

분산 노드 기반 Anchor-less UWB 측위 시스템의 특성에 대한 연구

유승호*

국립부경대학교 컴퓨터인공지능공학부 교수

A Study on the Characteristics of Distributed Node-Based Anchor-less UWB Positioning Systems

Seungho Yoo*

Professor, Department of Computer and Artificial Intelligence Engineering, Pukyong National University

요약 최근 위치기반 서비스의 중요도가 갈수록 늘어나고 있다. 그리고 이와 관련하여 Ultra-Wideband(UWB) 기술이 많은 모바일 단말들과 차량 등에 장착되고 있다. 하지만 일반적인 UWB 기반 측위 시스템의 경우 단순히 두 단말 사이의 거리와 방향을 파악하는 데에 사용되거나, 빌딩이나 공장, 쇼핑몰 같은 곳에 UWB anchor를 미리 설치한 후, 근로자나 고객의 위치를 확인하기 위하여 사용하기도 한다. 본 논문에서는 이러한 기법들과는 다른 방식으로 노드들의 위치를 파악하는 분산 노드 기반 Anchor-less UWB 측위 시스템의 특성에 대해서 분석하였으며, 노드 수의 증가 및 설정한 Ranging 주기에 따라 시스템의 실제 Ranging 주기 및 거리 추정 오차에 대해서 측정하였다. 또한, 본 시스템을 활용한 측위 시스템의 정확도를 실험을 통해 분석하였다. 실험 결과, Anchor를 설치하지 않고, 노드 간의 동기 작업을 하지 않은 상태에서도 평균 0.32m의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

주제어 : 사물인터넷, UWB, 위치추정, 분산시스템

Abstract The importance of location-based services has been steadily rising, leading to the increased integration of Ultra-Wideband (UWB) technology in mobile devices and vehicles. Conventional UWB-based positioning systems typically determine the distance and direction between devices or track locations by pre-installing UWB anchors in environments like buildings or factories. This paper analyzes the characteristics of a distributed node-based Anchor-less UWB positioning system, measuring its actual ranging period and distance estimation error with varying node numbers and configured ranging periods. Experimental results show that even without anchors or node synchronization, the system achieves an average error of 0.32 meters.

Key Words : IoT; UWB; Position Estimation; Distributed System

1. 서론

최근 구글 지도부터 시작하여 차량 내비게이션 서비스 및 자율 주행 차량, 그리고 로봇과 드론에 이르기까지 다

양한 서비스들이 장치 혹은 사용자의 위치 정보를 활용하여 사용자에게 유용한 정보를 제공하거나 주어진 작업을 수행한다[1, 2]. 이러한 위치 정보를 획득하기 위하여 Global Positioning System (GPS)과 Glonass 등을 포

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2022년)에 의하여 연구되었음.

*교신저자 : 유승호(shyoo@pknu.ac.kr)

접수일 2024년 07월 11일 수정일 2024년 07월 23일 심사완료일 2024년 08월 14일

함하는 Global Navigation Satellite System (GNSS) [3]부터 시작하여 Radio Frequency IDentification (RFID)이나 Wi-Fi와 같은 무선 통신 기술을 활용한 localization 기술, 카메라나 Light Detection And Ranging (LiDAR), RAdio Detection And Ranging (RADAR) 등을 활용한 센서 기반 localization 기술 등을 활용한다.

하지만, 이러한 위치 정보를 획득하는 데 사용하는 측위 기술들의 경우 기술별로 특성과 장단점이 달라 서로 사용되는 분야가 다르다. GNSS의 경우에는 지구 궤도를 돌고 있는 위성으로부터 신호를 받기 때문에, 주변 환경의 영향을 많이 받으며, 무선 통신 기술을 활용한 localization 기술은 일반적으로 localization을 위해 사용하는 무선 통신 기술을 사용하는 wireless anchor나 Access Point (AP)와 같은 장치들이 위치 정보를 획득하기 위한 환경에 미리 설치되어야 하고, 해당 장치들의 위치 정보나 환경에 대한 정보를 미리 수집하여야 한다. 센서 기반 localization 기술의 경우에는 무선 통신 기술 기반 localization 기술과는 다르게 환경에 장치를 미리 설치할 필요는 없지만, 주변 환경 정보 및 위치 정보를 획득하기 위하여 많은 양의 센서 데이터를 확보하고 이에 대해서 매우 많은 양의 연산이 필요하므로, 고성능의 연산 장치가 필요하다.

본 논문에서는 무선 통신 기술 기반 localization 기법 중 UWB 통신 기술을 활용하여 미리 설치된 anchor 없이도 장치들의 위치 정보를 확보할 수 있는 시스템의 특성에 관해서 연구한다. 이를 통하여 효과적인 분산 노드 기반 Anchor-less UWB 측위 시스템의 구성 및 운용 방법에 대해 제공한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 관련 연구에 관해서 기술한다. 3장에서는 본 논문에서 분석하고자 하는 시스템에 대해 간단히 설명하고, 4장에서는 해당 시스템의 분석 결과를 서술하며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

본 장에서는 GNSS 및 통신 기술 기반 localization과 센서 기반 localization에 대한 내용을 기술한다.

2.1 GNSS (Global Navigation Satellite System)

GNSS는 지구 주변을 공전하고 있는 GNSS 위성들로부터

신호를 수신하고, 이를 활용하여 GNSS 수신 장치의 위치를 파악한다. 그러므로, GNSS 수신기는 위성 신호를 잘 수신할 수 있도록 하늘이 열린 공간에 위치해야 하며, 주변에 높은 빌딩이나 나무 등이 있으면 위치 정확도가 떨어지게 된다[4]. 그리고 일반적인 GNSS 시스템은 다양한 원인으로 인하여 오차가 발생하게 되는데, 이러한 오차를 줄이는 방법으로 Differential GNSS (DGNSS)[5]와 Real Time Kinematic GNSS (RTK GNSS)[6]가 제안되었다. DGNSS와 RTK GNSS 모두 지상의 고정된 위치에 기준국을 설치하고, 해당 기준국이 수집하는 GNSS 관측데이터와 기준국의 위치 정보를 활용하여 오차 보정정보를 생성하고, 이를 DGNSS 및 RTK GNSS 수신기에 전송하여 해당 수신기들이 보다 정확한 위치를 추정할 수 있도록 하는 기법이다. DGNSS의 경우에는 GNSS 위성 신호의 코드 데이터, RTK GNSS의 경우에는 반송파 데이터를 활용하여 보정정보를 생성한다.

2.2 통신 기술 기반 localization

통신 기술 기반 localization은 LTE 기지국이나 Wi-Fi AP와 같이 고정된 위치에서 신호를 송신하는 장치들을 활용하여 모바일 기기와 같은 무선 장치의 위치를 추정하는 기법으로, 크게 거리 기반 기법[7]과 fingerprint 기반 기법[8]으로 분류할 수 있다. 거리 기반 기법의 경우 신호가 전달되는 거리에 따라 신호 세기가 줄어드는 특성을 활용하여 송신 장치와 수신 장치 사이의 거리를 추정[9, 10]하고, 이 거리 정보와 송신 장치들의 위치 정보를 활용하여 수신 장치의 위치를 추정한다. Fingerprint 기반 기법의 경우 위치 정보를 제공할 환경에 대한 무선 신호 지도를 만들고, 해당 지도 정보와 무선 장치가 수신한 신호 정보를 대조하여 가장 일치도가 높은 위치를 무선 장치의 위치로 추정하는 기법이다. 거리 기반 기법의 경우 fingerprint 기법에 비해 정확도가 상대적으로 떨어지지만, 구축 및 유지비용이 적게 든다는 장점이 있다. 이러한 Localization에는 일반적으로 Wi-Fi나 LTE와 같은 통신 기술을 주로 활용하였지만, 최근에는 모바일 장치를 중심으로 UWB 통신 기반 Localization이 점점 더 넓은 영역에서 활용되는 추세이다. UWB 통신 기반 Localization은 주로 Time of Flight (ToF)에 기반한 거리 추정 방식[11]이어서 타 방식보다는 더 정확하다. 다만, 일반적인 상황에서는 Infrastructure 구축이나 UWB 노드 간의 정밀한 클럭 동기화 등의 사전 보정 작업이 필요하다.

2.3 센서 기반 localization

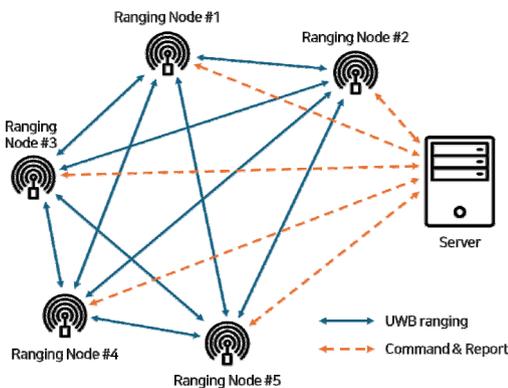
센서 기반 localization은 카메라나 LiDAR와 같은 센서들을 활용하거나, Inertial Measurement Unit (IMU)을 활용하여 모바일 로봇 혹은 장치의 위치를 파악하는 기법들이 있다. 카메라나 LiDAR와 같은 센서들을 활용할 때는 주로 주변 환경 정보를 수집하여 이를 바탕으로 주변 환경 정보에 대한 지도를 만들고, 해당 지도 내에서의 위치를 추정하는 Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)[12] 기법을 주로 사용하며, IMU를 사용할 때는 주로 이동 방향과 속도를 추정하는 dead reckoning[13] 기법을 사용한다. 그리고 최근에는 대부분의 센서 기반 localization에서 위의 두 가지 기법과 함께, 추가적으로 다양한 기법들을 혼합하여 활용하는 연구가 이루어지고 있다[14].

3. 시스템 개요

본 장에서는 Anchor-less UWB 측위 시스템의 디자인, 구성요소 및 세부 동작 방식에 대해서 간단하게 설명한다.

3.1 시스템 디자인

본 논문에서 분석하기 위한 시스템은 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, UWB 메시지를 서로간에 전송하고 수신하는 UWB Ranging 노드들과 UWB Ranging 노드들을 관리하는 서버로 구성된다. 그리고 본 시스템에서는 기존의 Anchor-Tag 기반의 UWB 시스템과는 다르게 모든 UWB 노드들이 동일한 방식으로 동작한다.



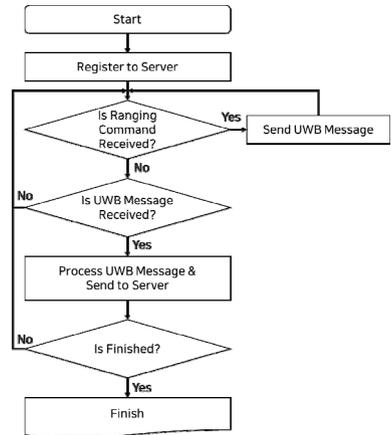
[Fig. 1] System design overview

3.2 시스템 작동 방식

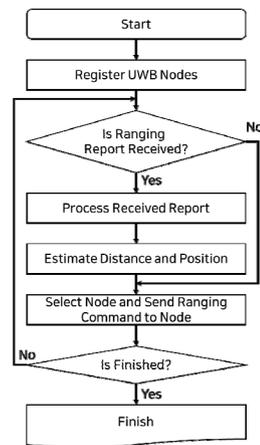
본 시스템에서 UWB Ranging 노드는 그림 2에 나타난 순서도와 같이 동작하며, 서버는 그림 3에 나타난 순서도와 같이 동작한다. 그리고 본 시스템의 핵심 기능들인 UWB Messaging과 Ranging 및 Positioning에 대해서는 다음의 세부 절에서 간단하게 다룬다.

3.2.1 UWB Messaging

노드 간에 거리를 측정하기 위해서는 UWB 메시지를 주고받아야 하며, 이때 일반적으로 보내는 노드에서 보내는 메시지에 보내는 시점의 노드 timestamp를 담아서 보내며, 받는 측에서는 받는 시점의 노드 timestamp를 기록하여, 이 두 종류의 정보들을 활용하여 노드들 사이의 거리를 추정한다.



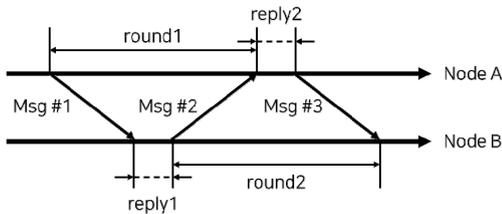
[Fig. 2] Operation flow of UWB ranging node



[Fig. 3] Operation flow of server

3.2.2 UWB Ranging

UWB Messaging을 통해 확보한 송수신 노드의 timestamp 정보를 활용하여 송수신 노드들 사이의 거리를 추정할 수 있다. 이때 다양한 기법을 통하여 메시지의 ToF와 노드 간 거리 정보를 추정할 수 있는데, 본 시스템에서는 Two Way Ranging (TWR) 기법[15]을 사용하였다. 이 기법은 노드 간 동기 작업이 필요하지 않아 분산 기반의 Anchor-less 기법을 활용하는 본 시스템에 적합하다. TWR 기법을 사용하기 위해서는 그림 4와 같이 송수신 노드 간에 3번의 메시지 교환을 필요로 하며, 각 메시지 교환 시의 timestamp 정보들과 아래의 수식 1을 활용하여 ToF를 구할 수 있으며, 이를 토대로 노드 간의 거리를 구할 수 있다.



[Fig. 4] Two-way ranging with three messages

$$ToF = \frac{T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}} \quad (1)$$

3.2.3 UWB Positioning

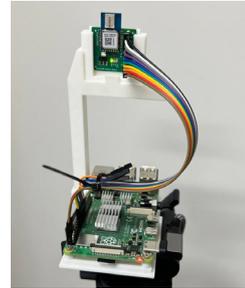
UWB Messaging과 Ranging을 통하여 노드들 간의 거리를 측정하면 노드들의 위치를 Multidimensional Scaling[16]을 통하여 추정할 수 있다. 다만, 이를 통해 생성되는 위치정보는 좌표계나 방향이 고정되어 있지 않아서 좌표계와 방향을 고정해주는 작업이 필요하다.

4. 시스템 구현 및 평가

분산 노드 기반 Anchor-less UWB 측위 시스템의 평가를 위하여 Raspberry Pi 기반의 노드들을 구현하였으며, 해당 시스템을 활용하여 평가를 수행하였다. 본 장에서는 시스템의 구현과 실험 환경 및 평가 결과에 대해서 간단하게 설명한다.

4.1 측위 시스템 구성

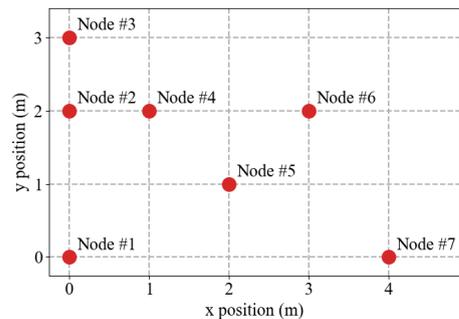
본 논문에서 평가하기 위한 시스템을 UWB 통신이 가능한 UWB 노드들과 UWB 노드들을 제어하고 각 노드 간의 거리 정보와 노드들의 위치 정보를 생성하는 서버로 구성하였다. UWB 노드들은 Raspberry Pi 계열의 Single Board Computer (SBC)와 Qorvo의 DWM1000 모듈을 사용하여 구성하였으며, 그림 5에서 확인할 수 있다. 그리고 서버의 경우에는 일반 PC 상에 Python 기반 코드로 작성하였다.



[Fig. 5] Implemented UWB node for evaluation

4.2 실험 환경

분산 노드 기반 Anchor-less UWB 시스템의 특성을 분석하기 위하여 UWB 노드들을 그림 6에 표시한 것과 같이 배치하여 1) 노드의 수에 따른 Ranging 특성 확인을 위한 실험, 2) 설정한 Ranging 주기에 따른 Ranging 특성 확인을 위한 실험, 그리고 3) 측위 정확도 측정의 3가지 실험을 수행하였다.

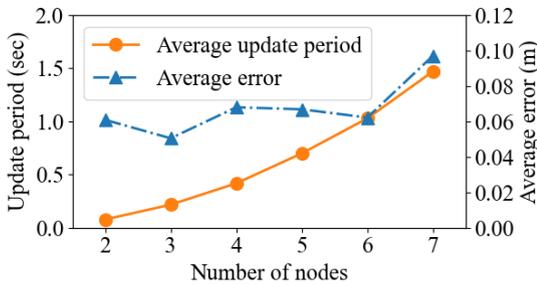


[Fig. 6] UWB node placement for experiment

4.3 노드의 개수에 따른 Ranging 특성 분석

노드의 수에 따른 Ranging 특성을 분석하기 위해, 그림 6에 나타나 있는 환경의 3번 노드와 7번 노드 사이의 Ranging 주기 및 거리 정확도를 분석하였다. 노드의 수는 2개부터 7개까지 1개씩 늘려가며 실험을 수행하였고,

각 실험마다 Ranging 주기와 평균 오차, 그리고 Ranging 동작의 오류 발생 비율을 측정하였다. Ranging 주기와 평균 오차는 그림 7과 같이 나타내었으며, 노드의 수가 증가함에 따라 주기와 오류 모두 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Ranging 동작의 오류 발생 비율은 표 1과 같이 나타내었으며, 평균 오차와 마찬가지로 노드의 수가 증가함에 따라 오류 발생 비율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.



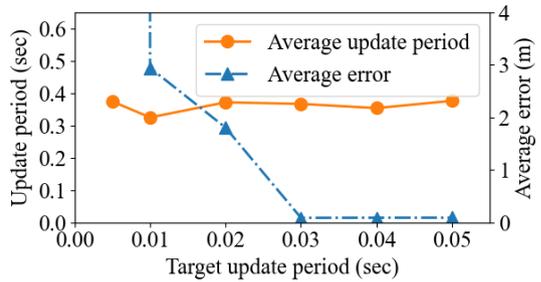
[Fig. 7] Update period and average error with number of nodes

<Table 1> Error occurrence ratio with respect to the number of nodes

Number of nodes	2	3	4	5	6	7
Error ratio (%)	1.65	2.14	1.75	4.67	7.45	11.03

4.4 설정 주기에 따른 Ranging 특성 분석

설정된 Ranging 주기에 따른 Ranging 특성을 분석하기 위해, 그림 6에 나타나 있는 환경의 1, 2, 3, 7번 노드를 사용하여 최소 Ranging 주기를 변경해가며 실험을 수행하였고, 각 실험마다 Ranging 주기와 평균 오차, 그리고 Ranging 동작의 오류 발생 비율을 측정하였다. Ranging 주기와 평균 오차는 그림 8과 같이 나타내었으며, 설정 주기보다는 노드의 수가 더 큰 영향을 미침을 확인하였으나, 설정 주기를 짧게 잡을 때에 평균 오차나 오류 발생 비율이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 설정 주기를 0.005초로 잡는 경우, 평균 오차가 약 2,000m로 매우 크게 발생하였다. 그리고 설정 주기에 따른 오류 발생 비율은 표 2와 같이 나타내었으며, 이 경우에도 설정 주기를 짧게 잡는 경우 오류 발생 비율이 높아짐을 확인할 수 있었다.



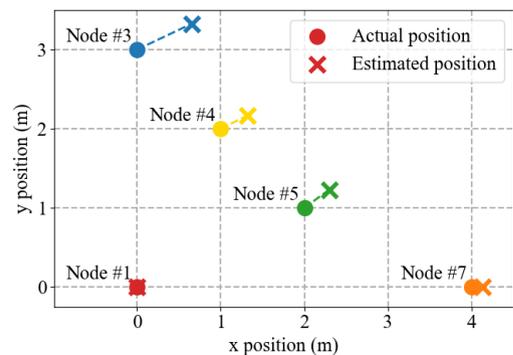
[Fig. 8] Update period and average error with ranging period

<Table 2> Error occurrence ratio with respect to the target update period

Period (sec)	0.005	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
Error ratio (%)	2.90	2.80	3.00	0.60	0.80	0.40

4.5 Positioning 정확도 분석

본 시스템의 측위 정확도를 분석하기 위해 그림 6에 나타나 있는 환경의 1, 3, 4, 5, 7번 노드를 사용하여 측위 실험을 수행하였다. 좌표계와 방향을 고정하기 위하여, 1번 노드는 원점에, 7번 노드는 x축 상에, 그리고 3번 노드는 y축 기준으로 양수의 값을 가지도록 설정하였다. 실험 결과는 표 3과 그림 9와 같이 나타내었으며, 표 3에는 노드별 평균 오차를, 그림 9에는 실제 노드의 위치와 평균 추정 위치를 각각 O와 X로 표시하였다. 실험 결과 평균 0.32 m의 오차를 지니는 것을 확인하였다.



[Fig. 9] Position estimation result

<Table 3> Average position error of nodes

Node #	3	4	5	7	Average
Error (m)	0.73	0.36	0.38	0.13	0.32

5. 결론

본 논문에서는 분산 노드 기반 Anchor-less UWB 측위 시스템의 특성을 분석하기 위하여 Raspberry Pi 기반의 UWB 노드와 이를 관리하는 서버를 구성하였으며, 해당 시스템을 바탕으로 UWB 노드의 수와 설정한 Ranging 주기에 따른 시스템의 특성을 실험을 통해서 확인하였다. 확인 결과, 노드의 수가 늘어날수록 Ranging 주기와 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 설정한 Ranging 주기와 실제 Ranging 주기 사이의 연관성은 확인할 수 없었지만, 설정한 Ranging 주기가 짧으면 거리 측정의 오차가 커짐을 확인할 수 있었다. 또한, 위치 추정의 정확도도 분석하였으며, 평균 0.32m의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 후속 연구로 UWB 노드와 GPS의 성능 비교를 위하여 UWB 노드에 GPS 수신기를 장착한 후, 실내의 및 건물 주변과 같은 다양한 환경에서의 실험을 통해 GPS와 본 연구에서 제안한 시스템의 성능을 비교하고자 한다.

REFERENCES

- [1] K.H.Kim, and K.H.Lee, "A Scheme of Identity Authentication and Anomaly Detection using ECG and Beacon-based Blockchain," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.7, No.3, pp.69-74, 2021.
- [2] J.M.Hwang, and B.Kim, "Design of Multi-Directional Mobility Mechanism Wheel Control Utilizing Brainwaves and IoT," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.9, No.5, pp.17-23, 2023.
- [3] P.K.Enge, "The Global Positioning System: Signals, measurements, and performance," *Int J Wireless Inf Networks* Vol.1, pp.83-105, 1994.
- [4] Y.Cui and S.S.Ge, "Autonomous vehicle positioning with GPS in urban canyon environments," *IEEE transactions on robotics and automation*, Vol.19, No.1, pp.15-25, 2003.
- [5] J.Farrell, and T.Givargis, "Differential GPS reference station algorithm-design and analysis," *IEEE transactions on control systems technology*, Vol.8, No.3, pp.519-531, 2000.
- [6] R.B.Langley, "Rtk gps," *Gps World*, Vol.9, No.9, pp.70-76, 1998.
- [7] K.Whitehouse, C.Karlof, and D.Culler, "A practical evaluation of radio signal strength for ranging-based localization," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.11, No.1, pp.41-52, 2007.
- [8] Z.Yang, C.Wu, and Y.Liu, "Locating in fingerprint space: Wireless indoor localization with little human

intervention," In *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp.269-280, 2012.

- [9] W.Xue, W.Qiu, X.Hua and K.Yu, "Improved Wi-Fi RSSI Measurement for Indoor Localization," in *IEEE Sensors Journal*, Vol.17, No.7, pp.2224-2230, 2017.
- [10] H.D.Kwon, S.B.Lee, J.H.Kwon, and E.J.Kim, "Smoothed RSSI-Based Distance Estimation Using Deep Neural Network," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.9, No.2, pp.71-76, 2023.
- [11] J.C.Adams, W.Gregorwich, L.Capots, and D.Liccardo, "Ultra-wideband for navigation and communications," *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Vol.2, pp.2/785-2/792, 2001.
- [12] G.Grisetti, R.Kümmerle, C.Stachniss, and W.Burgard, "A tutorial on graph-based SLAM," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Vol.2, No.4, pp.31-43, 2010.
- [13] A.R.Jimenez, F.Seco, C.Prieto, and J.Guevara, "A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU," In *2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, pp.37-42, 2009.
- [14] T.K.Kim, S.H.Lee, A.E.Kwak, and S.H.Lee, "Indoor autonomous driving system based on Internet of Things," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.10, No.2, pp.69-75, 2024.
- [15] Y.Jiang and V.C.M.Leung, "An Asymmetric Double Sided Two-Way Ranging for Crystal Offset," *2007 International Symposium on Signals, Systems and Electronics*, pp.525-528, 2007.
- [16] J.D.Carroll, and P.Arabie, "Multidimensional scaling," *Measurement, judgment and decision making*, pp.179-250, 1998.

유 승 호(SeungHo Yoo)

[정회원]



- 2012년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부(공학사)
- 2018년 8월 : 고려대학교 전기전자컴퓨터공학과(공학박사)
- 2018년 7월 ~ 2022년 3월 : KT 융합기술원 선임연구원

- 2022년 3월 ~ 2022년 8월 : 고려대학교 정보통신기술연구소 연구교수
- 2022년 9월 ~ 현재 : 국립부경대학교 컴퓨터·인공지능공학부 교수

<관심분야>

사물인터넷, 무선 네트워크, 무인비행체 (UAV), 실내 측위 (Indoor Positioning)