

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.3.117>  
JIIBC 2022-3-18

# BLE 기반 실내 측위 시스템에서 엔트로피 분석을 통한 정확도 평가 기법

## An Accuracy Assessment Scheme through Entropy Analysis in BLE-based Indoor Positioning Systems

피경준\*, 민홍\*\*, 한경호\*\*\*

Kyung-Joon Pi\*, Hong Min\*\*, Kyoungho Han\*\*\*

**요약** 인공위성 기반의 실외 측위 시스템과는 달리 실내 측위 시스템은 BLE, Wi-Fi, UWB 등 다양한 무선 기술을 활용한다. BLE 기반 비컨 기술은 일정 주기로 사전에 정의된 장치 ID와 위치 정보를 제공하고 이를 수신한 장치에서 RSSI를 활용하여 실내에서 사용자의 위치를 측정할 수 있다. 기존의 BLE 기반 실내 측위 시스템 연구들은 단일 지점에서 사용자의 실제 위치와 계산된 위치의 오차를 비교하는 연구가 많았다. 본 논문에서는 엔트로피 분석 모델을 적용하여 이동 경로나 구역에 따른 측위 정확도를 평가하는 기법을 제안하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 서로 다른 경로에 대한 엔트로피 결과값을 추출하고 이를 비교하여 어느 경로가 더 정확한지에 대해 평가할 수 있음을 검증하였다.

**Abstract** Unlike the satellite-based outdoor positioning system, the indoor positioning system utilizes various wireless technologies such as BLE, Wi-Fi, and UWB. BLE-based beacon technology can measure the user's location by periodically broadcasting predefined device ID and location information and using RSSI from the receiving device. Existing BLE-based indoor positioning system studies have many studies comparing the error between the user's actual location and the estimated location at a single point. In this paper, we propose a technique to evaluate the positioning accuracy according to the movement path or area by applying the entropy analysis model. In addition, simulation results show that calculated entropy results for different paths can be compared to assess which path is more accurate.

**Key Words** : BLE-based beacon, indoor positioning systems, entropy analysis, accuracy assessment, multi-path

### 1. 서론

블루투스 4.0버전으로부터 도입된 Bluetooth Low Energy(BLE)는 초저전력으로 동작하도록 설계되어 이를

탑재한 디바이스에서 배터리를 통해 장기간 동작할 수 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 BLE 기술을 활용한 비컨(Beacon)은 기기 내에 사전에 정의된 UUID(Universally Unique Identifier)와 위치 정보를 주기적으로 브로드캐스팅

\*비회원, 단국대학교, 연구교수

\*\*중신회원, 가천대학교, AI 소프트웨어학부

\*\*\*비회원, 단국대학교, 전자전기공학부

접수일자 2022년 5월 9일, 수정완료 2022년 5월 31일

게재확정일자 2022년 6월 10일

Received: 9 May, 2022 / Revised: 31 May, 2022 /

Accepted: 10 June, 2022

\*Corresponding Author: kyonghan@dankook.ac.kr

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Dankook University, Korea

(broadcasting) 하는 장치로 스마트폰과 같은 블루투스 스캔 기능이 포함된 장치에서 RSSI(Received Signal Strength Indicator)를 통해 비컨과 스캔 장치 간의 거리를 측정할 수 있다.

실내 측위 시스템은 건물이나 기타 실내 구조물 내에서 사용자나 기기의 위치를 측정하는 기술을 의미한다<sup>[2, 14]</sup>. GPS(Global Positioning System) 등의 위성 기반 위치 확인 시스템을 사용하는 외부 환경과는 달리 실내 측위 시스템은 건물 구조의 다양성과 많은 장애물로 인해 위성신호를 수신할 수 없으므로 정확한 위치 파악이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 블루투스, Wi-Fi, UWB(Ultra Wide Band) 등 RF(Radio Frequency) 기술을 활용한 실내 측위 기술들이 개발되고 있다<sup>[3]</sup>.

기존의 연구에서 실내에서 스마트폰을 활용한 사용자의 위치를 측정하기 위해 비컨과 스마트폰 사이의 레퍼런스 위치에서의 RSSI( $A_0$ )와 거리( $d$ )를 설정하고 수식 (1)과 같이 이동한 스마트폰에서 측정된 RSSI 신호의 거리에 따른 감쇄 현상을 반영하여 비컨과의 거리를 측정하는 기법을 제안하였다<sup>[4]</sup>.

$$RSSI = -10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + A_0 \quad (1)$$

$$d = \exp \left( \frac{RSSI - A_0}{-10n} \right)$$

BLE를 활용한 실내 측위 시스템과 관련된 대부분의 연구는 RSSI에 기반을 두고 있으며 필터링, 기계학습 등을 통해 정확도를 향상하는 것을 목표로 하고 있다. 기존 시스템에서 정확도를 평가하는 방법은 사용자의 위치를 알고 있는 상태에서 이루어진다. 즉 다수의 비컨으로부터 RSSI를 수신하고 삼변측량을 통해 위치를 측정된 뒤에 이를 실제 사용자의 위치와 비교하여 정확도를 평가하였다. 본 논문에서는 사용자의 위치에 대한 사전 정보가 없는 상태에서 각 레퍼런스 위치의 비컨에 대한 정보를 바탕으로 사용자의 이동에 따라 변화된 엔트로피를 계산하여 레퍼런스 위치의 엔트로피와의 비교를 통해 사용자 위치의 정확도를 평가하는 기법을 제안한다. 제안 기법의 경우 정확도를 평가하는 과정에서 사용자의 위치를 정확하게 파악할 필요가 없으며 지정된 영역에 따라 빠른 연산을 통해 단일 수치가 제시되기 때문에 정확도 비교가 쉬운 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장의 서론을 시작으로 2장에서는 기존의 관련 연구를 살펴본다. 3장에서는 제안된 시스템의 개요와 세부 내용에 관해 설명한다. 4

장에서는 실험 결과에 대해 분석하고 5장에서는 결론을 맺는다.

## II. 기존 연구

### 1. 정확도 향상 기법

RSSI 송신 신호의 물리적인 특성상 거리에 따라 신호 세기의 감소가 일어나는 점을 활용하여 스캔 장치에서 비컨의 신호 강도와 수신 장치의 신호 세기를 측정하여 거리를 계산하는 방법이 제안되었다<sup>[5]</sup>. 제안 기법에서 정확도 향상을 위해서 Feedback 필터링을 활용하였으며 이를 통해 비컨과 수신기 사이 5m 이내의 거리에서 0.3m 정도로 오차를 줄였다.

특정 공간을 서로 간섭이 되지 않도록 하기 위하여 여러 구역으로 나누고 구역마다 서로 다른 패턴으로 비컨을 배치하여 사용자가 어느 구역에 있는지 측정하는 기법을 제안하였다<sup>[6]</sup>. 이러한 패턴 기반의 위치 측정 방법은 일렬이나 격자 형태로 비컨을 배치하는 방법들에 비해 사용자가 위치한 공간을 더 정확하게 측정할 수 있다.

다수의 비컨이 밀집도 높게 배치된 환경에서는 RSSI 값이 안정적이고 높은 수치를 갖는 비컨을 선정하여 측위의 정확도를 높이는 방법을 제안하였다<sup>[7]</sup>. 제안 알고리즘을 통해 값의 변화가 심하고 신호가 약한 비컨을 제외함으로써 측위 오차를 줄일 수 있다.

소프트웨어적인 최적화 접근 이외에도 다수의 안테나를 사용하여 비컨에서 수신된 신호들의 각을 측정하고 이를 통해 비컨의 위치를 측정하는 기법도 제안되었다<sup>[8]</sup>. 다수의 안테나로부터 신호의 각을 계산하는 부분도 DSP(Digital Signal Processing) 회로를 통해 처리함으로써 빠른 처리가 이루어질 수 있도록 하였다.

최근에는 기계학습을 통한 정확도 향상 기법도 연구되고 있으며, 이 방법은 격자 형태의 지도 공간에 RSSI를 측정하여 맵핑하는 핑거프린트(fingerprint) 기법의 정확도 향상을 위해 12개의 지도학습 모델을 적용하고 각 모델의 정확도를 분석하였다<sup>[9]</sup>. 이 방법에서는 특정 공간에서 사용자의 이동에 따른 RSSI의 변화를 학습하고 이를 통해 약 80% 정도의 사용자 움직임에 대해 1m 이내의 정확도를 확보하는 방안을 제안하고 있다<sup>[10]</sup>.

기존의 정확도 향상 기법들은 대부분 RSSI에 의존하고 있으며 학습의 대상도 RSSI에만 의존하고 있기 때문에 BLE 통신 기술의 RSSI 민감도에 따라 정확도가 결정되는 한계가 있다.

## 2. 혼합 기술 적용 기법

실내 측위 시스템을 구현하는 과정에서 하나의 RF 기술에 의존하기보다는 상호 보완적인 기술을 연동하여 측위의 정확도를 향상하는 연구도 있다. Wi-Fi와 BLE를 계층적으로 사용하여 사용자의 위치를 측정하는 방법이 제안되었다<sup>[11]</sup>. 이 방법은 정확도는 낮지만, 탐지 영역이 넓은 Wi-Fi 신호를 통해 사용자의 위치를 대략 측정하고 BLE 기반 비컨의 신호를 받아 측위의 정확도를 향상하는 방법이다.

BLE와 UWB를 연동하는 기법도 제안되었다<sup>[12]</sup>. BLE는 에너지 소모는 적지만 정확도가 1~3m 정도이고 UWB는 에너지 소모는 많지만, 정확도가 10~50cm이기 때문에 제한된 에너지 사용량에 따라 위치 추적의 정확도를 조절하는 알고리즘이 제안되었다.

통해 신호 강도와 오차에 대한 데이터를 추적하고 해당 데이터를 통해 신호 간섭과 오차를 최소화하기 위해 기계학습 모델을 활용하는 연구도 진행되었다<sup>[15]</sup>.

## III. 엔트로피 분석을 통한 정확도 평가 기법 제안

### 1. 제안 시스템 개요

그림 1은 BLE 기반 실내 측위 시스템의 개요를 보여준다. 일정한 통신 반경을 갖는 BLE 비컨이 설치된 탐지 영역 내에서 스마트폰과 같은 BLE 스캐너 장치를 가진 사용자는 이동하면서 주기적으로 브로드캐스팅되는 비컨의 메시지를 수신한다. 비컨의 메시지 내에는 비컨 장치에 대한 고유 ID인 UUID와 위치 정보가 전송되고 RSSI를 통해 각 비컨과의 거리를 계산하면 사용자는 자신의 위치를 측정할 수 있다.

사용자가 특정 지점에 위치하면 브로드캐스팅 메시지를 수신할 수 있는 비컨의 리스트를 확보할 수 있다. 예를 들어 그림 1에서와 같이 사용자가 R13 비컨 근처에 위치하면 R9, R11, R13 비컨의 메시지를 수신할 수 있다. 그러나 사용자의 이동 경로나 통신 환경의 변화로 인해 수신되어야 할 메시지가 수신되지 않을 수 있으며 특정 지점이 아닌 블록 형태의 공간에 대한 정확도를 판별하는 것은 어렵다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 이동 경로에 따른 엔트로피 기반의 분석을 통해 측위에 대한 정확도를 평가하고 비교할 수 있는 기법을 제안한다.

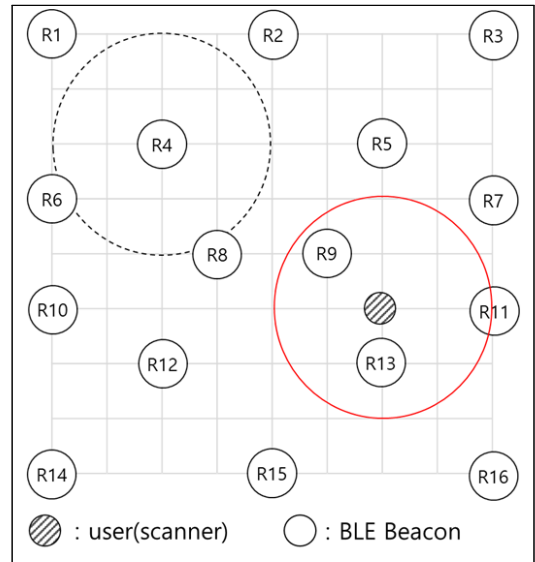


그림 1. BLE 기반 실내 측위 시스템 개요  
 Fig. 1. Overview of a BLE-based indoor positioning system

### 2. 엔트로피 분석 기법

그림 2는 사용자가 그림 1에서와 같이 위치했을 때 수신되어야 하는 메시지의 리스트(Reference)와 실제 수신한 메시지 리스트(Real-world data)를 비교한 것이다. 비컨의 통신 반경에 의해 3개의 비컨으로부터 메시지를 수신해야 하지만 실제 환경에서는 R11 메시지와 같이 수신하지 못하거나 R7, R15와 같은 비정상적인 메시지를 수신하는 경우가 발생한다. 이상적인 메시지 수신 환경과 실제 수신 환경의 정확도 차이를 분석하기 위해서 엔트로피 기반 분석 기법을 적용하였다.

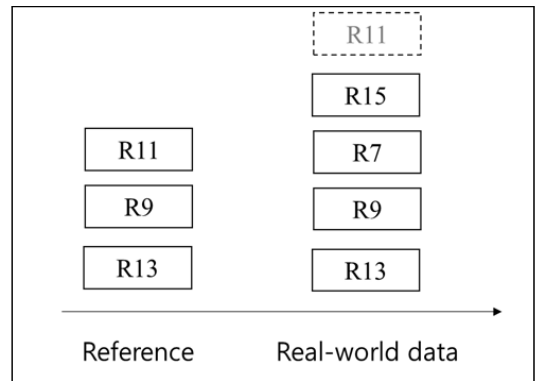


그림 2. 사용자가 수신한 메시지 비교  
 Fig. 2. Received messages of the user comparison

사용자가 이동하는 포인트의 집합을  $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 라고 할 때 Shannon의 엔트로피 정의<sup>[13]</sup>에 따라 수식 2와 같이 사용자의 이동 경로에 따른 엔트로피를 계산한다.

$$E_{path}(R, P) = \sum_{i=1}^n |E(R_i) - E(P_i)|, \quad (2)$$

where  $E(X) = - \sum_{uuid \in I} P_{uuid} \log P_{uuid}$

수식(2)에서 집합  $I$ 는  $p_i$  지점에서 수신되어야 하는 비컨의 UUID 집합이고, 전체 수신되어야 할 메시지의 개수를  $C$ , 수신된 UUID의 개수를  $N_{uuid}$ 라고 하면 각 비컨의 메시지가 추출될 확률( $P_{uuid}$ )과  $\log P_{uuid}$ 은 수식(3)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{uuid} = \frac{N_{uuid}}{C}, \quad (3)$$

$$- \log P_{uuid} = \log \frac{C}{N_{uuid}}$$

수식 (3)을 사용하여 각 위치에 대한 엔트로피 값 ( $E(X)$ )을 수식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$E(X) = \sum_{uuid \in I} \frac{N_{uuid}}{C} \times \log \frac{C}{N_{uuid}} \quad (4)$$

### 3. 엔트로피 분석 결과 해석 및 활용 방안

제안한 엔트로피 기반 분석 모델은 사용자의 여러 이동 경로에 대한 엔트로피 결괏값을 계산할 수 있으며 각 경로에 따라 계산된  $E_{path}(R, P)$ 의 값이 가장 최소가 되는 경로가 가장 정확하게 사용자의 위치를 추적할 수 있는 경로라는 것을 확인할 수 있다. 또한, 경로에 따른 정확도 평가 및 비교뿐만 아니라 대상 지역을 여러 구역으로 나누고 각 구역에 대한 엔트로피 값을 계산하고 이를 비교하는 것이 가능하다. 분석된 결과를 바탕으로 정확도가 높은 경로를 따라 모니터링 대상자들이 이동할 수 있도록 내부 구조를 설계할 수 있다.

## IV. 실험 및 결과

표 1은 제안 기법의 유효성을 검증하기 위해서 진행한 시뮬레이션 파라미터와 설정값을 보여준다. 시뮬레이션

프로그램은 Python 3.6 버전을 사용하여 구현하였으며 비컨과의 거리에 따른 RSSI 값을 반영하기 위해서 표 2와 같은 비컨과 Raspberry Pi 4B를 사용하여 10m 거리까지의 RSSI를 측정하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation Parameters

Parameter	Value
Field Size	20m X 20m
BLE broadcasting range (radius)	5m
Number of beacons	16
Number of Points	Path A: 4 Path B: 5
Threshold	-68 dBm

표 2. 비컨의 규격  
Table 2. Specification of beacons

List	Specification
Model	MIDASCON
Size	32mm x 66mm x 7.9mm
Battery	CR2450 Coin Battery (up to 2 years)
Bluetooth	Bluetooth® Smart 4.1
Chipset	Nordic52832 chipset

그림 3은 비컨과 Raspberry Pi 4B 사이의 거리를 2m 간격으로 설정하고 RSSI의 측정 결과를 보여준다. 거리마다 10회를 측정하고 RSSI의 평균값을 시뮬레이션에 사용하였다.

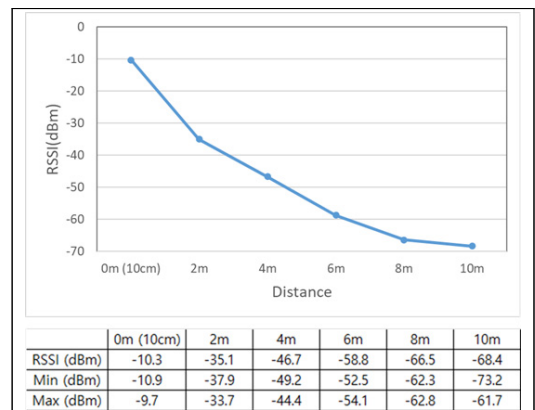


그림 3. 거리에 따른 RSSI의 측정값  
Fig. 3. RSSI value as distance

그림 4는 시뮬레이션을 위한 테스트 시나리오를 보여준다. 경로 A는 사용자가 비컨 R1에서 R16까지 대각선

으로 이동하면서 4개의 포인트에서 엔트로피값을 계산한다. 경로 B는 사용자가 비컨 R1에서 R3를 경유하여 R16까지 7자 모양으로 이동하면서 5개의 포인트에서 엔트로피값을 계산한다.

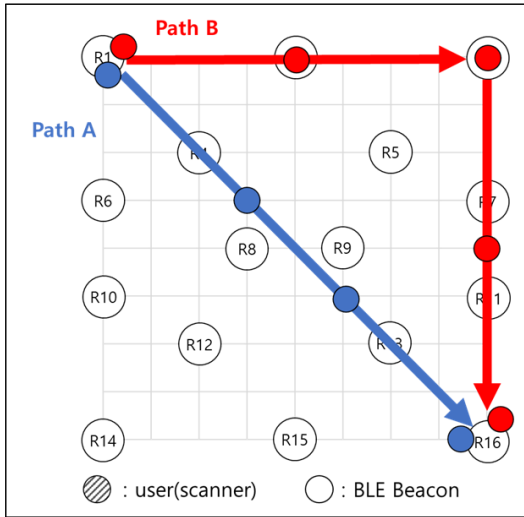


그림 4. 테스트 시나리오  
 Fig. 4. Test scenario

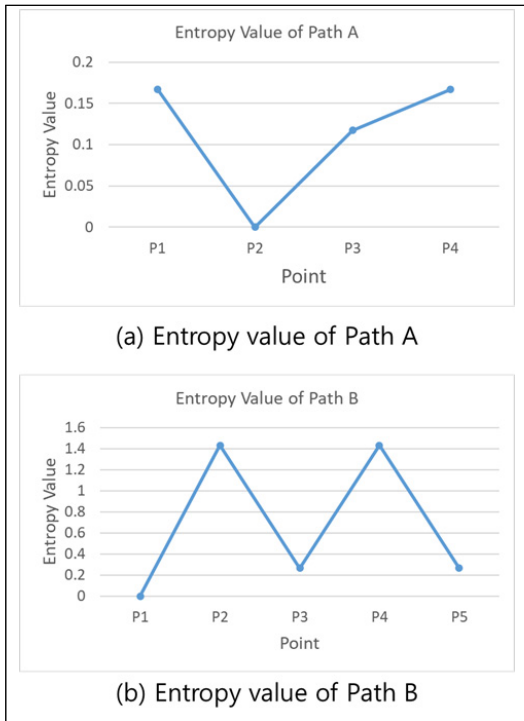


그림 5. 경로 A, B에 대한 엔트로피값 비교  
 Fig. 5. Entropy value comparison between Path A and B

그림 5는 테스트 시나리오에 따른 경로 A와 B의 각 포인트에서 엔트로피값을 비교한 결과이다. 경로 A의 경우 엔트로피값의 변화가 작지만, 경로 B의 경우는 엔트로피값의 변화가 크다. 정규화한 경로 전체에 대한 엔트로피값을 비교해도 경로 A의 경우는 약 0.1126 경로 B의 경우에는 약 0.6782로 경로 B의 값이 큰 것을 알 수 있다. 이를 통해 경로 A가 경로 B보다 사용자의 위치를 더 정확하게 추적할 수 있다고 평가할 수 있다.

## V. 결론

최근 디지털헬스케어에서는 웨어러블 디바이스를 활용하여 사용자의 실외 위치추위뿐만 아니라 실내 위치추위의 필요성이 증대되고 있다. 이에 저전력으로 동작할 수 있도록 설계된 무선 통신 기술인 BLE를 활용한 비컨 기반의 실내 측위를 하기 위한 연구도 더욱 활발하게 진행되고 있다. 기존 연구들은 RSSI를 기반으로 필터링, 기계학습, 다른 무선 통신 기술과의 연동을 통해 실제 사용자의 위치와 추정된 위치의 비교를 통해 실내 측위의 정확도를 높인다. 본 논문에서는 사용자의 이동 경로나 모니터링 공간 내의 정확도 등 단일 위치가 아닌 범위 내에서 정확도를 평가하기 위해 엔트로피 기반의 분석 모델을 사용하였다. 제안된 모델을 통해 이동 경로에 따른 엔트로피 결과값을 분석하여 사용자의 위치 탐지의 정확도를 평가할 수 있으며 이를 활용해 모니터링에 효과적인 비콘의 설치위치 내부 구조를 설계하는 데 활용할 수 있다.

## References

- [1] Young-Doo Lee, Sana Ullah Jan, Insoo Koo, "Application of Navigating System based on Bluetooth Smart," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol.17, No.1, pp.69-76, Feb. 2017. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.1.69>
- [2] Sudarshan S. Chawathe, "Indoor Localization Using Bluetooth-LE Beacons," in Proc. of the 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference, pp.262-268, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/UEMCON.2018.8796600>
- [3] P. Davidson and R. Piche, "A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.19, No.2, pp.1347-1370, Apr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2637663>.

- [4] Adam Satan, Zsolt Toth, "Development of Bluetooth Based Indoor Positioning Application," in Proc. of IEEE International Conference on Future IoT Technologies, pp.1-6, Jan. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/FIOT.2018.8325586>
- [5] Ji-seong Kim, Yong-kab Kim, Geun-chang 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>
- [6] Yeo-Dong Yoon, Yeong-Hwan Jang, Kyung-Joon Pi, Kwangsoo Jo, Junhuyuk An, Hong Min, "A Beacon-based Space Partition Scheme for Patient Location Tracking," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol.18, No.2, pp.157-162, Apr. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.2.157>
- [7] Maja Pušnik, Mitja Galun, Boštjan Šuma, "Improved Bluetooth Low Energy Sensor Detection for Indoor Localization Services," Sensors, Vol.20, No.8, pp.1-27, Apr. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/s20082336>
- [8] Z. Meybodi, M. Salimibeni, K. N. Plataniotis, A. Mohammadi, "Bluetooth Low Energy-based Angle of Arrival Estimation via Switch Antenna Array for Indoor Localization," in Proc. of the 23rd International Conference on Information Fusion, pp.1-6, Jul. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.23919/FUSION45008.2020.9190573>
- [9] J. Lovón-Melgarejo, M. Castillo-Cara, O. Huarcaya-Canal, L. Orozco-Barbosa, I. García-Varea, "Comparative Study of Supervised Learning and Metaheuristic Algorithms for the Development of Bluetooth-Based Indoor Localization Mechanisms," IEEE Access, Vol.7, pp.26123-26135, Feb. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2899736>
- [10] K. Kotrotsios, T. Orphanoudakis, "Accurate Gridless Indoor Localization Based on Multiple Bluetooth Beacons and Machine Learning," in Proc. of the 7th International Conference on Automation, Robotics and Application, pp.190-194, Feb. 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICARA51699.2021.9376476>
- [11] Ren C. Luo, Tung-Jung Hsiao, "Indoor Localization System Based on Hybrid Wi-Fi/BLE and Hierarchical Topological Fingerprinting Approach," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.68, No.11, pp.10791-10806, Nov. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2938893>
- [12] Chong Zhao, Bo Wang, "A UWB/Bluetooth Fusion Algorithm for Indoor Localization," in Proc. of the 7th International Conference on Automation, Robotics and Application, pp.190-194, Feb. 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2019.8865457>
- [13] Jianhua Lin, "Divergence measures based on the Shannon entropy," IEEE Transactions on Information Theory, Vol.37, No.1, pp.145-151, Jan. 1991.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/18.61115>
- [14] Dong-su Lee and Hyeong-seok Huh, "Improvement of Indoor Positioning Accuracy using Smart LED System Implementation," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 22, No. 1, pp. 786-791, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.786>
- [15] Dae-Jin Kim, Chi-Gon Hwang, and Chang-Pyo Yoon, "Learning data preprocessing technique for improving indoor positioning performance based on machine learning," The Journal of KIIT, Vol. 24, No. 11, pp. 1528-1533, 2020.  
DOI: <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.11.1528>

## 저 자 소 개

### 피 경 준(비회원)



- 1994년 : 중앙대학교 체육교육학과 졸업(학사).
- 2016년 3월~2021년 2월: ㈜폴스타헬스케어 이사
- 2021년 2월 ~ : 단국대학교 IT융합학부 수료(석박사 통합과정).
- 2021년 ~ 현재: 단국대학교 산학연 연구교수.
- 2020년 ~ 현재 : ㈜SBSYSTEMS IoT기술전략사업본부 본부장.
- 주관심분야 : 사물인터넷, 디지털 헬스케어시스템

### 민 흥(종신회원)



- 2004년 : 한동대학교 전산과학과 졸업(학사).
- 2011년 : 서울대학교 컴퓨터공학부 석사·박사통합과정 졸업(박사).
- 2013년 ~ 2020년 : 호서대학교 컴퓨터정보공학부 조교수.
- 2021년 ~ 현재 : 가천대학교 AI·소프트웨어학부 부교수.
- 주관심분야 : 운영체제, 자율형 사물인터넷, 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 결합허용 시스템

한 경 호(비회원)



- 1982년 : 서울대학교 전자공학과 졸업 (학사).
  - 1984년 : 서울대학교 전자공학과 졸업 (석사).
  - 1992년 : Texas A&M대 Elec Engr 졸업(박사).
  - 1993년 ~ 현재 : 단국대학교 전자전기 공학부 교수
- 주관심분야 : 사물인터넷, 자율주행

※ 이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1F1A1055408)