

도시 환경에서의 강건한 위치 추정을 위한 GNSS Shadow 기반 위치 확률 지도 생성

한민주, 김상현, 서지원*

연세대학교

hanmju@yonsei.ac.kr, sanghyun.kim@yonsei.ac.kr, *jiwon.seo@yonsei.ac.kr

Robust Urban Localization via GNSS Shadow-Based Position Probability Maps

Minju Han, Sanghyun Kim, Jiwon Seo*

Yonsei University

요약

본 논문에서는 도심 환경에서 위성 신호의 LOS/NLOS 오분류로 인해 발생하는 기존 ZSM 기반 위치 추정의 한계를 극복하기 위해, GNSS shadow 정보를 활용한 사용자 위치 확률 지도 생성 기법을 제안한다. 제안 기법은 이분법적 위치 제약 대신 확률적 접근을 적용하여 오분류 상황에서도 사용자의 위치 추정 실패를 방지한다. 실제 도심 환경에서 수집된 GPS 신호 데이터를 이용한 실험 결과, 제안한 기법은 위성 신호 오분류가 존재하는 상황에서도 위치 추정 실패 없이 높은 성공률을 유지하였다.

I. 서론

최근 차량 내비게이션, 스마트폰 위치 서비스, 자율주행 기술의 발전으로 정밀한 위치 추정 기술의 중요성이 증가하고 있다. 위성항법시스템(GNSS; Global Navigation Satellite System)은 위성에서 송신하는 신호를 이용하여 사용자의 위치를 결정하는 시스템으로, 다양한 응용 분야에서 위치 추정 수단으로 활용되고 있다. 그러나 도심 환경에서는 고층 건물로 인해 위성 신호의 차단 및 반사가 빈번하게 발생하며, 이로 인해 위치 추정 정확도가 크게 저하된다 [1]. 이러한 한계를 극복하기 위해 3차원 도시 모델을 활용한 ZSM(zonotope shadow matching) 알고리즘이 제안되었다 [2]. ZSM은 위성 신호가 직접 수신되지 못하는 GNSS shadow 영역을 기반으로 수신기의 위치를 추정하는 기법이다. 구체적으로, 각 위성 신호를 LOS(line-of-sight) 또는 NLOS(non-line-of-sight)로 분류한 뒤, 신호 유형에 따라 사용자의 위치를 GNSS shadow 영역의 내부 또는 외부로 제한한다. LOS 신호로 분류된 경우 수신기는 GNSS shadow 외부에 위치한다고 판단하며, NLOS 신호의 경우에는 GNSS shadow 내부에 위치한다고 판단한다. 이러한 제약 조건을 모든 가시 위성에 대해 적용함으로써, 사용자의 최종 위치 영역을 결정한다.

그러나 기존 ZSM은 위성 신호의 LOS/NLOS 분류 결과에 크게 의존한다는 한계를 가진다. 각 위성으로부터 도출된 위치 제약 조건이 이분법적으로 적용되기 때문에, 단 하나의 위성이라도 오분류가 발생할 경우 제약 조건들의 교집합이 공집합이 되어 위치 추정이 실패할 수 있다. 신호의 LOS/NLOS 분류에 일반적으로 사용되는 기계학습 기반 기법들은 분류 정확도가 약 80% 수준으로 [3], 신호 오분류는 불가피하게 발생한다. 따라서 이러한 오분류에 민감한 강한 이분법적 방식은 실환경 적용에 한계를 가진다.

본 논문에서는 기존 ZSM의 한계를 극복하기 위해 GNSS shadow 정보를 활용한 사용자 위치 확률 지도 생성 기법을 제안한다. 제안 기법은 위성 신호의 LOS/NLOS 분류 결과에 따라 사용자의 위치를 이분법적으로 제한하는 대신, 각 위치에 대해 사용자가 존재할 확률을 할당한다. 이를 통해 일부 위성 신호의 오분류가 발생하더라도 위치 추정의 실패를 방지할 수 있으며, 생성된 확률 지도를 기반으로 가장 높은 확률을 갖는 영역

을 사용자 위치로 결정함으로써 도심 환경에서 보다 안정적인 GNSS 위치 추정이 가능하다.

II. 기존 ZSM 알고리즘의 한계

앞서 설명한 바와 같이, 기존 ZSM 알고리즘은 위성 신호의 LOS/NLOS 분류 결과를 기반으로 사용자의 위치 영역을 이분법적으로 제한하며, 모든 가시 위성으로부터 도출된 위치 제약 조건들의 교집합을 최종 사용자 위치 영역으로 결정한다. 모든 위성이 정확하게 분류되는 경우에는 항상 유효한 사용자 위치 영역이 도출되지만, 일부 위성에서 오분류가 발생할 경우 제약 조건의 교집합이 존재하지 않아 위치 추정이 실패할 수 있다. 실제로 도심 환경에서 수집한 GPS 신호 데이터를 이용해 실험한 결과, 기존 ZSM 알고리즘에서 사용자 위치 추정의 실패가 빈번히 발생함을 확인하였다. 이러한 실험 결과에 대한 정량적인 분석은 Section V에서 자세히 설명한다.

III. GNSS shadow 기반 사용자 위치 확률 지도 생성 기법

본 논문에서는 도심 환경에서 위성 신호의 오분류가 발생하더라도 위치 추정이 실패하지 않도록, 기존 ZSM 알고리즘의 이분법적 판단 방식을 확률론적 접근으로 확장한 사용자 위치 확률 지도 생성 기법을 제안한다.

먼저 기존 ZSM과 동일하게 GPS 기반 초기 위치 추정 결과를 중심으로, 한번의 길이가 120 m인 정사각형 형태의 사용자 위치 후보 영역을 설정하고, 각 위성에 대해 건물로 인해 형성되는 GNSS shadow 영역을 계산한다 [2]. 이후 건물과 GNSS shadow 정보가 포함된 사용자 위치 후보 영역을 240×240 픽셀의 2차원 이미지로 변환한다. 다음으로 위성의 LOS/NLOS 분류 결과를 기반으로 각 픽셀에 사용자 존재 확률을 할당한다. 예를 들어, 신호가 LOS로 분류된 경우 shadow 영역 외부에 해당하는 픽셀에는 0.8, shadow 영역 내부에 해당하는 픽셀에는 0.2의 확률을 부여한다. 반대로 NLOS로 분류된 경우에는 shadow 영역 내부 픽셀에 0.8, 외부 픽셀에 0.2의 확률을 할당한다. 이와 같은 과정을 모든 위성에 대해 수행한 뒤, 각 위성으로부터 생성된 240×240 확률 행렬들을 픽셀 단위로 곱하여 최종 사용자 위치 확률 지도를 구성한다. 이때 확률값이 클수록 해당 위치에 사용자가 존

재할 가능성이 높음을 의미한다. 최종 수신기 위치 좌표는 확률 지도에서 높은 확률값을 갖는 픽셀 영역의 무게중심으로 결정한다. 그림 1은 오분류가 없는 조건에서 기존 ZSM 알고리즘과 제안한 기법의 사용자 위치 추정 결과를 비교한 것이다. 두 방식 모두 GNSS shadow 정보를 기반으로 사용자 위치를 추정하므로, 추정된 사용자 위치 자체에는 차이가 없다. 그러나 기존 ZSM은 최종 사용자 위치 영역만을 산출하는 반면, 제안한 기법은 각 픽셀에 대해 사용자가 존재할 확률 분포를 제공함을 확인할 수 있다.

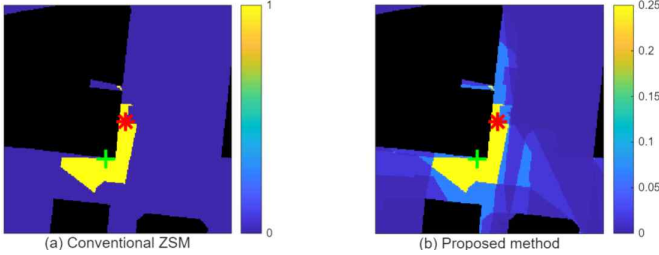


그림 1. 위성 신호 오분류가 없는 조건에서 (a) 기존 ZSM 알고리즘의 결과와 (b) 제안 기법의 확률지도 예시. (검정색 영역: 건물 영역, 빨간색 표식: 수신기 실제 위치, 초록색 표식: 수신기 추정 위치)

IV. 성능 분석을 위한 실험 설계

오분류된 위성 신호가 존재하는 상황에서도 제안한 사용자 위치 확률 지도 생성 기법이 강건한 위치 추정 성능을 유지할 수 있는지를 검증하기 위해, 실제 도심 환경에서 수집된 GPS 신호 데이터를 기반으로 성능 분석을 수행하였다. 실험에는 오픈 소스 데이터셋인 UrbanNav[4]를 사용하였으며, 홍콩 지역에서 수집된 총 642 epoch의 GPS 신호 데이터를 활용하였다. 위성 신호의 오분류는 각 epoch에서 일정 개수의 위성이 잘못 분류되는 상황을 가정하여 인위적으로 구현하였다. 구체적으로, 일부 위성을 선택한 뒤 해당 위성의 신호 수신 환경(LOS/NLOS)을 실제와 반대로 설정함으로써 오분류를 모사하였으며, 오분류 위성의 개수는 1개에서 3개까지 변화시키며 분석을 수행하였다. 이러한 설정을 바탕으로 기존 ZSM과 제안한 기법의 위치 추정 성공률을 비교하였다. 또한 오분류 위성 개수별로 최종 추정 위치의 RMS 수평 위치 오차를 계산하여, 오분류 수준에 따른 제안 기법의 위치 추정 정확도 변화를 함께 분석하였다.

V. 실험 결과

그림 2는 두 개의 위성에서 오분류가 발생한 상황에서 기존 ZSM과 제안한 기법의 사용자 위치 추정 결과를 비교한 예시이다. 기존 ZSM은 그림 2(a)와 같이 위치 제약 조건의 교집합이 형성되지 않아 사용자 위치 추정에 실패한 반면, 제안한 기법은 사용자 위치 확률 지도를 생성하여 그림 2(b)와 같이 최종 사용자 위치를 성공적으로 추정한다.

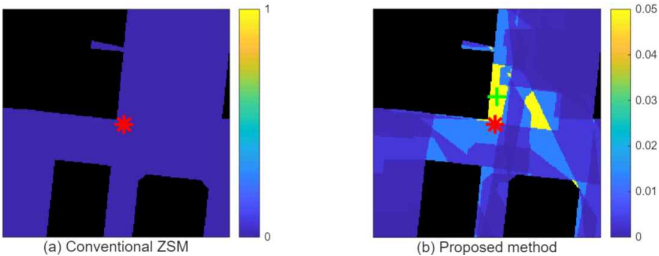


그림 2. 위성 신호 오분류가 발생한 상황에서의 기존 기법과 제안한 기법의 위치 추정 결과 비교 (검정색 영역: 건물 영역, 빨간색 표식: 수신기 실제 위치, 초록색 표식: 수신기 추정 위치)

더 나아가, 오분류 위성 개수에 따른 위치 추정 성공률을 분석하였으며, 이는 그림 3(a)와 같다. 기존 ZSM의 경우 오분류 위성 개수가 증가함에 따라 성공률이 감소하였지만, 제안한 기법은 오분류 위성 개수와 무관하게 모든 조건에서 성공률 100%를 유지하여, 오분류 환경에서도 위치 추정 실패가 발생하지 않음을 확인하였다.

마지막으로, 제안한 기법의 오분류 위성 개수에 따른 RMS 수평 위치 오차를 분석한 결과를 그림 3(b)에 제시하였다. 오분류 위성 개수가 증가할수록 RMS 수평 위치 오차 또한 증가하는 경향을 보이며, 이는 위성 오분류 수준이 위치 추정 정확도에 영향을 미침을 의미한다.

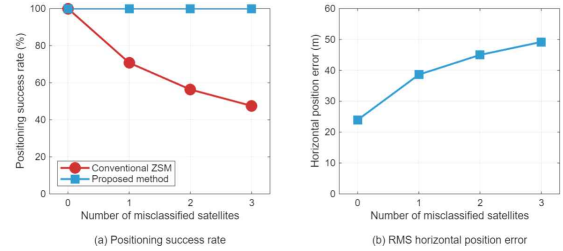


그림 3. 오분류 위성 개수에 따른 성능 변화. (a) 위치 추정 성공률, (b) 제안 기법의 RMS 수평 위치 오차

VI. 결론

본 논문에서는 위성 신호의 LOS/NLOS 오분류가 발생하는 상황에서도 강건한 사용자 위치 추정이 가능하도록, GNSS shadow 정보를 활용한 사용자 위치 확률 지도 생성 기법을 제안하였다. 기존 기법은 오분류 위성 개수가 증가함에 따라 위치 추정 성공률이 감소하는 반면, 제안한 기법은 오분류 위성이 존재하는 모든 조건에서 위치 추정 성공률 100%를 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(RS-2024-00358298), 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었음(RS-2024-00407003, 지상파 항법시스템 고도화 기술개발). 또한, 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 수행되었으며(RS-2020-NR046546), 우주항공청의 재원으로 지원을 받아 수행되었고(RS-2022-NR067078), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00437494).

참고 문헌

- [1] H. Lee et al., "Urban road safety prediction: A satellite navigation perspective," *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 14, no. 6, pp. 94-106, 2022.
- [2] S. Bhamidipati et al., "Set-valued shadow matching using zonotopes for 3D-map-aided GNSS localization," *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 69, no. 4, 2022.
- [3] S. Kim and J. Seo, "Machine learning-based classification of GPS signal reception conditions using a dual polarized antenna in urban areas," *Proc. IEEE/ION PLANS*, pp. 113-118, 2023.
- [4] L. T. Hsu et al., "UrbanNav: An open-sourced multisensory dataset for benchmarking positioning algorithms designed for urban areas," *Proc. ION GNSS+ 2021*, pp. 226-256, 2021.