

주머니 환경에서 PCA 기법을 결합한 딥러닝 스마트폰 PDR 시스템

김주안, 신요안*

송실대학교 전자정보공학부

jooan0102@soongsil.ac.kr, *yashin@ssu.ac.kr

Smartphone PDR System Based on Deep Learning with PCA in Pocket Environments

Joo-An Kim, Yoan Shin*

School of Electronic Engineering, Soongsil University

요약

스마트폰 내장 관성 측정 장치 센서를 활용한 보행자 관성 항법 (Pedestrian Dead Reckoning; PDR) 시스템은 주머니와 같은 기기의 무작위적인 흔들림과 회전이 발생하는 환경에서 방향 추정의 정확도가 크게 저하되어 정밀한 경로 추정에 한계가 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 주성분 분석을 적용하여 보행자의 주 이동 방향을 추출하고, 획득된 방향 데이터를 딥러닝 기반 PDR 모델의 입력 데이터로 활용하여 경로를 복원하는 시스템을 제안한다. 제안 시스템의 성능을 검증하기 위해 보행 실험을 수행하였으며, 직선 및 회전 구간에서 정답 경로를 안정적으로 추정하였음을 확인하였다.

I. 서론

스마트폰 내장 관성 측정 장치 (Inertial Measurement Unit; IMU) 센서를 활용한 보행자 관성 항법 (Pedestrian Dead Reckoning; PDR) 시스템은 주로 Android OS (Operating System)에서 제공되는 Game Rotation Vector 또는 자이로스코프 센서의 적분값을 사용하여 보행자의 방향을 추정한다[1]. 하지만, 기기가 신체에 고정되어 있지 않은 주머니 환경에서는 기기의 무작위적인 흔들림과 회전으로 인해 기존 기법으로는 정밀한 방향 추정에 어려움이 존재한다. 본 논문에서는 센서 데이터가 불안정한 환경에서 주성분 분석 (Principal Component Analysis; PCA) 기법을 활용하여 안정적인 방향 데이터를 추출하고, 해당 데이터를 딥러닝 (Deep Learning) 기반 PDR 모델의 입력 데이터로 사용하여 정밀한 경로 추론을 가능하게 하는 시스템을 제안한다.

II. 주머니 환경에서의 방향 추정

PCA 기법은 데이터의 분포를 분석하여 데이터를 가장 잘 설명하는 핵심 축을 수학적으로 추출하는 통계적 기법이다[2]. 보행 시 발생하는 가속도 시계열 데이터는 보행자의 이동 방향을 따라 반복적인 신호 패턴을 형성하는 특성이 있으므로, 가속도 시계열 데이터에 PCA 기법을 적용하여 추출된 첫 번째 주성분 벡터를 통해 보행자 이동 방향을 추정할 수 있다.

본 논문에서는 주머니 환경에서의 불안정한 센서 데이터로 정확한 이동 방향 데이터를 추출하기 위해 80Hz 주기로 수집된 3축 선형 가속도 데이터에 PCA 기법을 적용하였다. 구체적으로 2초 분량의 데이터를 하나의 입력 윈도우로 구성하였고, 슬라이드는 8로 설정하여 0.1초 간격으로 방향 데이터를 추출하였다. 각 구간 내 가속도 데이터의 분산이 최대가 되는 첫 번째 주성분 벡터를 계산하여 이를 보행자의 주 이동 방향으로 정의하였다.

그림 1은 제안 기법 및 기존 기법을 사용하여 추출한 방향 데이터들과 정답 데이터 (Ground Truth; GT)를 비교한 결과이며, 그래프의 파란색 점과 주황색 점은 각각 Game Rotation Vector와 자이로스코프 센서 적분값으로 추정한 기존 기법들의 방향 데이터이다. 그림 1에서 도시된 바와

같이, 기존 기법들로 추정된 데이터는 심한 진동을 보이며 연속적인 보행 경로 복원에 필수적인 방향 추정의 일관성을 확보하는 데 있어 한계를 보인다. 반면, 초록색 점은 제안된 PCA 기법을 사용하여 2초간의 가속도 패턴을 분석하여 산출된 결과로서, 이상치 데이터와 잡음이 효과적으로 억제되었음을 확인하였다. 해당 결과는 빨간색 실선으로 표시된 GT의 방향을 안정적으로 추종하며, 기존 방향 계산 방식에 비해 딥러닝 모델의 입력 데이터로서 높은 신뢰성을 가짐을 확인할 수 있다.

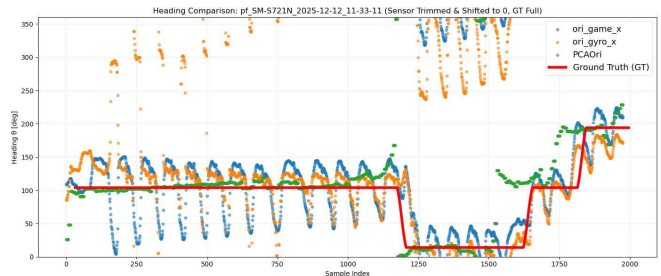


그림 1. GT 대비 제안 기법 및 기존 기법들의 방향 추정 결과 비교

III. 딥러닝 기반 PDR 모델

주머니 환경에서 연속적인 보행 경로를 추정하기 위해, 선행 연구에서 제안된 딥러닝 기반 PDR 모델 구조를 사용하였다[3]. 해당 모델은 다층 퍼셉트론 (Multi-Layer Perceptron; MLP) 기반의 딥러닝 회귀 모델이며, 입력 데이터는 식 (1)과 같이 가속도 및 자이로스코프 데이터의 크기 (Magnitude) 와 0도에서 360도 범위로 정규화된 방향 데이터로 구성된다. 또한, 모델의 출력 데이터는 GPS 기반의 상대적인 이동 변화량이며, 1초 마다의 추론 값을 누적하여 최종 궤적을 산출한다.

$$[Acc_{mag}, Gyro_{mag}, Heading]. \quad (1)$$

본 연구의 핵심은 추론 과정에서의 입력 데이터 최적화에 있으며, 기존 기법으로 추정된 불안정한 방향 데이터를 제안 기법으로 추정한 안정적인 방향 데이터로 대체하였다. 이를 통해 모델은 이상치 및 잡음이 제거된 방

향 데이터를 바탕으로 다음 시점의 위치를 강건하게 추론할 수 있다.

IV. 실험 결과 및 결론

제안된 PCA 기반 경로 추정 시스템의 유효성을 검증하기 위해, 숭실대학교 형남공학관 12층 복도에서 총 세 차례의 회전 구간이 포함된 경로를 설정하여 보행 실험을 진행하였다. 스마트폰을 주머니에 소지한 환경에서 데이터를 수집하였으며, 실험 기기는 삼성 Galaxy S24 FE를 사용하였다. 그림 2는 주머니 환경에서 제안 시스템을 사용하여 추정한 경로와 GT와의 비교 결과이다. 실험 결과 직선 및 회전 구간에서 GT 경로를 안정적으로 추종하며, 결과적으로 1.74m의 절대 궤적 오차 (Absolute Trajectory Error; ATE)를 기록하였다.

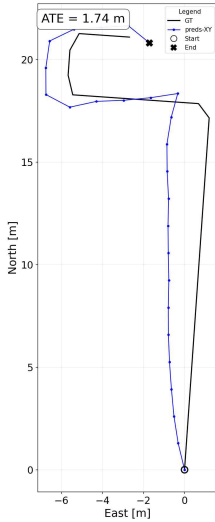


그림 2. 제안 시스템의 추론 경로와 GT 경로 비교

본 논문에서는 주머니 환경에서 기존 기법으로 보행자의 정확한 이동 방향 추정이 어려운 문제를 해결하기 위해, PCA 기법을 적용하여 강건한 방향 데이터를 추출하였다. 이후, 해당 데이터를 딥러닝 기반 PDR 시스템의 입력으로 활용하여 정밀한 경로 추정이 가능한 시스템을 제안하였다. 향후 스마트폰 사용자의 자세를 분류하여, 각 자세에 가장 적합한 방향 추정 알고리즘을 사용하는 적응형 PDR 시스템으로의 발전 가능성을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-16071705)

참 고 문 헌

- [1] J. Ye, A. Mansour, and F. Huang. "Enhancing real-time heading estimation for pedestrian navigation via deep learning and smartphone embedded sensors," *Scientific Reports*:15.31672, 2025.
- [2] Maćkiewicz, Andrzej, and W. Ratajczak. "Principal components analysis (PCA)," *Computers & Geosci.*, pp. 303-342, Mar. 1993.
- [3] K.-S. Kim and Y. Shin, "Deep learning-based PDR scheme that fuses smartphone sensors and GPS location changes," *IEEE Access*, vol. 9, no. 1, pp. 158616-158631, Dec. 2021.