

BLE 채널분리를 활용한 파티클 필터 기반 비콘 위치추정

이범준, 김승구*

*충북대학교

siddhartha@chungbuk.ac.kr, * kimsk@cbnu.ac.kr

Beacon Localization Using a Particle Filter with BLE Channel Separations

Lee Beom Jun, Kim Seung Ku*

*Chungbuk National Univ.

요 약

본 논문은 이동 로봇을 활용하여 실내 환경에 배치된 저전력 블루투스 비콘의 위치를 추정하는 시스템을 제안한다. 수신 신호 강도 기반의 위치 추정은 경제적이지만, BLE 광고 채널 간의 주파수 특성 차이와 실내 환경의 간섭으로 인해 신호 변동성이 크다는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 37, 38, 39 번 채널의 데이터를 독립적으로 수집하여 처리하는 등가 가중 평균 기법과 누적된 확률 정보를 활용하는 파티클 필터를 결합한 시스템을 구축하였다. 실험결과, 제안 기법은 기존 가중 최소 자승법 및 기본 파티클 필터 대비 우수한 안정성을 보였으며, 최종적으로 평균 5.91 m의 오차로 비콘 위치를 추정하였다.

I. 서론

최근 스마트 물류 및 자산 관리 분야에서 실내 실시간 위치 추정 시스템의 수요가 증가하고 있다. 저전력 블루투스(Bluetooth Low Energy, BLE) 기술은 저비용 및 저전력 특성 덕분에 대규모 자산 추적을 위한 핵심 인프라로 활용되고 있다. 그러나 수만 개의 비콘이 설치된 환경에서 관리의 효율성을 높이기 위해서는 비콘의 설치 좌표를 자동으로 파악하는 위치추정 기술이 선행되어야 한다. 기존의 수동 매핑 방식은 인적 오류의 가능성이 크고, 환경 변화에 유연하게 대응하기 어렵다는 한계를 지닌다. 따라서 이동 로봇이 주행하며 미지의 비콘 위치를 추정하는 기술은 운영 자동화를 위한 필수적인 과제이다.

무선 신호 기반의 위치 추정 기술 중 수신 신호 강도(Received Signal Strength Indicator, RSSI)를 이용한 방식은 별도의 고가 장비 없이도 구현이 가능하여 경제적이다. 하지만 RSSI 데이터는 실내 환경의 간섭과 노이즈로 인해 단일 신호원만으로는 신뢰성을 보장하기 어렵다[1]. 특히 BLE 표준 규격상 존재하는 3 개의 광고 채널은 서로 다른 주파수 대역을 사용하므로, 동일한 위치에서도 채널별로 상이한 페이딩 특성을 나타낸다[2]. 이러한 채널별 편차를 고려하지 않은 채 데이터를 혼합하여 사용할 경우 RSSI 분포가 비정규성을 띠게 되어 파티클 필터의 위치추정 성능을 저하시킨다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 채널 분리 기법과 파티클 필터(Particle Filter, PF)를 결합한 확률적 위치 추정 시스템을 제안한다[3].

II. 본론

본 연구에서 제안하는 시스템은 라이다 센서를 장착한 모바일 로봇이 미지의 환경을 주행하며 비콘의 위치를

탐색하는 과정을 포함한다. 로봇은 주행 중 라이다 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 기술을 통해 실시간으로 실내 지도를 작성함과 동시에 자신의 정밀한 위치를 추정하며, 이와 동시에 주변 비콘으로부터 발신되는 RSSI 데이터를 수집한다. 수집된 RSSI 세기는 경로 감쇠 모델을 통해 로봇과 비콘 사이의 거리 정보로 변환되는데, 특정 시점의 단일 관측치는 방향성이 결여된 1 차원적인 거리 정보만을 제공한다. 그러나 로봇이 환경 내의 다양한 지점을 이동하며 RSSI 데이터를 누적 수집함에 따라, 다각도에서 획득된 거리 정보가 교차하며 비콘의 2 차원 좌표를 나타내는 유의미한 위치 정보로 전환된다. 이러한 데이터 수집 및 처리 과정은 크게 무선 신호 전처리와 확률적 위치 추정의 두 가지 핵심 기법으로 구성된다.

첫 번째 기법인 채널 분리 알고리즘은 BLE 광고 패킷의 물리적 송신 특성을 고려하여 설계되었다. BLE 표준 규격에 따라 비콘은 신호 간섭을 피하고 통신 안정성을 확보하기 위해 37(2,402 MHz), 38(2,426 MHz), 39(2,480 MHz)번 채널을 순회하며 신호를 송신한다. 하지만 이동 로봇에 탑재된 일반적인 BLE 스캐너는 특정 시점에 하나의 채널만을 수신할 수 있으므로, 수집된 RSSI 는 각 채널의 주파수별 페이딩 특성에 의해 큰 변동을 겪게 된다. 본 연구에서는 이를 상쇄하기 위해 수집된 신호를 즉시 위치 추정에 사용하지 않고, 3 개의 물리 채널 데이터가 모두 확보될 때까지 대기하는 등가 가중 평균 기법을 적용한다. 세 채널의 데이터가 모두 갖춰진 순간, 아래의 식과 같이 각 채널의 평균값을 다시 평균하여 대표 RSSI 값 $\overline{P_{RSSI}}$ 를 산출함으로써 특정 주파수에 대한 편향성을 제거한다.

$$\overline{P_{RSSI}} = \frac{1}{3} \sum_{k \in \{37, 38, 39\}} \left(\frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} P_{k,j} \right) \quad (1)$$

여기서 n_k 는 k 번째 채널의 수집 횟수이며, $P_{k,j}$ 는 해당 채널의 j 번째 신호 강도이다. 이 전처리를 통해 RSSI 분포는 분산이 감소하고 모델링이 용이한 정규 분포(Normal Distribution) 형태를 회복하게 된다.

두 번째 기법은 RSSI의 높은 변동성을 확률적으로 수용하여 비콘의 위치를 추정하는 파티클 필터 프레임워크이다. 파티클 필터는 비콘의 위치를 상태 변수 $S = [x, y]^T$ 로 정의하며, 초기화, 가중치 갱신, 리샘플링의 3 단계를 통해 최적의 위치를 산출한다. 먼저 초기화 단계에서는 비콘 신호가 최초 감지된 로봇 좌표를 중심으로 최대 수신 범위 내에 파티클 $s_t^{(i)}$ 을 균등하게 배포하며, 비콘은 고정된 객체이므로 정적 전이 모델을 유지한다. 이후 갱신 단계에서는 전처리된 측정치 z_t 를 바탕으로 각 파티클의 가중치 $w_t^{(i)}$ 를 아래와 같이 업데이트한다.

$$w_t^{(i)} = \eta \cdot w_{t-1}^{(i)} \cdot p(z_t | s_t^{(i)}) \quad (2)$$

여기서 관측 우도 $p(z_t | s_t^{(i)})$ 는 로그-거리 경로 감쇄 모델로 계산된 각 파티클의 기대 RSSI 값과 실제 측정값 사이의 유사도를 정규 확률 밀도 함수로 산출한 값이다. 마지막으로 리샘플링 단계에서는 유효 파티클 수 $N_{eff} = 1/\sum (w_t^{(i)})^2$ 를 모니터링하여 임계치 미만일 경우 시스템 리샘플링을 수행한다. 리샘플링 직후에는 입자의 다양성을 위해 미소 변위 지터를 추가하며, 최종적인 비콘 위치는 모든 파티클의 가중 평균 위치로 결정된다.

실험은 충북대학교 내 $30\text{m} \times 18\text{m}$ 크기의 공간에서 수행하였다. 실험 공간에는 총 25 개의 BLE 비콘을 격자 형태로 배치하였으며, LiDAR 센서와 BLE 스캐너가 장착된 이동 로봇이 사전에 계획된 경로를 주행하며 데이터를 수집하였다. 로봇은 주행 중 각 비콘으로부터 평균적으로 약 80 회의 RSSI 데이터를 수신하였으며, 수집된 데이터는 제안하는 채널 분리 기법과 파티클 필터 알고리즘을 통해 처리되었다. 성능 비교를 위해 기존의 가장 최소 자승법(Weighted Least Squares, WLS)과 채널 분리가 적용되지 않은 기본 파티클 필터(PF Base)를 동일한 데이터셋에 적용하여 위치 추정 오차를 분석하였다.

실험 결과, 제안하는 채널 분리(Channel Separation, CS)를 활용한 파티클 필터방식이 모든 실험 세트에서 가장 우수한 정밀도와 안정성을 보였다. 그림 1의 박스플롯 결과에 따르면, WLS 방식은 RSSI의 순간적인 노이즈와 페이딩 현상에 민감하게 반응하여 이상치를 발생시키는 등 불안정한 모습을 보였다. 반면, 파티클 필터 기반의 방식들은 누적된 확률 정보를 활용함으로써 오차 범위를 크게 줄였음을 확인하였다. 특히, 기본 파티클 필터(PF Base)와 비교했을 때 채널 분리기법을 적용한 제안 방식은 평균 오차를 더욱 감소시켰다. PF Base 방식은 채널별 주파수 편차로 인한 비정규적 잡음 때문에 특정 지점에서 오차가 발산하는 경향이 있으나, PF + CS 방식은 증가 가중 평균을 통해 신호의 분산을 억제함으로써 6 m 내외의 안정적인 추정 성능을 유지하였다. 이는 주파수 채널별 페이딩 특성을 전처리 단계에서 평균한 것이 필터의 수렴 정확도를 높이는 데 기여한 것으로 분석된다. 결과적으로 제안 기법은 단일 시점의 신호 품질에 의존하지 않고 로봇의 주행에 따른 공간적 관측 정보를 효과적으로 융합하여 위치 추정의 신뢰도를 향상시켰다.

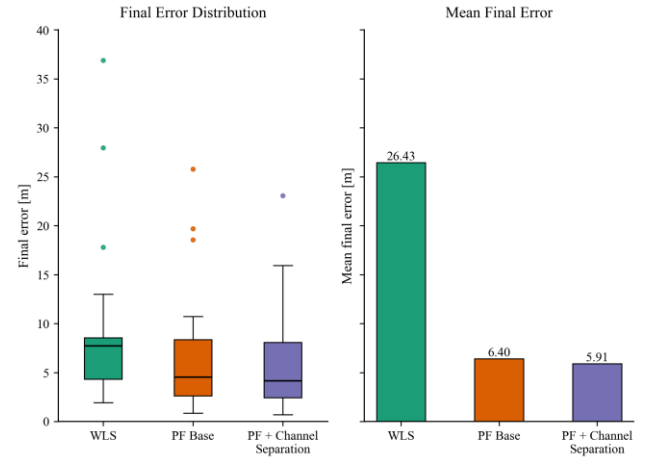


그림 1. 위치추정오차 분포(좌)와 평균 위치추정오차(우)

III. 결론

본 논문은 이동 로봇을 활용한 비콘 위치 추정에서 RSSI의 불안정성을 극복하기 위해 채널 분리 기반의 증가 가중 평균 알고리즘과 파티클 필터를 결합한 시스템을 제안하였다. BLE 광고 채널의 물리적 특성을 고려한 전처리 기법을 통해 RSSI 데이터의 분산을 감소시켰으며, 파티클 필터의 확률적 갱신 과정을 통해 데이터를 누적하는 위치추정을 수행하여 단일 측정 노이즈에 강인한 위치 추정 성능을 달성하였다. 실험을 통해 제안 기법은 RSSI 데이터가 누적됨에 따라 추정 오차가 점진적으로 감소하며 실제 위치로 수렴하는 모습을 보였고 최종적으로 평균 5.91m의 오차로 비콘의 위치를 추정하였다. 향후 연구에서는 BLE 센서의 관성 데이터를 융합하여 이동하는 BLE 비콘에 대하여 위치추정을 하는 연구를 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2022R1A5A8026986). 본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0020536, 산업혁신인재성장지원사업). 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업임(IITP-2025-RS-2020-II201462).

참고 문헌

- [1] A. Booranawong, K. Sengchuai, and N. Jindapetch, "Implementation and test of an RSSI-based indoor target localization system: Human movement effects on the accuracy," *Measurement*, vol. 133, pp. 370-382, Feb. 2019.
- [2] Bluetooth SIG, "Bluetooth Core Specification v6.0," Vol. 6, Part B (Link Layer), Sec. 1.4 (Physical channels) and Sec. 1.4.1 (Physical channel indices).
- [3] S. Thrun, D. Fox, W. Burgard, and F. Dellaert, "Robust Monte Carlo localization for mobile robots," *Artificial Intelligence*, vol. 128, no. 1-2, pp. 99-141, May 2001.