 세션은 동일한 분석 길이를 확보하기 위해 40초 구간으로 정규화하였다. 실험 결과, 시간 영역에서는 호흡에 해당하는 주기 성분이 연속적으로 나타났고, 주파수 영역에서도 저주파 호흡 대역에서 뚜렷한 피크가 형성되어 벽 너머에서도 호흡 성분의 관측이 가능함을 확인하였다. 또한 표 1의 거리 추정 결과에서, 목재/파티션/가벽 등 일부 조건에서는 실제 거리와 유사한 수준의 오차율을 보였으나, 금속 문 및 두꺼운 벽 조합에서는

반사·감쇠 특성의 영향으로 추정 거리가 크게 편향될 수 있음을 확인하였다. 이는 동일한 설치 거리 조건에서도 벽 재질과 두께가 거리 추정 안정성에 직접적인 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

본 연구는 IR-UWB 단일 센서 기반으로, 실생활에서 흔히 접하는 다양한 벽/문 조건을 동일 기하 조건에서 비교한 실험 자료를 제시하였다는 점에서 의미가 있다. 특히 벽 환경에서 호흡 신호가 가장 잘 나타나는 거리 구간이 시간에 따라 변할 수 있다는 점을 반영하여, 블록 단위 bin 재선택과 추적을 통해 거리 추정 과정을 구성하여 적용함으로써 현장 조건 변화에 대응 가능한 분석 절차를 제시하였다.

후속 연구로는 벽의 재질과 두께 정보를 사전에 알 수 없는 환경을 가정하여 관측된 신호 특성을 이용해 거리 편향을 추정·보정하는 방법을 연구할 계획이다. 이를 통해 벽 조건이 불명확한 재난 환경에서도 호흡 기반 거리 추정의 활용성을 높이고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A5A8026986). 본 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업 기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0020536, 산업혁신 인재성장지원사업). 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역 지능화혁신인재양성사업임(IITP-2025-RS-2020-II201462).

참 고 문 헌

- [1] Khan F., Cho S. H., "A Detailed Algorithm for Vital Sign Monitoring of a Stationary/Non-Stationary Human through IR-UWB Radar," *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 290, Feb. 2017.
- [2] J.-H. Kim, S.-K Kim, "UR-Sense: Ubiquitous respiration sensing with UWB radar," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 195, Sep. 2025