

비동기 UWB 앵커 노드를 이용한 단방향 거리 측정 기반 위치 추정 기법

하영훈*, 안현선*, 이종욱**, 최정식^o

One-Way Ranging (OWR)-Based Positioning Technique with Time-Asynchronized UWB Anchor Nodes

Young-hun Ha*, Hyeon-seon An*, Jong-uk Lee**, Jeong-sik Choi^o

요약

최근 위치 기반 서비스에 대한 수요가 증가하면서 정밀한 위치 추정 기술의 중요성이 커지고 있다. 특히 UWB 기술은 500MHz 이상의 넓은 대역폭을 활용하여 cm 수준의 정밀한 거리 및 위치 추정이 가능하여 주요 스마트폰 제조사들이 UWB 기술을 적극적으로 도입하고 있다. UWB 거리 추정 방식은 양방향과 단방향 방식으로 구분되는데, 그중 단방향 방식은 비교적 간단하게 동작한다는 장점이 있지만 UWB 기기 간의 시간 동기화가 정밀하게 유지되어야 한다는 제약 조건이 있다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 모바일 기기와 앵커 노드가 시간 동기화가 이루어지지 않은 조건에서 칼만 필터를 이용하여 비동기를 추정하고 따라서 정밀한 위치 추정을 가능하게 하는 새로운 단방향 거리 측정 기반 위치 추정 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안한 기법의 위치 추정 성능을 검증하였으며 오차 범위 이내에서 모든 기기가 동기화된 이상적인 상황과 유사한 성능 달성이 가능함을 확인하였다.

Key Words : UWB positioning, One-way ranging, Kalman filter

ABSTRACT

With the increasing demand for location-based services, precise location estimation technology is becoming increasingly important. In particular, UWB technology enables precise location estimation at the centimeter level by utilizing a wide bandwidth of more than 500 MHz, so major smartphone manufacturers are actively applying UWB technology. Ranging methods using UWB are generally classified into two-way ranging (TWR) and one-way ranging (OWR). The OWR method has the advantage of simplicity, but has the constraint that the time synchronization between UWB devices must be precisely maintained for high accuracy. To overcome these limitations, in this paper, we propose an innovative OWR-based positioning technique enabling precise location estimation under the condition that UWB anchor nodes are not time-synchronized, by estimating and calibrating the time-asynchrony between UWB anchor nodes using Kalman filter. Also, we validate the positioning performance of the proposed method through simulation and confirm that it can achieve similar performance with an acceptable error range as in an ideal scenario where all devices are synchronized.

* 본 논문은 2021학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었습니다.

• First Author : Kyungpook National University, School of Electronic and Electrical Engineering, gghh1073@knu.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Kyungpook National University, School of Electronic and Electrical Engineering, jeongsik.choi@knu.ac.kr, 정회원

* Kyungpook National University, School of Electronic and Electrical Engineering, gustjs1882@knu.ac.kr, 학생회원

** Kyungpook National University, School of Electronics Engineering, lju0621@knu.ac.kr

논문번호 : 202406-114-D-RN.R1, Received June 7, 2024; Revised July 25, 2024; Accepted August 8, 2024

I. 서 론

위치 추정 기술은 지도 서비스, 네비게이션, 자산 추적 및 위치 기반 광고 등 다양한 위치 기반 서비스를 위해 사용될 뿐만 아니라 위치 정보를 활용하여 무선 신호를 효율적으로 송수신하는 등 새로운 기술 개발에 활용될 수 있기에 정밀한 위치 추정 기술 확보가 필요하다^{1,2)}.

모바일 기기의 위치를 추정하기 위하여 대부분의 기기에 설치되어 있는 Wi-Fi, Bluetooth, 이동통신 등의 무선 기술과 관성 센서, 카메라 등의 센서 기술이 널리 활용되고 있다³⁻⁵⁾. 이 중 Wi-Fi 시스템의 경우 대부분의 장소에 액세스 포인트가 설치되어 있어 추가 인프라 설치로부터 자유롭다는 장점 때문에 많은 위치 추정 연구에서 활용되어 왔다⁶⁻¹¹⁾. 하지만 연구에서 주로 사용되는 Wi-Fi의 수신 신호 세기 측정값의 경우 송수신단 사이의 거리 외에도 주위 전파 환경 등 다양한 요소에 의해 결정되기 때문에 해당 값을 이용하여 정밀한 위치 추정 성능을 달성하기 어렵다는 단점이 존재했다.

이를 보완하기 위하여 2016년에 발표된 IEEE 802.11-2016 표준에서는 왕복 여행 시간 (RTT: Round trip time)을 측정하여 송수신단 사이의 거리를 추정하는 FTM (Fine timing measurement) 프로토콜을 정의하였으며 40, 80, 160MHz 대역폭의 신호를 활용하여 정밀한 거리 추정이 가능하게 되었다¹²⁾. 최근에는 IEEE 802.11bk 작업 그룹에서 320MHz 대역폭을 활용하는 정밀 거리 추정 기술이 연구되고 있다.

한편 UWB (Ultra-wideband)의 경우 Wi-Fi 송수신 대역보다 넓은 500MHz 이상의 대역폭을 사용하여 시간 축에서 매우 짧은 펄스의 송수신이 가능하며, 따라서 이론적으로 Wi-Fi 대비 더욱 정밀한 거리 추정이 가능하다¹³⁾. UWB 기술은 근거리 통신용으로 상용화가 되었지만 Wi-Fi 등의 대안 기술에 밀려 한동안 주목을 받지 못했다. 그러나 광대역 신호를 통한 정밀 거리 추정이 가능하다는 특성 때문에 비교적 최근 거리 추정 및 위치 추정 용도로 다시 주목을 받고 있다¹³⁻¹⁶⁾.

특히 스마트폰 단말에 UWB 기술이 점차 도입되고 있는 추세이다. 2019년 애플은 스마트폰 제조업체 중 최초로 UWB 송수신을 위한 U1 칩을 개발하여 iPhone 11 시리즈에 탑재하였으며, 이후 iPhone 시리즈와 Watch 시리즈, AirTag 등 다양한 제품군에 UWB 기술을 적용하고 있으며 이후 개선된 U2 칩도 개발하였다. 삼성전자는 역시 2020년 갤럭시 노트 20 Ultra와 갤럭시 Z 폴드 2 모델에 처음으로 NXP사의 UWB 칩 SR100T을 탑재한 이후 자사의 플래그십 스마트폰 제품인 갤럭시

Plus, Ultra, Flip, Fold 시리즈 등에 UWB 기능을 지속적으로 도입하고 있으며, 2022년 2월부터는 자체 개발한 UWB 칩 엑시노스 커넥트 U100을 자사 스마트폰에 탑재하기 시작하였다. 또한 구글과 샤오미 역시 자사의 스마트폰 Pixel 6 Pro, Pixel 7 Pro, Xiaomi's Mi Mix 4 등 모델에 UWB 기술을 탑재하는 등 UWB 기술을 이용한 정밀한 거리 및 위치 추정 기술에 대한 관심이 증가하고 있다^{17,18)}.

IEEE 802.15.4z-2020 표준에서 정의된 UWB 거리 추정 방식은 단방향 (OWR: One-way ranging) 과 양방향 (TWR: Two-way ranging) 방식으로 구분할 수 있다¹⁹⁾. 양방향 방식 중 주로 사용되는 DS-TWR (Double-Sided TWR) 방식은 두 기기 간에 시간 정보를 포함한 무선 신호를 교환하여 왕복 여행 시간을 측정하는 방식으로 동기화가 되지 않은 두 기기 사이에서도 높은 거리 추정 정확도를 달성할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 두 기기 간 거리 추정을 위해 최소 3회 이상의 신호 송수신이 필요하며 동시에 거리 추정을 수행할 수 있는 기기의 수에 한계가 있다는 단점이 있다^{13,20)}.

반면 단방향 거리 추정 방식은 일반적으로 시간 동기화된 두 기기 간의 거리 추정을 위해 사용되며 한 기기에서 송신된 신호를 반대편 기기에서 수신하여 도달 시간 (ToF: Time of flight)을 측정하여 거리를 계산한다. 단방향으로 거리 추정이 수행되기 때문에 하나의 기기에서 송신한 신호를 주위의 다수 기기에서 수신하여 각각 거리 추정이 가능하며, 따라서 수많은 기기가 동시에 거리 추정을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 높은 거리 추정 정확도를 달성하기 위해서는 기기 간 시간 동기화가 정밀하게 유지되어야 한다는 제약 조건이 있다²¹⁾.

이러한 제약 조건을 해결하기 위하여 앵커 노드와 단말이 동기화 되지 않은 상황에서 앵커 노드 간 동기화를 우선 수행하는 연구가 진행되어 왔다^{22,23)}. 모든 앵커 노드가 동기화되어 있는 경우 TDOA (Time difference of arrival)를 측정하여 모바일 기기의 위치를 추정할 수 있지만 앵커 노드 간 동기화를 위한 프로토콜이 필요하며, 앵커 노드 간 가시경로가 존재하지 않거나 무선 신호의 다중경로 전파 특성으로 인해 노드 간 정밀한 동기화가 불가능한 상황에서는 위치 추정 오차가 발생하게 된다.

본 연구에서는 단방향 거리 추정 방식의 한계를 극복하기 위하여 모든 앵커 노드와 기기의 동기가 맞지 않는 상황에서 각 앵커 노드와 모바일 기기 사이의 비동기를 추정하는 동시에 기기의 위치를 추정하는 칼만 필터를 설계한다. 앵커 노드와 단말 사이의 시간 비동기를 추정

해야 할 상태로 고려함으로써 기존의 칼만 필터를 이용한 위치 추정 기법 대비 복잡도는 증가하지만, 단방향 거리 추정을 수행함으로써 동시에 위치를 추정할 수 있는 기기의 수가 이론상 무한대로 늘어날 수 있다는 장점이 존재한다. 따라서 제안하는 기법은 많은 수의 기기가 주기적으로 위치 정보를 확보해야 하는 쇼핑센터, 물류센터, 공장 등의 실제 환경에서의 위치 추정에 중요한 역할을 수행할 것으로 기대된다.

본 논문의 II장에서는 UWB 앵커 노드의 비동기와 모바일 기기의 위치를 추정하는 칼만 필터를 제안한다. III장에서는 모의실험을 통하여 제안한 위치 추정 알고리즘의 성능을 평가하고 IV장에서 논문의 결론을 맺는다.

본 논문에서 임의의 벡터 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 에 대해 $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{x}}$ 으로 정의하며 확률 벡터 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 에 대해 $\mathbb{E}[\mathbf{y}]$, $\text{Cov}(\mathbf{y}) = \mathbb{E}[(\mathbf{y} - \mathbb{E}[\mathbf{y}])(\mathbf{y} - \mathbb{E}[\mathbf{y}])^T]$ 는 각각 기댓값 및 공분산 행렬을 나타낸다. 또한 $\mathbf{0}_{N \times M} \in \mathbb{R}^{N \times M}$, $\mathbf{I}_N \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 은 각각 영행렬 및 항등(identity) 행렬을 의미한다.

II. 제안하는 위치 추정 알고리즘

본 장에서는 시스템 모델을 설명하고 앵커 노드의 비동기 및 단말의 위치 추정을 위한 칼만 필터를 설계한다.

2.1 시스템 모델

모바일 기기의 위치 추정을 위하여 2차원 평면에 N 개의 UWB 앵커 노드가 설치된 시나리오를 고려한다. 앵커 노드 n 의 위치는 $\mathbf{z}_n = [x_n, y_n]^T$ 로 정의하며 모바일 기기의 위치는 $\mathbf{z} = [x, y]^T$ 로 정의한다. 또한 모바일 기기와 각 앵커 노드는 동기화되어 있지 않다고 가정하며, 따라서 모바일 기기의 시간 스탬프(timestamp) 0에 대응하는 번째 앵커 노드의 시간 스탬프는 τ_n 으로 주어진다고 가정한다. 즉, 모바일 기기와 번째 앵커 노드 사이에는 τ_n 만큼의 시간 차이가 있으며 이러한 차이는 위치 추정이 진행되는 과정 동안에는 일정하게 유지된다고 가정한다.

그림 1은 앵커 노드와 모바일 기기 사이의 단방향 거리 추정 과정을 보여준다. 각 앵커 노드에서는 거리 추정을 위한 신호를 일정 시간 간격으로 송신한다고 가정한다. 송신 신호에는 앵커 노드를 식별할 수 있는 주소와 앵커 노드에서 신호를 송신할 때 측정된 시간 스탬프가 포함되어 있다. 모바일 기기에서는 해당 신호를

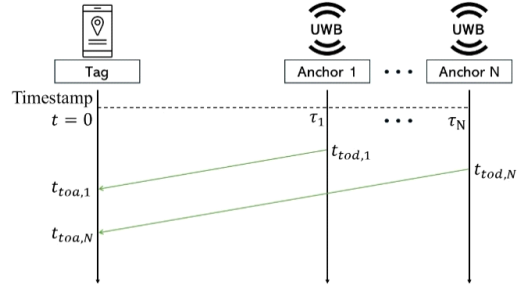


그림 1. 비동기 단방향 거리 추정
Fig. 1. Asynchronized one-way ranging.

수신할 때 시간 스탬프를 측정하는 방식으로 단방향 거리 추정을 수행한다. 앵커 노드 n 에서 신호를 송신할 때의 시간 스탬프를 $t_{toa,n}$, 모바일 기기에서 신호를 수신할 때 획득한 시간 스탬프를 $t_{toa,n}$ 으로 정의할 때 두 노드 간의 단방향 거리 측정값은 아래와 같이 모델링된다.

$$d_n = c(t_{toa,n} - t_{tod,n}) = \|\mathbf{z}_n - \mathbf{z}\| + c\tau_n + \omega_n \quad (1)$$

식 (1)에서 c 는 전파의 속도를 의미하며 거리 측정값은 앵커 노드와 모바일 기기 사이의 거리에 비동기에 의해 발생하는 거리 오프셋 $c\tau_n$ 이 더해진 형태로 획득된다는 것을 의미한다. 또한, ω_n 은 시간 스탬프의 측정 오차 때문에 발생하는 거리 오차를 의미하며 평균 0 표준편차 $\sigma_{dist,n}$ 인 가우시안 확률 분포로 모델링한다. 본 논문에서는 추정해야 할 거리 오프셋을 $\delta_n = c\tau_n$ 으로 정의한다.

2.2 비동기 및 위치 추정을 위한 칼만 필터 설계

시스템에서 추정해야 할 변수를 칼만 필터의 상태 벡터로 정의한 후 거리 측정값을 이용하여 상태를 추정하는 방법을 제안한다. 칼만 필터의 상태 벡터 \mathbf{X} 는 아래와 같이 모바일 기기의 위치 및 각 앵커 노드와 모바일 기기 사이의 거리 오프셋을 모두 포함한다.

$$\mathbf{X} = [x, y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N]^T \quad (2)$$

모바일 기기는 매 스탬프마다 인접한 모든 앵커 노드의 신호를 수신하여 거리 측정값을 획득하고 칼만 상태를 추정한다. 본 장에서는 k 번째 칼만 스탬프에서 추정한 상태를 $\hat{\mathbf{X}}^{(k)}$ 로, 해당 상태의 공분산 행렬을

$\mathbf{P}^{(k)} = \text{Cov}(\hat{\mathbf{X}}^{(k)})$ 로 정의한다. 또한 각 칼만 스텝에서의 변수 값을 나타내기 위해 위 첨자 (k)를 사용한다. 예를 들어 $d_n^{(k)}$ 은 k 번째 칼만 스텝에서 측정된 앵커 노드 n 까지의 거리를 의미한다. 본 논문에서 제안하는 칼만 필터 수행 과정은 아래와 같다.

2.2.1 상태 초기화

첫 번째 칼만 스텝에서는 상태 벡터의 초기 상태를 추정한다. 앵커 노드 n 으로부터 측정된 거리 값이 $d_n^{(1)}$ 일 때 식 (1)의 거리 추정 모델을 이용하면 거리 오프셋의 초기 추정값은 아래와 같이 획득할 수 있다.

$$\hat{\delta}_n^{(1)} = d_n^{(1)} - \|\mathbf{z}_n - \mathbf{z}\| \quad (3)$$

하지만 현재 모바일 기기의 위치를 알지 못하는 상황이기에 n 번째 앵커 노드까지의 거리는 수신 신호 세기와 경로 손실 모델을 이용하여 획득한 근삿값을 활용한다. 즉, n 번째 앵커 노드에서 송신된 신호의 수신 신호 세기를 $p_n^{(1)}$ 으로 정의하면 앵커 노드까지의 거리는 아래와 같이 근사화된다^[11].

$$\|\mathbf{z}_n - \mathbf{z}\| \approx 10^{\frac{P_0 - p_n^{(1)}}{10\eta}} \quad (4)$$

식 (4)에서 P_0 는 기준거리 1m에서 측정된 수신신호 세기를 의미하며 η 는 경로 손실 지수를 의미한다. 식 (4)에서 근사화된 값을 식 (3)에 대입하여 거리 오프셋의 초기 추정값을 획득하며 해당 추정값의 표준편차는 $\sigma_{\delta,n}$ 으로 가정한다.

각 앵커 노드의 거리 오프셋을 초기화한 이후 모바일 기기의 초기 위치를 추정한다. 수신 신호 세기 기준으로 가장 인접한 앵커 노드의 좌표나 가장 인접한 다수개의 노드의 평균 위치 등으로 모바일 기기의 위치를 초기화할 수 있으나, 본 논문에서는 정밀한 초기 위치 추정을 위해 비용함수를 설계하고 해당 함수가 최소화되는 지점을 초기 위치로 설정하는 비선형 방식을 이용한다^[11]. 즉, 초기 위치는 아래와 같은 방식으로 획득할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{z}}^{(1)} = \underset{\mathbf{z}}{\text{argmin}} \sum_{n=1}^N (\|\mathbf{z}_n - \mathbf{z}\| - \tilde{d}_n^{(1)})^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 $\tilde{d}_n^{(1)} = d_n^{(1)} - \hat{\delta}_n^{(1)}$ 은 거리 오프셋이 보정된 거리 측정값으로 정의된다. 획득한 초기 위치의 x, y

좌표가 서로 상관관계가 없으며 각 좌표 초기 추정값의 표준편차가 σ_{xy} 라고 가정하면, 초기 추정 위치의 공분산 행렬은 $\text{Cov}(\hat{\mathbf{z}}^{(1)}) = \sigma_{xy}^2 \mathbf{I}_2$ 으로 표현된다. 식 (3) - (5)를 통하여 초기 칼만 상태 $\hat{\mathbf{X}}^{(1)}$ 를 획득하였으며 해당 상태의 공분산 행렬도 아래와 같이 대각 행렬로 초기화할 수 있다.

$$\mathbf{P}^{(1)} = \text{diag}(\sigma_{xy}^2, \sigma_{xy}^2, \sigma_{\delta,1}^2, \dots, \sigma_{\delta,N}^2) \quad (6)$$

2.2.2 상태 예측

예측 단계에서는 이전 스텝에서 추정된 상태에서 현재 상태를 예측한다. $k-1$ 번째 칼만 스텝에서 추정된 모바일 기기의 위치에서 k 번째 스텝의 위치를 추정하기 위해 다음과 같은 상태 전환 모델을 이용한다^[24].

$$\mathbf{z}^{(k)} = \mathbf{z}^{(k-1)} + \mathbf{v}^{(k)} \Delta T \quad (7)$$

위 식에서 $\mathbf{v}^{(k)}$ 는 칼만 스텝 $k-1$ 에서 k 사이의 모바일 기기의 이동 속도 벡터를 의미하며 센서 측정값 등의 추가 정보가 없는 경우에는 2차원 평면상의 임의의 방향으로 일정 속도로 이동한다고 가정할 수 있다. 즉, 이동 속도 벡터는 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{v}^{(k)} = v[\cos\theta \quad \sin\theta]^T \quad (8)$$

위 식에서 v 는 모바일 기기의 속력으로 상수로 가정하며, θ 는 이동 방향을 나타내는 확률 변수로 $[0, 2\pi]$ 구간에서 균등하게 분포되어 있다고 가정한다. 따라서 $\mathbb{E}[\mathbf{v}^{(k)} \Delta T] = \mathbf{0}_{2 \times 1}$ 이며 공분산 행렬은 $\text{Cov}(\mathbf{v}^{(k)} \Delta T) = 0.5(v \Delta T)^2 \mathbf{I}_2$ 으로 계산된다.

각 앵커 노드의 거리 오프셋의 경우 위치 추정 과정 동안 불변으로 가정하였기 때문에 이전 스텝에서 추정된 값이 계속 유지되며 분산 역시 동일하다고 가정한다. 즉, 모든 $n=1, \dots, N$ 에 대하여 $\delta_n^{(k)} = \delta_n^{(k-1)}$ 의 상태 전환 모델을 가진다. 위치와 거리 오프셋의 상태 전환 모델을 기반으로 k 스텝의 예측된 상태는 아래와 같이 표현된다.

$$\hat{\mathbf{X}}^{(k|k-1)} = \hat{\mathbf{X}}^{(k-1)} \quad (9)$$

해당 상태의 공분산 행렬 $\mathbf{P}^{(k|k-1)} = \text{Cov}(\hat{\mathbf{X}}^{(k|k-1)})$ 는 x, y 좌표 추정값의 공분산 값만 변경되며 아래와 같이 계산된다.

$$\mathbf{P}^{(k|k-1)} = \mathbf{P}^{(k-1)} + \begin{bmatrix} \frac{(v\Delta T)^2}{2} \mathbf{I}_2 & \mathbf{0}_{2 \times N} \\ \mathbf{0}_{N \times 2} & \mathbf{0}_{N \times N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2.3 상태 추정

추정 단계에서는 이전 단계에서 예측된 상태 벡터를 관측 값을 이용하여 갱신하는 과정을 수행한다. 관측 값은 각 앵커 노드까지의 거리이며 아래와 같은 벡터로 표현 가능하다.

$$\mathbf{m}^{(k)} = [d_1^{(k)}, d_2^{(k)}, \dots, d_N^{(k)}]^T \quad (11)$$

식 (11)을 기반으로 다음과 같은 관측 모델을 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{m}^{(k)} &= \mathbf{h}(\mathbf{X}^{(k)}) + \boldsymbol{\omega}^{(k)} \\ &= \begin{bmatrix} \|\mathbf{z}^{(k)} - \mathbf{z}_1\| + \delta_1^{(k)} \\ \|\mathbf{z}^{(k)} - \mathbf{z}_2\| + \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \|\mathbf{z}^{(k)} - \mathbf{z}_N\| + \delta_N^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

위 식 (12)에서 각 앵커 노드로부터의 거리 측정이 상관 관계가 없는 경우 $\boldsymbol{\omega}^{(k)}$ 의 공분산 행렬은 $\mathbf{R}^{(k)} = \text{Cov}(\boldsymbol{\omega}^{(k)}) = \text{diag}(\sigma_{dist,1}^2, \dots, \sigma_{dist,N}^2)$ 인 대각 행렬로 표현된다.

관측 모델을 이용한 칼만 오차는 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{e}^{(k)} = \mathbf{m}^{(k)} - \mathbf{h}(\mathbf{X}^{(k|k-1)}) \quad (13)$$

또한 칼만 오차의 공분산 행렬 $\mathbf{S}^{(k)} = \text{Cov}(\mathbf{e}^{(k)})$ 은 아래와 같이 계산된다.

$$\mathbf{S}^{(k)} = \mathbf{H}^{(k)}\mathbf{P}^{(k|k-1)}(\mathbf{H}^{(k)})^T + \mathbf{R}^{(k)} \quad (14)$$

식 (14)에서 $\mathbf{H}^{(k)}$ 는 관측 모델의 Jacobian 행렬로 아래와 같이 유도가 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^{(k)} &= \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^{(k|k-1)}} \\ &= \begin{bmatrix} x^{(k|k-1)} - x_1 & y^{(k|k-1)} - y_1 \\ \|\hat{\mathbf{z}}^{(k|k-1)} - \mathbf{z}_1\| & \|\hat{\mathbf{z}}^{(k|k-1)} - \mathbf{z}_1\| \\ \vdots & \vdots \\ x^{(k|k-1)} - x_N & y^{(k|k-1)} - y_N \\ \|\hat{\mathbf{z}}^{(k|k-1)} - \mathbf{z}_1\| & \|\hat{\mathbf{z}}^{(k|k-1)} - \mathbf{z}_1\| \end{bmatrix} \mathbf{I}_N \end{aligned} \quad (15)$$

칼만 필터 수행에 따라 칼만 이득은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{K}^{(k)} = \mathbf{P}^{(k|k-1)}(\mathbf{H}^{(k)})^T(\mathbf{S}^{(k)})^{-1} \quad (16)$$

마지막으로 획득한 칼만 이득을 이용하여 칼만 스텝 k 의 상태를 추정할 수 있으며 추정된 상태의 공분산 행렬도 아래와 같이 획득한다.

$$\hat{\mathbf{X}}^{(k)} = \hat{\mathbf{X}}^{(k|k-1)} + \mathbf{K}^{(k)}\mathbf{e}^{(k)} \quad (17)$$

$$\mathbf{P}^{(k)} = (\mathbf{I}_{N+2} - \mathbf{K}^{(k)}\mathbf{H}^{(k)})\mathbf{P}^{(k|k-1)} \quad (18)$$

III. 모의실험

본 장에서는 모의실험을 통하여 제안한 기법의 성능을 검증한다. 이를 위하여 가로 50m 세로 50 m의 2차원 평면을 고려하였으며 해당 평면에 10개의 앵커 노드를 임의의 위치에 배치하였다. 모바일 기기는 해당 평면 상에서 가로 40m 세로 40m의 사각형 궤도를 따라 일방적인 보행자의 이동 속력인 3Km/h로 이동한다고 가정하였으며 모든 앵커 노드에 대한 거리 추정은 매 500ms 마다 진행된다고 가정하였다. 실험에 사용한 파라미터는 표 1에 정리되어 있다.

그림 2는 제안한 기법을 적용한 위치 추정 결과를 보여준다. 모바일 기기는 (-20, -20) 좌표의 왼쪽 아래 위치에서 출발하여 오른쪽 방향으로 검은 점선을 따라 160m 이동하였으며 피관측 실선은 제안한 기법으로 기기와 앵커의 비동기를 보정하여 위치를 추정한 결과를 보여준다. 빨간색 실선은 제안한 기법의 성능 비교를 위해 기기와 앵커 노드가 모두 완벽하게 동기화되었다

표 1. 실험 파라미터
Table 1. Experimental parameters.

Parameter	Value
Size of 2D plane	50 m × 50 m
Number of anchor nodes	10
Length of test path	160 m
Speed of mobile device	3 Km/h
UWB ranging interval	500 ms
Pathloss model	TR38.901 (InH)
Std. of ranging error, $\sigma_{dist,n}$	0.5 m
Std. of initial distance offset, $\sigma_{\delta,n}$	10 m
Std. of initial position estimate, σ_{xy}	10 m

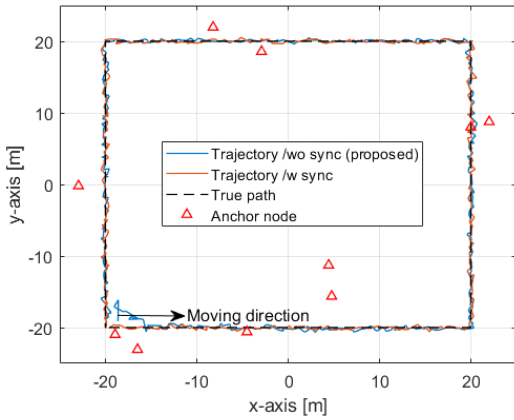


그림 2. 위치 추정 결과
Fig. 2. Positioning result.

고 가정할 때 획득한 위치 추정 결과를 보여준다. 칼만 필터의 초기화 과정에서 식 (3) 및 (4)를 이용하여 각 앵커 노드의 거리 오프셋을 추정하였으나 해당 값이 부정확하여 초기 추정 위치는 실제 위치와 큰 차이가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 하지만 칼만 필터 과정이 진행됨에 따라 거리 오프셋이 정확한 값으로 추정되며 위치 추정 결과도 정확해지는 것을 확인할 수 있다. 약 5m 이후부터는 위치 추정 결과가 모바일 기기와 각 앵커 노드가 완벽하게 동기화된 상황의 결과와 비교하여 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

그림 3은 실험에 사용된 모든 앵커 노드의 거리 오프셋의 오차가 제안한 칼만 필터 스텝이 증가함에 따라 0으로 수렴하는 것을 보여준다. 칼만 필터의 상태 초기화 당시 거리 오프셋이 최대 20m까지의 넓은 범위에서 분포되었으나 칼만 필터 과정이 진행되면서 해당 오차가 점진적으로 줄어들었으며, 20 스텝 이후에는 앵커 노드의 거리 오프셋의 최대 오차가 0.50m (평균 오차 0.30m)로 추정되고 50 스텝 이후에는 최대 오차가

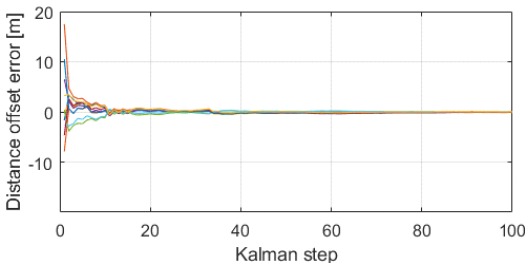


그림 3. 칼만 필터 과정 동안 거리 오프셋 추정 오차의 변화
Fig. 3. Distance offset error during Kalman filtering procedure.

0.21m (평균 오차 0.14m), 100 스텝 이후에는 최대 오차가 0.13m (평균 오차 0.06m)로 수렴한다는 것을 관찰할 수 있었다. 모의 실험에서 500ms 간격으로 칼만 필터 스텝이 진행된다는 점을 고려하면 10초 이후부터 비교적 정확한 거리 오프셋 추정이 가능하며 따라서 비동기 방식으로 동작을 함에도 불구하고 모든 노드가 동기화된 경우의 결과와 비슷한 위치 추정 성능을 달성할 수 있다는 것을 확인하였다.

그림 4는 위치 추정 오차를 보여준다. 각 노드의 거리 오프셋 추정치가 부정확한 초기의 10 칼만 스텝까지는 위치 추정 결과가 1m 이상 발생한다는 것을 확인하였으며 20 스텝 이후부터 각 노드의 거리 오프셋이 비교적 정확하게 추정됨에 따라 위치 추정 결과도 정확해지는 것을 알 수 있다. 성능 평가를 위하여 위치 오차가 1m 되는 지점을 검은색 실선으로 표현하였으며 20 스텝 이후에는 위치 오차가 1m 미만이 됨을 관찰할 수 있었다. 모든 앵커 노드가 동기화된 비교군의 경우 평균 위치 추정 오차가 0.27m였으며 비동기 된 방식에 본 논문에서 제안하는 기법을 적용하였을 때는 평균 위치 추정 오차가 0.33m가 됨을 알 수 있었다. 또한 초기 추정치가 안정화되는 20 스텝 이후에는 본 논문에서 제안하는 기법의 위치 추정 오차가 0.28m로 완벽하게 동기화된 경우와 큰 차이가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로 거리 추정 오차가 다양하게 발생할 수 있는 실제 환경에서 제안한 기법의 유효성을 검증하기 위하여 거리 추정 오차에 대한 표준편차 값을 0.25, 0.5, 0.75, 1 m로 다르게 설정하여 성능을 분석하고 결과를 표 2에 정리하였다.

거리 추정 오차의 표준편차 값이 클수록 비동기로 인한 거리 추정 오프셋을 추정하는데 많은 칼만 스텝이 소요됨을 알 수 있다. 거리 추정 오차의 표준편차가 0.25m로 비교적 정확할 경우 20 칼만 스텝에서 추정한

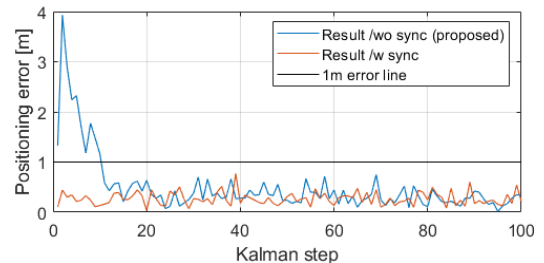


그림 4. 칼만 필터 과정 동안 위치 추정 오차의 변화
Fig. 4. Positioning error during Kalman filtering procedure.

표 2. $\sigma_{dist,n}$ 값에 따른 성능 비교
Table 1. Performance comparison depending on $\sigma_{dist,n}$.

$\sigma_{dist,n}$ [m]	0.25	0.5	0.75	1.0
MAE of distance offset at 20 Kalman step [m]	0.09	0.30	0.70	1.08
MAE of distance offset at 50 Kalman step [m]	0.05	0.14	0.34	0.66
MAE of distance offset at 100 Kalman step [m]	0.03	0.06	0.10	0.17
MAE of positioning performance after 20 Kalman step (proposed) [m]	0.14	0.28	0.43	0.58
MAE of positioning performance (synchronized anchors) [m]	0.14	0.27	0.39	0.49

거리 오프셋의 평균 절대 오차 (MAE: Mean absolute error)는 0.09m로 매우 정확하지만, 표준편차가 1m인 경우 같은 상황에서 거리 오프셋의 평균 절대 오차는 1.08m임을 알 수 있다. 하지만 이 경우에도 100 스텝 이후에는 거리 오프셋의 평균 절대 오차가 0.17m로 줄어든다는 것을 확인하였다.

거리 추정 오차의 표준편차 값이 커짐에 따라 20 스텝 이후에 추정된 위치의 평균 절대 오차 값도 증가함을 알 수 있지만, 모든 앵커가 완벽히 동기화된 상황과 비교하였을 때 10cm 이내의 성능 차이가 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 실제 환경과 같이 복잡한 환경에서도 제안하는 알고리즘이 우수한 성능을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 앵커 노드와 모바일 기기가 동기화되지 않은 상황에서 단방향 방식으로 측정한 거리 값을 이용하여 모바일 기기의 위치를 추정하는 기법을 제안하였다. 이를 위하여 모바일 기기와 각 앵커의 비동기를 추정하는 동시에 위치를 추정하는 칼만 필터를 설계하였으며 모의실험을 통하여 제안한 기법이 모든 앵커와 단말이 동기화된 이상적인 상황과 비교하여 칼만 필터의 상태가 안정화된 이후에는 오차 범위 이내에서 유사한 위치 추정 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 기법을 적용하여 동기화가 되지 않은 상황에서도 정밀한 위치 추정이 가능할 것으로 기대되며 특히 모바일 기기는 신호 송신 없이 수동적으로 앵커 노드에서 송신되는 신호만 수신하면 되므로 높은 에너지 효율과 이론적으로 수많은 모바일 기기의 위치를 동시에 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. Khosravi, H. S. Ghadikolaei, J. Zander, and M. Petrova, "Location-aided beamforming in mobile millimeter-wave networks," in *2022 IEEE 95th VTC2022-Spring*, pp. 1-7, Helsinki, Finland, Jun. 2022. (<https://doi.org/10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860534>)
- [2] Q. Xiang, C. Sun, and D. Liu, "Location based CSI optimization for RIS aided networks," in *Proc. 2023 9th ICCIP '23*, pp. 439-444, New York, USA, Dec. 2023. (<https://doi.org/10.1145/3638884.3638952>)
- [3] F. Potorti, et al., "The IPIN 2019 indoor localisation competition – description and results," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 206674-206718, Nov. 2020. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037221>)
- [4] C. Laoudias, A. Moreira, S. Kim, S. Lee, L. Wirola, and C. Fischione, "A survey of enabling technologies for network localization, tracking, and navigation," in *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3607-3644, 4th Quart., 2018. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2855063>)
- [5] J. Choi and Y.-S. Choi, "Calibration-free positioning technique using wi-fi ranging and built-in sensors of mobile devices," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 8, no. 1, pp. 541-554, Jan. 2021. (<https://doi.org/10.1109/IIOT.2020.3004774>)
- [6] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, vol. 2, pp. 775-784, Mar. 2000. (<https://doi.org/10.1109/INFCOM.2000.832252>)
- [7] L. Banin, U. Schatzberg, and Y. Amizur, "WiFi FTM and map information fusion for accurate positioning," in *2016 Int. Conf. IPIN*, pp. 1-4, Alcalá de Henares, Spain, Oct. 2016.
- [8] J. Choi, "Enhanced Wi-Fi RTT ranging: A sensor-aided learning approach," in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 4, pp.

- 4428-4437, Apr. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3151018>)
- [9] J. Choi, "Sensor-aided learning for Wi-Fi positioning with beacon channel state information," in *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 7, pp. 5251-5264, Jul. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3138850>)
- [10] J. Yang and Y. Chen, "Indoor localization using improved RSS-based lateration methods," in *2009 IEEE GLOBECOM 2009*, pp. 1-6, Honolulu, USA, Dec. 2009.
(<https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2009.5425237>)
- [11] J. Choi, Y.-S. Choi, and S. Talwar, "Unsupervised learning techniques for trilateration: From theory to android APP implementation," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 134525-134538, Sep. 2019.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.294165>)
- [12] "IEEE standard for information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – specific requirements - Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," in IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std. 802.11-2012), pp. 1-3534, Dec. 2016.
(<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7786995>)
- [13] B.-J. Jang, "Principles and trends of UWB positioning technology," *J. Korean Inst. Electr. Eng. Sci.*, vol. 33, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2022.
(<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2022.33.1.1>)
- [14] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, "A survey of indoor localization systems and technologies," in *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, 3rd Quart, 2019.
(<https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>)
- [15] J. Zhang, P. V. Orlik, Z. Sahinoglu, A. F. Molisch, and P. Kinney, "UWB systems for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 313-331, Feb. 2009.
(<https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008786>)
- [16] S. Gezici and H. V. Poor, "Position estimation via ultra-wide-band signals," in *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 386-403, Feb. 2009.
(<https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008840>)
- [17] D. Coppens, A. Shahid, S. Lemey, B. Van Herbruggen, C. Marshall, and E. De Poorter, "An overview of UWB standards and organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability aspects and future research directions," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 70219-70241, Jun. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187410>)
- [18] J. Ma, Z. Chang, F. Zhang, J. Xiong, J. Ni, B. Jin, and D. Zhang, "Involving ultra-wideband in consumer-level devices into the ecosystem of wireless sensing," in *Proc. 28th Annu. Int. Conf. Mobile Comput. And Netw. (MobiCom '22)*, pp. 758-760, New York, USA, Oct. 2022.
(<https://doi.org/10.1145/3495243.3558745>)
- [19] "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks--Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques," in IEEE Std. 802.15.4z-2020 (Amendment to IEEE Std. 802.15.4-2020), pp. 1-174, Aug. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9179124>)
- [20] M. Wang, B. Xue, W. Wang, and J. Yang, "The design of multi-user indoor UWB localization system," *2017 2nd ICFST*, pp. 322-326, Shenzhen, China, Apr. 2017.
(<https://doi.org/10.1109/ICFST.2017.8210528>)
- [21] B. Xu, G. Sun, R. Yu, and Z. Yang, "High-accuracy TDOA-based localization without time synchronization," in *IEEE Trans. Paralle. and Distrib. Syst.*, vol. 24, no. 8, pp. 1567-1576, Aug. 2013.
(<https://doi.org/10.1109/TPDS.2012.248>)
- [22] F. Zhang, S. Duan, and J. Tan, "UWB-based wireless clock synchronization and real-time positioning in smart parking," in *IEEE Sensors J.*, vol. 24, no. 3, pp. 3822-3832, Feb. 2024.
(<https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3340188>)
- [23] J. Cano, S. Chidami, and J. L. Ny, "A kalman

filter-based algorithm for simultaneous time synchronization and localization in UWB networks,” *2019 ICRA*, pp. 1431-1437, Montreal, QC, Canada, 2019.

(<https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794180>)

- [24] J. Choi, Y.-S. Choi, and S. Talwar, “Localization with Wi-Fi ranging and built-in sensors: Self-learning techniques,” *Mach. Learn. for Indoor Localization and Navig.*, pp. 101-130, Cham: Springer, 2023. (https://doi.org/10.1007/978-3-031-26712-3_5)

하 영 훈 (Young-hun Ha)



2024년 2월 : 경북대학교 전자공학부 학사
2024년 3월~현재 : 경북대학교 전기전자공학부 석사과정
<관심분야> 무선통신, 인공지능, 센서 융합, 측위 시스템
[ORCID:0009-0004-4678-8523]

안 현 선 (Hyeon-seon An)



2023년 8월 : 경북대학교 전자공학부 학사
2023년 9월~현재 : 경북대학교 전기전자공학부 석사과정
<관심분야> 센싱, 정보통신
[ORCID:0009-0008-7962-5332]

이 종 욱 (Jong-uk Lee)



2020년 3월~현재 : 경북대학교 전자공학부 재학
<관심분야> 무선통신, 센싱, 레이더
[ORCID:0009-0004-0013-222X]

최 정 식 (Jeong-sik Choi)



2010년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 학사
2012년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2016년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2016년 9월~2017년 8월 : 서울대학교 뉴미디어통신공동연구소 선임연구원
2017년 6월~2021년 7월 : Intel Labs/Intel Corporation (USA, CA) Research Scientist AI/ML
2021년 9월~현재 : 경북대학교 전자전기공학부 조교수
<관심분야> 무선통신, 센싱, 측위 시스템
[ORCID:0000-0002-0615-345X]