

무선 신호 측위를 위한 Combinatorial Data Augmentation 기반 온라인 파티클 필터 기법 연구

이지원, 김상혁, 고승우
인하대학교, 인하대학교, 인하대학교

jiwlee@inha.edu, inhaase20@inha.edu, swko@inha.ac.kr

Combinatorial Data Augmentation-Assisted Online Particle Filter for Radio-Based Positioning

Ji-Won Lee, Sang-Hyeok Kim, Seung-Woo Ko
Inha Univ., Inha Univ., Inha Univ.

요약

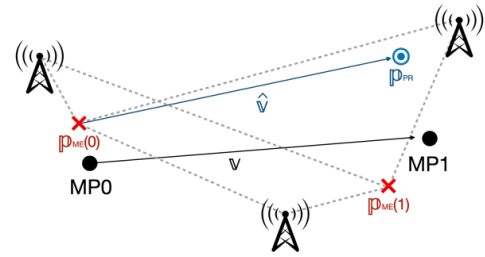
무선 신호 위치 측위의 Non-Line-of-Sight(NLoS) 편향을 극복하기 위한 방법으로 무선 신호 기반 위치 추정과 (Inertial Measurement Unit) IMU 기반 위치 추정을 융합하는 기술이 많은 관심을 받고 있다. 이러한 기술의 대표적인 예로 파티클 필터가 사용된다. 기존 파티클 필터는 환경에 대한 정보를 바탕으로 우도 확률을 계산해 가중치를 갱신한다. 하지만 환경에 대한 정보가 부족한 온라인 상황에서는 한계점이 있다. 본 논문에서는 온라인 상황에서 Combinatorial Data Augmentation (CDA)을 사용해 환경에 대한 정보를 증강시켜 파티클 필터에 적용하는 방법을 제안한다. 제안하는 기법은 정규분포를 따르는 파티클 필터 대비 RMSE가 약 43% 감소함을 실험을 통해 검증하였다.

I. 서론

최근 무선 신호 기반 측위의 Non-Line-of-Sight (NLoS) 편향을 극복하기 위해 무선 신호 기반 측위와 사용자의 디바이스 내 (Inertial Measurement Unit) IMU 센서를 통한 위치 예측치를 융합하는 기술에 관심이 높아지고 있다. 대표적으로 파티클 필터가 사용되며 위치 측위에 대한 에러를 낮추는 데에 효과적이다[1]. 하지만 파티클 필터의 구조 상 파티클의 가중치를 갱신하기 위한 우도 확률이 계산되어야 하는데 환경에 대한 정보가 충분하지 않은 온라인 상황에서는 우도 확률 계산에 한계가 있다. 이러한 정보 부족을 극복하기 위해 측정 데이터간 조합을 사용하여 데이터를 증강시키는 Combinatorial Data Augmentation (CDA) 기법이 있다[2]. 본 논문에서는 CDA 기법을 기반으로 데이터를 증강시켜 온라인 환경에 대한 정보 부족을 극복하고 이를 이용해 우도 확률 계산 문제를 해결한다. 계산된 우도 확률을 파티클 필터에 적용하여 온라인 환경에서 NLoS 편향을 극복하고 효과적인 측위를 검증하고자 한다. 실험을 통해 CDA 기반 파티클 필터의 RMSE가 정규분포 기반 파티클 필터 대비 43% 감소함을 검증하였다.

II. 시스템 모델 및 문제 정의

본 논문에서는 [그림 1]과 같이 M 개의 고정된 기지국이 설치된 네트워크에서 한 명의 사용자가 measurement point (MP) 0 에서 MP 1 으로 이동하는 상황을 고려한다. 각 기지국과 사용자 사이에는 LoS 또는 NLoS 상태가 포함되며, 이에 따른 편향치가 부여된다.



[그림 1] 시스템 모델

각 기지국과 사용자 사이의 거리 \hat{d}_m 는 실제 거리 d_m 에 편향치 b_m 를 부여하고, 노이즈 n_m 를 더하여 다음과 같이 구할 수 있다.

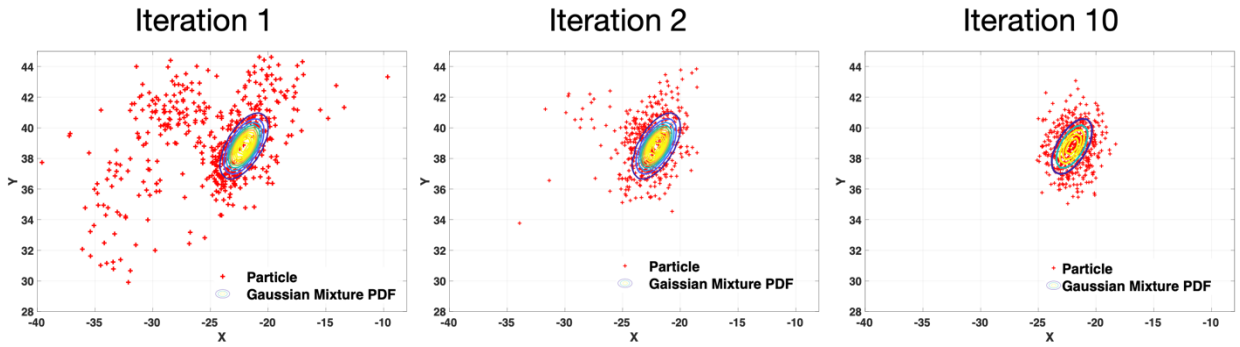
$$\hat{d}_m(l) = d_m(l) + b_m(l) \cdot I_{NLoS} + n_m(l), \\ l = 0, 1, \quad m = 1, 2, \dots, M.$$

이 때, I_{NLoS} 는 NLoS 에서 1, LoS 에서 0 이 된다.

본 논문에서는 measurement 기반 위치 측위를 위해 CDA 기법을 사용한다[2]. 주어진 M 개의 거리 정보를 3 개씩 골라서 나온 $M C_3$ 개의 예비 위치 추정 값들의 중앙값을 위치 추정 결과로 사용한다. 이때 MP 0 와 MP 1 에서의 measurement 기반 위치 측위 결과를 $\mathbb{P}_{ME}(0)$ 와 $\mathbb{P}_{ME}(1)$ 로 정의한다.

또한 유저가 위치 벡터 \mathbf{v} 로 이동할 때 단말이 가지고 있는 IMU 센서를 활용하여 MP 0 에서 MP 1 로 이동하는 위치 벡터 $\hat{\mathbf{v}}$ 를 추정할 수 있고, 이를 통해 MP 1 의 위치를 다음과 같이 예측 할 수 있다.

$$\mathbb{P}_{PR} = \mathbb{P}_{ME}(0) + \hat{\mathbf{v}}.$$



[그림 2] 시행 횟수에 따른 파티클의 분포도

본 논문에서는 $\mathbb{P}_{ME}(0)$ 와 \mathbb{P}_{PR} 를 융합하여 불확실성을 최소화할 수 있는 MP1 최적의 위치 $\mathbb{P}^*(1)$ 를 찾는 것을 목표로 한다.

III. CDA 기반 파티클 필터

본 논문에서는 CDA 기법을 사용하여 계산한 우도 확률밀도를 파티클 필터에 적용해 위치를 추정하는 방법을 제안한다. $\mathbb{P}_{ME}(0)$ 를 기준으로 생성된 J 개의 파티클을 벡터 $\beta_j^{(0)}$ 와 정규 분포를 더해 초기 배치시키고 이를 $\{\beta_j^{(0)}\}$ 라 정의한다. CDA의 예비추정위치들을 사용하여 MP1에서의 measurement 기반 추정위치 확률밀도 함수를 2차원 Gaussian Mixture Model을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{CDA}(\mathbb{P}) = \sum_{k=1}^K \alpha_k g(\mathbb{P} | \mu_k, \Sigma_k).$$

이때 $g(\mathbb{P} | \mu_k, \Sigma_k)$ 은 평균 μ_k 과 공분산 Σ_k 을 가지는 2차원 정규분포의 확률밀도 함수이고 α_k 는 그에 대한 가중치이다 (i.e., $\sum_{k=1}^K \alpha_k = 1$).

추정한 확률밀도 함수를 파티클의 우도 함수를 계산하는데 사용한다. $\beta_j^{(0)}$ 에 대한 가중치 $w_j^{(0)}$ 는 다음과 같다.

$$w_j^{(1)} = \frac{f_{CDA}(\beta_j^{(0)})}{\sum_{r=1}^J f_{CDA}(\beta_r^{(0)})}.$$

이때 첫번째 추정위치 $\mathbb{P}^{(1)}$ 을 파티클들의 가중평균으로 계산할 수 있다.

$$\mathbb{P}^{(1)} = \sum_{j=1}^J w_j^{(1)} \beta_j^{(0)}.$$

이러한 수행을 추정위치가 수렴할 때까지 수행한다. i 번째 iteration 시 관련 수식은 다음과 같다.

$$w_j^{(i)} = \frac{f_{CDA}(\beta_j^{(i-1)})}{\sum_{r=1}^J f_{CDA}(\beta_r^{(i-1)})}, \quad \mathbb{P}^{(i)} = \sum_{j=1}^J w_j^{(i)} \beta_j^{(i-1)}.$$

최종적으로 수렴한 추정위치를 최종 추정위치로 판단한다 (i.e., $\lim_{i \rightarrow \infty} \mathbb{P}^{(i)} = \mathbb{P}^*(1)$).

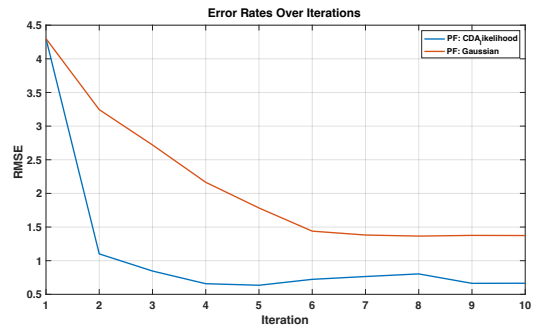
IV. 실험 결과

실험은 100x100(m²) 공간에 10개의 고정된 기지국과 한 명의 사용자가 위치한 환경에서 수행하였다. 사용자의 초기 위치와 이동한 위치는 무작위로 설정하였으며 500개의 파티클로 실험을 진행하였다.

[그림 2]은 CDA를 기반으로 추정한 위치 $\mathbb{P}_{ME}(1)$ 에 대한 2차원 혼합 확률밀도와 파티클의 분포를 각각 등고선과 점으로 나타낸 것이다. 순서대로 파티클 필터를

각 1, 2, 10 회씩 반복하였을 때, 파티클이 2차원 혼합 확률밀도 중심으로 근사함을 보였다.

[그림 3]과 [표 1]은 CDA 기반 파티클 필터의 성능을 비교하기 위해 대조군으로 정규분포 기반 파티클 필터를 설정하였다.



[그림 3] 시행 횟수에 따른 RMSE 변화

[그림 3]은 파티클 필터의 반복 시행 횟수에 따른 RMSE (m)를 나타낸 것이다.

구분	PF(Gaussian)	PF(CDA)
평균 RMSE (m)	2.23	1.27

[표 1] CDA 기반 파티클 필터의 성능 비교

[표 1]은 각각의 평균 RMSE (m)를 나타낸 것이다. 제안하는 기법은 정규분포 기반 파티클 필터에 비해 오차가 약 43% 감소하였다.

V. 결론

본 논문에서는 CDA를 기반으로 파티클 필터를 이용한 온라인 상황에서 NLoS 편향을 최소화하는 측위 방법을 제안하였다. 향후 연구에서는 실측 데이터를 이용하여 제안한 방법을 검증할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2021-03-00347, 6G 통신을 위한 Post MAC)

참고 문헌

- [1] Wang, Y., and Li, X., "The IMU/UMB Fusion Positioning algorithm based on particle filter," ISPRS Int. J. Geo-Inf., 6(8), 235, 2017.
- [2] S. M. Yu, J. Park, and S.-W. Ko, "Combinatorial data augmentation for real-time indoor positioning: Concepts and experiments," in Proc. IEEE VTC 2022 Spring, (Helsinki, Finland), pp. 1-5, Jun. 2022.