

비콘 탐색을 위한 BLE RSSI 기반 가중치-이동비용 융합 파티클 후보 선택 전략

이가진, 김승구*

*충북대학교

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

A Weight-Travel Cost Fusion Particle Selection Strategy for BLE RSSI-Based Beacon Search

Lee Gajin, Kim Seungku*

*Chungbuk National Univ.

요약

본 논문은 BLE RSSI 기반 파티클 분포를 입력으로 받아, 로봇의 이동 목표를 가중치·이동비용·페널티를 함께 고려해 선택하는 방법을 제안하였다. 가중치와 거리의 상대적 비중 요소인 α 를 변화시키며 기존 가중치만을 사용하는 방식과 비교한 결과 $\alpha=0.5$ 에서 평균 이동시간이 약 66% 감소, 평균 최종 위치 오차는 약 19.4% 감소로 가장 우수했다. 이를 통해 가중치와 이동 비용을 균형 있게 반영하고 페널티를 결합한 목표 선택이 실내 환경에서도 탐색 효율을 유의미하게 향상시킬 수 있음을 입증하였다.

I. 서 론

실내에서 위치가 알려지지 않은 신호 발생원을 찾아 해당 지점으로 이동하는 기술은 자산 추적, 시설 점검, 서비스 로봇 등 다양한 응용에서 활용될 수 있다. BLE 비콘은 비용 부담이 낮고 저전력 기반으로 장시간 신호 송출이 가능하며 별도의 기준 인프라나 정밀 동기 없이 수신만으로 관측 가능하다는 장점이 있다. 다만 RSSI는 환경에 따라 변동이 커 한 번의 측정으로 위치를 정확히 정하기 어렵기 때문에, 기존 연구에서는 BLE RSSI를 효과적으로 관측하기 위해 파티클 필터 기반의 위치 추정 방법을 사용해왔다[1]. 또한 RSSI 기반 탐색은 ‘신호 관측 - 이동 - 재관측’의 반복 과정을 통해 불확실성을 줄여나가는 구조를 가진다[2]. 따라서 다음에 로봇이 어떤 후보 지점으로 이동할지가 탐색 시간과 이동 효율을 좌우한다. 본 연구는 기존 연구에서 제공하는 파티클 분포(후보 위치와 가중치)를 입력으로 받아 로봇의 다음 이동 목표를 선택하는 전략에 초점을 둔다. 기존 방식[3]은 가중치(가능성)만으로 목표를 정해 불필요한 우회나 왕복이 발생하는 경우가 있었다. 이에 본 논문은 가중치뿐 아니라 로봇과 후보 지점 사이의 거리 요소(지도 기반 이동 비용)를 함께 고려하고, 이동 후 RSSI가 약해졌던 구역에는 페널티를 누적해 반복적인 비효율을 이동률을 줄이는 목표 선택 방법을 제안한다. 또한 가중치와 거리 요소의 비중을 조절하며 탐색 효율과 최종 정확도의 변화를 비교, 분석한다.

II. 본론

본 연구는 위치를 모르는 BLE 신호원을 실내에서 찾기 위해, 파티클의 관측 주기마다 비콘 후보 위치 파티클과 그 파티클의 가중치로 받아서 로봇이 다음에 어디로 이동할지를 결정하는 방법을 다룬다. 여기서 파티클 분포를 만들어주는 위치추정 단계는 선행 연구의 방식을 따르며, 본 논문은 결과를 입력으로 받아 이동 목표를 선택하는 규칙을 개선하는 데 초점을 둔다. 파티클의 가중치가 크다는 것은 해당 후보 위치가 관측된

RSSI에 더 잘 부합하여, 실제 신호원이 그 위치에 존재할 확률이 높다는 의미이다. 로봇이 이동하며 RSSI 관측을 반복할수록 가중치 분포는 점차 일부 후보에 집중되는 경향을 보이며, 파티클이 한 영역으로 수렴한다는 것은 후보 위치의 불확실성이 감소하고 실제 위치가 그 주변으로 좁혀지고 있음을 의미한다. BLE RSSI는 실내 환경에서 다중 경로, 차폐 등의 영향으로 변동이 커 단일 측정만으로 안정적인 위치 결정을 내리기 어렵다. 기존 방식은 가중치가 가장 큰 후보를 곧바로 목표로 선택한다. 하지만 가중치만 볼 경우, 초기에는 확률이 흔들리기 쉬워 목표가 자주 바뀌거나 실제 이동 관점에서 비효율적인 왕복, 우회가 생겼다. 이를 보완하기 위해 본 연구는 가중치 뿐 아니라 로봇과 후보 지점 사이의 이동 비용, 그리고 페널티를 함께 반영한다. 이동 비용은 단순 직선 거리가 아닌 지도에서 장애물을 고려해 실제로 얼마나 돌아가야 하는지를 반영하도록 wavefront BFS를 사용하여 점유격자 기반 거리 맵을 생성하여 거리를 계산하였다. 또한 페널티는 후보 지점으로 이동했을 때 RSSI가 약해진 경우 그 주변을 이후 선택에서 불리하게 만들어, 비효율적인 방향으로 반복 이동하는 현상을 줄이기 위한 장치로 활용하였다. 가중치와 거리 요소의 상대적 비중은 α 로 조절하며, α 가 클수록 가중치 중심, α 가 작을수록 거리 중심으로 목표 선택이 이루어진다.

본 연구는 α 를 0.3, 0.5, 0.7로 나누어 실험함으로써, 가중치 기반 수렴을 우선하는 전략과 이동 비용을 우선하는 전략 사이에서 어떤 균형이 실제 탐색 성능에 더 효과적인지를 비교, 분석한다. $\alpha=0.7$ 은 가중치 비중이 큰 조건, $\alpha=0.5$ 는 가중치와 거리를 같은 값으로 반영하는 조건, $\alpha=0.3$ 은 거리 비중이 큰 조건을 의미한다. 또한 가중치만을 사용한 기존 방식의 결과를 비교군으로 설정하고, 이동 비용 요소와 페널티를 추가로 반영한 목표 선택이 BLE 신호원의 실제 위치를 더 효율적으로 탐색하는지 평가하였다. $\alpha = 0.3, 0.5, 0.7$ 에 대하여 총 5회씩 실험을 수행하였다. 그림 1은 로봇의 이동 소요 시간의 평균과 기존 실험 결과의 이동 소요 시간의 평균을, 그림 2는 목표 지점과 로봇의 최종 위치 간 거리 오차의 평균을 시각화한

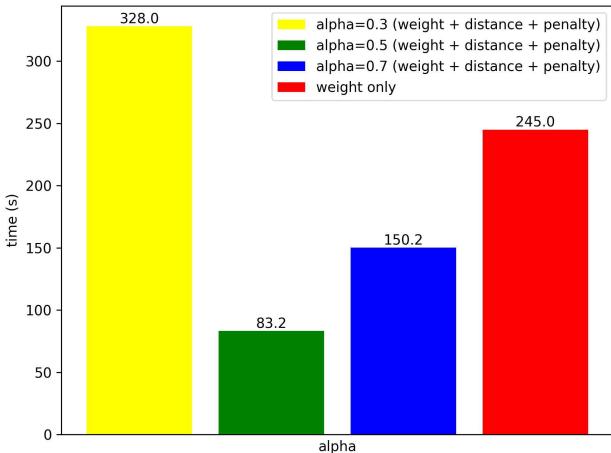


그림 1.a 변화에 따른 평균 이동 소요 시간 비교

것이다. 가중치만을 사용한 기존 방식의 실험 결과는 평균 이동 소요 시간은 약 245초, 평균 최종 위치 오차 약 0.67m로 나타났다. 제안 방식에서 $\alpha=0.5$ 로 설정한 경우 평균 이동 소요 시간은 83.2초, 평균 최종 위치 오차는 0.54m로 기존 방식 대비 가장 높은 성능을 보였다. 반면 $\alpha=0.7$ 에서는 평균 이동 소요 시간이 150.2초로 감소하였으나 평균 최종 위치 오차가 0.89m로 증가하였다. $\alpha=0.3$ 에서는 평균 이동 소요 시간이 328초, 평균 최종 위치 오차가 2.37m로 가장 낮은 성능을 보였다.

$\alpha=0.3$ 은 거리 요소 비중이 커서 로봇이 가까운 후보를 반복적으로 선택하는 경향이 강해진다. 그러나 RSSI는 거리만으로 매끄럽게 증가/감소하지 않고, 실내 환경에서는 벽, 금속 등에 의해 신호가 반사되거나 가려지면서 같은 거리에서도 RSSI가 크게 흔들릴 수 있다[4]. 이런 조건에서 로봇이 가까운 지점만 반복 탐색하면 관측 위치가 다양해지지 않아 유효 정보가 쌓이지 않고, 반복 관측으로 인한 가중치 편향으로 인해 일부 후보로 편향되는 문제가 생길 수 있다.[5] 따라서 $\alpha=0.3$ 에서 성능이 저하된 것은 가까운 목표 선호가 RSSI의 변동성과 결합되어 정보 수집이 비효율적으로 진행되었기 때문으로 해석할 수 있다. $\alpha=0.7$ 은 가중치 비중이 커서 로봇이 가능성이 높은 후보를 더 적극적으로 따라가므로 시간은 줄어드는 경향을 보였다. 그러나 RSSI의 신호가 실내에서는 잡음의 영향을 크게 받기 때문에 실제 신호원 방향이 아닌 위치에서 일시적으로 RSSI가 크게 관측되는 국소적인 최대값이 생길 수 있다[4]. 이 경우 로봇이 높은 가중치 후보를 따라가다가 다시 다른 후보로 전환하는 과정이 반복되면서 이동이 늦고, 결과적으로 최종 위치 오차가 증가할 수 있다. $\alpha=0.7$ 은 수렴 속도는 확보하였지만, RSSI 신호의 불규칙성 때문에 불필요한 이동이 완전히 줄어들지 않아 지표가 악화된 것으로 해석된다. 종합하면, RSSI의 변동성이 큰 환경에서는 가중치, 또는 거리 요소를 함께 고려하면서 불리 구역을 누적 반영하는 균형적 설정이 탐색 효율에 유리할 수 있으며 본 실험에서는 $\alpha=0.5$ 에서 그 경향이 가장 뚜렷하게 나타났다.

III. 결론

본 연구에서는 BLE RSSI 기반 신호원을 대상으로, 실내 환경에서 반복적인 이동-관측을 수행하며 목표 위치로 수렴하도록 하는 목표 선택 방법을 구현하였다. 기존의 가중치만으로 목표를 선택하는 방식에서 확장하여 가중치, 이동 비용, 패널티를 함께 고려하는 목표 선택 전략을 제안하고, α 를 변화시키며 성능 변화를 비교하였다. 그 결과, 가중치와 거리 요소를 균형있게 반영한 $\alpha=0.5$ 에서 기존 방식 대비 평균 이동 소요 시간이 약 66.0% 감소하고, 평균 최종 위치 오차가 약 19.4% 감소하여 가장 안정적인 성능을 보였다. 반면 거리 비중이 큰 $\alpha=0.3$ 에서는 평균 이동 소요 시간

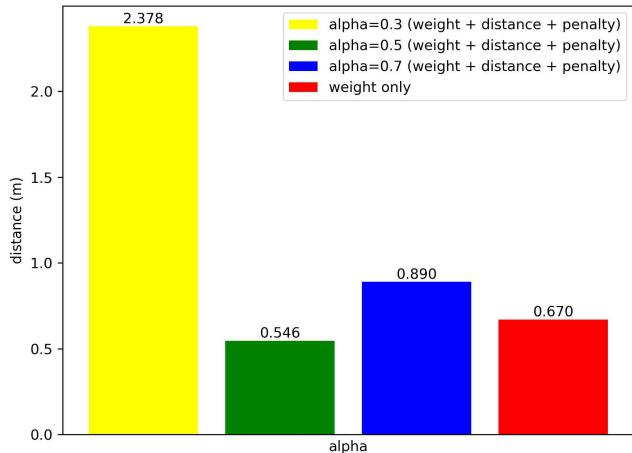


그림 2.a 변화에 따른 평균 최종 위치 오차 비교

이 약 33.9% 증가하고 평균 최종 위치 오차가 약 253.7% 증가하여 성능이 악화되었으며, $\alpha=0.7$ 에서는 평균 이동 소요 시간이 약 38.7% 감소했으나 평균 최종 위치 오차가 약 32.8% 증가하였다. 이는 RSSI의 변동성이 큰 실내 환경에서 목표 선택이 한쪽 요소(거리 또는 가중치)에 치우칠 경우 주행 효율이 저하될 수 있으며 가중치, 이동 비용, 패널티의 균형 설정이 핵심적임을 시사한다. 향후에는 α 를 분포의 불확실도에 따라 적응적으로 조절하는 방법을 통해 성능을 안정화할 계획이다.

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 인재성장지원 사업).

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역 지능화혁신인재양성사업임 (IITP-2025-RS-2020-II201462).

참 고 문 헌

- [1] 이범준, 김승구, “LiDAR SLAM 과 Bluetooth Beacon 을 활용한 물품 관리 시스템”, 한국전기전자학회 하계학술대회논문집, 제주대학교 아라컨벤션홀, 2024년 8월.
- [2] Upadhyay J, Rawat A, Deb D, Muresan V, Unguresan M-L, "An RSSI-Based Localization, Path Planning and Computer Vision-Based Decision Making Robotic System", Electronics 9, no. 8: 1326. 2020, <https://doi.org/10.3390/electronics9081326>.
- [3] 이가진, 이범준, 김승구, “BLE 비콘 위치 추정을 위한 로봇 경로 탐색 기법”, 한국통신학회 학술대회논문집, 제주, 2025년 6월.
- [4] M. Ghaemifar, S. Motie, S. M. Moosaviun, Y. Nemati, and S. Ebadollahi, “Bluetooth low energy for indoor positioning: Challenges, algorithms and datasets,” Automation in Construction, vol. 177, p. 106316, 2025, doi:10.1016/j.autcon.2025.106316.
- [5] Y. Shen, B. Hwang and J. P. Jeong, "Particle Filtering-Based Indoor Positioning System for Beacon Tag Tracking," in IEEE Access, vol. 8, pp. 226445–226460, 2020