

A Study of UWB Placement Optimization Based on Genetic Algorithm

Doyeon Jung¹, Euiho Kim^{2†}

¹Department of Mechanical Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea

²Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea

ABSTRACT

Urban Air Mobility (UAM) such as a drone taxi is one of the future transportations that have recently been attracting attention. Along with the construction of an urban terminal, an accurate landing system for UAM is also essential. However, in urban environments, reliable Global Navigation Satellite Systems (GNSS) signals cannot be received due to obstacles such as high-rise buildings which causes multipath and non-line of sight signal. Thus, the positioning result in urban environments from the GNSS signal is unreliable. Consequently, we propose the Ultra-Wideband (UWB) network to assist the soft landing of UAM on a vertiport. Since the positioning performance of UWB network depends on the layout of UWB anchors, it is necessary to optimize the layout of UWB anchors. In this paper, we propose a two-steps genetic algorithm that consists of binary genetic algorithm involved multi objectives fitness function and integer genetic algorithm involved robust solution searching fitness function in order to optimize taking into account Fresnel hole effects.

Keywords: genetic algorithm, UWB, Fresnel hole, vertiport, positioning accuracy

1. INTRODUCTION

전 세계적으로 대도시에서 인적자원이 집중되면서 도심 속 교통 정체 문제가 심각하다. 이는 물류 운송이나 이동 효율성 측면에서 높은 사회적 비용을 요구하게 하는데, 교통정체 해결방안으로써 Urban Air Mobility (UAM)이 미래의 이동 수단으로 각광받고 있다. 이에 도심항공모텔개발과 함께 (Pukhova et al. 2021), 2016년부터 Uber 사 등이 드론택시 서비스를 상용화하기 위해 활발한 연구를 진행하고 있다. 그러나 승객의 수요가 집중된 도심에서는 높은 건물이나 장애물로 인해 신뢰할 만한 GNSS 신호를 받기 어렵고 다중경로 신호 등 여러 이유로 인해 정밀한 위치 측위가 이루어지지 않는다 (Park et al. 2009). 그러므로 드론택시의 이착륙 과정에서 잘못된 위치 측위는 큰 인명피해로 직결될 수 있어서 위성 항법시스템을 대체할 시스템이 필요하다. 이에 UWB, Camera, Lidar와 같이 센서를 이용하는 위치 측위 시스템과 머신러닝 기반의 INS/GNSS 통합 항법 시스템 등 정밀한 측위를 하기 위한 선행 연구가 이루어지고 있다 (Park et al. 2011,

Kim & Choi 2016, Dai et al. 2020). 그런데 Lidar 센서의 경우 값이 비싸고 광범위한 탐색이 어렵고, 기존 위치를 알고 있는 랜드마크 특징점을 이용하는 비전시스템은 날씨와 조도, 흔들림에 영향을 많이 받는다. 이에 위성 항법 시스템의 대안으로 소비 전력이 작고 다중 반사파에 강한 UWB 네트워크를 이용한 위치 측위 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Baldi et al. 2002, Queralta et al. 2020, Xia et al. 2021).

UWB 네트워크는 Anchor 배치에 따라 위치 측위 성능이 크게 변한다. 많은 수의 센서를 사용하면 당연히도 정밀한 위치를 얻을 수 있겠으나 비용적인 측면에서 효율적이지 못해 사용될 센서의 개수와 Anchor의 배치를 최적화하는 과정이 필수적이다 (Yun et al. 2008). 배치 최적화는 NP-hard 문제이므로 합리적인 시간 안에 해결해 낼 수 없기 때문에 정답에 가까운 근사값을 얻는 것에 만족해야 한다. 잘 알려져 있는 외판원 문제처럼 모든 경우의 수를 일일이 확인해 보는 것 외에는 정답을 찾아낼 수 없기 때문이다 (Lee et al. 2003, Kim et al. 2011, Hussain et al. 2017). 따라서 본 논문에서는 UWB 배치 최적화 문제를 해결하기 위해 Heuristic 기법 중 하나인 Genetic algorithm을 이용하였다. Genetic algorithm을 사용한 센서 배치 최적화의 선행 연구를 확인하면 (Johansson & Evertsson 2003, Zhang et al. 2008), 네트워크 밀도나 연결성 (Bhondekar et al. 2009), 센서의 에너지 소비 (Kim 2010), 신호 지연 시간, 신호 손실 패킷 수 (Fan 2009), 위치 오차 (Sivakumar et al. 2012, Peng & Li 2015, Ferrero-Guillén et

Received Mar 29, 2022 Revised Apr 18, 2022 Accepted May 02, 2022

†Corresponding Author

E-mail: euihokim@hongik.ac.kr

Tel: +82-2-320-1636 Fax: +82-2-320-1636

Doyeon Jung <https://orcid.org/0000-0003-0430-3271>

Euiho Kim <https://orcid.org/0000-0002-6501-9330>

al. 2020), 센서신호의 최대 커버리지 영역 (Yoon & Kim 2010), 센서 설치 비용 (Oh & Kim 2008) 등의 다양한 적합도 함수를 사용할 수 있다. 또한, Algorithm 자체의 실행 속도를 향상시키기 위한 매개 변수 최적화나 알고리즘 확장 등의 연구도 진행되어 왔다 (Johansson & Evertsson 2003, Zhang & Liu 2020).

우선, UWB 배치를 위해서는 UAM 착륙상황에 대한 가정이 필요하다. 전 세계 75개의 도시 가운데 서울은 많은 Heliport를 보유한 곳 중 하나이므로 드론택시 기술을 수용할 수 있는 기반이 충분히 갖춰졌다고 판단되었다. 그러나 아직 UAM 착륙장의 설치 기준이 법적으로 제정된 바가 없으므로 MIT에서 제공한 Heliport의 설치 기준을 고려해 착륙환경을 구성하였다 (Choi et al. 2021). 그러나 UWB 네트워크를 실제 공간에서 사용할 때 안테나 사이 거리와 각도에 따라 신호가 받아지지 않는 지점이 존재하게 된다 (Promwong et al. 2004, He et al. 2012, Duan et al. 2020). 이 지점을 Fresnel hole이라 하고, 송신기에서 보내는 전파가 지표면에 부딪혀 발생하는 Reflection wave가 Direct wave와 상쇄간섭되기 때문에 발생한다. 전파간섭은 Receiver signal strength를 약해지게 만들고 센서의 신호 수신 여부를 결정하기 때문에, 배치 최적화에 있어 중요하게 고려해야 할 점이다. 그러므로 본 논문에서는 신호 상쇄의 영향을 최소화할 수 있는 UWB의 배치를 탐색한다.

2장에서는 UWB와 Genetic algorithm에 대한 설명을 기술하였으며, 3장에서 드론택시 착륙환경 구성과 Two-steps genetic algorithm의 적합도 함수, 작동 과정을 나타낸다. Two-steps genetic algorithm은 UWB의 개수와 위치오차 값을 최소화하는 다중 목적 적합도 함수를 갖는 이진 Genetic algorithm과 정해진 UWB anchor의 개수로 더 엄격한 조건의 위치오차 값을 최소화하는 적합도 함수를 갖는 정수 Genetic algorithm으로 구성되어 있다. 4장에서는 Two-steps genetic algorithm의 simulation 결과를 다룬다.

2. BACKGROUND

2.1 Ultra-WideBand

UWB는 기존 전송 시스템에 비해 더 넓은 주파수 영역대에 걸쳐 대용량의 정보를 전송하는 무선통신 기술이다. 3.1 ~ 10.6 GHz의 주파수 대역에서 작동하며 480 Mbps의 전송속도를 가지고 있다. 주파수 폭으로 인해 Spatial capacity를 늘릴 수 없는 다른 통신 시스템과는 달리 넓은 주파수 대역에 걸쳐 있으므로 높은 Spatial capacity를 가질 수 있으며 다른 통신 시스템에 간섭을 주지 않고 공유하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 거리 측정 오차가 Centimeter level로 매우 정밀하다고 할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 과거 군사용 무선 통신기술로서 사용되다가 민간에 개방되면서 많은 분야에서 사용되고 있다. UWB는 나노초 이하의 매우 짧은 마치 임펄스와 같은 펄스를 사용하여 전력을 적게 사용하면서 대용량의 정보를 멀리 보낼 수 있는데, 0.5 mW의 저전력으로 70 m까지 정보 전송이 가능하다. 전송 과정 중에는 환경에 따라 다중경로로 인한 신호의 확산과 지연이 발생할 수 있

으나 UWB는 매우 짧은 폭의 펄스를 사용함으로써 페이딩 영향을 거의 받지 않고 신호를 전달할 수 있어서 빌딩 내부, 도심지, 삼림지역에서도 사용 가능하다. 이에 실내 측위 시스템으로써 연구가 많이 진행되고 있다 (Gigl et al. 2007). 본 논문에서는 드론택시의 위치를 UWB tag로 가정하고 고정된 UWB anchor 배치에서 위치 측위를 진행하였다.

2.2 Genetic Algorithm

1960년대부터 자연현상의 원리를 모방한 알고리즘들이 매우 다양한 최적화 문제를 해결하기 위해 여러가지로 개발되어 왔는데, 대표적으로 모의진화 (Simulated evolution), 유전알고리즘 (Genetic algorithms), 진화전략 (Evolution strategies), Simulated annealing, Tabu search 등이 여기에 속한다. 특히, 자연의 진화과정 그 자체를 하나의 탐색 메커니즘이라고 보고, 자연에 살고 있는 생물군이 지속적으로 변하는 환경에 효율적으로 적응하여 살아아가는 사실을 착안해 이를 이진화 원리로 모사하고자 하는 노력이 Genetic algorithm의 탄생 동기가 되었다. Genetic algorithm이란 유전적 계승과 자연선택이라는 자연현상을 알고리즘 형태로 모델링한 탐색법을 말한다. Genetic algorithm은 기존의 다른 검색 알고리즘들과 달리 미분가능성, 연속성 등 탐색공간의 제약을 받지 않는다. 이런 장점 때문에 Genetic algorithm은 복잡한 최적화 문제들을 해결할 수 있는 도구로 관심을 받게 되었으며, 많은 분야에 이미 성공적으로 적용되고 있다.

Genetic algorithm의 메커니즘은 다음과 같다. 염색체 (Chromosome)로 구성된 초기 세대를 생성하고 초기 세대의 염색체들은 선택 (Selection), 교차 (Cross-over), 돌연변이 (Mutation)의 과정들을 거듭하며 진화된다. 앞의 과정을 통해 만들어진 다음 세대의 염색체들은 적합도를 평가받고 중단조건을 부합하게 되면 진화가 끝나고 그렇지 않다면 진화는 반복된다. 도출된 해가 문제의 답에 얼마나 부합한지 판단하기 위해 적합도 함수가 존재하며 선택연산의 기준이 된다. 선택이란 교차되기 위한 부모 염색체를 고르는 과정이다. 선택된 두 부모 염색체들은 교차연산을 통해 자신들의 유전자를 섞어 자식의 염색체를 구성한다. 즉, 자연현상처럼 부모의 형질을 자식이 물려받는 것이다. 그러나 이러한 교차만으로는 전역최적해를 찾지 못하고 지역최적해에 빠질 가능성이 있어 새로운 해를 탐색하지 못하게 되는데 이를 방지하기 위하여 돌연변이 연산을 수행한다. 돌연변이 연산은 염색체의 특정 유전자를 임의로 변경하여 새로운 유전자 형질을 부여하는 것이다. 돌연변이 연산이 너무 적으면 지역 최적해에 빠질 가능성이 높아지지만 돌연변이 연산이 너무 많아지면 전역최적해에 수렴하는데 오랜 시간이 걸리게 된다.

3. METHODOLOGY

이 연구는 3차원 필드에서 UWB를 배치하는 가상 응용을 가정한다. 유전알고리즘을 이용하여 탐색하려는 것은 UWB 네트워크 설계 시 최적 위치와 센서의 개수이다. 이 문제를 해결하고자 할 때 고려해야 할 조건들은 다음과 같다.

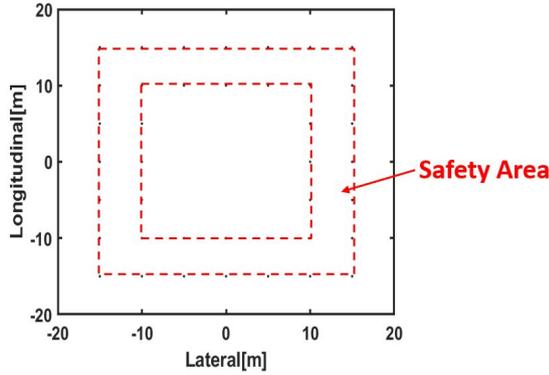


Fig. 1. Top view of UWB deployment scenario.

3.1 Problem Outline

3.1.1 UWB 기반 측위 네트워크 환경 구성

드론택시의 이착륙 시설 (Vertiport)은 교통 수요가 집중된 도심지역에 설치되어야 하지만, 주요거점에는 고층빌딩과 헬기나 항공기가 빈번히 운용되고 있어, 설치기준에 있어 상당히 많은 검토가 필요하다. 현재 Vertiport에 대한 설치기준이 법적으로 제정된 바 없으므로 환경을 구성하기 위해 기존의 Heliport의 설치 기준을 참고하였다. MIT에서 규정한 45 ft 크기의 기체를 기준으로 하는 Heliport에 대한 규모는 기체의 가로, 세로 길이 중 더 큰 쪽 길이를 D라 할 때, Touchdown and Liftoff (TLOF)는 1D (=15 m), Final Approach and Takeoff (FATO)는 1.5D (=20 m), Safety Area (SA)는 20 ft (=6 m)로 정해져 있다. Fig. 1은 앞의 설명을 바탕으로 구성된 UWB 기반 측위 네트워크의 환경이다. 이 논문에서는 UWB들을 SA에 배치되며 착륙 경로 후보지점들과 충돌하지 않도록 TLOF를 에워싸는 형태로 구성하였다. UWB 후보 지점들의 높이는 1m에서 1m 간격으로 3m까지, 2m에서 2m 간격으로 6m까지, 3m에서 3m 간격으로 9m까지 세 가지 경우로 나누었다.

3.1.2 드론 착륙 경로 구성

드론의 착륙 경로는 Fig. 2와 같이 3가지로 나누었다. 드론의 비행가능 영역은 다른 항공기와의 충돌을 피하기 위해, 국내에서는 지표면 또는 건물의 상단으로부터 150 m 이내의 고도에서만 비행이 가능하도록 되어있다. 본 논문에서는 Vertiport로 착륙하기 위한 드론의 경로를 구성하기 위해 Heliport의 설치 기준인 고층건물의 높이 120 m를 기준으로 지표면에서부터 150 m 이내 진입상황을 가정하여 이착륙지면에 30 m 이하의 고도에서 착륙하는 경로를 구성하였다. 드론 택시 첫번째 경로는 착륙지면으로부터 고도 30 m, 반경 15 m 이내의 착륙각도 65도, 두번째 경로는 착륙지면으로부터 고도 20 m, 반경 50 m 이내의 착륙각도 20도, 세번째 경로는 고도 10 m, 반경 100 m의 착륙각도 6도를 만족하도록 Fig. 3과 같이 설정하였다. 드론과 착륙 지면사이의 장애물이 없는 환경을 가정하므로 경로의 대칭성을 위해 4방향을 고려하였으며 각 경로마다 300개씩 900개의 지점을 구성하였다.

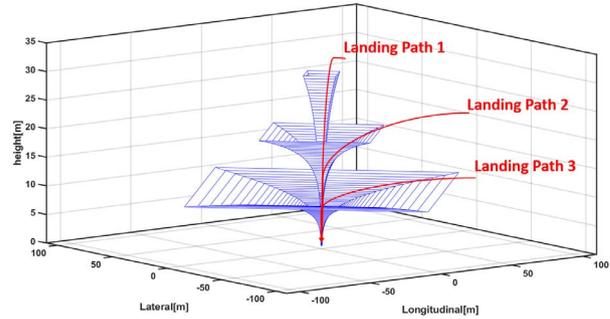


Fig. 2. Drone Taxi's landing path scenario.

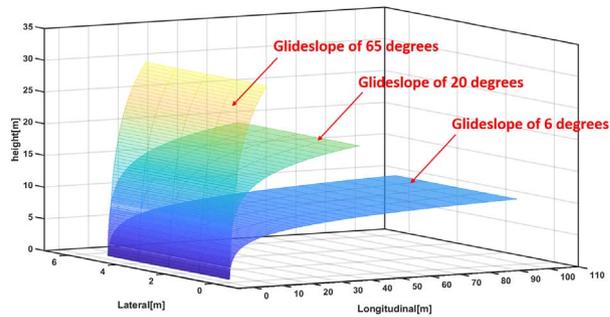


Fig. 3. Glideslope of each landing path's degrees.

3.1.3 Fresnel hole

UWB 네트워크를 사용할 때 실제 환경은 안테나간 전파 수신 환경이 항상 Line Of Sight (LOS)한 것이 아니고 지면이나, 주변 장애물에 의한 반사파가 존재하기도 한다. 반사파는 안테나로 수신되는 전파들 사이에 상쇄를 일으킨다. 그러므로 수신기에 들어오는 전파의 세기는 송신 전파의 세기보다 줄어드는 것이 일반적이며 수신 신호의 전파세기는 식 (1)과 같다.

$$P_{RX} = P_{TX} - L_{TX} + G_{TX} - L_{PATH} + G_{RX} - L_{RX} \quad (1)$$

여기서 P_{TX} , P_{RX} 는 dBm 단위의 송신과 수신 신호 전력을 의미한다. L_{TX} , L_{RX} 는 dB 단위의 송수신기 전체 시스템의 손실, G_{TX} , G_{RX} 는 dBi 단위의 송수신기 안테나 Gain, L_{PATH} 는 dBi 단위의 송수신기 안테나 사이 전체 전파 손실을 의미한다.

신호는 항상 가시선 전파로 들어오는 것이 아니라 다른 경로를 통해서도 목적지에 도달할 수 있다. 다중 경로를 통해 전파되는 신호는 회절, 굴절, 반사 및 흡수가 이루어 지기도 한다. 특히, Fig. 4와 같은 지면에 의한 신호 반사는 무선통신 시스템에서 흔히 볼 수 있는 현상이다. 이러한 반사 효과는 Receiver signal strength에 영향을 미친다. 본 논문에서는 Received signal strength를 계산하기 위하여 Transmitted signal을 직사각형 파형이라고 정의하여 Tag와 Anchor 사이의 신호 도달 과정을 시뮬레이션 하였다. 이를 통해 보여지는 Transmitted pulse와 Propagation pulse 사이의 지연 시간만큼 Propagation pulse를 이동시켜 지면 반사에 의한 신호 손실을 계산한다.

지면으로 인한 반사파는 신호 세기 상쇄를 일으켜 수신되

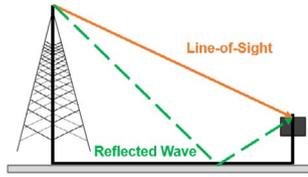


Fig. 4. Two ray propagation model.

는 전파의 세기가 수신기가 받을 수 있는 최소 전파세기보다 작아 신호가 들어오지 않는 구간, 즉 Fresnel hole을 발생시킨다. 그러므로 통신 네트워크 설계 시 Fresnel hole이 생기는 것을 방지하기 위하여 수신 전력의 Link margin을 고려하여야 한다. Link margin은 수신기가 받는 전파의 세기에서 수신기가 받을 수 있는 최소 전파의 세기를 빼 계산할 수 있으며 식 (2)와 같다. Link margin이 0 이하가 되면 신호가 수신되지 않는다고 판단한다.

$$\text{Link Margin} = P_{RX} - Rx \text{ Sensitivity} \quad (2)$$

드론 착륙 경로의 임의의 지점을 송신 안테나로, 배치된 UWB 지점들을 수신 안테나로 가정하였다. 일반적인 UWB 안테나 방사 패턴을 고려할 때 두 안테나 사이의 전파의 세기는 Elevation 각도가 클수록 거리가 멀어질수록 감소하므로 Elevation 각도와 거리에 따른 Link margin을 구하였다. 이 때, 안테나의 방사 패턴 모양이 수신되는 전파의 세기에 영향을 미치므로 송수신기 안테나의 각도를 나누어 구성하였다. Tag의 안테나 각도가 0도일 때, Anchor의 각도는 0, 45, 90도로 나뉘어져 있다. Link margin 계산 시 Decawave사의 EVK1000 모델의 송신전력 (-10 dBm)과 Receiver sensitivity (-102 dBm / 500 Mhz), Carrier 주파수 (3.9 GHz)를 사용하였다. 송신기의 전파 형태는 Matlab의 Communication toolbox의 Raytracing 모델을 사용하였으며, 장애물이 없는 지형에서 지면으로부터 최대 1번 반사되어 수신기에 들어오는 반사파만을 고려하였다.

3.2 Fitness Function, Genetic Operator Mechanism

문제 해결을 위해 2단계의 Genetic algorithm을 구상하였다. 첫번째 단계로 적절한 UWB의 개수를 찾는 것과 드론 경로 지점들에 대한 위치 오차 표준편차의 평균값을 최소화하는 두가지의 목적의 Fitness function을 가진 이진 Genetic algorithm을 구상하였다. 이 알고리즘은 요구되는 오차기준을 만족하는 배치를 이루기 위한 UWB의 최소 개수를 탐색한다. 두번째 단계에서는 앞서 정해진 개수의 UWB를 가지고 더 엄격한 기준을 만족시키는 UWB의 최적 배치를 탐색한다.

3.2.1 Fitness function

기준을 만족하는 배치를 이루기 위한 UWB의 최소 개수를 찾는 이진 Genetic algorithm은 Chromosome의 길이를 총 UWB 후보군의 개수와 같은 360개로 설정하고 각 유전자는 0 또는 1의 값을 가질 수 있게 하였다. 0은 해당 번호의 UWB가 선택되지 않음을 뜻하며 1은 해당 번호의 UWB가 선택됨을 뜻한다. Fitness

function에서 드론 경로 후보 지점에 대한 위치 오차 표준편차를 구할 때, 선택된 UWB의 위치를 사용한다.

UWB의 최적 배치를 탐색하기 위한 두번째 단계의 Genetic algorithm의 경우 탐색체는 정해진 길이의 정수번호의 유전자들로 이루어져 있다. 두 알고리즘 모두 주어진 정수조건 내에서 무작위의 초기 UWB 개체군 (Population)을 생성한다. 드론 착륙 경로 지점에서부터 탐색체 안의 유전자 값이 나타내는 번호의 UWB anchor 위치에 도달한 신호의 시간 차를 이용하여 거리 정보를 얻는다. 위의 Time of Arrival (TOA) 방법을 Least square로 계산하여 위치 오차 표준편차를 구한다 (Shin & Sung 2000). 앞서 계산된 드론 착륙 경로 지점들과 UWB 배치 후보지점들 간의 Link margin을 이용하여 해당 드론의 위치에서 측정이 가능한 UWB를 구분할 수 있으며, Link margin이 0 이하인 UWB는 실제 환경에서 신호가 받아지지 않음으로 제거한 뒤 남겨진 UWB들만 위치 오차를 계산하였다. Link margin이 0 이상인 UWB의 개수가 4개 이하인 경우, 위치 오차를 계산하지 않고 큰 페널티를 주어 진화과정 중 제외되도록 하였다. 4개 이상의 유전자가 남은 탐색체는 900개의 드론 착륙 경로 지점들에 대하여 위치오차 표준편차를 구한다. 하나의 탐색체로부터 계산된 900개의 위치 오차 표준편차 평균이 해당 탐색체의 적합도가 된다. 위치 오차 표준편차는 식 (3)과 같다.

$$\sigma_p = \sqrt{\text{trace}(H^TWH)^{-1}} \quad (3)$$

H 행렬은 i번째 드론 경로 지점의 좌표를 D_i , i번째 UWB anchor 후보지점의 좌표를 U_i 라고 할 때, 식 (4)와 같다.

$$H = \begin{bmatrix} D_i - U_1 \\ \|D_i - U_1\| \\ D_i - U_2 \\ \|D_i - U_2\| \\ \vdots \\ D_i - U_n \\ \|D_i - U_n\| \end{bmatrix} \quad (4)$$

W 행렬은 가중치 행렬로써 거리측정 정확도 σ_{uwb1} 를 0.1로 고정하였으며 식 (5)와 같다.

$$W = \begin{bmatrix} \sigma_{uwb1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_{uwb2}^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

이진 Genetic algorithm의 경우 위치 오차 표준편차와 사용된 UWB의 개수가 적합도에 반영된다. Multi objective fitness function에서는 적합도가 되는 파라미터들의 스케일이 비슷하도록 적절한 계수를 곱해 주어야 한다. 스케일이 비슷하지 않을 경우 한가지 목적이 지배적으로 작용하여 다른 목적의 최적화가 제대로 이루어지지 않을 수 있다. 또한, 특정 목적의 조건이 다른 조건에 비해 지나치게 엄격할 경우 알고리즘의 수렴성능이 현저히 떨어지는 것을 확인했다. 첫번째 목적을 f_1 이라 하고 두번째 목적을 f_2 라 할 때, 전체 Fitness function, F는 식 (6)과 같다. 위치 오차 표준편차를 f_1 , UWB 개수를 f_2 , ω_1 을 0.1, ω_2 를 0.003로 사용하였다.

$$F = \omega_1 * f_1 + \omega_2 * f_2 \quad (6)$$

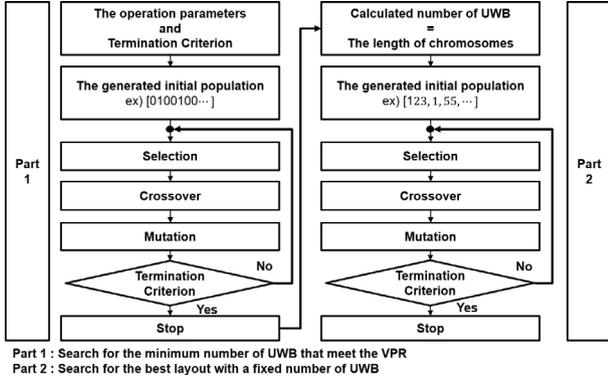


Fig. 5. Genetic algorithm flow diagram.

최적 배치를 탐색하기 위한 Genetic algorithm의 경우, 이전 Genetic algorithm의 위치오차 표준편차 계산보다 더 엄격한 기준을 적용하였다. 위치오차 표준편차 계산 시 2 m가 넘는 오차를 가질 때 큰 Penalty를 주어 진화과정에서 제외되도록 하였다. 또한, 낮은 고도에서 정밀한 측위를 할 수 있는 배치가 필요하다고 판단하여, 3 m 이내 고도를 갖는 드론 경로 후보지점의 위치 오차 표준편차를 계산할 때에는 가중치를 부과하였다. 앞서 부과한 큰 Penalty는 해당 개체군을 매우 나쁜 경우로 판단하게 하여 빠르게 제외시키고 낮은 고도의 가중치는 3 m 이내 고도를 가진 지점들이 다른 지점들에 비해 먼저 최소화해야 할 문제로 판단하게 한다.

사용된 두 단계 유전 알고리즘 모두 적합도의 크기가 클수록 좋지 않은 염색체로 판단하게 하였으며, 세대가 거듭되며 적합도가 작아지는 방향으로 수렴된다.

3.2.2 Two-steps genetic algorithm

이전 Genetic algorithm의 유전자는 0 또는 1만 가져야 하므로 경계 값과 정수조건을 부여하였다. 염색체의 길이는 수렴속도를 위하여 선택된 UWB의 개수를 20개 정도로 줄여 초기집단으로 설정해 주었다. 최적 배치 탐색을 위한 Genetic algorithm 유전자도 1부터 360까지 정수번호가 부여된 UWB 배치 후보군 안에서만 생성되도록 경계 값과 정수조건을 부여하였다. 이때 염색체들은 한 개체군 안에서 중복되지 않아야 하므로 비선형 제약조건이 필요하다. 알고리즘은 비선형 제약조건을 만족하도록 진화한다. 최적 배치 탐색을 위한 Genetic algorithm에서 염색체의 길이는 이전 Genetic algorithm의 해로써 UWB 군의 높이에 따라 달랐다.

Two-steps genetic algorithm의 순서도는 Fig. 5와 같다. 초기 개체군은 설정된 조건 안에서 무작위로 생성된다. 선택, 교차, 변이의 단계를 지나면서 좋은 해집단으로 진화한다. 본 논문에서는 50개의 개체군을 사용하였고, 1000 세대 진화시킨 후 최적해를 출력하도록 하였다. 만약 더 이상 수렴되지 않고 500 세대가 지나도록 같은 해를 산출하면 알고리즘을 중단시켰다. 선택 연산자는 Tournament 연산을 사용하여 교차될 부모 염색체를 선택하였다. 교차 연산자는 Two point crossover 연산을 사용했으며, 변이 연산자는 가우시안 분포를 따르는 표준편차를 갖는 가우시안 변이 연산자를 사용하였다. 5개의 염색체를 엘리트로 지정하였고,

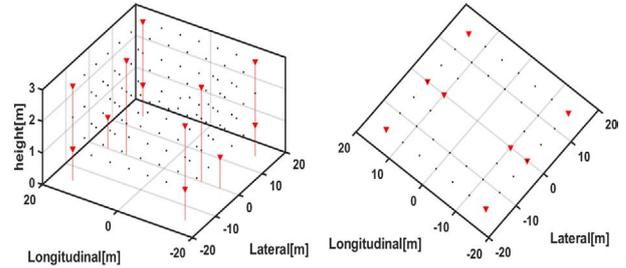


Fig. 6. UWB placement of CASE 1.

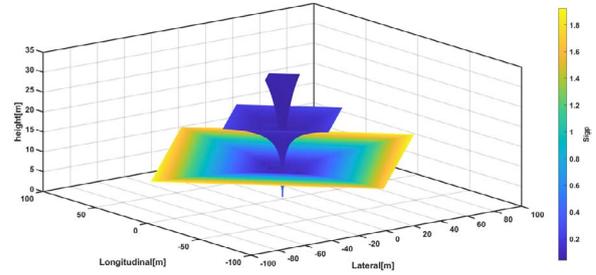


Fig. 7. Vertical positioning error standard deviation of CASE 1.

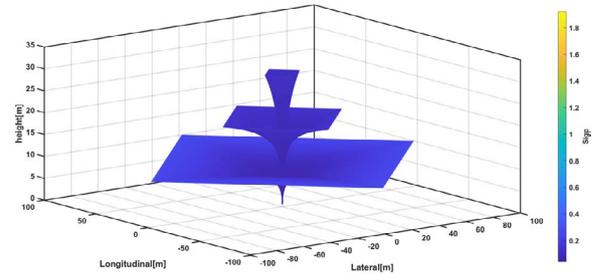


Fig. 8. Horizontal positioning error standard deviation of CASE 1.

교차비율을 0.8, 가우시안 변이 연산자의 표준편차를 50, 변이 확률은 0.1로 설정하였다. 위의 설정 값들은 여러 번의 실행을 통해 최적의 성능을 나타내는 값들을 사용한 것이다. 즉, 50개의 염색체 중에서 5개는 다음 세대로 온전히 유지되고 남은 45개 중 80%는 교차가, 20%는 변이가 일어나 자식세대를 형성하게 된다. 이 과정이 한 세대가 넘어갈 때마다 일어나게 된다.

4. SIMULATION RESULTS

4.1 Genetic Algorithm Experimental Results

2단계의 Genetic algorithm을 통해 각 Chromosome에 대한 드론 착륙 경로 지점들의 위치 오차 표준편차를 구하였다. 10회 이상 Genetic algorithm simulation을 반복하여 수렴된 적합도를 확인한 결과 비슷한 경향성의 해답이 도출되었을 때 탐색을 중단하였다. UWB의 최대 높이에 따라 나눈 CASE 마다 Genetic algorithm simulation을 실행 후 최종 산출된 UWB 배치와 드론 착륙 지점들에 대한 3차원의 위치 오차 표준편차를 확인하였다.

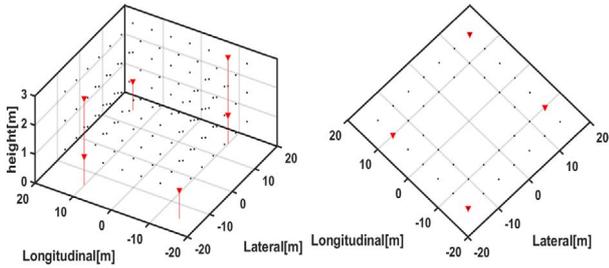


Fig. 9. UWB placement of CASE 2.

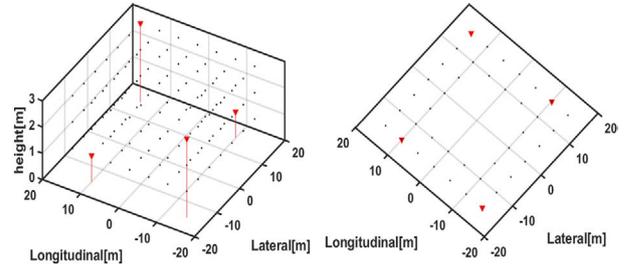


Fig. 12. UWB placement of CASE 3.

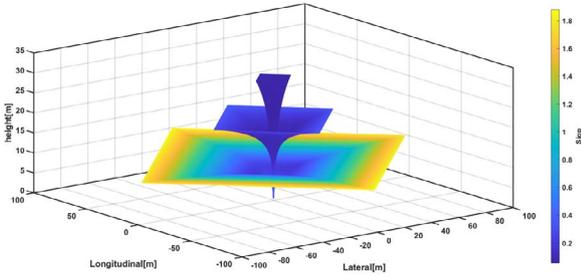


Fig. 10. Vertical positioning error standard deviation of CASE 2.

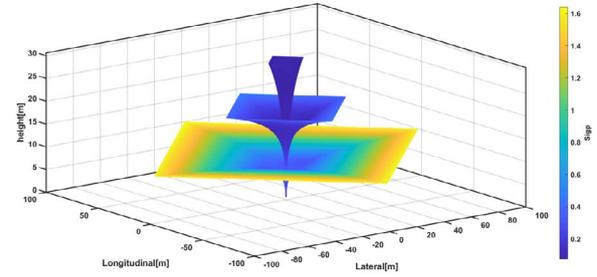


Fig. 13. Vertical positioning error standard deviation of CASE 3.

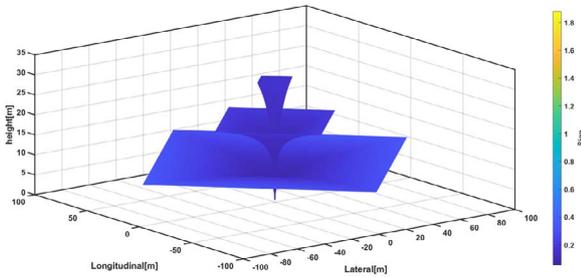


Fig. 11. Horizontal positioning error standard deviation of CASE 2.

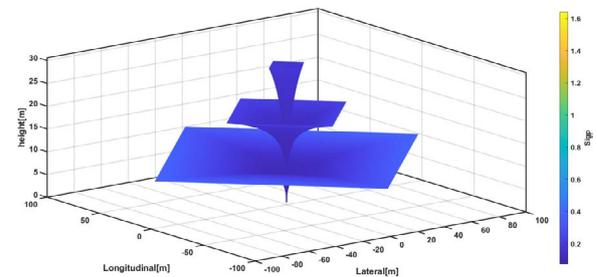


Fig. 14. Horizontal positioning error standard deviation of CASE 3.

본 논문의 착륙 시나리오는 장애물이 없는 환경을 가정하였으므로 드론의 착륙 과정에서 가장 큰 위험요소는 지면과의 충돌이다. 충돌을 피하기 위해서는 드론의 수직 위치 오차가 충분히 작아야 한다. 그러므로 해당 배치가 타당한지 판단하기 위해 수직 위치 정확도를 이용하였다. 지면에서부터 드론의 고도를 Above Ground Level (AGL)라 하고, 수직위치 정확도를 Vertical Positioning Accuracy (VPA, 1 σ)라 할 때, Vertical Protection Ratio (VPR)은 식 (7)과 같다.

$$VPR = \frac{AGL}{VPA} \quad (7)$$

VPR이 클수록 지면에 부딪힐 확률이 작아지게 된다. 본 연구에서는 VPR을 5.2로 설정하여 지면충돌 확률을 2×10^{-7} 미만으로 하도록 하였다. 드론의 수직 고도가 10 m를 넘게 되면 너무 큰 오차가 타당하게 됨을 방지하기 위하여 2 m로 고정하였다.

4.1.1 CASE 1

UWB anchor 후보군의 높이가 1 m에서 1 m 간격으로 3 m까지

일 때의 배치결과는 Fig. 6과 같다. 결정된 UWB anchor 배치에 따른 드론 착륙 지점들의 위치오차 표준편차를 Figs. 7과 8에 나타냈다.

4.1.2 CASE 2

UWB anchor 후보군의 높이가 2 m에서 2 m 간격으로 6 m까지 일 때의 배치결과는 Fig. 9와 같다. 결정된 UWB anchor 배치에 따른 드론 착륙 지점들의 위치오차 표준편차를 Figs. 10과 11에 나타냈다.

4.1.3 CASE 3

UWB anchor 후보군의 높이가 3 m에서 3 m 간격으로 9 m까지 일 때의 배치결과는 Fig. 12와 같다. 결정된 UWB anchor 배치에 따른 드론 착륙 지점들의 위치오차 표준편차를 Figs. 13과 14에 나타냈다.

UWB anchor의 최대 높이변화에 따라 요구되는 오차기준을 만족하는 UWB의 최소 개수와 배치가 달라졌다. CASE 1에서는

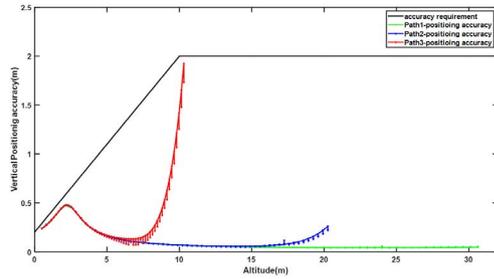


Fig. 15. Vertical positioning accuracy of CASE 1.

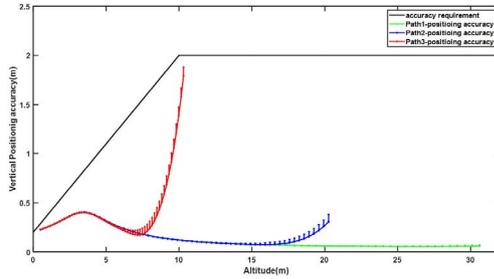


Fig. 16. Vertical positioning accuracy of CASE 2.

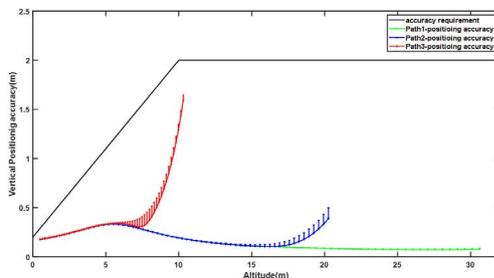


Fig. 17. Vertical positioning accuracy of CASE 3.

총 12개의 UWB, CASE 2에서는 6개의 UWB, CASE 3에서는 4개의 UWB가 사용된 배치가 산출되었다. UWB의 배치는 전반적으로 멀리 퍼지도록 배치됨을 볼 수 있었고 CASE 2와 CASE 3에서 최종 배치가 매우 유사하게 나왔다. 또한, 모든 CASE에서 드론 경로의 반경이 커질수록 위치오차가 커짐을 확인할 수 있는데 드론 경로 지점을 기준으로 UWB의 네트워크가 한쪽으로 치우쳐졌다고 볼 수 있기 때문이다. 또한, 모든 경우에서 위치오차가 수평보다 수직방향에서 훨씬 큰 값을 가짐을 통해 수직오차가 지배적임을 알 수 있었다. 그러므로 해당 배치의 타당성을 검증하기 위하여 수직 오차 값을 분석하였다.

4.2 Validation of Results

앞선 결과를 통해 수직오차가 지배적임을 확인하여 결과의 타당성을 분석하기 위해 수직 위치 오차 표준편차를 가지고 분석하였다. 요구되는 VPR을 검은 실선으로 나타냈을 때 각 경로에 따른 위치 오차 정확도를 고도에 따라 나타냈다.

드론의 경로에 따른 수직 위치 오차를 CASE에 따라 Figs. 15-17에 나타내었다. 경로 1번은 반경이 15 m로 가장 작고 고도가

30 m까지 높아지지만 위치오차가 모든 구간에서 0.5 m 내외에 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 반경 50 m인 경로 2번까지 0.5 m 내외의 위치오차를 가지고 있으나, 반경이 100 m까지 커지는 경로 3번의 경우 고도가 높아질수록 수직위치 오차가 급격히 커지는 것을 볼 수 있다. CASE에 따른 결과들이 Genetic algorithm을 이용하여 구해진 UWB 배치의 타당성의 기준이 되는 VPR을 만족하는 것을 볼 수 있다.

5. CONCLUSION

본 논문에서는 위치 측위 네트워크를 위한 UWB 배치 방법으로 유전 알고리즘을 사용하였다. Heliport 기준을 참고한 그리드 배치를 구성하였고, Two-steps genetic algorithm은 적절한 UWB 개수가 몇개인지, 어떤 배치를 가져야 하는지 결정하였다. 적합도 함수는 송수신기 사이의 Linkmargin을 고려한 드론 경로의 위치 오차 표준편차들의 평균을 적합도로 사용하였다. 진화과정을 통해 네트워크 특성이 모든 경로 지점에서 4개 이상의 UWB와 통신 가능하며 정해진 개수의 센서에서 최소한에 근사한 위치 오차를 갖는 배치를 얻을 수 있었다. 또한 배치할 수 있는 UWB의 높이가 높을수록 VPR을 만족하는 UWB의 최소 개수가 줄어들을 수 있다. 수렴과정을 통해 Genetic algorithm은 UWB의 무작위 배치에 비해 유리함을 알 수 있으며 이에 UWB 최적 배치에 있어 Genetic algorithm을 사용하는 것이 하나의 방법이 될 수 있음을 제안한다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A2C2006028).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, K.E. and J.D.; methodology, K.E. and J.D.; software, J.D.; methodology, K.E. and J.D.; investigation, J.D.; writing—original draft preparation and editing, J.D.; visualization, J.D.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Baldi, P., De Nardis, L., & Di Benedetto, M. G. 2002, Modeling and optimization of UWB communication

- networks through a flexible cost function, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20, 1733-1744. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2002.805619>
- Bhondekar, A., Renu, V., Singla, M., Ghanshyam, C., & Pawan, K. 2009, Genetic Algorithm Based Node Placement Methodology for Wireless Sensor Networks, in *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists*, Hong Kong, 18-20 Mar 2009.
- Choi, J. S., Lee, S. H., Baek, J. S., & Hwang, H. W. 2021, A study on vertiport installation standard of drone taxis (UAM), *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 29, 74-81. <https://doi.org/10.12985/ksaa.2021.29.1.074>
- Dai, H. F., Bian, H. W., Wang, R. Y., & Ma, H. 2020, An INS/GNSS integrated navigation in GNSS denied environment using recurrent neural network, *Defence Technology*, 16, 334-340. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.08.011>
- Duan, S., Su, R., Xu, C., Chen, Y., & He, J. 2020, Ultra-Wideband Radio Channel Characteristics for Near-Ground Swarm Robots Communication, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19, 4715-4726. <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2986446>
- Fan, J. 2009, Using genetic algorithms to optimise Wireless Sensor Network design, PhD Dissertation, Loughborough University, UK.
- Ferrero-Guillén, R., Díez-González, J., Álvarez, R., & Pérez, H. 2020, Analysis of the Genetic Algorithm Operators for the Node Location Problem in Local Positioning Systems, *Lecture Notes in Computer Science Hybrid Artificial Intelligent Systems*, 12344, 273-283. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61705-9_23
- Gigl, T., Janssen, G. J. M., Dizdarevic, V., Witrisal, K., & Irahhauten, Z. 2007, Analysis of a UWB Indoor Positioning System Based on Received Signal Strength, in *4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, Hannover, Germany, 22-22 Mar 2007 <https://doi.org/10.1109/WPNC.2007.353618>
- He, R., Zhong, Z., Ai, B., Ding, J., & Guan, K. 2012, Analysis of the Relation Between Fresnel Zone and Path Loss Exponent Based on Two-Ray Model, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 208-211. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2187270>
- Hussain, A., Muhammad, Y. S., Nauman Sajid, M., Hussain, I., Mohamd Shoukry, A., et al. 2017, Genetic Algorithm for Traveling Salesman Problem with Modified Cycle Crossover Operator, *Computational intelligence and neuroscience*, Article ID 7430125. <https://doi.org/10.1155/2017/7430125>
- Johansson, C. & Evertsson, G. 2003, *Optimizing Genetic Algorithms for Time Critical Problems*, M.S. Dissertation, Department of Software Engineering and Computer Science Blekinge Institute of Technology, Ronneby, Sweden.
- Kim, E.-H. & Choi, D.-K. 2016, A UWB positioning network enabling unmanned aircraft systems auto land, *Aerospace Science and Technology*, 58, 418-426. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.09.005>
- Kim, J.-S. 2010, An Energy Efficient Clustering based on Genetic Algorithm in Wireless Sensor Networks, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 11, 1661-1669. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.5.1661>
- Kim, K.-B. & Song, D.-H. 2011, Path Search Method using Genetic Algorithm. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 15, 1251-1255. <https://doi.org/10.6109/JKIICE.2011.15.6.1251>
- Lee, S.-H., Choi, I.-J., Lee, S.-J., & Lim, K.-W. 2003, A Transit Assignment Model using Genetic Algorithm, *Journal of Korean Society of Transportation*, 21, 65-75.
- Oh, D. & Kim, W. J. 2008, Optimal topology in Wibro MMR Network Using a Genetic Algorithm, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, 34, 235-245.
- Park, C.-H., Kwon, S., Lee, C.-H., & Jung, W.-Y. 2011, A study of a reliable positioning based on technology convergence of a satellite navigation system and a vision system, *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea TC*, 48, 20-28.
- Park, J.-W., Park, J.-H., Song, S.-H., & Sung, T.-K. 2009, Comparisons of Error Characteristics between TOA and TDOA Positioning in Dense Multipath Environment, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 58, 415-421.
- Peng, B. & Li, L. 2015, An improved localization algorithm based on genetic algorithm in wireless sensor networks, *Cognitive Neurodynamics*, 9, 249-256. <https://doi.org/10.1007/s11571-014-9324-y>
- Promwong, S., Takada, J., Supanakoon, P., & Tangtisanon, P. 2004, Theoretical ground reflection model for UWB communication systems, in *IEEE International Symposium on Communications and Information Technology*, Sapporo, Japan, 26-29 Oct 2004 <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2004.1413910>
- Pukhova, A., Llorca, C., Moreno, A., Staves, C., Zhang, Q., et al. 2021, Flying taxis revived: Can Urban air mobility reduce road congestion?, *Journal of Urban Mobility*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2021.100002>
- Queralta, J. P., Almansa, M. C., Schiano, F., Floreano, D., & Westerlund, T., 2020, UWB-based System for

UAV Localization in GNSS-Denied Environments: Characterization and Dataset, in 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, NV, 24 Oct 2020-24 Jan 2021. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341042>

- Shin, D. H. & Sung, T. K. 2000, Comparisons of position error characteristics and DOP between TOA and TDOA technique, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 6, 923-927.
- Sivakumar, S., & Venkatesan, R., & Karthiga, M. 2012, Error Minimization in Localization of Wireless Sensor Networks using Genetic Algorithm, *International Journal of Computer Applications*, 43, 16-20. <https://doi.org/10.5120/6155-8547>
- Xia, B., Zheng, X., Zhang, L., & Zhao, L. 2021, UWB Positioning System Based on Genetic Algorithm, *Journal of Computer and Communications*, 9, 110-118. <https://doi.org/10.4236/jcc.2021.94008>
- Yoon, Y.-R. & Kim, Y.-H. 2010, Genetic Algorithms for Maximizing the Coverage of Sensor Deployment, *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, 20, 406-412. <https://doi.org/10.5391/JKIS.2010.20.3.406>
- Yun, Z., Lim, S., & Iskander, M. F. 2008, An Integrated Method of Ray Tracing and Genetic Algorithm for Optimizing Coverage in Indoor Wireless Networks, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7, 145-148. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2008.919358>
- Zhang, Q., Wang, J., Jin, C., Ye, J., Ma, C., et al. 2008, Genetic Algorithm Based Wireless Sensor Network Localization, in *Fourth International Conference on Natural Computation*, Jinan, China, 18-20 Oct 2008. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2008.206>
- Zhang, Y. J. & Liu, M. 2020, Node Placement Optimization of Wireless Sensor Networks Using Multi-Objective Adaptive Degressive Ary Number Encoded Genetic Algorithm, *Algorithms*, 13, 189. <https://doi.org/10.3390/a13080189>



Euiho Kim received the bachelor's degree from the Department of Aerospace Engineering, Iowa State University, Ames, IA, USA, and the master's and Ph.D. degrees from the Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, Stanford, CA, USA. He is currently an Associate Professor with the Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, South Korea. Prior to this, he was a Research Associate with the Department of Aerospace Engineering, University of Kansas, and the Technical Lead of the ground-based augmentation system of GPS and FAA's alternative position, navigation, and timing programs. His current research interests include satellite-based navigation, aircraft navigation using ground nav aids, indoor navigation, and robotics.



Doyeon Jung received her B.S. degree in Department of Mechanical and System Design Engineering from Hongik University, South Korea. She is currently pursuing her M.S. degree at Hongik University. Her research interest includes UWB network optimization.

