

Design and Implementation of Indoor Positioning & Shortest Path Navigation System Using GPS and Beacons in Narrow Buildings

Sang-Hyeon Park*, Huhnkuk Lim*

*Undergraduate Student, Dept. of Computer Engineering, Hoseo University, Asan, Korea

*Associate Professor, Dept. of Computer Engineering, Hoseo University, Asan, Korea

[Abstract]

As techniques for indoor positioning, fingerprinting, indoor positioning method using trilateration, and utilizing information obtained from equipments by Wi-Fi/Bluetooth, etc are common and representative methods to specify the user's indoor position. However, in these methods, an indoor space should be provided with enough space to install a large number of equipment (AP, Beacon). In this paper, we propose a technique that can express the user's location within a building by simultaneously using the GPS signal and the signal transmitted from the beacon in a building structure where the conventional method cannot be applied, such as a narrow building. A shortest path search system was designed and implemented by applying the Dijkstra Algorithm, one of the most representative and efficient shortest path search algorithms for shortest path search. The proposed technique can be considered as one of the methods for measuring the user's indoor location considering the structural characteristics of a building in the future.

▶ **Key words:** Beacon, Indoor Location, University, Location-based services, Android API, IoT, Bluetooth

[요 약]

실내 측위를 위한 기법으로 Fingerprinting, 삼변 측량을 이용한 실내 위치 측위 방법, Wi-Fi / Bluetooth 등 장비로 얻은 정보를 활용하여 사용자의 실내 위치를 특정 하는 것이 일반적이고 대표적인 방법이다. 하지만 이러한 방법들은 실내 공간이 다수의 장비(AP, Beacon)를 설치할 수 있을 만큼의 장소가 마련되어야 한다. 본 논문에서는 폭이 좁은 건물 등 기존 방식을 적용할 수 없는 건물 구조에서 GPS 신호와 비콘 으로부터 전달된 신호를 동시에 이용하여 건물 내 사용자의 위치를 표현할 수 있는 기법을 제안한다. 또한 최단 경로 탐색을 위해 가장 대표적이고 효율적인 최단 경로 탐색 알고리즘 중의 하나인 다익스트라 알고리즘(Dijkstra Algorithm)를 적용하여 최단 경로 탐색 시스템을 설계 구현했다. 제안된 기법은 향후 건물 구조 특성을 고려한 사용자 실내 위치 측정 방법 중 하나로 고려될 수 있을 것이다.

▶ **주제어:** 비콘, 실내 측위, 대학, 위치 기반 서비스, 안드로이드 API, 블루투스

-
- First Author: Sang-Hyeon Park, Corresponding Author: Huhnkuk Lim
 - Sang-Hyeon Park (vhfldxh0@naver.com), Dept. of Computer Engineering, Hoseo University
 - Huhnkuk Lim (hklim@hoseo.edu), Dept. of Computer Engineering, Hoseo University
 - Received: 2023. 01. 06, Revised: 2023. 03. 02, Accepted: 2023. 03. 02.

I. Introduction

사용자 위치 측위를 위해 사용하는 GPS는 미국이 개발 및 관리하는 위성항법 시스템으로 세계 어느 곳에서든 3대 이상의 인공위성에서 신호를 받아, 각자의 단말기에서 이를 계산하여 자신의 위치를 정확히 알아낼 수 있는 시스템이다. 알아낼 수 있는 위치정보는 경도, 위도, 표고(해발고도)가 있으며 추가로 정확한 시간 정보까지 얻을 수 있다. 이는 정확한 위치 정보 계산에 있어서 정확한 시각 정보가 필수이기 때문이다. GPS를 활용한 실외 측위 상황에서는 높은 정확도를 제공하지만 실내 측위에서는 다중 경로 전파 환경으로 인해 높은 정확도를 달성하기 어렵다[1][2][3].

Wi-Fi, RFID 및 무선 비콘과 같은 무선 기술이 실내 측위를 위해 사용될 수 있는데 그중 BLE(Bluetooth Low Energy) 비콘 기반 기술은 정확도가 높고 에너지 소비가 적기 때문에 가장 적합하다. 비콘은 형상, 빛, 소리, 색채, 전파 등으로 약속된 신호를 보내고, 위치 및 방향 등의 정보를 제공하는 특성을 가지고 있는 송·수신 기기 및 장비이다. 일정 범위에 있는 사용자의 위치를 찾고, 사용자에게 필요한 다양한 정보를 전달한다. 비콘 기술을 활용하여 실내 측위를 하는 여러 접근 방식이 존재한다[4-7].

첫 번째 방법으로는 삼변 측량을 이용한 실내 위치 측위가 있다[8-12]. 각각의 신호 발생기(AP, Bluetooth 장비)에서 발하는 신호 강도를 이용하여 현재 위치에서의 대략적인 거리를 구하고 이들이 교차되는 공간의 중앙점을 사용자 위치로 정하는 기술이다. 개별 AP의 정확한 위치만 알 수 있다면 계산을 통해 위치를 찾을 수 있지만, AP들의 위치가 변경될 수도 있고, 지형지물에 따라 신호 강도가 달라지는 등 예외 상황이 많은 실내에서는 적용이 어려우며 다수의 신호 발생기가 설치될 수 있는 넓은 실내 공간이 마련되어야 한다는 단점이 있다[9-12].

두 번째 방법으로는 Fingerprinting 기반의 실내 위치 측위가 있다[13]. 특정 위치에서 보이는 Wi-Fi/Bluetooth 신호를 저장해 놓고 해당 위치에 대한 특징점으로 사용하여 임의의 사용자가 자신의 주변의 신호들을 모아 서버로 요청하면, 이미 기록된 특징 점들과 비교하여 사용자의 현재 위치를 계산하고 결과 위치를 표시하는 방법이다. 이 또한 다수의 신호 발생기가 설치될 수 있는 넓은 실내공간이 마련되어야 하며 실제 서비스에 적용하고 운용하기 위해서는 서비스 가능 지역의 모든 실내 지도와 해당 지역의 Wi-Fi 수집이 필요하고 가능한 동선에 따른 거리마다 신호를 계산하는 등의 많은 노력이 필요하다. 따라서 현재 가장 많이 사용되고 있는 비콘 기반 실내

측위 기술들은 폭이 좁은 건물 등에서는 사용하기에 적합하지 않다.

1962년부터 의무화된 학교 표준설계도에는 건물의 배치, 교실의 크기, 복도의 폭, 천장의 높이 등 학교 건축에 필요한 세세한 모든 사항들이 규정되어 있어 학교 부지와 학생 수에 맞게 동일한 형태의 학교가 세워졌다. 표준설계도 의무 적용은 1992년 폐지되었지만 통제가 편하고 건축비도 적다는 이유로 아직까지도 대부분의 학교 건축물은 기존의 폭이 좁은 구조의 1자형 건물 형태가 7자나 ㄷ자, T자 형태 정도로 변형되었을 뿐, 표준 설계도에서 크게 벗어나지 않은 형태로 지어지고 있다[14][15].

이에 본 연구에서는 폭이 좁은 건물 환경에서 사용자의 위치를 정확하게 측정하고 사용자가 요청한 목적지까지 최단경로를 제공하는 로드맵을 지원하기 위해서, GPS 신호 및 비콘 신호를 동시에 이용하여 특정 건물 내 사용자의 실내 측위를 파악하고 가장 대표적이고 효율적인 최단 경로 탐색 알고리즘인 다익스트라 알고리즘(Dijkstra Algorithm)을 앱에 적용하여 최단 경로 안내 시스템을 구현하고자 한다.

2장에서는 시스템 디자인을 설명하고, 3장에서는 디자인한 시스템을 기반으로 시스템을 구현하고 실험결과를 보여주고자 한다. 그리고 4장에서 본 논문의 결론을 맺고자 한다.

II. System Design

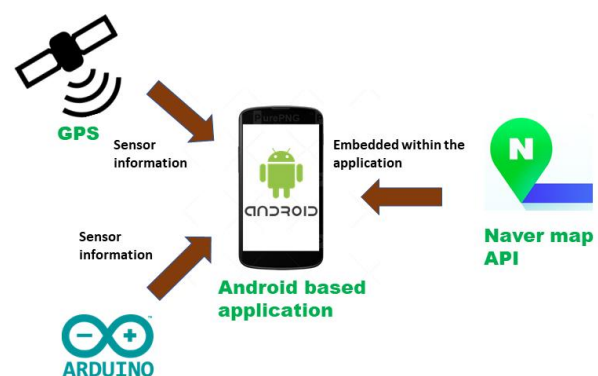


Fig. 1. Design of proposed Navigation System

그림1은 제안 시스템 구조를 나타낸다. 제안 시스템은 서버-클라이언트 구조가 아닌, 단일 로컬 시스템 형태인 모바일 앱을 이용하여 설계 되었다. GPS와 비콘으로 얻은 정보를 이용해 지도상에 사용자 위치와 경로를 표시한다.

지도는 Naver map API를 기반으로 제작되었으며 실사용에서 효율적인 최단 경로를 제공하기 위한 필요 노드 (도로 이외에 도로로 이동 가능한 길, 다양한 출입구 등)을 추가하여 개선된 최단 경로를 안내한다.

본 연구에서 최단 경로를 제안하는 유도 시스템은 Dijkstra가 제안한 알고리즘을 활용한다. 사용 가능한 다양한 알고리즘 중 간결한 알고리즘의 장점을 가지므로 최적의 솔루션을 얻을 수 있다. 출발점 노드로부터 도착점 노드까지 경로를 찾는 절차는 다음과 같다.

1. 모든 노드에 임시 거리 값 할당 계획할 때: 초기 노드의 경우 0으로 설정하고 초기 노드를 제외한 다른 모든 노드의 경우 무한대로 설정된다.
2. 모든 노드를 방문하지 않은 상태로 표시된다. 초기 (시작) 노드는 현재로 설정되며 초기 노드를 제외한 모든 노드로 구성된 방문되지 않은 노드 집합이라는 방문되지 않은 노드 집합을 만든다.
3. 현재 노드의 경우 방문하지 않은 모든 노드를 고려하여 이웃 노드와 그들의 잠정적인 거리를 계산한다. 예를 들어, 현재 노드 A가 6의 거리로 표시되어 있고, 이를 이웃한 B와 연결하는 가장자리의 길이가 2라면, B까지의 거리는 (A를 통해) $6+2=8$ 이 된다. 이 거리가 이전에 기록된 잠정 거리 B보다 작으면 해당 거리가 저장된다.
4. 현재 노드의 모든 인접 노드를 고려했으면 현재 노드를 방문됨으로 표시하고 방문되지 않은 집합에서 제거한다. 방문한 노드는 다시 검사되지 않는다.
5. 대상 노드가 완전한 순회로 표시된 경우 사용자에게 최적 경로를 애플리케이션에 표시한다.

본 연구에서 비콘은 두 가지 용도로 사용된다. 첫 번째는 사용자가 실외 환경에서 실내 환경으로 이동함을 확인한다. 두 번째는 실내 환경에서 사용자와 특정 비콘과의 거리를 측정하기 위함이다. 비콘을 통해 얻은 RSSI 값을 이용해 사용자의 위치로 결정될 수 있는 후보 노드가 결정된다.

BLE 기기가 Advertise Mode에서 주기적으로 송신하는 광고 패킷 (비콘 메시지)는 RSSI를 포함하고 있다. RSSI는 수신된 무선 신호에 존재하는 전력 측정값으로 주로 음의 dBm 값으로 표시되며 0dBm에 가까울수록 신호가 강함을 의미한다. BLE에서 광고 패킷을 송신하는 송신기와 광고 패킷을 수신하는 수신기의 거리가 가까울수록 RSSI 값이 커지고, 거리가 멀수록 RSSI 값은 작아진다. 이러한 특성으로 RSSI는 송신기와 수신기의 사이의 거리를 나타내는 지표로 사용될 수 있다.

RSSI를 활용하여 거리를 구하는 식은 (1)과 같다.[10]

$$RSSI = -10 \log_{10}(d) + a \quad (1)$$

$$d = 10^{\frac{a - RSSI}{10n}} \quad (2)$$

- d : (2)에 의거하여 계산된 거리
- n : 보정 상수 (2~4: 해당 연구에서는 2를 사용)
- a : TX power로 특정 거리에서 수신기로부터 측정된 기본 RSSI 값(1m에서 측정된 RSSI 사용)
- RSSI : 수신기에 측정된 RSSI 값

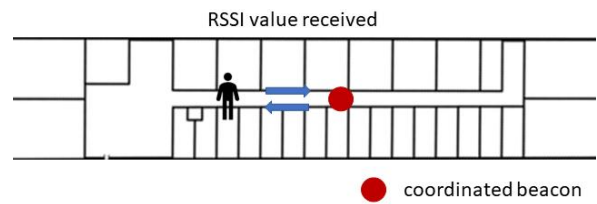


Fig. 2. RSSI received from the coordinated beacon

그림 2는 송신기(비콘)로부터 전달된 신호가 수신기(사용자 휴대폰)에서 RSSI 값으로 표현된 예시를 그림 3은 비콘과 사용자와의 거리(d)가 식(2)에 의해 계산되었을 때의 예시이다. 그림 3과 같이 비콘 으로부터 특정 거리(d)만큼 떨어진 두 개의 노드가 사용자 위치로 결정 될 수 있는 후보 노드이다.

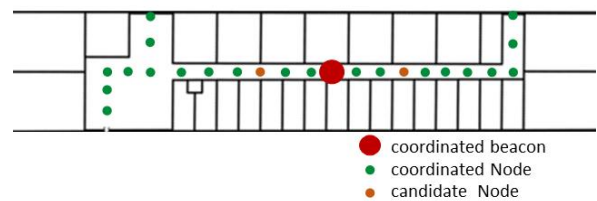


Fig. 3. Two candidate nodes with the distance calculated from the coordinated beacon

두 개의 노드 중 사용자의 위치를 결정하는 방법으로는 두 가지가 있다. 첫 번째 방법으로 GPS로 받은 좌표 값을 활용하는 것이다. 내부 지도에 표현된 모든 노드는 (위도, 경도) 값이 고정된 상태이다. 따라서 후보 노드로 지정 된 두 노드의 좌표와 GPS로부터 얻은 좌표를 각각 식(3)에 대입하여 결과 값을 얻어 비교한다. (후보 노드는 최대 두 개 까지만 존재하므로 n 은 1 또는 2) 더 작은 값을 도출 해낸 노드가 최종 사용자의 실내 위치로 결정된다.

$$\frac{|n \text{번 후보노드 위도} - \text{GPS로 측정된 위도}| + |n \text{번 후보노드 경도} - \text{GPS로 측정된 경도}|}{\text{결과값}} \quad (3)$$

두 번째 방법으로는 후보 노드를 하나로 고정하는 것이다. 사용자가 실내에 진입한 순간부터 사용자가 이동할 동선은 입구 노드에서부터 도착지 노드까지로 고정된다. 사용자가 이동함에 현재 노드에서 경로 상에 바로 다음 노드가 사용자의 위치로 결정된다. 하지만 두 번째 방법은 사용자가 뒤로 돌아가거나 빠르게 움직이는 등 시스템이 예측하지 못한 경로로 움직일 경우에는 위치를 보장할 수 없다.

결국 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 추가 비콘을 설치하여 삼변측량 기법을 사용해야 한다. 이것은 대학 건물의 구조와 맞지 않고 또한 최소의 비용으로 실내 위치 측위 방법을 구안해야 한다는 취지와 맞지 않는다. 따라서 본 연구에서는 첫 번째 방법을 이용하여 실내 경로 위에 사용자의 위치를 표시하는 애플리케이션을 구현하였다. 아래 표 1은 제안 실내 측위 방법과 삼변 측량 기법과의 비교를 건물 구조와 비용 면에서 보여준다.

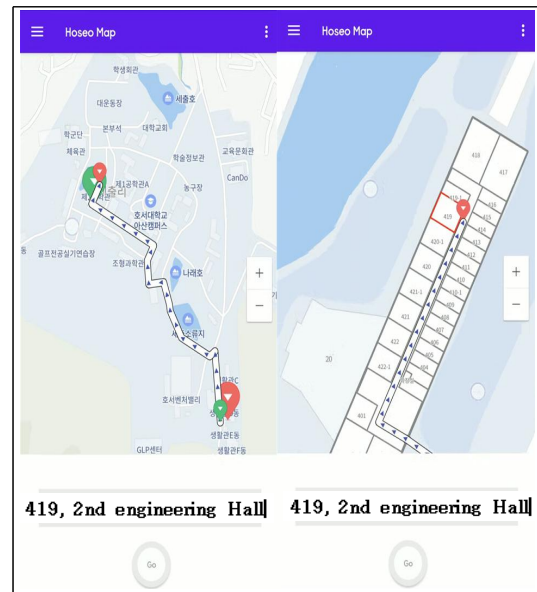
Table 1. Comparison between the proposed indoor positioning method and the trilateration method

	Proposed Indoor Positioning Method	Trilateration Method
Building structure	Narrow width	Wide width
Cost	Low (Few beacons needed)	High (Multiple beacons needed)

III. System Implementation and Demonstration Results

그림 4(a)는 제안 시스템 기반 하에 외부 건물에서 실내 강의실을 도착지로 설정하였을 때 앱 구동 화면이다. 다익스트라 알고리즘을 기반으로 출발점(실외 노드)에서 도착점(실내 노드)까지의 최단 경로가 실내외 지도 위에 표시되며 그림 4(b)는 실내 지도 위에 경로가 성공적으로 표현됨을 확인하였다. 다익스트라 알고리즘은 기존 지도에서 제공하는 API 노드 외 건물 내 추가 도입된 Coordinated nodes(그림 3)까지도 고려하여 최단 경로를 찾는다. 테스트하기 위한 환경은 안드로이드 기반 애플리케이션으로 제작되었으며 기존 상용 중인 길 찾기 앱(Naver Map, kakao Map) 등에서 제공하지 못하던 건물 출입구 노드를 추가함으로써 효율적이고 실용적인 최단 경로를 제공한다.

사용자는 앱을 구동하기 위해 이동 전화에 내장된 Bluetooth 기능과 GPS 기능을 활성화해야 한다. 비콘의 기능을 필요로 하지 않는 외부 상황에선 Bluetooth 기능을 사용하지 않고 GPS 센서 값을 이용하여 사용자의 측위를 제공한다.



(a) (b)
Fig. 4. Route guidance from outdoor departure to indoor destination, (a) full route guidance, (b) Indoor route guidance

실내에서 사용자 측위를 시작하기 위해서는 그림 5와 같이 입구에 배치된 비콘을 앱이 인식하고 사용자가 특정 비콘(실내 위치 측위 시작)을 지나 건물 내부로 진입하였다 판단하고 실내 측위를 진행한다. 실내 측위 알고리즘이 시작되는 기준은 특정 비콘과 사용자와의 거리가 0.5m 이하로 줄었을 때 사용자의 실내 측위를 시작한다. 이와 같은 원리로 층을 구분할 수도 있다. 필요에 따라 계단 혹은 층의 입구에 비콘을 배치하게 되면 사용자가 해당 층의 진입 여부를 알 수 있다.

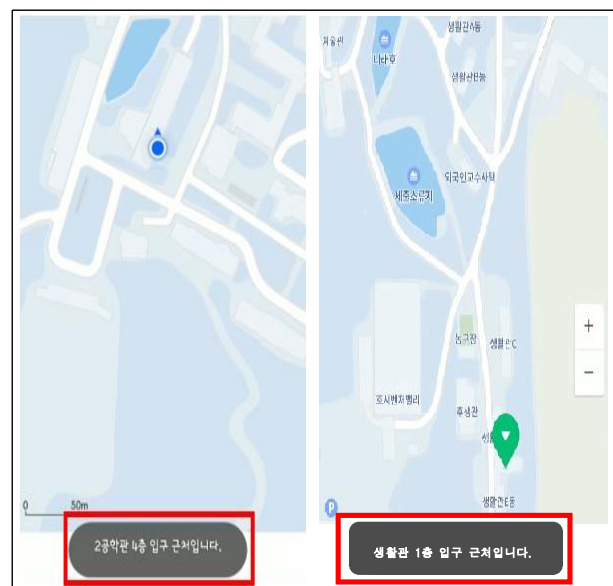


Fig. 5. User recognition by the entrance beacon in a building

Table 2. Distance between user and beacon

	RSSI	Distance(D)
Beacon 1	-89	28m
Beacon 2	-54	0.4m

Table 3. User location node determination process

	Latitude	Longitude	Distance to beacon (m)	Calculated value
User GPS	36.73656658	127.07333165	-	-
Beacon2	36.73655262	127.07317123	-	-
Node18	36.73644698	127.07309784	0.4	0.0003536
Node19	36.73650778	127.07313515	0.2	-
Node20	36.73657655	127.07318614	0.2	-
Node21	36.73662142	127.07321476	0.4	0.0001717

앱에서는 사용자가 위치하는 층의 다수의 비콘 으로 부터 송신된 RSSI 값으로 비콘과 사용자의 거리를 파악한다. 실내 측위가 시작되면 해당 층에서 연결 가능한 모든 비콘 과의 거리가 측정된다. 사용자가 이동함에 따라 연결 된 비콘의 수는 달라질 수 있다. 표 2는 두 개의 비콘이 식 (1)에 의거하여 사용자와 비콘의 거리가 측정된 예시이다. 계산식(3)을 진행하기 위한 비콘을 선택하는 기준은 사용자와의 거리이다. 사용자로부터 측정된 거리가 비콘 1과의 거리보다 비콘 2와의 거리가 더 작기 때문에 애플리케이션에서는 비콘 2로부터 0.4m 떨어진 Node18번과 Node21 번이 후보 노드로 결정된다. 표 2에서 얻은 거리 정보를 바탕으로 2장에서 언급했던 계산식(3)에 의거하여 Node 21번을 사용자의 위치로 판단한다(표 3). 이와 같은 작업 은 사용자가 실내에 진입한 순간부터 도착 노드에 도달할 때까지 반복된다.

제안된 실내 측위 기술의 위치 정확도는 GPS로 부터의 위치 값 및 비콘 으로부터의 RSSI 값의 정확도에 의존하며 이에 따른 위치 오차 보정을 위한 후속 연구가 필요하다.

그림 6은 구현된 시스템 내부에서 GPS로부터 얻은 좌 표 값과 비콘 센서로부터 측정된 거리 정보에 기반 되어 위 기술 한 계산식(3)에 의해 결정된 사용자의 위치를 보 여준다. 결정된 노드로 사용자의 위치가 표시되고 위치가 이동함(다음 노드로 진행됨)에 따라 지나온 길은 회색 실 선으로 표시하여 사용자가 이동한 길을 표시한다.



Fig. 6. Tracking of the user's indoor location and display of the route traveled

IV. Conclusions

본 논문에서는 Fingerprinting, 삼변 측량 등 대표적인 실내 측위 방법이 사용되기 어려운 환경에서 GPS 및 비콘 을 이용한 실내 측위 방법을 제안했다. 두 지점 간 효과적인 경로 탐색을 위해 다익스트라 알고리즘(Dijkstra Algorithm)과 제안된 실내 측위 방법을 적용하여 위치 측 위 및 최단 경로 안내 시스템을 설계 구현하였다. 제안 시 스템은 사용자와 비콘의 거리가 0.5m 이하일 때 사용자의 실내 측위를 시작하고, 실내에 위치한 두 개의 비콘 중 RSSI 신호강도가 더 큰 비콘을 기준으로 두 개의 후보 노 드를 결정하고 두 개의 노드 중 GPS 위치와의 거리가 더 작은 후보 노드를 최종 사용자의 실내 위치로 결정하였다. 제안 시스템은 폭이 좁은 건물 등의 기존 방식을 적용할 수 없는 건물 구조 환경에서 향후 실내 위치 측위를 위한 하나의 방법으로 고려될 수 있을 것이며, 위치 오차 보정 을 위한 후속 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(MOE)(2021RIS-004)

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(Ministry of Science and ICT) (No. 2021R1A2C1010481)

REFERENCES

- [1] R. Neapolitan et. al., "Foundations of Algorithms" 5th ed., Jones and Bartlett Publishers, 2014
- [2] W. Meng, W. Xiao, W. Ni, and L. Xie, "Secure and robust Wi-Fi fingerprinting indoor localization", *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp. 1-7. Sep. 2011, doi.org/10.1109/IPIN.2011.6071908
- [3] B. Bobescu and M. Alexandru, "Mobile Indoor Positioning Using Wi-Fi Localization," *Review of the Air Force Academy*, vol. 28, no. 1, pp. 119-122, 2015
- [4] TTA Dictionary of Information and Communication Terms, <http://word.tta.or.kr/>
- [5] G. Li, E. Geng, Z. Ye, Y. Xu, J. Lin and Y. Pang "Indoor positioning algorithm based on the improved RSSI distance model," *Sensors*, vol. 18, no. 9, Aug. 2018, doi.org/10.3390/s18092820.
- [6] J. Kunhoth, A. Karkar, S. A-. Maadeed and A. A-. Al, "Indoor positioning and wayfinding systems: a survey", *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 10, no. 18, pp. 1-42, May 2020
- [7] P. Pascacio, S. Casteleyn, J. Sospedra, E. Lohan and J. Nurm, "Collaborative Indoor Positioning Systems: A Systematic Review", *Sensors*, vol. 21, no. 3, 2021, doi.org/10.3390/s21031002.
- [8] A. Drira, "GPS navigation for outdoor and indoor environments", MS thesis, University of Tennessee, 2006, <https://www.semantic scholar.org/paper/GPS-Navigation-for-Outdoor-and-Indoor-Environments/f3f8d1d710ea2507a22bd19425b2059231df66c1>.
- [9] J. Lee et. al, "Common Chord based Trilateration Correction Algorithm and Hybrid Positioning System Development", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 24, no.3, pp. 448-458, Mar. 2020, doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.3.448
- [10] S. Kim, T. Kim and S. Tak, "Performance Evaluation of RSSI-based Trilateration Localization Methods" *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 15 no. 11, pp. 2488 - 2492, 2011, doi.org/10.6109/jkiice.2011.15.11.2488.
- [11] J. Kwak and Y. Sung, "Beacon-based Indoor Location Measurement Method to Enhanced Trilateration", *Proceedings of the Korea Information Processing Society Conference*, pp. 907-909, 2017, doi.org/10.3745/PKIPS.y2017m04a.907.
- [12] M. G. Wing, A. Eklund, and L. D. Kellogg, "Consumer-grade global positioning system (GPS) accuracy and reliability", *Journal of forestry*, vol. 103, no. 4, pp. 169-173, Jun. 2005, doi.org/10.1093/jof/103.4.169
- [13] J. Liu, "Survey of Wireless Based Indoor Localization Technologies," *Washington University in St. Louis*, pp. 1-15, May 2014, <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-14/ftp/indoor.pdf>.
- [14] J. Park, S. Kim, K. Seo, C. Park, and S. Lee, "Spatial Aspects of Space", *Educational History*, vol. 10, no. 3, pp. 37-43, 2003.
- [15] E. Seong and S. Yang, "A Study on the Architectural Characteristics of Middle Schools Built in the 2000s - Focused on 'Excellent School Facilities' selected by EDUMAC", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 13, no. 10, pp. 4822-4831, Oct. 2012, doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.10.4822

Authors



Sang-Hyeon Park is a undergraduate student in the dept. of computer engineering at Hoseo university. He is interested in IoT, AI, and smart vehicles.



Huhnuk Lim received his Ph.D in Computer Engineering from the Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), South Korea in 2006. He had worked for the Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI) from 2006 to 2019 as a principal researcher. He is currently an associate professor in the dept. of computer engineering at Hoseo university. His recent research area covers IoT, edge computing, AI and V2X for smart vehicles.