

제한된 환경에서의 다중 무인기 편대 운용을 위한 무인기 간 상대 위치 정보 활용 기법 분석

윤희창¹, 유승호^{2*}

¹국립부경대학교 컴퓨터공학부 학생, ²국립부경대학교 컴퓨터·인공지능공학부 조교수

Analysis of Inter-UAV Relative Position Information Utilization Methods for Multi-UAV Formation Operations in Constrained Environments

Huichang Yun¹, Seungho Yoo^{2*}

¹Student, Division of Computer Engineering, Pukyong National University

²Professor, Department of Computer and Artificial Intelligence Engineering, Pukyong National University

요약 무인항공기는 처음 군용으로 도입된 이후, 영상 촬영, 지도 생성, 물품 배송 등의 다양한 분야에서 활용되고 있으며 계속해서 활용 분야를 확장해나가고 있다. 대부분의 무인기 운용은 특성상 정확한 위치 정보가 필수적이며, 일반적으로 위치 정보를 획득하기 위해 GPS를 사용한다. 하지만 GPS는 재밍, 날씨, 환경 등의 외부 요인에 영향을 크게 받는다. 이를 해결하기 위해 LiDAR, 카메라, 무선 통신 기반(Wi-Fi, Bluetooth)의 다양한 측위 기술이 연구되고 있는데, 이들은 높은 자원 소모, 낮은 정확도 등의 한계를 가진다. 이에 본 논문에서는 GPS와 같은 절대 위치 정보를 활용하기 힘든 환경에서 무인기 간의 상대 위치 정보를 활용하는 기법 및 그 특성에 따른 영향을 분석하였다. 이를 위해 시뮬레이션을 통해 다양한 상대 위치 정보 갱신 주기를 적용한 실험을 수행하였고, 그 결과, 상대 위치 정보를 적절한 주기로 활용한다면 다중 무인기 편대 운용 시에 대형을 정밀하게 유지할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 무인기, 다중 무인기 편대, 측위 시스템, 사물인터넷, PX4, Gazebo 시뮬레이션

Abstract Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), initially introduced for military use, are now widely applied in areas such as aerial photography and delivery services. Many UAV-based systems require precise position information, and the systems use GPS to acquire position information. But, GPS is vulnerable to jamming and environmental constraints. To overcome these constraints, many localization methods, which utilize LiDAR, camera and wireless communication (Wi-Fi, Bluetooth), are employed. But these methods face challenges such as high resource consumption or low accuracy. We analyze the effects and characteristics of utilizing relative positioning information between UAVs in environments where absolute positioning systems like GPS are difficult to use. To this end, we conducted simulation experiments with various update intervals of relative position data. The results demonstrate that maintaining an appropriate update frequency enables precise formation control in multi-UAV operations.

Key Words : UAV, Multi-UAV Fleet, Positioning System, IoT, PX4, Gazebo Simulation

1. 서론

무인기는 최초로 군용으로 도입된 이후, 영상 촬영, 지도 생성, 물품 배송, 드론쇼, 레이싱, 농업 등의 분야에서 활용되어왔으며[1], 최근에는 UAM과 같은 무인 교통 수단으로까지 확장되고 있는 추세이다. 거의 모든 무인기 기반 시스템 및 서비스들은 정확한 위치 정보를 필요로 하며, 일반적으로 위치정보를 확보하기 위해 GPS를 사용한다. 하지만 일반 GPS의 경우에는 위성으로부터 보내오는 신호를 활용하기 때문에 환경의 영향을 받기도 하고, 단일 GPS 수신기로는 제거할 수 없는 오차가 존재한다. 그렇기에 드론쇼나 지도 생성과 같이 높은 정밀도를 요구하는 서비스의 경우에는 RTK-GPS와 같이 높은 정밀도의 위치 정보를 제공하는 장치를 사용한다.

하지만, RTK-GPS와 같은 장치들도 GPS 위성으로부터 전송되는 무선 신호를 수신하여 동작하기 때문에 기상환경이나 재밍 등의 영향을 크게 받으며, 실내나 지하와 같은 환경에서 활용할 수 없다는 단점이 있다. 그렇기에 LiDAR나 카메라를 활용하여 무인기의 위치와 주변 환경 정보를 확보하고 이를 바탕으로 안정적으로 비행하는 기법[2] 또한 활용되고 있으며, 다수의 무인기에서 각각 수집하고 처리한 정보를 취합하여 하나의 환경 정보로 만들고 해당 정보와 각 무인기의 위치 정보를 함께 제공하는 기법에 대한 연구 또한 진행되고 있다.

그렇지만 위와 같은 기법의 경우에는 각 무인기들의 정보들을 취합하고 가공하는데에 많은 양의 컴퓨팅 및 네트워크 자원을 필요로 하기 때문에, 다수의 무인기가 실시간으로 서로간의 위치 정보를 확인하면서 협업하여 임무를 수행하기에는 적합하지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 무선 통신 기반 측위 기법들[3]을 활용할 수 있다. 무선 통신 기반 측위 기법의 경우에는 일반적으로 Wi-Fi나 Bluetooth 등을 활용하는 것이 일반적이었으나, 최근에는 해당 기술들보다 통신 장치간의 거리 및 상대 위치를 측정하는데 더 적합한 Ultra-Wide Band (UWB) 통신 기술 또한 활용되고 있는 추세이다 [4]. 하지만, 해당 기술도 무선 통신에 기반하기 때문에 주변 통신 환경이 거리 및 상대 위치 측정 주기에 영향을 미칠 수 있다.

그렇기에 본 논문에서는, GPS의 정확도가 높지 않고, 통신 및 네트워크 또한 원활하게 활용할 수 없는 환경에서 다중 무인기 편대를 운용하기 위해 무인기 간 상대 위치 정보를 활용하는 주기에 따른 영향을 분석하였으며, 그 결과에 대해서 공유하고자 한다.

2. 관련 연구

본 장에서는 다중 무인기와 관련된 연구 동향에 대한 내용을 기술한다.

2.1 다중 무인기를 활용한 임무 수행 관련 연구

최근 무인기 기술이 발전함에 따라, 하나의 목표를 위하여 다수의 무인기를 편대로 구성하여 임무를 수행하는 연구들이 활발히 진행되고 있다 [5-8]. 다수의 무인기를 활용하는 시스템의 경우에는 다양한 환경에서 높은 임무 수행 능력과 강건함을 제공하며, 이러한 특성으로 인하여 재난 대응, 수색 및 구조, 감시 정찰 임무, 군사 작전 등의 분야에서 활용 가능성에 관한 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다.

이러한 연구들을 살펴보았을 때, 다수의 무인기들이 서로 협력적으로 행동하며 임무를 효율적으로 분담함으로써 단일 무인기만으로는 수행하기 힘든 임무들을 수행할 수 있음을 확인할 수 있다.

2.2 무인기간 상대 위치 파악 및 공유 관련 연구

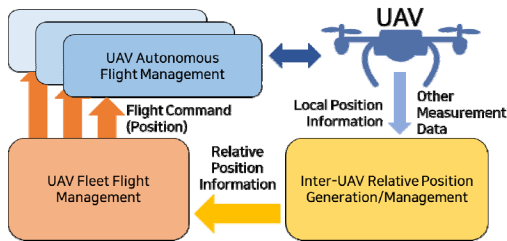
다수의 무인기를 편대로 구성하여 운용하기 위해서는 편대 내 무인기간의 상대 위치 파악은 필수적이며, 방해전파 등으로 GPS가 제한된 환경에서는 이러한 상대 위치 정보의 중요성이 더욱 높아진다. 기존 연구들은 IR이나 LiDAR, UWB 등과 같은 센서, 통신장치 등을 활용하여 상대 위치 정보들을 활용하는 기법들에 대해서 제안하였다 [2, 3, 9, 10].

2.3 기타 무인기 관련 연구

무인기와 관련된 추가적인 연구로는 무인기의 항법 정확성 향상, 에너지 효율성 개선 등의 다양한 주제가 있다. 본 논문과 관련해서는 GPS 제한 환경에서의 무인기 항법 정확도 향상을 위한 센서 융합 기법 [11], 강화 학습을 적용한 비행 경로 계획 [8]과 관련된 연구들이 수행되고 있다.

3. 시스템 개요

본 절에서는 본 논문에서 제안하는 기법에 대한 분석을 수행하기 위해 시스템의 구조에 관해서 설명한다.



[Fig. 1] Overall System Design

3.1 시스템 디자인

본 논문에서 제안하는 시스템을 구성하기 위해 “무인기 자율 비행 관리 모듈”, “무인기 간 상대 위치 정보 생성/관리 모듈”과 “무인기 편대 비행 관리 모듈”의 세 가지 모듈을 구성하였다. 이를 통하여 시스템에 속한 무인기들이 외부의 명령을 받아 정해진 위치로 편대를 유지하며 비행할 수 있도록 구성하였다. 전체적인 구성을 [Fig. 1]에 나타내었으며, 각 모듈의 보다 자세한 설명은 다음 세부 챕터들에 기술하였다.

3.1.1 무인기 자율 비행 관리 모듈

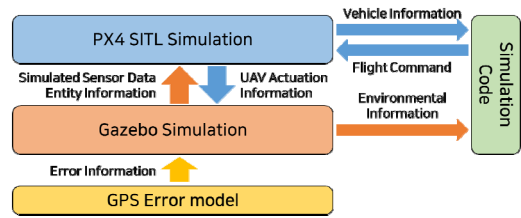
무인기들이 외부로부터 명령을 수신하고 해당 명령을 이행하도록 하며, 무인기의 상대 정보를 네트워크를 통해 외부의 제어용 컴퓨터 등에 전송하여 해당 컴퓨터가 무인기의 현재 상태를 확인할 수 있도록 한다.

해당 모듈은 PX4로부터 수신되는 정보를 획득하고, Offboard Control [12]을 통하여 무인기가 원하는 위치로 비행하도록 명령을 내리는 ROS2 [13] 노드로 구성하였다. 제안하는 시스템에서는 해당 모듈을 통해 무인기의 비행 컨트롤러가 추정한 위치 정보, GPS 정보 등을 확보하고 활용한다.

3.1.2 무인기 간 상대 위치 정보 생성/관리 모듈

해당 모듈은 함께 비행하는 무인기들 간의 상대 위치 정보를 생성하고 관리하는 기능을 수행하는데, 이는 무인기가 각자 추정하는 지역 위치 정보의 원점이 서로 다르며 GPS 오차 또한 각 무인기마다 서로 다르게 발생하기 때문에, 무인기들의 대형을 정확하게 유지하기 위해서 필요한 기능이다.

해당 모듈은 UWB 통신 모듈 등을 통하여 구성이 가능하지만, 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 제안하는 기법에 대한 확인 및 검증을 수행하기 때문에, Gazebo 시뮬레이션[14]에서 확보 가능한 무인기의 시뮬레이션 환경 내에서의 정확한 위치 정보를 바탕으로 각 무인기 간의 상대 위치 정보를 획득하고 관리하도록 구성하였다.



[Fig. 2] Simulation Structure

3.1.3 무인기 편대 비행 관리 모듈

무인기 자율 비행 관리 모듈을 통해 얻은 무인기의 위치 정보와 무인기 간 상대 위치 정보 생성 관리 모듈을 통해 획득한 무인기 간 상대 위치 정보를 활용하여 각 무인기의 위치 정보의 오차 정보를 획득하고, 해당 정보를 바탕으로 무인기 자율 비행 관리 모듈에 보낼 비행 명령 정보를 보정하여 각 무인기가 가지는 오차를 상쇄시킬 수 있도록 한다. 이를 위하여 전송할 이동 명령 정보에 획득한 오차 정보를 빼주어, 무인기가 오차를 없애는 방향으로 이동하도록 명령 정보를 보정한 후에 각 무인기에 전송한다.

4. 시뮬레이션 구성

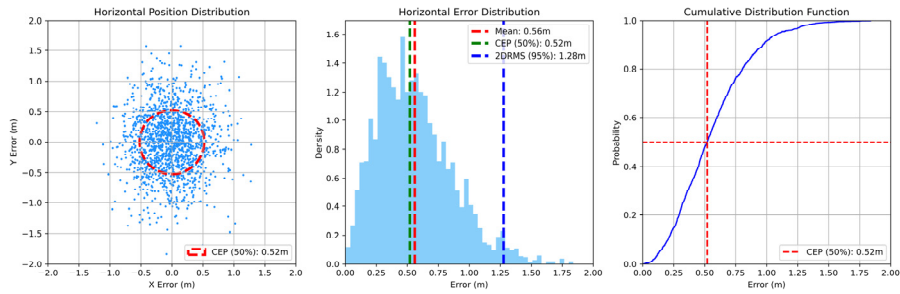
본 절에서는 앞에서 제안한 시스템의 Gazebo 시뮬레이터와 PX4 flight stack을 활용한 다중 무인기 시뮬레이션 환경을 구성하였으며, 본 절에서 해당 시뮬레이션의 구성 및 작동 방식에 대해 설명한다.

4.1 시뮬레이션 구성

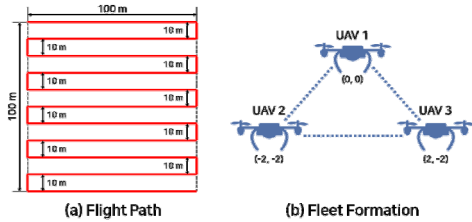
다수의 무인기를 활용한 시뮬레이션 수행을 위하여 PX4 Simulation in the loop (SITL) 시뮬레이션과 Gazebo 시뮬레이션을 연동하고 GPS 오류 모델을 적용하여 본 논문에서 제안하는 기법에 대한 검증 및 분석을 위한 통합된 시뮬레이션 환경으로 구성하였다.

4.1.1 PX4 Software In The Loop 시뮬레이션

PX4 SITL 시뮬레이션은 무인기 시뮬레이션으로, 무인기의 기본적인 기능들인 상태 파악, 자세 제어, 구동 기능 및 offboard control 등을 수행하도록 구성되어 있다. 본 시뮬레이션에서는 다수의 PX4 SITL을 동시에 작동시킬 수 있도록 구성하여, 시뮬레이션 환경 내에서 다수의 무인기를 운용할 수 있도록 구성하였다.



[Fig. 3] GPS Error Characteristics on Simulation Environment



[Fig. 4] Simulation Scenario

4.1.2 Gazebo 시뮬레이션

PX4 SITL 시뮬레이션이 동작하기 위해서는 무인기 및 센서의 물리적 동작을 시뮬레이션 해야 하는데, 이를 위해 로보틱스 시뮬레이션인 Gazebo 시뮬레이션을 활용하였다. 해당 시뮬레이션 환경은 물리적 환경 모사, 센서 가상 데이터 생성, 시각적 렌더링 등의 기능을 제공하여, 4.1.1의 시뮬레이션이 동작할 수 있게 한다.

4.1.3 GPS 오류 모델

일반적으로 GPS를 통해서 얻은 위치 정보는 3~5미터 정도의 오차를 가지는 것으로 알려져 있다 [15]. 하지만, 본 논문에서 활용하는 시뮬레이션 환경에는 기본적으로 GPS 오류가 반영되어있지 않기 때문에, 본 논문에서 제안하는 기법에 대한 확인을 위해서 수평 및 수직 GPS 오류를 시뮬레이션에 반영하였다. GPS 측정값은 위도 및 경도의 각도로 표현되므로 미터 단위의 오류를 각도 단위로 변환하여 적용하였다.

4.2 시뮬레이션 시나리오

본 절에서는 논문에서 제안하는 기법을 확인하기 위해 [Fig. 4]와 같이 시뮬레이션 시나리오를 구성하였다. 무인기 편대는 [Fig. 4]의 좌측에 표시한 비행 경로를 따라 비행하도록 구성하였으며, 편대에 속하는 3대의 무인기는 [Fig. 4]의 우측과 같이 1번 무인기를 중심으로 하여

<Table 1> Estimated Errors of GPS position Information in Simulation

Error Type	Error Value (m)
Mean	0.56
CEP (50%)	0.52
2DRMS (95%)	1.28

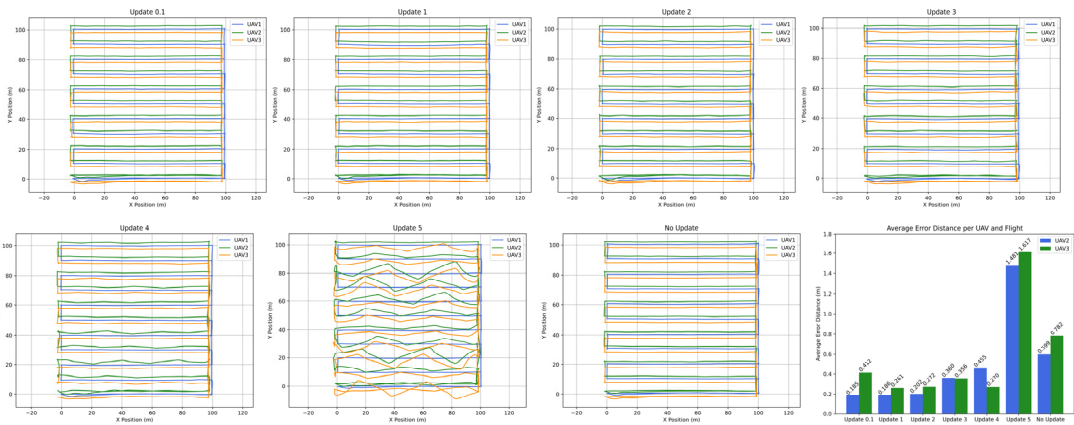
<Table 2> Configurations for Experiments

Flight Settings	Update Relative Position Info.	Update Period (sec)
Update 0.1	Yes	0.1
Update 1	Yes	1
Update 2	Yes	2
Update 3	Yes	3
Update 4	Yes	4
Update 5	Yes	5
No Update	No	-

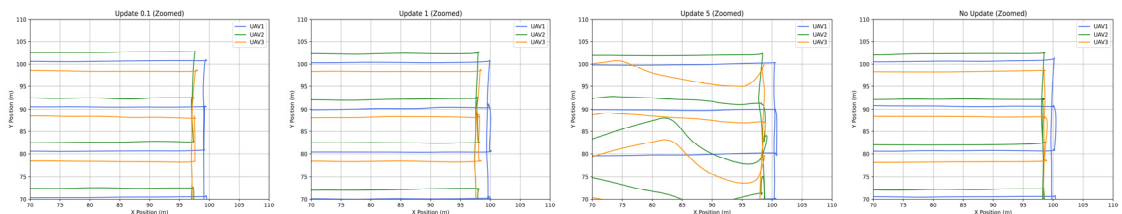
각각 (0, 0), (-2, -2), (2, -2)의 대형을 유지하도록 구성하였다. 동일한 시나리오에 대해 무인기 편대의 상대 위치 정보와 관련된 설정을 변경하면서 시뮬레이션을 반복하여 수행하였으며, 이를 통해 상대 위치 정보와 관련된 사항들이 무인기 편대의 비행에 영향을 주는지에 대해서 확인하였다.

5. 시뮬레이션 결과

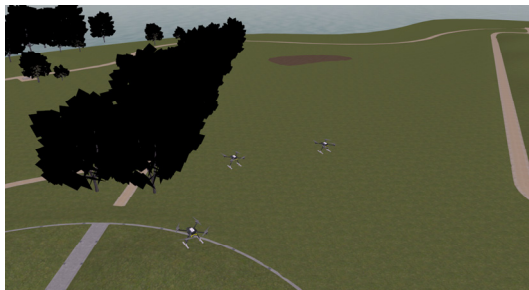
본 절에서는 앞에서 제안한 시스템의 Gazebo 시뮬레이터와 PX4 SITL 및 제안한 모듈들을 활용한 다중 무인기 시뮬레이션 환경을 구성하였으며, 본 절에서 해당 시뮬레이션의 구성 및 작동 방식에 관해 설명한다.



[Fig. 5] Flight Path of Simulations and Average Error Distance per UAV and Flight



[Fig. 6] Zoomed Flight Path of Update 0.1, Update 1, Update 5 and No Update



[Fig. 7] Simulation Environment and UAVs

〈Table 3〉 Average Error of UAVs for Each Experiments

Flight Settings	Average Position Error (m)		
	UAV 2	UAV 3	Overall
Update 0.1	0.1852	0.4125	0.2988
Update 1	0.1865	0.2610	0.2237
Update 2	0.2015	0.2716	0.2366
Update 3	0.3600	0.3559	0.3580
Update 4	0.4547	0.2700	0.3623
Update 5	1.4808	1.6175	1.5491
No Update	0.5988	0.7820	0.6904

5.1 GPS 오류 모델 적용 확인

본 논문에서 제안한 기법에 대한 시뮬레이션을 수행하기 전에, 본 논문에서 제안한 시뮬레이션에 적용한 GPS 오류 모델이 의도한 대로 동작하는지를 확인하였다. 4.1.3에서 제시한 오류 특성을 그대로 적용하면 PX4 SITL에서 GPS가 불안정하다고 판단하고, 비행이 불가하였기 때문에, 비행이 가능한 수준으로 오류를 조정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 위치 정보는 [Fig. 3]과 [Table 1]에 나타내었으며, 평균 오차는 0.56 m, CEP (50%)는 0.52 m, 2DRMS (95%)는 1.28m임을 확인할 수 있었다.

5.2 비행 결과 확인

무인기 간 상대 위치 정보 갱신 여부 및 주기를 [Table 2]와 같이 설정하여 이에 따른 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션 비행을 수행하였다. 모든 비행에 대한 결과를 [Fig. 5]에 표기하였으며, 각 비행별 무인기 2와 무인기 3의 평균 위치 오차는 [Table 3]과 [Fig. 5]의 우측 하단에 표기하였다. 시뮬레이션 사진은 [Fig. 7]에서 확인할 수 있다.

[Table 3]과 [Fig. 5]에서 확인할 수 있는 것과 같이 상대 위치 정보를 충분히 자주 갱신할 경우에는 갱신하

지 않는 경우보다 무인기 간의 대형을 더 정교하게 유지할 수 있는 것을 확인하였으나, 5초마다 갱신하는 경우와 같이 위치 정보를 충분히 갱신하지 못할 경우에는 무인기 간의 대형이 크게 흐트러짐을 확인할 수 있었다. 위치 정보를 갱신하지 않는 경우에는 5.1에서 확인한 GPS 오차 값과 유사한 값의 위치 오차를 가지

는 것을 확인할 수 있었다. 또한 [Fig. 5]와 [Fig. 6]에서 확인할 수 있듯이, 상대 위치 정보 갱신 여부 및 주기에 따라 무인기 2와 3의 비행 경로가 변하는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 무인기의 비행에 필수적인 GPS의 성능이 제한된 환경에서 다수의 무인기 운용을 위한 상대 위치 정보 활용 기법을 제안하고 분석하였다. PX4 SITL과 Gazebo 시뮬레이션을 통해, 상대 위치 정보 갱신 주기에 따른 편대 대형 유지 정확도를 분석하였다. 상대 위치 정보가 자주 갱신될수록 편대의 위치 정확도가 높아지며 특히 4초 이내의 주기에서는 편대 대형을 정확하게 유지함을 확인하였고, 본 기법이 GPS가 제한된 환경에서 다중 무인기 운용에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 저자들은 향후 UWB 기술을 적용하여 실제 환경에서의 추가적인 실험 및 검증을 통해 본 연구 기법의 실전성을 검증하고자 하며, 이와 동시에 기존의 타 기법들과의 비교 분석 또한 함께 수행하고자 한다. 본 연구 결과는 군사 작전, 재난 구조 등의 다양한 분야에서의 다중 무인기 시스템 운용에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] G.Y.Jeong, and Y.Y.Cho, "A Study on Efficient Methods of Pesticide Control Using Agricultural Unmanned Aerial Vehicles," *The JIOTS Transactions*, Vol.8, No.2, pp.35-40, 2022.
- [2] Y.H.Jin, S.Lee, and H.K.Kim, "Collision Avoidance Algorithm Using Point Cloud," *The JIOTS Transactions*, Vol.10, No.6, pp.7-14, 2024.
- [3] T.K.Kim, "Technology Trends of Indoor Localization Scheme," *The JIOTS Transactions*, Vol.11, No.2, pp.173-177, 2025.
- [4] C.L.Sang, M.Adams, M.Hesse and U. Rückert,

"Bidirectional UWB Localization: A Review on an Elastic Positioning Scheme for GNSS-Deprived Zones," *IEEE Journal of Indoor and Seamless Positioning and Navigation*, Vol.1, pp.161-179, 2023

- [5] G.Balamurugan, J.Valarmathi, and V.P.S.Naidu, "Survey on UAV navigation in GPS denied environments," *International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPE5)*, pp.198-204, 2016.
- [6] H.T.Do, H.T.Hua, M.T.Nguyen, C.V.Nguyen, H.TT.Nguyen, H.T.Nguyen, and N.TT.Nguyen, "Formation Control Algorithms for Multiple-UAVs: A Comprehensive Survey," *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, Vol.8, No.27, pp.170230, 2021.
- [7] G.Skorobogatov, C.Barrado, and E.Salami, "Multiple UAV Systems: A Survey," *Unmanned Systems*, Vol.08, No.02, pp.149-169, 2020.
- [8] N.Imanberdiyev, C.Fu, E.Kayacan, and I.M.Chen, "Autonomous navigation of UAV by using real-time model-based reinforcement learning," *14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, pp.1-6, 2016.
- [9] T.K.Kim, "IoT-based Indoor Localization Scheme," *The JIOTS Transactions*, Vol.2, No.4, pp.35-39, 2016.
- [10] W.Shule, C.M.Almansa, J.P.Queralta, Z.Zou, and T.Westerlund, "UWB-Based Localization for Multi-UAV Systems and Collaborative Heterogeneous Multi-Robot Systems," *Procedia Computer Science*, Vol.175, pp.357-364, 2020.
- [11] X.Ye, F.Song, Z.Zhang and Q.Zeng, "A Review of Small UAV Navigation System Based on Multisource Sensor Fusion," *IEEE Sensors Journal*, Vol.23, No.17, pp.18926-18948, 2023.
- [12] "Offboard Mode | PX4 Guide (main)." [Internet], https://docs.px4.io/main/en/flight_modes/offboard.html
- [13] "ROS: Home" [Internet] <https://www.ros.org/>
- [14] "Gazebo" [Internet] <https://gazebo.org/home>
- [15] "GPS.gov: GPS Accuracy" [Internet] <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>

윤 희 창(Huichang Yun)

[준회원]



- 2024년 2월 : 국립부경대학교 컴퓨터인공지능공학부(공학사)
- 2024년 3월 ~ 현재 : 국립부경대학교 컴퓨터·인공지능공학부 석사과정

<관심분야>

Edge-AI Robot·UAM Application, SLAM, Machine Learning, Network

유 승 호(Seungho Yoo)

[정회원]



- 2012년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부(공학사)
- 2018년 8월 : 고려대학교 전기전자컴퓨터공학과(공학박사)
- 2018년 7월 ~ 2022년 3월 : KT 융합기술원 선임연구원
- 2022년 9월 ~ 현재 : 국립부경대학교 컴퓨터·인공지능공학부 교수

<관심분야>

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