

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.3.41>
JIIBC 2024-3-7

대규모 IoT 환경에서의 효과적 측위를 위한 능동적-수동적 거리 추정 기법

Active-Passive Ranging Method for Effective Positioning in Massive IoT Environment

황병선*, 이승우*, 김경훈*, 선영규**, 김진영***

Byungsun Hwang*, Seongwoo Lee*, Kyoung-Hun Kim*,
Young-Ghyu Sun**, Jin-Young Kim***

요약 Internet of Things (IoT)의 성능 발전 및 보급으로 다양한 위치 기반 서비스가 제공되고 있으며, 요구되는 서비스의 목적에 맞게 다양한 거리 추정 기법들이 연구되고 있다. 기존 거리 추정 기법은 태그와 앵커가 직접 신호를 교환하여 거리를 추정하기 때문에 대규모 IoT 환경에서 통신 자원을 효율적으로 사용하지 못하다는 한계점을 갖는다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 능동적-수동적 거리 추정 기법들이 제안되었으나, 클럭 드리프트 오차에 대한 이론적인 수렴성 보장과 거리 추정 기법의 특징에 대한 분석이 부족하여 정밀한 측위 결과를 도출하기 어려울 수 있다. 본 논문에서는 대규모 IoT 환경에서 정밀 측위를 위해 클럭 드리프트 오차를 반영한 개선된 능동적-수동적 거리 추정 기법을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 개선된 능동적-수동적 거리 추정 기법은 기존 능동적-수동적 거리 추정 기법 대비 최대 94.4%, 14.4% 거리 추정 성능을 개선할 수 있음을 확인했다.

Abstract With the advancement and proliferation of the Internet of Things (IoT), a wide range of location-based services are being offered, and various ranging methods are being researched to meet the objectives of the required services. Conventional ranging methods involve the direct exchange of signals between tags and anchors to estimate distance, presenting a limitation in efficiently utilizing communication resources in large-scale IoT environments. To overcome these limitations, active-passive ranging methods have been proposed. However, there is a lack of theoretical convergence guarantees against clock drift errors and a detailed analysis of the characteristics of ranging estimation techniques, making it challenging to derive precise positioning results. In this paper, an improved active-passive ranging method that accounts for clock drift errors is proposed for precise positioning in large-scale IoT environments. The simulation results confirmed that the proposed active-passive ranging method can enhance distance estimation performance by up to 94.4% and 14.4%, respectively, compared to the existing active-passive ranging methods.

Key Words : Localization, Ranging method, Time of flight, Massive IoT

*준회원, 광운대학교 전자융합공학과

**정회원, 광운대학교 전자융합공학과

***정회원, 광운대학교 전자융합공학과, 교신저자

접수일자 2024년 4월 3일, 수정완료 2024년 5월 3일

게재확정일자 2024년 6월 7일

Received: 3 April, 2024 / Revised: 3 May, 2024 /

Accepted: 7 June, 2024

***Corresponding Author: jinyoung@kw.ac.kr

Dept. of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University, Korea

I. 서 론

Internet of Things (IoT)의 성능 발전으로 다양한 분야에 보급됨에 따라 기존에 배치된 IoT를 활용한 위치 기반 서비스가 제시되고 있다^[1-3]. 기존 위치 기반 서비스는 주로 실시간으로 어디서든 사용자의 위치를 추정할 수 있는 global navigation satellite system (GNSS)을 활용하여 제공되었다. 그러나, GNSS는 위성 신호의 영향을 쉽게 받아 정밀 측위가 불가능한 경우가 생길 수 있다는 한계점이 있다. 이러한 한계점을 극복하고자 다양한 radio frequency (RF) 기반 근거리 측위 시스템이 제안되고 있다^[4]. 특히 ultra-wideband (UWB)는 다중 대역 환경에서 강건한 신호 특성 때문에 UWB를 활용한 근거리 측위 시스템이 주목받고 있다^[5].

RF 기반 근거리 측위 시스템에서는 신호의 세기, 도달 시간, 각도 등 다양한 신호 특성을 이용해 사용자와의 거리를 추정한다. UWB는 초단파 신호를 전송할 수 있어 Bluetooth 및 Wi-Fi에 비해 비교적 높은 시간 분해능을 갖는다. UWB 기반 측위 시스템은 이러한 신호 특성을 활용하여 신호의 도달 시간을 측정해 거리를 추정하는 time-of-flight (TOF) 기법을 주로 사용한다.

기존 TOF 기법은 최소 3개 이상의 앵커를 통해 태그와의 거리 반경을 취득하고, 취득한 거리 반경의 교차점을 계산해 최종적인 태그의 위치를 추정한다. 이때 앵커는 태그와 신호를 직접 교환하는 능동적인 프로토콜 과정을 거친다. TOF 기법은 기존에 배치된 IoT를 활용하여 적은 비용으로 시스템을 구축할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 대규모 IoT 환경에서는 센서 간 신호의 충돌을 고려하여 신호 대기 시간이 요구된다는 한계점을 가지고 있고, 이는 위치 기반 서비스의 성능을 떨어뜨릴 수 있다. 이러한 한계점을 극복하고자 능동적-수동적 거리 추정 기법이 연구되고 있다^[6].

능동적-수동적 거리 추정 기법은 태그와 직접 신호를 교환하는 능동적 앵커와 신호를 엿듣는 수동적 앵커를 통해 거리를 추정한다. 수동적 앵커는 능동적 앵커와 태그가 교환하는 신호를 수신하여 간접적으로 태그와의 거리를 추정할 수 있다. 수동적 앵커는 거리 추정을 위한 신호를 송신하지 않기 때문에 측위 시스템에서의 통신 자원 사용량을 절약할 수 있다.

기존 능동적-수동적 거리 추정 기법은 클록 드리프트 오차에 대한 이론적인 수렴을 보장하고 있지 않고, 거리 추정 기법의 특징을 반영하고 있어 정밀한 측위 결과를 도출하기 어려울 수 있다^[7]. 본 논문은 대규모 IoT 환경

에서의 정밀 측위를 위한 개선된 능동적-수동적 거리 추정 기법을 제안한다. 시뮬레이션에서 거리 추정 프로토콜별 성능을 비교 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 능동적 거리 추정 기법과 프로토콜별 거리 오차를 설명한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 개선된 능동적-수동적 거리 추정 기법을 설명하고 클록 드리프트 오차를 개선할 수 있는 접근법을 제시한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법의 성능을 검증하고, 5장에서 결론을 통해 본 논문을 마무리 짓는다.

II. 능동적 거리 추정 기법

1. SS-TWR 프로토콜

Single-sided two-way ranging (SS-TWR)은 태그와 앵커 간 신호를 1회씩 전송하여 신호 도달 시간을 측정한다. 그림 1은 태그A와 앵커B 간 거리 추정을 위한 SS-TWR 프로토콜의 신호 송수신 과정을 보여주며, 신호 도달 시간은 다음과 같다^[8,9].

$$t_{roundA} = 2 \cdot t_{A \leftrightarrow B} + t_{replyB}. \quad (1)$$

t_{roundA} 와 t_{replyB} 는 각각 태그A가 측정한 신호의 왕복 시간과 앵커B가 측정한 응답 시간을 의미한다. 식(1)을 통해 신호 도달 시간 $t_{A \leftrightarrow B}$ 를 구할 수 있다.

식(1)에서 태그A와 앵커B에 클록 드리프트를 고려하면 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{t}_{roundA} = (1 + e_a) t_{roundA}, \quad (2)$$

$$\hat{t}_{replyB} = (1 + e_b) t_{replyB}, \quad (3)$$

$$\hat{t}_{roundA} = 2 \cdot \hat{t}_{A \leftrightarrow B} + \hat{t}_{replyB}. \quad (4)$$

이때 \hat{t} 는 클록 드리프트를 고려한 t 값을 의미한다. 식(2)와 식(3)은 각각 태그A와 앵커B에서 발생한 클록 드리프트 오차 e_a , e_b 를 고려한 왕복 시간 및 응답 시간을 의미한다. 식(4)를 통해 $\hat{t}_{A \leftrightarrow B}$ 를 구할 수 있고, 클록 드리프트로 발생한 오차는 다음과 같다.

$$\hat{t}_{A \leftrightarrow B} - t_{A \leftrightarrow B} = e_a \cdot t_{A \leftrightarrow B} + \frac{t_{replyB} \cdot (e_a - e_b)}{2}. \quad (5)$$

2. SDS-TWR 프로토콜

Symmetrical double-sided two-way ranging (SDS-TWR)은 SS-TWR을 2회 반복한 프로토콜로 그림 2에서 신호 송신 및 수신 과정을 보여준다. 신호의 도달 시간을 계산하는 수식은 아래와 같다.

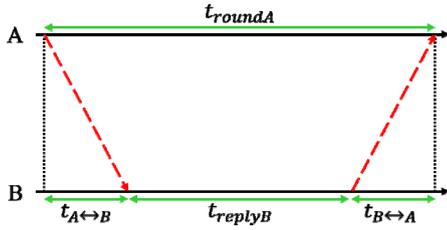


그림 1. SS-TWR protocol의 신호 교환.
Fig. 1. Signal exchange of SS-TWR protocol.

$$t_{roundB} = 2t_{A \leftrightarrow B} + t_{replyA}, \quad (6)$$

t_{roundB} 와 t_{replyA} 는 각각 앵커B가 측정한 신호 왕복 시간, 태그A가 측정한 신호 응답 시간을 의미한다. 식(1)과 식(6)을 통해 $t_{A \leftrightarrow B}$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$t_{A \leftrightarrow B} = \frac{t_{roundA} - t_{replyB} + t_{roundB} - t_{replyA}}{4}. \quad (7)$$

식(7)은 클록 드리프트가 고려되지 않은 수식으로 이를 모델링하면 다음과 같다.

$$\hat{t}_{replyA} = (1 + e_a)t_{replyA}, \quad (8)$$

$$\hat{t}_{roundB} = (1 + e_b)t_{roundB}, \quad (9)$$

식(7)-(9)를 이용한 클록 드리프트에 의한 거리 추정 오차는 아래 수식과 같다.

$$\hat{t}_{A \leftrightarrow B} - t_{A \leftrightarrow B} = \frac{t_{A \leftrightarrow B}(e_a + e_b)}{2} + \frac{1}{4}(e_a - e_b)(t_{replyB} - t_{replyA}), \quad (10)$$

SDS-TWR 프로토콜은 클록 드리프트로 인한 오차를 최소화하기 위해 제안된 기법으로 t_{replyA} 와 t_{replyB} 가 동일하게 설정해 오차를 최소화한다.

$$\hat{t}_{A \leftrightarrow B} - t_{A \leftrightarrow B} = \frac{t_{A \leftrightarrow B}(e_a + e_b)}{2}. \quad (11)$$

3. AltDS-TWR 프로토콜

SDS-TWR 프로토콜은 정확한 시간 동기화를 가정한다. 그러나 이는 실제 통신 환경에 적용하기엔 무리가 있다. Alternative double-sided two-way ranging (AltDS-TWR)은 SDS-TWR 프로토콜과 동일한 과정으로 신호를 송신 및 수신하지만, 태그와 앵커의 신호 응답 시간이 동일해야 한다는 제한점을 해결한 프로토콜이다. AltDS-TWR는 식(1)과 식(6)을 이용해 $t_{A \leftrightarrow B}$ 를 수식으로 유도하면 다음과 같다^[8].

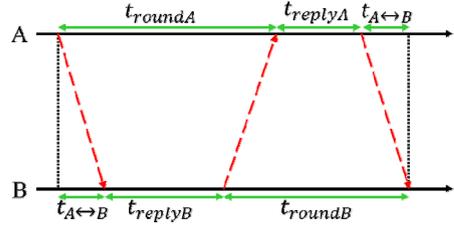


그림 2. DS-TWR 프로토콜의 신호 교환.
Fig. 2. Signal exchange of DS-TWR protocol.

$$t_{roundA} \cdot t_{roundB} = (2t_{A \leftrightarrow B} + t_{replyB})(2t_{A \leftrightarrow B} + t_{replyA}), \quad (12)$$

$$t_{A, A \leftrightarrow B} = \frac{t_{roundA} \cdot t_{roundB} - t_{replyB} \cdot t_{replyA}}{2(t_{roundA} + t_{replyA})}. \quad (13a)$$

$$t_{B, A \leftrightarrow B} = \frac{t_{roundA} \cdot t_{roundB} - t_{replyB} \cdot t_{replyA}}{2(t_{roundB} + t_{replyB})}. \quad (13b)$$

$$\hat{t}_{A, A \leftrightarrow B} - t_{A, A \leftrightarrow B} = e_a \cdot t_{A \leftrightarrow B}, \quad (14a)$$

$$\hat{t}_{B, A \leftrightarrow B} - t_{A, A \leftrightarrow B} = e_b \cdot t_{A \leftrightarrow B}. \quad (14b)$$

e_a 및 e_b 에 따라 오차가 변화하므로 클록 드리프트가 적게 발생한 센서를 선택해 오차를 최소화할 수 있다.

III. 제안하는 능동적-수동적 거리 추정 기법

그림 4는 능동적-수동적 거리 추정 기법의 신호 교환 과정을 보여준다. 능동적-수동적 거리 추정 기법에서 앵커는 태그A와 직접 신호를 교환하는 능동적 앵커B와 능동적 앵커의 신호를 엿듣는 수동적 앵커C로 구분할 수 있다. 제안하는 능동적-수동적 거리 추정 기법에서 수동적 앵커는 능동적 앵커의 위치를 사전 인지하고 있다고 가정한다. 수동적 앵커는 능동적 앵커와 태그가 교환하는 신호와 능동적 앵커의 위치정보를 활용해 간접적으로 태그와의 거리를 추정한다.

1. SS-TWR 프로토콜

그림 4에서 $t_{reception C, AB}$ 는 태그A와 능동적 앵커B가 교환한 신호를 수신한 시간 간격을 의미한다. $t_{A \leftrightarrow C}$ 는 태그A와 수동적 앵커C 사이 신호 도달 시간을 의미하며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$t_{A \leftrightarrow C} = t_{A \leftrightarrow B} + t_{replyB} + t_{B \rightarrow C} - t_{reception C, AB}. \quad (15)$$

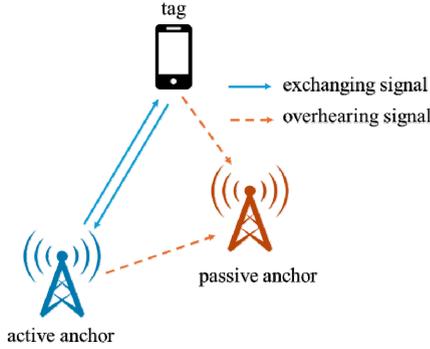


그림 3. 능동적-수동적 거리 추정 기법.
Fig. 3. Active-passive ranging scheme.

$t_{B \leftrightarrow C}$ 는 능동적-수동적 거리 추정 기법의 기본 가정으로 구할 수 있으며, 클록 드리프트를 모델링하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{t}_{reception C_{AB}} = (1 + e_c) t_{reception C_{AB}}, \quad (16)$$

$$\hat{t}_{A \leftrightarrow C} = \hat{t}_{A \leftrightarrow B} + \hat{t}_{reply B} + t_{B \leftrightarrow C} - \hat{t}_{reception C_{AB}}, \quad (17)$$

e_c 는 수동적 앵커 C에서 발생한 클록 드리프트로 인한 오차를 의미하며, 식(8)-(17)을 이용한 클록 드리프트로 인한 거리 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{t}_{A \leftrightarrow C} - t_{A \leftrightarrow C} \\ = e_a t_{A \leftrightarrow B} + \frac{t_{reply B}(e_a + e_b)}{2} - e_c t_{reception C_{AB}}. \end{aligned} \quad (18)$$

2. SDS-TWR 프로토콜

기존 능동적-수동적 거리 추정 기법에서 SDS-TWR 프로토콜을 일반화한 수식은 클록 드리프트를 줄이기 위해 $t_{reply A}$ 와 $t_{reply B}$ 가 동일한 특징을 적용하고 있지 않다^[7]. 이러한 특징을 적용하기 위해 $t_{reception C_{AB}}$ 와 $t_{reception C_{BA}}$ 를 활용한다. $t_{A \leftrightarrow C}$ 를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$t_{A \leftrightarrow C} = -t_{A \leftrightarrow B} - t_{reply A} + t_{B \leftrightarrow C} + t_{reception C_{BA}}, \quad (19)$$

식(15), 식(19)를 통해 $t_{A \leftrightarrow C}$ 에 대한 식으로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{A \leftrightarrow C} = t_{B \leftrightarrow C} + \frac{t_{reception C_{BA}} - t_{reception C_{AB}}}{2}, \quad (20)$$

식(21)에 클록 드리프트를 이용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

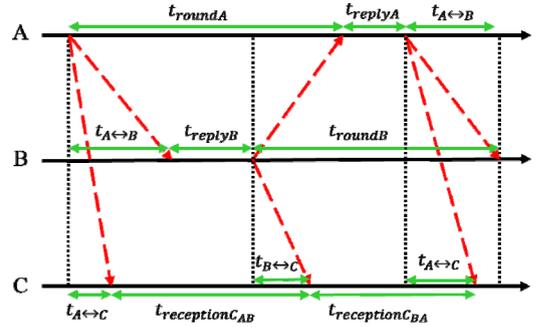


그림 4. 능동적-수동적 거리 추정 기법의 신호 교환.
Fig. 4. Signal exchange of active-passive ranging scheme.

$$\hat{t}_{reception C_{BA}} = (1 + e_c) t_{reception C_{BA}}, \quad (21)$$

$$\hat{t}_{A \leftrightarrow C} = t_{B \leftrightarrow C} + (1 + e_c) \cdot \frac{t_{reception C_{BA}} - t_{reception C_{AB}}}{2}, \quad (22)$$

$$\hat{t}_{A \leftrightarrow C} - t_{A \leftrightarrow C} = \frac{e_c \cdot (t_{reception C_{BA}} - t_{reception C_{AB}})}{2}. \quad (23)$$

3. AltDS-TWR 프로토콜

AltDS-TWR 프로토콜의 수식은 SDS-TWR 프로토콜과 유사한 과정으로 전개된다. 식(15)와 식(19)를 이용해 $t_{A \leftrightarrow C}$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t_{A \leftrightarrow C} = t_{B \leftrightarrow C} \\ + \frac{t_{reply B} - t_{reply A} + t_{reception C} - t_{reception C}}{2}. \end{aligned} \quad (24)$$

식(24)에 클록 드리프트를 모델링하면 다음과 같은 오차 수식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{t}_{A \leftrightarrow C} - t_{A \leftrightarrow C} \\ = \frac{e_b t_{reply B} - e_a t_{reply A} + e_c (t_{reception C_{BA}} - t_{reception C_{AB}})}{2}. \end{aligned} \quad (25)$$

IV. 시뮬레이션 결과

클록 드리프트는 IEEE 802.15.4a 표준에서 정의한 ± 20 ppm을 가정한다. 센서의 응답 시간은 $1 \mu s$ 미만의 값으로 불규칙적으로 설정하고 1,000회 반복하여 평균 오차를 구한다. 클록 드리프트로 인한 거리 추정 오차를 확인하기 위해 기존 기법과 제안하는 기법을 비교하면 다음 표 1과 표 2와 같다.

표 1. 클록 드리프트로 인한 SDS-TWR 프로토콜 오차 비교.
 Table 1. Error in SDS-TWR protocol by clock drift.

	거리 추정 오차 수식
기존 거리 추정 기법 ^[7]	$\frac{e_a + e_b}{2} \cdot t_{A \rightarrow B} + e_b \cdot t_{replyB} - e_c \cdot t_{reception C_{AB}}$
제한한 거리 추정 기법	$\frac{e_c \cdot (t_{reception C_{BA}} - t_{reception C_{AB}})}{2}$

표 2. 클록 드리프트로 인한 AltDS-TWR 프로토콜 오차 비교.
 Table 2. Error in AltDS-TWR protocol by clock drift.

	거리 추정 오차 수식
기존 거리 추정 기법 ^[7]	$e_a \cdot t_{A \rightarrow B} + e_b \cdot t_{replyB} - e_c \cdot t_{reception C_{AB}},$ $e_b \cdot t_{A \rightarrow B} + e_b \cdot t_{replyB} - e_c \cdot t_{reception C_{AB}}$
제한한 거리 추정 기법	$\frac{1}{2} (e_b \cdot t_{replyB} - e_a \cdot t_{replyA}) +$ $\frac{1}{2} e_c (t_{reception C_{BA}} - t_{reception C_{AB}})$

그림 5는 클록 드리프트로 인한 프로토콜별 거리 추정 오차를 보여준다. SDS-TWR 프로토콜은 AltDS-TWR 프로토콜과 비교하여 상대적으로 낮은 오차를 보인다. 이는 센서 간 응답 시간을 동일하게 설정하여 클록 드리프트를 줄이는 특성 때문에 발생한 결과이다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 능동적-수동적 거리 추정 기법의 오차는 기존 기법 대비 SDS-TWR, AltDS-TWR 각각 약 94.4%, 14.6% 개선함을 확인할 수 있다.

대규모 IoT 환경에서의 효과적 측위를 위해서는 앵커 수에 따른 교환하는 신호 패킷 수 분석이 필요하다. 그림 6은 능동적 앵커 수에 따른 교환한 신호 패킷 수를 보여준다. SS-TWR 프로토콜은 앵커와 태그가 1회씩 신호를 교환하기 때문에 교환하는 신호 패킷 수는

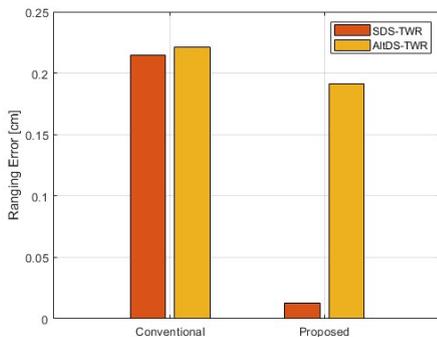


그림 5. 클록 드리프트로 인한 프로토콜별 거리 추정 오차.
 Fig. 5. Ranging error by protocol due to clock drift.

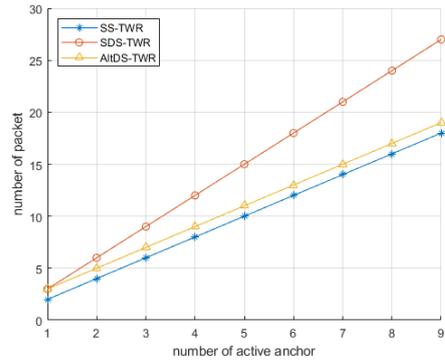


그림 6. 능동적 앵커 수에 따른 신호 패킷 수.
 Fig. 6. Number of packet according to number of active anchor.

$N_{total} = 2N_{active}$ 와 같이 계산할 수 있다. N_{total} 과 N_{active} 은 각각 교환한 신호 패킷 수와 능동적 앵커의 수를 의미한다. SDS-TWR 프로토콜은 SS-TWR 프로토콜을 2번 반복해 $N_{total} = 3N_{active}$ 와 같이 계산할 수 있다. AltDS-TWR 프로토콜은 센서 간 응답 시간을 다르게 설정할 수 있어 마지막 송신 신호에 모든 거리 추정 결과를 담에 보낼 수 있어 $N_{total} = 2N_{active} + 1$ 와 같이 계산할 수 있다. 능동적 앵커의 수가 증가함에 따라 거리 추정을 위한 신호 패킷 수가 큰 폭으로 증가함을 알 수 있지만, 능동적 앵커 대신 수동적 앵커를 사용할 경우 요구되는 신호 패킷 수를 줄여 통신 자원이 제한되는 대규모 IoT 환경에서 효과적으로 측위가 가능하다.

V. 결론

본 논문은 대규모 IoT 환경에서 효율적 측위를 위한 개선된 능동적-수동적 거리 추정 기법을 제안했다. 제안한 능동적-수동적 거리 추정 기법은 프로토콜별 특성을 반영하고 TOA의 가장 큰 오차 원인인 클록 드리프트를 고려한다. 시뮬레이션 결과 제안한 능동적-수동적 거리 추정 기법은 기존 거리 추정 기법 대비 SDS-TWR 프로토콜과 AltDS-TWR 프로토콜에서 최대 94.4%, 14.4% 만큼의 거리 추정 오차를 개선할 수 있음을 확인했다. 또한, 거리 추정 기법의 프로토콜별 교환하는 신호 패킷 수를 앵커 수에 따라 비교해 제안하는 능동적-수동적 거리 추정 기법이 대규모 IoT 환경에서 신호 대기 시간 및 에너지 소모 관점에서 효율적임을 확인했다.

References

- [1] Z. Wei, et. al, "Integrated Sensing and Communication Signals Toward 5G-A and 6G: A Survey," IEEE Internet of Things Journal, Vol. 10, No. 13, pp. 11068-11092, Jul. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IJOT.2023.3235618>.
- [2] E. Cho, J. Y. Lee and J. Y. Lee, "Mobile-based Smart Same-Time Broadcasting Services Using Locational Information of Urban Railway Users," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 23, No. 3, pp. 207-213, Jun. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2023.23.3.207>.
- [3] J. Kim, Y. Kim and G. Hoang, "A Study on Indoor Position-Tracking System Using RSSI Characteristics of Beacon," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 17, No. 5, pp. 85-90, Oct. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.5.85>.
- [4] F. Zafari, A. Gkelias and K. K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," IEEE Communications Survey & Tutorials, Vol. 21, No. 3, pp. 2568-2599, Apr. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>.
- [5] M. Ridolfi, S. Van De Velde, H. Steendam and E. De Poorter, "Analysis of the Scalability of UWB Indoor Localization Solutions for High User Densities," Sensors, Vol. 18, No. 6, pp. 1875, Jun. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s18061875>.
- [6] Z. Sahinoglu and S. Gezici, "Enhanced Position Estimation via Node Cooperation," in Proc. of 2010 IEEE International Conference on Communications, Cape Town, South Africa, pp. 1-6, May, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2010.5502319>.
- [7] T. Laadung, S. Ulp, M. M. Alam and Y. L. Moullec, "Novel Active-Passive Two-Way Ranging Protocols for UWB Positioning Systems," IEEE Sensors Journal, Vol. 22, No. 6, pp. 5223-5237, Mar. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISEN.2021.3125570>.
- [8] D. Neirynek, E. Luk and M. McLaughlin, "An Alternative Double-Sided Two-Way Ranging Method," in Proc. of 2016 13th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC), Bremen, Germany, pp. 1-4, Oct. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/WPNC.2016.7822844>.
- [9] C. Lian Sang, M. Adams, T. Hormann, M. Hesse, M. Pormann and U. Ruckert, "Numerical and Experimental Evaluation of Error Estimation for Two-Way Ranging Methods," Sensors, Vol. 19, No. 3, pp. 616, Feb. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s19030616>.

저 자 소 개

항 병 선(준회원)



- 2023년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2023년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 석박사통합과정
- 관심분야 : 측위 시스템, 인공지능, 무선 통신 시스템

이 승 우(준회원)



- 2021년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2021년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 박사과정
- 관심분야 : 에너지인터넷, 인공지능, 스마트 그리드, 측위 시스템, 무선 통신

김 경 훈(준회원)



- 2024년 2월 : 광운대학교 전자융합공학 학사 졸업
- 2024년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 석박사통합과정
- 관심분야 : 딥러닝, 강화학습, 자율주행, 측위 시스템

선 영 규(정회원)



- 2018년 2월 : 광운대학교 전자융합공학과 공학사
- 2024년 2월 : 광운대학교 전자융합공학과 공학박사
- 2024년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 연구원
- 관심분야 : 위치인식, 인공지능, 이동통신, 위성통신, 에너지인터넷

※ 이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 20-302-H00-002(KRIT-CT-22-070), 비레이저 기반 차세대 마일즈 개발)

김진영(정회원)



- 1998년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

- 관심분야 : 인공지능, 차세대이동통신, 전력선통신, 가시광통신, 무선 측위 시스템