

모바일 로봇을 활용한 파티클 필터 기반 BLE 비콘 위치추정

이범준, 김승구*

*충북대학교

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

Particle Filter-based BLE Beacon Localization Using a Mobile Robot

Lee Beom Jun, Kim Seung Ku*

*Chungbuk National Univ.

요약

본 논문은 BLE 신호의 RSSI 값을 기반으로, LiDAR SLAM과 파티클 필터 기법을 결합하여 BLE 비콘의 위치를 추정하고 이를 시각화하는 방법을 제안한다. 이동형 로봇이 환경을 이동하면서 각 비콘의 RSSI 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 비콘과의 거리 추정을 수행한다. 측정된 RSSI 값은 환경 노이즈와 불확실성을 고려하여 파티클 필터 기반의 확률적 추정기법으로 처리된다. 추정된 비콘 위치는 LiDAR로 생성된 지도 상에 시각화되어 비콘 분포의 공간적 배치를 보여준다. 실험 결과, 제안된 방법은 약 1.82 m의 평균 위치추정 오차를 달성하였으며, BLE 비콘 위치추정 분야에서 실제 적용 가능성을 입증하였다.

I. 서론

Bluetooth 4.0의 등장과 함께 BLE (Bluetooth Low Energy) 비콘 기술은 실내 위치추정, 자산 추적, 재고 관리 등 다양한 분야에서 주목받고 있다. 특히 산업 및 물류 환경에서는 BLE 비콘을 이용한 실시간 추적을 통해 운영 효율성과 자원 관리 능력을 향상시킬 수 있다. 또한, BLE는 저전력·저비용 특성을 지녀 스마트 빌딩, 병원, 공항 등의 다양한 실내 공간에서도 널리 활용되고 있다. 하지만 BLE 비콘의 정확한 위치추정은 BLE 신호의 간섭, 다중경로 전파, 비가시선(NLOS: Non-Line-of-Sight) 효과 등의 영향으로 인한 높은 신호 잡음으로 인해 어려움이 있다[1]. 특히 실내 환경은 벽, 가구, 인체 등 다양한 장애물이 존재하여 RSSI(Received Signal Strength Indicator, 수신 신호 강도)의 변동성을 증가시키며, 이로 인해 단순 RSSI 기반 거리 추정은 오차가 매우 커질 수 있다. 이를 해결하기 위해 기존에는 RSSI 평균값 기반의 삼변측량 방식이 활용되어 왔으나, 여전히 RSSI 신호잡음으로 인해 신뢰도 확보에는 한계가 존재한다.

본 논문에서는 BLE RSSI 측정값을 사용하여 실내 환경 내에서 LiDAR SLAM(Simultaneous Localization And Mapping)과 파티클 필터 기반의 확률적 추정기법을 결합한 BLE 비콘의 위치추정 방식을 제안한다. LiDAR 센서를 장착한 로봇으로부터 로봇의 실시간 위치 정보를 획득하고, 파티클 필터링 기법을 적용하여 RSSI 기반 거리 측정의 불확실성을 보완함으로써, 보다 견고하고 정밀한 비콘 위치추정을 달성하는 것을 목표로 한다. 본 연구는 저비용 BLE 인프라만을 이용하여 위치추정이 가능하다는 점에서 향후 다양한 위치기반 서비스에 응용할 수 있는 가능성을 제시한다.

II. 본론

제안하는 BLE 비콘 위치추정 방식은 다음과 같은 5단계를 반복한다. LiDAR 기반의 지도 생성 및 로봇 위치추정, 주기적인 BLE 비콘 신호 수신, RSSI 측정 및 칼만 필터링, 파티클 필터 기반 확률적 위치추정, 결과 시각화.

LiDAR 센서를 탑재한 이동형 로봇이 환경을 주행하면서 Google Cartographer [2] SLAM 알고리즘을 이용해 2D 지도를 구축하고 실시간으로 자신의 위치를 추정한다. BLE 비콘은 사전에 알려지지 않은 위치에 배치하며, 일정한 주기와 신호강도로 신호를 송출한다. 로봇은 이동 중 수신된 신호의 RSSI 값을 이용하여 비콘과의 거리 추정을 시도한다. RSSI 값은 일반적으로 로봇과 비콘 간의 거리가 멀어짐에 따라 감소하며, 추정 거리는 이상적으로 잡음을 포함한 정규분포 형태인 수식 (1)을 따른다.

$$d = 10^{\frac{RSSI_0 - RSSI}{10n}} + \delta \quad (1)$$

d 는 수신기(로봇)와 송신기(비콘)간의 추정 거리(m), $RSSI_0$ 은 기준거리(일반적으로 1 m)에서의 RSSI 값(dBm), n 은 경로손실지수, δ 은 정규분포 $N(0, \sigma_d^2)$ 를 따르는 잡음 항으로 오차를 반영한다.

그러나 실내 환경에서는 다중경로 효과, 장애물로 인한 반사 및 굴절, 비가시선(NLOS) 조건 등의 다양한 요인으로 인해 RSSI의 잡음 특성이 불규칙해지고, 그 분포가 정규성을 벗어나는 경향을 보인다. 이러한 비정상적인 잡음 분포를 보정하기 위해 Kalman 필터를 적용함으로써, RSSI 값을 평활화하고 평균이 d 인 정규분포에 가까운 형태로 유도할 수 있다. Kalman 필터는 단기적인 RSSI의 변동성을 효과적으로 억제하지만, 일부 잔여 잡음은 여전히 거리 추정의 정확도에 영향을 미친다. 이를 해결하기 위해 파티클 필터 [3] 기반의 위치추정 기법을 추가적으로 도입하여 비콘의 위치를 보다 견고하게 추정한다. 파티클 필터는 지도 상에 다수의 파티클(비콘의 위치 후보)을 분포시켜 확률적인 위치 추정을 수행하며, 필터링된 RSSI 값과 로봇의 위치 정보를 이용해 반복적으로 파티클을 갱신한다. 파티클 필터링의 과정은 다음과 같다.

- 1) 초기화 : 일정한 개수의 파티클을 사전에 설정한 크기의 영역에 무작위로 분포시킨다.
- 2) 예측 단계 : 파티클을 미세하게 무작위 이동시켜 다양성을 유지하고, 반복수행과정에서 발생하는 파티클의 퇴화를 완화한다.
- 3) 갱신 단계 : Kalman 필터로 평활화된 RSSI 값을 기반으로 로봇과 비

큰 간의 거리를 d 로 추정한 후, 각 파티클의 위치와 로봇 위치 간의 실제 거리를 평균이 d 인 가우시안 확률밀도 함수에 적용하여 해당 파티클의 가중치를 계산한다. 이때 가우시안 분포는 거리 추정의 불확실성을 반영하며, 계산된 가중치는 이후 리샘플링 단계에서 파티클 선택 확률로 활용된다.

- 4) 리샘플링 단계 : 가중치가 낮은 파티클은 제거하고, 높은 파티클은 중복 선택하여 가중치가 높은 파티클에 집중된 분포를 형성한다. 이를 통해 파티클의 분포는 유의미한 위치 근방으로 수렴한다.

최초 수신 시 초기화를 진행한 후 로봇이 위치를 이동하며 예측, 갱신, 리샘플링 과정을 RSSI 값이 수신될 때마다 반복한다. 로봇이 여러 위치에서 파티클과의 거리 값을 기반으로 가중치를 갱신하면 파티클의 분포는 점차 실제 비콘 위치 주변으로 수렴하게 된다. 모든 측정이 완료되면, 최종적으로 다수의 파티클 위치의 평균값을 LiDAR SLAM으로 생성한 지도상에 표시하여 비콘의 추정위치 분포를 시각화한다.

실험은 12 m * 6 m 크기의 실내 사무실 환경에서 수행되었다. 로봇에 장착된 Bluetooth 센서 높이에 맞추어 모든 비콘은 바닥에 배치되었다. 경로손실지수 및 1 m 기준 RSSI 값은 실험환경에서 반복측정을 통해 얻은 값으로 각각 2.5, -60 dBm으로 설정하였다. 파티클 필터의 초기화 단계에서 파티클은 비콘당 600개를 설정하였고, 예측단계의 무작위 이동량은 0.2 m로 설정하였다. 로봇은 약 250초 동안 환경을 주행하며 데이터를 수집하였고, 각 비콘당 평균 265.7회의 RSSI 측정을 수행하였다. 추정된 비콘의 위치는 LiDAR SLAM으로 생성한 지도상에 파란색 정사각형으로 표시하였고, 실제 비콘의 위치는 빨간색 원으로 표시하였다. 로봇의 이동 경로는 보라색 선으로 표시하였다. 배치된 10개의 비콘중 1개 (Beacon 6)는 로봇이 근접하지 못하여 RSSI 잡음을 영향을 크게 받았고, 이로 인해 위치추정 오차가 크게 나타났다. 나머지 9개의 비콘은 평균 1.82 m의 위치추정 오차를 기록하였다.

표 1. BLE 비콘 위치추정 실험 결과

비콘 ID	RSSI 수신 횟수	최근접 거리 (m)	위치추정 오차 (m)
Beacon 1	243	0.89	1.54
Beacon 2	260	1.63	1.12
Beacon 3	316	0.42	0.48
Beacon 4	308	1.05	1.36
Beacon 5	260	3.08	2.66
Beacon 6	241	3.74	8.25
Beacon 7	283	0.98	1.39
Beacon 8	269	0.51	0.23
Beacon 9	265	1.32	0.57
Beacon 10	212	0.70	0.67
평균 (m)	265.7	1.43	1.82

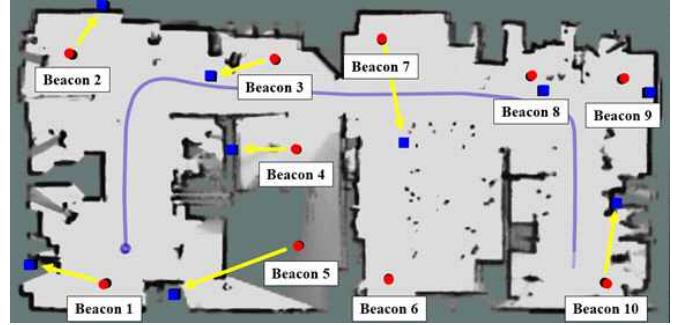


그림 1. BLE 비콘 위치추정 결과의 시각화

III. 결론

본 논문에서는 실내 환경에서 LiDAR SLAM 기반의 로봇 위치추정과 BLE 비콘의 RSSI 데이터를 활용하여, 비콘의 위치를 파티클 필터를 통해 추정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방식은 Kalman 필터를 이용해 RSSI 값의 잡음을 감소시키고, 거리 추정값을 기반으로 가우시안 확률밀도를 활용하여 파티클에 가중치를 부여함으로써, 비콘 위치에 대한 확률적 추정을 정교화하였다. 특히, 예측, 갱신, 리샘플링 단계를 반복 수행하여 파티클 분포를 점차 수렴시키는 구조를 통해, RSSI의 불확실성을 효과적으로 보완하였다. 실험은 12m * 6m 규모의 사무실 환경에서 진행되었으며, BLE 비콘 10개에 대해 평균 265회 이상의 RSSI 데이터를 수집하였다. 실험 결과 평균 1.82 m의 위치 오차를 보이며, 제안한 방식의 실내 위치추정 적용 가능성을 실험적으로 확인하였다. 향후 연구에서는 RSSI 외에도 Bluetooth 5.1에서 제공하는 도착각(Angle of Arrival, AoA) 및 출발각(Angle of Departure, AoD) 정보나 ToF(Time of Flight) 데이터를 결합하여 거리 추정의 정밀도를 향상시키는 방안이 고려될 수 있다.

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] J. Jung, D. Kang, and C. Bae, "Distance Estimation of Smart Device using Bluetooth," in Proc. ICSNC 2013: The Eighth International Conference on Systems and Networks Communications, Venice, Italy, Oct. 2013, pp. 13-18.
- [2] W. Hess et al., "Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM," in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden, May 2016, pp. 4950 - 4957.
- [3] M. S. Arulampalam et al., "A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 50, no. 2, pp. 174 - 188, Feb. 2002.