

Near-Field 전파환경에서 랜드마크 유형 추정 기법

이재복, 김효원*, 김선우

한양대학교 융합전자공학과, 충남대학교 전자공학과*

{ok7393, remero}@hanyang.ac.kr, hyowon.kim@cnu.ac.kr*

Landmark Type Estimation Technique in Near-Field Regions

Jaebok Lee, Hyowon Kim*, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University,

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University*

요약

본 논문에서는 NF (near-field) effect 내에서 환경 센싱 시 활용할 수 있는 랜드마크 유형 추정 방법에 대해 소개한다. 랜드마크 유형은 랜드마크에 입사하는 신호가 전파되는 모델을 결정하여, 정확한 환경 센싱을 위해 랜드마크 유형의 추정은 필수적이다. 기존 환경 센싱에 이용되는 랜드마크 유형 추정 방법은 사용자의 이동성과 복수의 신호 수집을 필요로 하며 이로 인해 높은 연산량과 환경 센싱 지연이 발생한다. 본 논문에서는 랜드마크 유형의 효율적인 추정을 위하여 NF 거리 측정값을 이용한 방법을 제시한다. 제안 방법은 단일 신호의 time-of-arrival 거리와 NF 거리 측정값만을 이용한 랜드마크 유형 추정을 가능하게 하며, MATLAB 시뮬레이션을 통해 제안 방법의 정확도와 실효성을 검증한다.

I. 서론

Radio SLAM (simultaneous localization sensing)으로 대표되는 전파 기반 환경 센싱은 수집된 신호의 거리, 각도 등의 측정값과 기지국, 사용자, 랜드마크 사이의 기하학적 관계를 이용하여 주변 환경의 물체를 탐지한다[1]. 이러한 기하학적 관계는 랜드마크의 유형에 따라 각각 다르게 모델링되며, 랜드마크 유형에 대한 정보는 환경 센싱의 정확도와 복잡도를 결정하는 주요 요인이 된다[2]. 기존 radio SLAM 방법은 랜드마크 추정에 동일한 랜드마크로부터 반사된 복수의 신호를 필요로 한다. 이 때, 동일한 랜드마크의 여부를 판단하는 data association 문제가 발생하며, 수집된 신호는 서로 다른 사용자 위치에서 획득되어야 하는 제약을 가진다.

본 연구진은 6G 통신 시스템의 enabler로 주목받는 ELAA(extremely large antenna array)로 인하여 NF (near-field) effect가 발생함에 주목하였다. NF effect 내의 사용자는 신호 파면의 곡률을 이용하여 NF 거리 측정값 획득이 가능해지며 이는 기존 TOA (time-of-arrival) 기반 거리와 다른 특성을 가져 radio SLAM의 랜드마크 추정에 새로운 접근 방법을 제공한다[3]. 따라서 본 논문은 단일 신호의 ToA 기반 거리와 NF 거리 측정값만을 이용한 랜드마크 유형 추정 방법을 제안한다. MATLAB 시뮬레이션을 통하여 제안 방법 사용 시 사용자 위치와 각도 측정값을 사용하지 않고 단일 신호 측정값을 이용한 랜드마크 유형 추정이 가능함을 확인하였다.

II. 시스템 모델

고려하는 네트워크의 전파 환경은 하나의 BS(base station)을 포함하며, BS는 신호를 송신, 네트워크 내 사용자는 BS로부터 신호를 수신함을 가정한다. 구성 네트워크의 전파 환경 내에는 반사 평면으로 인해 생성된 고정된 위치를 가지는 VA(virtual anchor)와 입사 신호를 난반사하는 SP(scattering point)가 존재하며 사용자는 이러한 랜드마크로부터 반사된 신호를 수신한다. 이 때, 신호가 반사된 랜드마크의 유형을 m ($m \in VA, SP$), 위치를 \mathbf{x}_m 으로 정의한다. 또한 \mathbf{x}_m 은 고려하는 네트워크 환경 내에서 고르게 분포함을 가정하였다 (uniformly distributed). 사용자는 최대 감지 범위 R 이내의 랜드마크로부터 수신한 신호의 채널추정을 통해 측정값 \mathbf{z} 를 획득하며 사용자의 3차원 위치는 $\mathbf{s} = [x_s, y_s, z_s]$ 로 표현된다.

사용자와 랜드마크의 위치에 따른 측정값 \mathbf{z} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{s}, \mathbf{x}, m) + \mathbf{r}, \quad (1)$$

여기서 \mathbf{h} 는 측정 모델 함수, \mathbf{r} 은 공분산 행렬 \mathbf{R} 에 대해 $N(0, \mathbf{R})$ 을 따르는 측정 모델 오차이다. $\mathbf{h}(\mathbf{s}, \mathbf{x}, m) = [\tau, d]^T$ 이며, τ , d 는 각각 ToA (time-of-arrival) 거리, NF 거리 측정값을 나타내며 다음과 같이 모델링된다.

$$\tau = \begin{cases} \|\mathbf{x}_m - \mathbf{s}\| & m = VA \\ \|\mathbf{x}_{BS} - \mathbf{x}_m\| + \|\mathbf{x}_m - \mathbf{s}\| & m = SP \end{cases}, \quad (2)$$

$$d = \|\mathbf{x}_m - \mathbf{s}\|, \quad (3)$$

이 때, \mathbf{x}_{BS} 는 BS의 위치를 나타낸다.

III. NF 측정값 이용 랜드마크 유형 추정 기법

제안하는 랜드마크 유형 추정 기법은 ToA 거리 τ 와 NF 거리 d 의 차이를 이용한다. 이 때, $\Delta = \tau - d$ 의 pdf는 다음과 같이 표현된다.

$$p(\Delta | m, r) = \begin{cases} N(\Delta; 0, \sigma_1^2) & m = VA \\ N(\Delta; r, \sigma_2^2) & m = SP \end{cases}, \quad (4)$$

이 때, $r = \|\mathbf{x}_{BS} - \mathbf{x}_m\|$ 이며, σ_1 , σ_2 는 측정 오차의 표준 편차이다. 수식 (2)의 변수 r 을 제거한 marginal distribution은 전체 확률 정리(total probability theorem)를 이용하여 다음과 같이 표현되며 \mathbf{x}_m 의 분포는 m 에 따라 변하지 않음을 가정하였다.

$$\begin{aligned} p(\Delta | m) &= \int_r p(r | m) p(\Delta | m, r) dr \\ &= \int_r p(r) p(\Delta | m, r) dr. \end{aligned} \quad (5)$$

우리는 앞서, 네트워크 내에서 \mathbf{x}_m 이 uniform distribution을 따르며 사용자의 감지 범위 R 이내의 \mathbf{x}_m 으로부터 측정값이 획득됨을 가정하였다. 이 때, r 의 범위를 $[0, R)$ 으로 가정한다면 $p(r)$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(r' \leq r) = \frac{r^2}{R^2}, \quad (6)$$

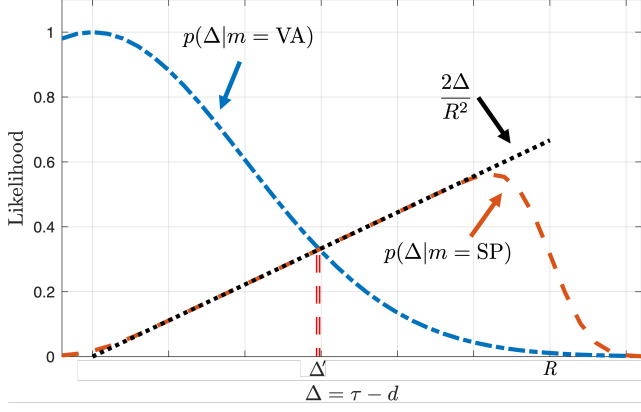


그림 1. $p(\Delta|m)$ 와 $2\Delta/R^2$ 의 그래프 개형

$$p(r) = \frac{d}{dr}p(r' \leq r) = \frac{2r}{R^2}, \quad (7)$$

$p(r' \leq r)$ 은 r 의 cdf 확률 분포를 나타낸다. 따라서 최종적인 $p(\Delta|m)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$p(\Delta|m) = \begin{cases} N(\Delta; 0, \sigma_1^2) & m=VA \\ \frac{2}{R^2} \int_0^R r N(\Delta; r, \sigma_2^2) dr & m=SP \end{cases} \quad (8)$$

따라서, 측정값 \mathbf{z} 를 통해 $\Delta = \tau - d$ 를 획득하고 $p(\Delta|m=VA)$ 와 $p(\Delta|m=SP)$ 를 비교하여 ML (maximum likelihood) 방법으로 더 높은 값을 가지는 m 을 랜드마크 유형으로 추정할 수 있다.

$m=VA$ 인 경우, $p(\Delta|m)$ 은 중심이 0이고 분산이 σ_1^2 인 Gaussian 함수를 나타낸다. 반면, $m=SP$ 일 때, $p(\Delta|m)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\Delta|m=SP) = \frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{r}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\Delta-r)^2}{2\sigma_2^2}\right) dr. \quad (9)$$

위 적분 결과는 대수적인 함수를 이용한 표현이 불가능하여 일반적인 방법으로 $p(\Delta|m=SP)$ 의 값을 계산하는 것은 불가능하다. 그림 1은 $p(\Delta|m=SP)$ 를 나타낸 그래프이다. $p(\Delta|m=SP)$ 는 Δ 가 $[0, R)$ 범위 내에서 매우 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는

$\int_0^R \frac{r}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\Delta-r)^2}{2\sigma_2^2}\right) dr$ 이 중심이 Δ 이고 분산이 σ_2^2 인

Gaussian 함수의 평균을 나타내며 이는 근사적으로 Gaussian 함수의 중심 Δ 을 나타내기 때문이다. 따라서 $[0, R)$ 범위 내에서 $\int_0^R \frac{r}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\Delta-r)^2}{2\sigma_2^2}\right) dr \approx \Delta$ 와 같이 근사할 수 있으며

$p(\Delta|m=SP)$ 를 다음과 간단한 선형 함수로 표현할 수 있다.

$$p(\Delta|m=SP) = \frac{2\Delta}{R^2}. \quad (10)$$

결론적으로, ML을 통하여 다음과 같이 주어진 Δ 에 따라 $p(\Delta|m=VA)$ 와 $p(\Delta|m=SP)$ 중 더 높은 값을 나타내는 m 을 랜드마크 유형으로 결정할 수 있다.

$$m = \operatorname{argmax}_{m' \in \{VA, SP\}} p(\Delta|m'). \quad (11)$$

또한, $\Delta \in [0, R)$ 범위 내에서 $p(\Delta|m=VA)$ 가 감소함수, $p(\Delta|m=SP)$ 가 증가함수 임을 통하여 어떠한 상수 $\Delta = \Delta'$ 를 기준으로 $p(\Delta|m=VA)$ 와 $p(\Delta|m=SP)$ 의 대소가 결정됨을 알 수 있으며 Δ' 는 $p(\Delta'|m=VA) = p(\Delta'|m=SP)$ 를 만족하는 값이다. 두 함수의 교점을 나타내는 Δ' 는 다음과 같이 표현된다.

표 1. 제안 방법과 벤치마크의 Δ 기준값 및 m 추정 정확도 분석 결과

R [m]	Δ 기준값 [m]		m 추정 정확도 [%]	
	제안 방법 (Δ')	벤치마크 (Δ'')	제안 방법	벤치마크
50	3.1797	3.1667	99.74	99.74
100	3.5578	3.5578	99.92	99.92
200	3.9045	3.9715	99.98	99.98

$$\Delta' = \sigma_1 \sqrt{W\left(\frac{R^4}{8\pi\sigma_1^4}\right)}, \quad (12)$$

이 때, W 는 $W^{-1}(x) = xe^x$ 를 만족하는 Lambert function이다. 따라서 $\Delta \leq \Delta'$ 일 때 $m=VA$ 이며, $\Delta > \Delta'$ 일 때 $m=SP$ 로 판정할 수 있다. 제안 방법은 각도 측정값, \mathbf{s} , \mathbf{x}_{BS} 를 필요로 하는 기존 방법 대비, 오직 Δ , R , σ_1 의 정보만으로 m 의 추정을 가능하게 한다.

IV. 시뮬레이션 환경 및 결과

시뮬레이션을 위하여 1개의 BS, 1개의 사용자, 1개의 랜드마크로 구성된 $400 \text{ [m]} \times 400 \text{ [m]}$ 크기의 전파 환경을 구성하였다. 랜드마크의 위치 \mathbf{x}_m 은 BS의 위치를 중심으로 감지 반경 R 내에서 uniformly distributed 임을 가정하였으며, $p(m=VA) = p(m=SP) = 0.5$ 로 설정하였다. τ 의 표준편차 σ_1 는 1 m로 고정하였으며, 감지반경 R 을 50 [m], 100 [m], 200 [m]로 변경하며 랜드마크 유형 m 의 추정 정확도를 분석하였다. 각 Monte Carlo 10^6 회의 시행을 통해 수식 (10)의 근사를 하지 않은 방법을 벤치마크로 설정하여 제안 방법의 Δ' 와 벤치마크의 Δ'' 를 비교하고 그에 따른 추정 정확도를 분석하였다.

표 1은 각 R 에 대한 Δ' , Δ'' 와 그에 따른 m 추정 정확도를 나타낸다. 제안 방법은 R 의 값에 상관 없이 모두 99.7 [%] 이상의 m 추정 정확도를 나타내며, 수식 (10)의 근사를 이용하지 않은 경우와 비교하여도 m 추정 정확도가 하락하지 않았음을 볼 수 있다. 따라서 제안 방법을 통하여 정확도의 손실 없이 m 을 추정할 수 있음을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 NF 환경에서 사용 가능한 환경 내 랜드마크 유형 추정 기법을 제안한다. 기존 랜드마크 유형 추정 방법은 사용자와 BS의 위치 뿐만 아닌 각도 측정값이 요구되며, 서로 다른 사용자 위치에서 수집된 복수의 신호 수집이 필수적이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 ToA, NF 기반의 거리 측정값의 비교를 통한 랜드마크 유형을 추정 방법을 제안하였다. 제안 방법은 ToA/NF 거리 측정값의 차이와 Lambert function으로 정의된 Δ' 의 비교를 통하여 랜드마크 유형 추정을 가능하게 한다. 시뮬레이션 결과, 제안 방법을 사용하여 제한된 측정값을 통해 효과적으로 랜드마크 유형 추정이 가능함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2023R1A2C3002890).

참고 문헌

- [1] H. Durrant-Whyte *et al.*, "Simultaneous localization and mapping: Part I," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, Jun. 2006.
- [2] H. Kim *et al.*, "5G mmWave Cooperative Positioning and Mapping using Multi-Model PHD Filter and Map Fusion," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 3782-3795, Jun. 2020.
- [3] Y. Lu *et al.*, "Near-Field Channel Estimation in Mixed LoS/NLoS Environments for Extremely Large-Scale MIMO Systems," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 71, no. 6, pp. 3694-3707, Jun. 2023.