

단일 UAV를 활용한 TDOA 기반 Surveillance Radar의 위치 추정

이한결*, 박종호°, 임재성*

Estimation of Surveillance Radar Location Based on TDOA Using a Single UAV

Hangyeol Lee*, Jongho Park°, Jaesung Lim*

요약

본 논문에서는 단일 UAV의 선회 운동으로 적 레이더의 위치를 추정하는 기법을 제안한다. UAV를 선회시키면서 적 레이더의 신호를 감지하며, TOA 측정값과 위치를 지상 통제소에 전송하여 TDOA를 추정한다. LSM 기법과 EKF를 기반으로 적절한 UAV의 선회 중심축 좌표를 산출한 후 기동하여 정확도를 향상한다. 제안 기법의 경우, 최소 40km 이상의 거리를 유지해야 하는 경우에도 1% 내외의 높은 정확도를 보였으며 UAV의 회전 반경이 클수록 큰 오차를 갖는 예측값을 가질 확률이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 비교적 정확한 장거리 위치 추정이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. EKF 이외의 개선된 위치 추정 알고리즘을 적용하거나, FDOA, AOA 값을 추가로 활용함으로써 더 나은 추정 성능을 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

키워드 : UAV, 탐지 레이더, TDOA

Key Words : UAV, Surveillance Radar, TDOA

ABSTRACT

In this paper, an estimation of radar location using a single rotating UAV(Unmanned Aerial Vehicle) is proposed. With a steady level coordinated turn, the UAV captures signals from enemy radars and sends TOA(Time of Arrival) measurements and locations to a ground control station. It calculates TDOA(Time Difference of Arrival) and estimates the location of the target based on LSM(Least Square Method) and EKF(Extended Kalman Filter). Then, the UAV computes the center of the coordinated turn and flies to the corresponding position. In the numerical simulation, accuracy around 1% is shown in the case where the minimum distance between the UAV and the target is 40km. Also, as the turning radius of the UAV gets larger, the probability of having a large error decreases. Therefore, it is expected that an accurate long-range location estimation is possible at a low cost. Also, the proposed algorithm can be improved by applying other estimation algorithms, or by additionally utilizing FDOA(Frequency Difference of Arrival), and AOA(Angle of Arrival) values.

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1G1A1003429).

• First Author : Department of Military Digital Convergence, Ajou University, leehg3770@ajou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Department of Military Digital Convergence, Ajou University, parkjo05@ajou.ac.kr, 정회원

* Department of Military Digital Convergence, Ajou University, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202103-063-A-RN, Received March 16, 2021; Revised April 19, 2021; Accepted April 26, 2021

I. 서 론

현대전의 전쟁 양상은 네트워크 중심전(Network Centric Warfare)으로 대표되는 정보·전자전 중심의 전쟁으로 변화하고 있으며, 탐지수단, 결정권자, 타격수단 등을 네트워크를 통해 실시간 연계하여 전장 인식 공유, 지휘속도 향상, 작전 템포 및 효율 증가, 치명성 증대를 꾀하는 방향으로 나아가고 있다. 이에 따라 정보 우위(Information Superiority)의 중요성이 부각되고 있다. 정보 우위란, 필요한 적의 정보를 아군에게 정확한 시간 내에 정확한 형태로 제공함으로써 상대적인 정보 이점(Information Advantage)을 달성한 상태를 지칭한다¹⁾. 본 정보 우위의 확보를 통하여 작전 효율을 높여 아군의 전투력을 증대시킬 수 있다. 이를 위하여 정보 작전, 정보 보호, 정보 획득 등이 이루어진다. 정보 획득 측면에서 큰 역할을 수행하는 것이 바로 감시·정찰 무기체계인데, 대표적으로 레이더 체계, SAR(Synthetic Aperture Radar) 체계, EO/IR(Electro-Optical/ Infra-Red) 체계, 수중감시체계, 전자전체계가 있다.

이러한 현대전 양상의 변화에 따라, UAV(Unmanned Aerial Vehicle)를 전장에 활용하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있는데, 그 중 이동 가능한 UAV를 신호 수신 및 지상 통제소로 전송 가능한 공중 중계 노드로써 활용하는 연구가 존재한다²⁾. UAV는 기존 통신 노드에 비해 기동력이 뛰어나며 신속한 작전 투입 및 철수가 가능하고 상황에 따른 위치 변경의 자유도가 높으며 유지비용이 저렴하고 운용 난이도가 낮다는 장점을 지닌다. 또한, 전시 상황에서 해당 노드를 이동시키기 위해 아군이 직접 접근할 필요가 없으므로 아군의 생존성을 높일 수 있다.

신호원의 위치를 추정하고자 할 경우, 발생하는 신호를 시간 동기화하고 현재의 위치정보를 보유한 3기 이상의 노드가 신호원으로부터 발생한 신호를 확보해야 한다. 이렇게 TDOA(Time Difference of Arrival)를 추출한 후 예측값에 대한 비선형 모델의 해를 계산하는 것으로 추정이 가능하다³⁾. 그러나 신호원의 위치 추정을 위해 지상 노드들을 활용할 경우, 산 등의 지형과 지상 장애물 등으로 인해 BLoS(Beyond Line of Sight), NLoS(None-Line of Sight) 상황이 발생하거나, 지상 노드 이동에 제약이 발생할 수 있다는 단점이 존재한다.

이러한 단점을 극복하기 위하여, 공중 중계 노드로서의 UAV를 활용하는 선행 연구들이 존재한다. 그러나 본 선행 연구들은 지상 노드와 병행하여 운용한다

는 점⁴⁾, 3기 이상의 UAV를 배치하여 운용하는 방법을 제시한다는 점⁵⁾, 탐지 레이더의 특성과 부합하지 않는 노드 간 시간 동기화 방식을 제시한다는 점⁶⁾ 등의 문제점이 존재한다.

본 논문에서는 단일 UAV를 다중의 공중 중계 노드의 역할을 수행할 수 있다는 연구⁷⁾와 레이더 신호로부터 PRI(Pulse Repetition Interval)을 예측할 수 있다는 연구^{8,9)}에서 착안하여 단일 UAV를 활용하여 TDOA 값을 측정할 후, EKF(Extended Kalman Filter)¹⁰⁾를 기반으로 비선형 모델의 해를 계산하여 감시 레이더의 위치를 추정하는 기법을 제안한다. 적 감시 레이더 체계의 위치정보를 수집하고, 전시 상황에서의 적 레이더 체계에 대한 대처 난이도를 감소시켜 정보 우위에 기여할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 레이더의 정의와 특성, TDOA 기반 측위 기법과 해당 기법을 활용한 신호원 추정 관련 연구에 관한 설명 및 한계점을 서술하고, 3장에서는 제안하는 기법의 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 전장 환경 모델을 제시하고 수치 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 성능을 분석한다. 마지막으로, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관련연구

2.1 레이더

레이더는 송신 후 표적으로부터 반사된 전자기파를 수신하는 것으로 특성 정보를 추출한다. 송신하는 파의 종류에 따라 지속파(Continuous Wave) 레이더, 주파수변조 지속파(Frequency Modulation-Continuous Wave) 레이더, 펄스(Pulse) 레이더, 펄스 도플러(Pulse Doppler) 레이더로 나뉜다. 이 중 지속파 레이더는 송신 안테나에서 지속적인 전파 방사가 이루어지고 표적의 반사파를 수신 안테나에서 받아 이동표적에서 발생한 도플러 주파수를 탐지하고 표적 이동속도를 측정하는 방식을 취한다.

저출력 송신기를 사용한 이동표적 구분이라는 이점은 있으나 2개의 송수신 안테나 사용, 송신기와 수신기 사이에 간섭이 일어나지 않는 수준의 출력 파워 제한 필요 등의 단점이 존재한다. 반면, 펄스 레이더는 송신 시 펄스 형태의 전파를 사용하여 표적으로부터의 반사 신호를 수신해 표적의 방위와 거리를 추출한다. 신호를 간헐적으로 송신하기 때문에 송신기 출력을 증가시켜야 한다는 단점이 있으나 1개 안테나로 운용할 수 있다는 장점이 존재하며, 현재 표적의 방위 및 거리 추출을 위한 레이더로 가장 널리 이용된다.

탐지 레이더의 경우, 장거리에 존재하는 적 탐지 레이더의 위치 추정을 목표로 하기 때문에 대체로 지속과 레이더에 비해 고출력이 가능한 펄스 레이더를 주로 사용하며, 빔폭을 지나는 메인 빔이 회전을 하며 펄스 폭 수준의 펄스를 방사한 뒤 표적에 의해 반사된 신호를 수신하기 위한 휴지 기간을 갖게 된다. 이때 펄스의 발생 시간부터 펄스 발생 이후 휴지 종료 시간까지의 시간을 PRI(Pulse Repetition Interval)라고 한다.

각 펄스 간 PRI는 일정하거나 가변적일 수 있는데, 대표적인 PRI 형태로는 Stable, Stagger, Jitter, D&S(Dwell & Switch)가 존재한다. Stable은 각 펄스 간 PRI가 일정하고, Stagger는 정해진 N개의 PRI가 순차적으로 반복된다. Jitter는 특정 값을 중심으로 PRI 값이 조금씩 변화하며, D&S는 PRI가 변화한 후 일정 펄스 수 만큼 PRI 값이 유지된다. 이러한 PRI 변경은 전자보호(Electronic Protection) 능력을 향상시키기 위해 고의로 가해지거나, 장비 불안정 등으로 인해 발생하기도 한다.

2.2 TDOA 기반 측위 기법

TDOA는 신호원으로부터 방사된 신호에 대해 각 두 노드가 수신한 시간의 차이를 의미한다. 신호 수신 시간은 노드 간 거리에 비례하기 때문에, 해당 시차를 기반으로 두 노드에 대한 신호원의 위치에 대한 쌍곡선을 도출할 수 있다. 이를 이용해 다수의 시차 값을 기반으로 다수의 쌍곡선을 그린 후 해당 쌍곡선의 교집합을 신호원의 위치로 추정하는 것이 TDOA 기반 측위 기법이다. 본 기법은 상대적으로 정확하면서도 연산이 적다는 장점이 존재하여 고정 신호원의 위치 추정을 위해 자주 활용된다.

일반적으로 TDOA 기반 측위를 통해 예상 위치를 추정하기 위해선 그림 1과 같이 최소 3기 이상의 수신 노드가 필요하다. 만약 1기의 노드가 이동하며 신호원으로부터 신호를 수신한다면 다수의 노드 역할을 수행할 수 있다⁷⁾. 이를 TDOA 기반 측위 기법에 활용할 수 있다. 그러나 이동하는 1기의 노드로부터 다수의 TDOA 값을 정확히 산출하기 위해선 각 위치에서 수신하는 신호에 대한 시간 동기화가 이루어져야 한다. 참고문헌 [7]의 경우, 신호원이 송신하는 신호에 타임 스탬프가 포함되어 있다는 가정을 기반으로 시간 동기화를 수행하였다. 본 논문의 신호원은 감시 레이더이므로 타임 스탬프가 존재하지 않는 경우이다. 이러한 환경에서의 시간 동기화 기법을 제안하고자 한다.

간단한 연산으로 높은 정확도를 얻을 수 있다는 장

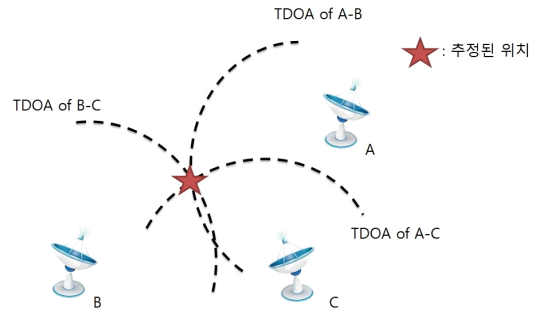


그림 1. TDOA 기반 측위 기법
Fig. 1. Location estimation based on TDOA method

점으로 인해, UAV를 신호 노드로 활용하여 TDOA 정보를 얻어 신호원의 위치를 추정하는 선행 연구들이 존재한다^{4,6)}. 참고문헌 [4]에서는 정지된 Station과 움직이는 UAV를 배치하여, 각 UAV의 위치 신호원의 TOA(Time of Arrival)와 Station의 동일 신호에 대한 TOA를 확보하여 TDOA 값을 계산한다. 그리고 이를 신호원의 위치 추정에 활용한다. 그러나, 해당 연구의 경우, 신호원이 전 방향으로 방사된다는 가정이 포함되어 있어 각 신호 수신 노드들은 동일한 송신 시간을 갖는 신호를 항상 수신받을 수 있다. 따라서 수신된 신호에 타임 스탬프가 존재하지 않더라도 송신 시간이 동일함을 알기 때문에 정확한 TDOA 값 계산을 위한 각 노드들의 시간 동기화에 어려움이 없다. 그러나 지대공 레이더와 같이 레이더의 빔폭이 제한된 경우, 빔의 각도와 UAV의 위치에 따라 신호를 수신하지 못하는 경우가 발생하므로 해당 방식의 시간 동기화가 불가능하다. 더 나아가, 해당 연구는 2기 이상의 신호 수신 노드들을 운용한다. 이러한 다중 노드 운용은 단일 노드 운용에 비해 유지비용 및 체계 운용의 난이도가 상승한다. 또한, 지상의 station을 수신 노드로 활용할 경우, 수신 노드와 타겟 간 지형으로 인해 발생하는 BLoS, NLoS 등의 문제에서 벗어날 수 없다.

참고문헌 [5, 6]의 경우, 3기의 UAV를 레이더 근방에 배치한 후 각 UAV 간의 TDOA 값을 계산하는 방식으로 레이더의 위치를 추정하였다. 각 UAV 간 시간 동기화를 위해, UAV가 항상 수신할 수 있는 레이더의 Sidelobe 세기를 가정하였다. 그러나 참고문헌 [4]의 문제점과 마찬가지로 다수의 UAV를 활용함으로써 발생하는 유지비용 및 난이도가 단일 UAV를 활용하는 경우보다 높으며, UAV와 레이더 간 거리가 충분히 가깝지 않을 경우 레이더의 Sidelobe와 주변 잡음을 구분할 수 없기 때문에 해당 시간 동기화 및

TDOA 계산 방식을 적용하기 어렵다는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 선행 연구들에서 드러난 문제점을 극복할 수 있는 시간 동기화와 TDOA 계산 방법을 제시하며, 단일 UAV 운용을 고려한다.

III. 제안 모델

3.1 시스템 모델

그림 2와 같이, 레이더의 Mainlobe를 잡을 수 있는 적절한 위치에서 UAV가 일정한 반경을 유지하며 선회 기동을 한다. 이러한 선회 기동 중 레이더 신호를 수신할 경우, 수신 시간과 현재 UAV의 위치를 지상 통제소로 전송한다. 일정 수 이상의 데이터를 수신하게 되면 지상 통제소는 위치 추정 알고리즘을 통해 표적 레이더의 위치 예측값을 계산한다. 이를 통해 UAV가 선회 기동을 할 위치 좌표를 업데이트하고, UAV는 새로운 중심점을 기준으로 선회 기동을 한다. 그림 3과 같이 이러한 과정을 되풀이한다. UAV 선회 부터 추정 위치 방향으로 비행하는 것까지의 수행을 1회의 cycle이라고 할 때, 그림 3에서 N은 cycle의 수행 수, N_1 은 1회의 cycle 내에서 수집할 최소의 데이터 수, N_2 는 전체 알고리즘 내에서 수행할 최소 cycle 수를 나타낸다.

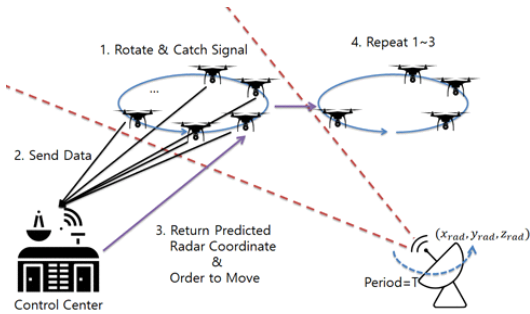


그림 2. 시스템 모델
Fig. 2. System model

3.2 표적 위치 추정

표적 위치를 추정하기 위해선, 각 노드 간 TDOA 값이 다수 필요하다. 본 연구에서는 단일 UAV의 선회가 다수 노드의 역할을 대체하기 때문에 각 위치에서 수신된 펄스의 송신 시각이 각각 다르다는 점, 적 레이더의 경우 신호에 타임 스탬프를 포함시키지 않는다는 점 등을 고려해야 한다. 이러한 요소들로 인해, 단순히 추출된 표본으로부터 얻은 펄스 수신 시각 정

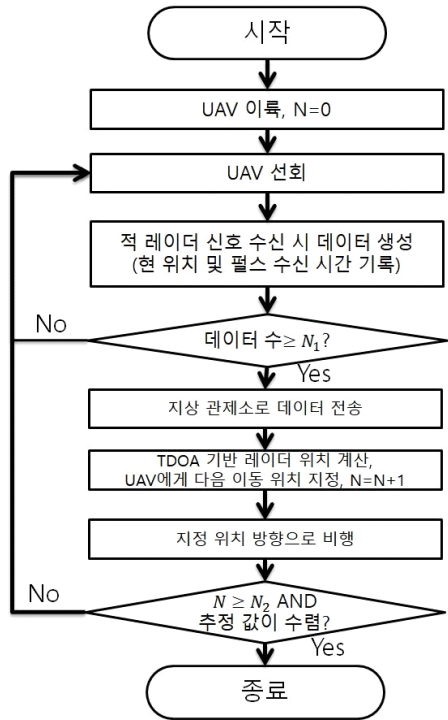


그림 3. 제안 모델의 플로우차트
Fig. 3. Flowchart of the proposed model

보만으로는 펄스의 송신 시간에 대한 동기화가 불가능하고, 표적 위치 추정을 위한 정확도 높은 TDOA 값을 얻을 수 없다.

따라서, 해당 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 표적에 대한 사전 정보 수집을 통해 PRI 패턴을 추정한다^{8),9)}. 적 레이더의 PRI 패턴을 안다고 가정한다. 어떠한 위치에서 적의 레이더 펄스를 수신한 시각을 t_i , 그 다음 다른 위치에서 적의 레이더 펄스를 수신한 시각을 t_j , 각 펄스를 레이더가 송신한 시각을 τ_i, τ_j , 각 펄스 수신 위치와 레이더 간 거리를 d_i, d_j 라고 할 때, t_i 와 t_j 는 다음과 같다.

$$t_i = \tau_i + \frac{d_i}{c}, \quad t_j = \tau_j + \frac{d_j}{c} \quad (1)$$

여기서 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 이고, 필요한 TDOA 정보는 $\Delta t_{ij} = \frac{d_j}{c} - \frac{d_i}{c}$ 이므로, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta t_{ij} = (t_j - t_i) - (\tau_j - \tau_i) = (t_j - t_i) - \sum_{k=1}^N PRI_k \quad (2)$$

두 펄스 간 N-1개의 펄스가 발생한다면 두 펄스 간의 간격은 N개의 PRI 값을 더한 값이므로 식 (2) 및 그림 4와 같이 표현할 수 있다. 일반적으로 임무를 수행하는 UAV와 레이더와의 거리가 최대 수백km이고 UAV의 회전 반경은 최대 약 10km이기 때문에 Δt_{ij} 의 값이 PRI의 합보다 상당히 작다. 이를 이용하여

$(t_j - t_i) - \sum_{k=1}^N PRI_k$ 의 값을 최소로 하는 N을 선택할 수 있다.

시스템 모델은 표적 위치 추정을 위해 추정된 TDOA 값을 기반으로 LSM(Least Square Method)과 EKF를 수행한다.

표적의 좌표를 $X(x, y, z)$, t_i, t_j 에서 펄스를 수신 받은 UAV의 위치를 각각 $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j), d_i$ 와 d_j 의 차를 p_{ij} 라고 할 때, p_{ij} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_{ij} = d_j - d_i = c(t_j - t_i) = c\Delta t_{ij} = d_i - d_j = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} - \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2} \quad (3)$$

예측하고자 하는 위치 값을 $\bar{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ 라고 할 때, 다음과 같이 식을 전개할 수 있다.

$$p_{13}^2 - p_{12}^2 = x_3^2 + y_3^2 - x_2^2 - y_2^2 - 2xx_3 - 2yy_3 + 2xx_2 + 2yy_2 - 2d_1p_{23} \quad (4)$$

$$\frac{p_{13}^2 - p_{12}^2 - x_3^2 - y_3^2 + x_2^2 + y_2^2}{2p_{23}} = b_{23} = \frac{(x_2 - x_3)x + (y_2 - y_3)y}{2p_{23}} - d_1 \quad (5)$$

$$b_{23} - b_{24} = \frac{(x_2 - x_3)x + (y_2 - y_3)y}{2p_{23}} - \frac{(x_2 - x_4)x + (y_2 - y_4)y}{2p_{24}} = \left[\frac{x_2 - x_3}{p_{23}} - \frac{x_2 - x_4}{p_{24}} \quad \frac{y_2 - y_3}{p_{23}} - \frac{y_2 - y_4}{p_{24}} \right] \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = [a_{34x} \ a_{34y}] \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서, \bar{X} 는 다음과 같은 선형 식으로 표현할 수 있다.

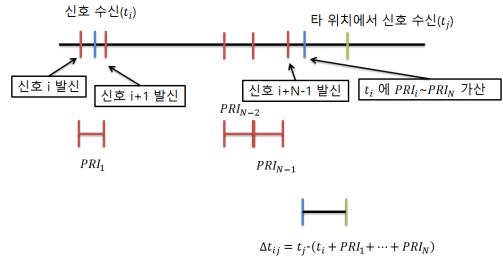


그림 4. TDOA 값 추정 기법
Fig. 4. Estimation of TDOA values

$$B = \begin{bmatrix} b_{23} - b_{24} \\ b_{23} - b_{25} \\ b_{23} - b_{26} \\ b_{24} - b_{25} \\ b_{24} - b_{26} \\ b_{25} - b_{26} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{34x} & a_{34y} \\ a_{35x} & a_{35y} \\ a_{36x} & a_{36y} \\ a_{45x} & a_{45y} \\ a_{46x} & a_{46y} \\ a_{56x} & a_{56y} \end{bmatrix} \bar{X} = A\bar{X} \quad (7)$$

식 (7)은 의사역행렬을 이용하여 해를 구할 수 있다.

$$\bar{X} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (8)$$

LSM 경우, 데이터를 기반으로 선형화하기 때문에 잡음이 많을수록, 데이터를 얻는 시스템이 비선형 모델일수록 오차가 증폭된다. 즉, LSM만으로는 정확한 위치 추정값을 얻을 수 없으므로, 본 연구에서는 EKF를 통해 정확도를 향상시킨다. EKF의 time update와 measurement update 단계는 다음과 같이 표현된다.

· Time update

$$F_k = I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ (Static target)} \quad (9)$$

$$X_{k|k-1} = F_{k-1} X_{k-1|k-1} = X_{k-1|k-1} \quad (10)$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} = P_{k-1|k-1} + Q_{k-1} \quad (11)$$

· Measurement update

$$h(X_{k|k-1}) = \|X_{k|k-1} - p_{2,k}\| - \|X_{k|k-1} - p_{1,k}\| \quad (12)$$

$$H_k = \frac{\delta h_k(X)}{\delta X} \Big|_{X=X_{k|k-1}} = \frac{(X_{k|k-1} - p_{1,k})^T}{\|X_{k|k-1} - p_{1,k}\|} - \frac{(X_{k|k-1} - p_{2,k})^T}{\|X_{k|k-1} - p_{2,k}\|} \quad (13)$$

$$X_{klk} = X_{klk-1} + K_k v_k \quad (14)$$

$$P_{klk} = P_{klk-1} - K_k S_k P_{klk-1} \quad (15)$$

$$v_k = z_k - h(X_{klk-1}) \quad (16)$$

$$S_k = H_k P_{klk-1} H_k^T + R_k \quad (17)$$

$$K_k = P_{klk-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (18)$$

Time update 단계에서는 상태 모델을 표현하며, F_k 는 상태 전이 행렬, $X_{k-1|k-1}$, X_{klk-1} 는 각각 k-1번째 measurement update로부터 얻은 표적 위치의 예상 값 행렬과 해당 값에 k번째 time update를 적용한 행렬이다. $P_{k-1|k-1}$, P_{klk-1} 는 각각 k-1번째 measurement update를 통해 갱신된 예상 오차 공분산 행렬과 해당 값에 k번째 time update를 적용한 행렬이다. 한편, Q_k 는 예측 잡음 공분산이다.

본 논문에서는 위치가 고정된 레이더가 표적이므로, 상태 전이 행렬 F_k 는 식 (9)와 같이 I_2 로 표현한다. F_k 는 식 (10)과 같이 이전에 예측된 위치 값 행렬 $X_{k-1|k-1}$ 을 갱신하고 식 (11)과 같이 추정 오차 공분산 행렬 $P_{k-1|k-1}$ 을 보정할 때 활용한다.

Measurement update 단계의 경우 측정 모델을 표현한다. $h(X)$ 는 측정 식, H_k 는 측정 행렬, v_k 는 혁신, S_k 는 혁신 공분산, K_k 는 Kalman 이득을 나타낸다. 측정 식 $h(X_{klk-1})$ 는 예측된 좌표 X_{klk-1} 와 k번째 알고리즘 시행 시 레이더 펄스를 수신한 레이더 펄스 수신 두 위치 $p_{1,k}$, $p_{2,k}$ 의 거리의 차로 표현한다.

LSM과 EKF를 통해 표적의 추정 위치를 산출하면 지상 통제소는 해당 위치 정보를 UAV에게 송신한다. UAV는 해당 위치 값을 기반으로 기동한다. 이러한 과정이 1회의 cycle이며, 이러한 cycle을 반복하여 표적 추정 위치의 정확도를 향상시킨다.

IV. 수치 시뮬레이션

4.1 전장 환경 모델

수치 시뮬레이션의 전장 환경 모델은 UAV의 선회 기동 중심점을 원점으로 하여, 위치를 추정하고자 하는 표적이 (100 km, 100 km, -h) 위치에 있다고 설정한다. 여기서 h는 UAV의 고도이다. 해당 시뮬레이션은 적과의 대치 중인 환경을 가정하기 때문에, 일정

거리 이상 적진으로 접근할 경우 위험할 수 있다. 따라서, 해당 전장 환경 내 적 표적 근방 접근을 제한하는 임의의 경계선을 설정한다. 해당 경계선이 항상 직선은 아니지만, 해당 경계선 내 영역을 포함하도록 법선을 설정하여 새로운 경계선을 만들 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 직선 경계선이 표적으로부터 30km의 거리를 두도록 가정한다. 각 시뮬레이션마다 경계선의 각도는 0 ~ 90° 내에서 무작위로 선정된다. UAV의 최대 작전거리는 120km로 설정한다. 만약 UAV의 다음 위치 좌표가 경계선 너머에 존재할 경우, 해당 이동 좌표를 지나는 경계선의 법선과 경계선의 교점을 새 좌표로 선정하여 이동한다. 그림 5는 해당 전장 환경 모델을 XY 평면상에서 도식화한 것이다.

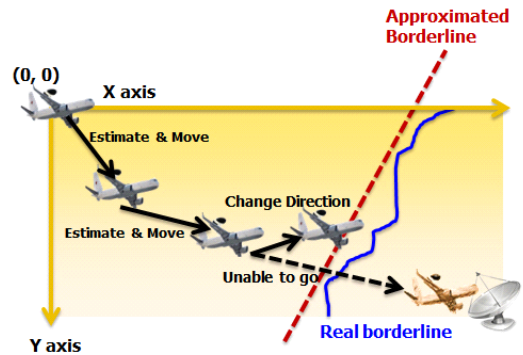


그림 5. XY 평면상의 전장 환경 모델
Fig. 5. Battlefield model in XY-Plane

표 1. UAV 파라미터
Table 1. UAV parameter

UAV Parameter	Value
Radius of Turn	3km, 5km, 10km
Average Speed	180km/h
Altitude	1.5, 2.5, 4.5km
Power	73hp
Maximum Duration of Flight	18h
Maximum Range of Operation	120km
Mass	427kg

표 2. 레이더 파라미터
Table 2. Radar parameter

Radar Parameter	Value
PRI	1000μs
Pulse Width	0.5μs
Azimuth Beamwidth	1.3°
RPM	12.5

본 시뮬레이션에서 사용한 UAV와 레이더의 파라미터는 표 1과 표 2와 같다.

4.2 UAV 동역학 모델

해당 시뮬레이션의 한 cycle 단위 동안, UAV는 등속 원운동으로 선회 및 데이터 수집, 지상관제소로 데이터 전송 및 표적 위치의 예측값 계산 후 이를 기반으로 한 다음 선회 중심점 좌표값 리턴, 리턴값 수신 및 UAV 이동으로 총 3단계로 구성되어 반복 수행한다.

UAV 선회 및 데이터 수집 단계에서 UAV는 선회 동안 120개의 데이터를 수집하며, 유사한 위치 및 시간 정보를 가지는 데이터를 수집하지 않도록 UAV 선회 기동 중심축을 기준으로 각 데이터 간 최소 3° 이상 차이 나도록 설정하여 데이터 수집의 간격을 부여한다.

120개의 데이터를 수집한 UAV는 해당 데이터를 지상 관제소로 전송한 후 마지막 데이터를 수집한 위치에서 대기한다. 지상 관제소는 표적의 예상 위치 값과 UAV의 다음 선회 중심이 될 위치 값을 계산한다. UAV는 이를 수신하여 업데이트된 선회 기동 중심으로 이동한다.

본 연구에서 고려한 UAV 동역학 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{avg} &= 50 \text{ (m/s)} \\ \omega_{avg} &= 50/r \text{ (rad/s)} \\ a_{avg} &= \frac{2500}{r} \text{ (m/s}^2\text{)} \\ x(t) &= x_{axis} + r \cos(\omega_{avg}t) \\ y(t) &= y_{axis} + r \sin(\omega_{avg}t) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 r 은 UAV의 회전 반경, x_{axis} 와 y_{axis} 는 UAV의 선회 기동 중심 위치이며, v_{avg} , ω_{avg} , a_{avg} 는 각각 UAV의 평균 속도, 각속도, 가속도이다.

새로운 선회 중심 좌표로 이동하는 단계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} AX_{k+1} &= (x_{axis}_{k+1}, y_{axis}_{k+1}) \\ &= \begin{cases} (x_k^e, y_k^e) & (x_k^e - y_k^e/a + b/a \leq 0) \\ \left(\frac{ax_k^e + y_k^e - b}{2a}, \frac{ax_k^e + y_k^e + b}{2} \right) & (x_k^e - y_k^e/a + b/a > 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

$$P = \frac{d}{dt}(dist \times F(t)), \quad dist = \|AX_{k+1} - AX_k\| \quad (21)$$

$$a(t) = \int \frac{P}{m \times dist} dt = \frac{P}{m \times dist} t, \quad a(0) = 0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} v(t) &= \int a(t) dt \\ &= \begin{cases} \frac{P}{2(m \times dist)} t^2 & \left(\frac{P}{2(m \times dist)} t^2 < v_{max} \right) \\ v_{max} & \left(\frac{P}{2(m \times dist)} t^2 \geq v_{max} \right) \end{cases} \\ v(0) &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$ang_{k|k+1} = \arctan\left(\frac{y_{axis}_{k+1} - y_{axis}_k}{x_{axis}_{k+1} - x_{axis}_k}\right) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} x(t) &= v(t) \cos(ang_{kvertk+1}) + x_{last} \\ y(t) &= v(t) \sin(ang_{kvertk+1}) + y_{last} \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 AX_k 는 k 번째 cycle에서의 UAV의 선회 중심 좌표, x_k^e 와 y_k^e 는 k 번째 cycle에서의 표적 좌표 예측값, a 와 b 는 경계선의 기울기와 y 절편, $a(t), v(t), F(t)$ 는 UAV의 가속도, 속도, 힘, P, m 은 UAV의 일률과 질량이다. 식 (20)-(25)는 UAV가 다음 이동 좌표를 수신하여 선회 기동 중심축을 업데이트하여 비행하는 것을 가속도, 속도, 각도로 표현한 것이다.

4.3 시뮬레이션 수행

해당 시뮬레이션에서 수행되는 알고리즘의 각 cycle 마다 20회의 LSM과 30회의 EKF가 수행된다. 최종 위치 추정값은 20회의 cycle 수행 후 UAV가 경계선상에 접근할 때 도출한 예측값의 평균으로 계산한다. 또한, $\sigma = 4 \times 10^{-8}$ 의 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이 시뮬레이션 수행 시 TDOA 계산 값에 가산된다. 선회반경이 r 이라 할 때 UAV의 초기 위치는 (r, r) 이며 레이더의 초기 빔 각도가 -45° 이다. 또한, 바람 등의 외란이 없는 이상적인 비행 환경을 가정한다.

$h = 4.5km$ 일 때, UAV의 회전 반경이 각각 $r = 3km, 5km, 10km$ 인 3가지 경우에 대해 20회 cycle을 수행하였다.

그림 6은 각 경우에 대해서 20회 cycle을 수행하는 동안 RMSE(Root Mean Square Error) 값을 나타내며, 그림 7은 20회 cycle 동안 산출한 추정값이다. 그림 8과 그림 9는 UAV의 궤적을 나타낸다. 그림 6과 7의 경우, $r = 3km, 5km, 10km$ 예측값의 편차가 감

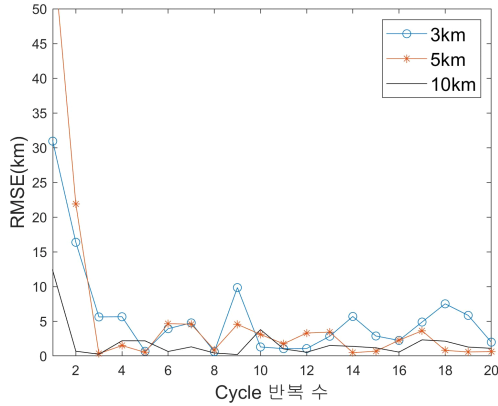


그림 6. 각 경우에 대한 RMSE 값
Fig. 6. RMSE measurement for each case

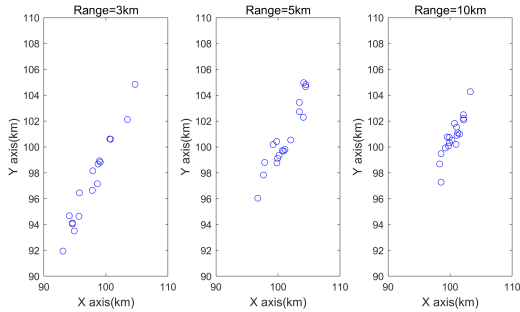


그림 7. 20회 cycle 동안 추정값
Fig. 7. Estimated radar position

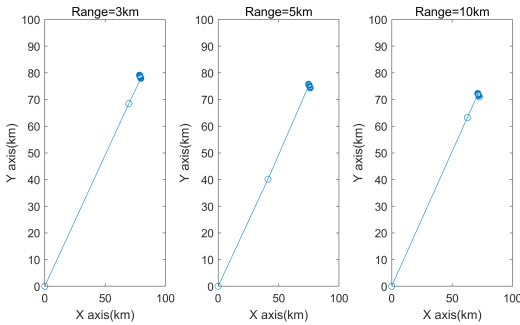


그림 8. UAV 이동 경로
Fig. 8. Trajectory of UAV

소하여 레이더 추정 위치가 수렴함을 알 수 있다. 각 경우에 대한 최종 예측값과 RMSE 값은 표 3과 같다. $r = 3km$ 의 경우 $r = 5km, 10km$ 에 비해 최종 예측값의 RMSE 값이 크고, 이는 추정 값의 불안정성에 따른 결과로 판단된다. 그림 6에서 RMSE 값이 진동하는 것은 UAV가 최소거리에 도달하였지만, 잡음으로 인한 계산 오차에 따라 레이더의 예상 좌표가 달라지기 때문이다.

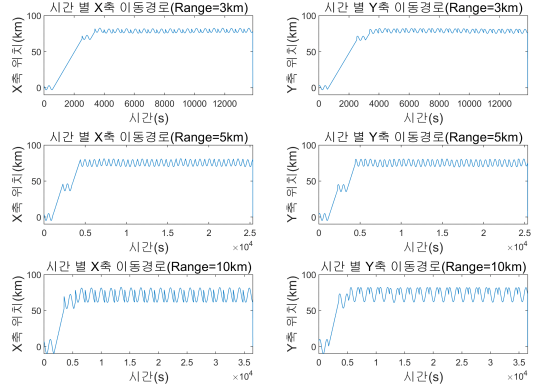


그림 9. 위치 성분 별 시간 응답
Fig. 9. Time history of UAV position components

표 3. 최종 예측값 결과
Table 3. Final estimation result

	최종 예측값(km)	RMSE(km)
3km	(97.75, 97.31)	2.48
5km	(99.59, 99.55)	0.43
10km	(100.61, 100.87)	0.74

다음은 $r = 10km$ 일 때, UAV의 고도가 각각 $h = 1km, 2.5km, 4.5km$ 인 3가지 경우에 대해서 20회 cycle을 수행하였다.

그림 10은 각 경우에 대해서 20회 cycle을 수행하는 동안 RMSE 값을 나타내며, 그림 11은 20회 cycle 동안 산출한 추정값이다. 그림 10과 그림 11을 통해 고도 값의 변화가 성능에 큰 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다. 이는 표적과 UAV가 유지하는 거리에 비해 고도 값이 상대적으로 크지 않기 때문이다. 각 경우에 대한 최종 예측값과 RMSE 값은 표 4과 같으며, 마찬가지로 고도에 따른 오차의 변화가 크지 않음을

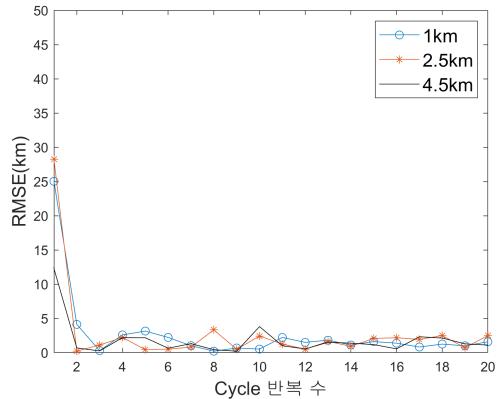


그림 10. 각 경우에 대한 RMSE 값
Fig. 10. RMSE measurements for each case

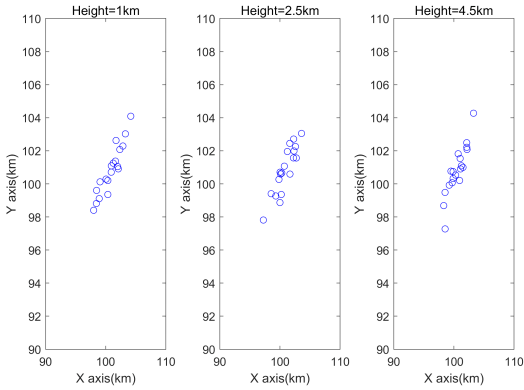


그림 11. 20회 cycle 동안 추정값
Fig. 11. Estimated radar position

표 4. 최종 예측값 결과
Table 4. Final estimation result

	최종 예측값(km)	RMSE(km)
1km	(100.88, 100.86)	0.87
2.5km	(100.87, 100.85)	0.86
4.5km	(100.53, 100.81)	0.68

확인할 수 있다.

마지막으로, 경계선 최소거리가 각각 $d = 10km, 20km, 30km, 40km, 50km$ 인 5가지 경우에 대해 20회 cycle을 수행하였다.

그림 12는 각 경우에 대해서 20회 cycle을 수행하는 동안 RMSE 값을 나타내며, 그림 13은 20회 cycle 동안 산출한 추정값이다. 그림 14와 그림 15는 UAV의 궤적을 나타낸다. 그림 12와 그림 13에서 확인할 수 있듯이, 경계선 최소거리가 증가할수록 각 cycle로

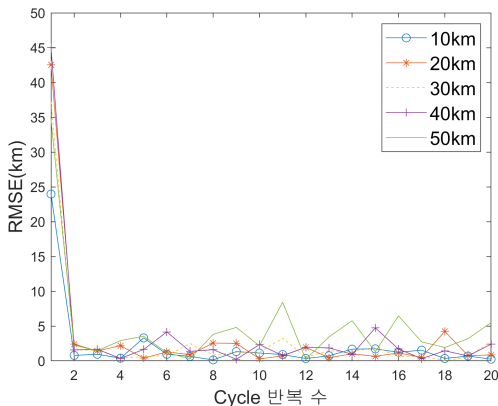


그림 12. 각 경우에 대한 RMSE 값
Fig. 12. RMSE measurement for each case

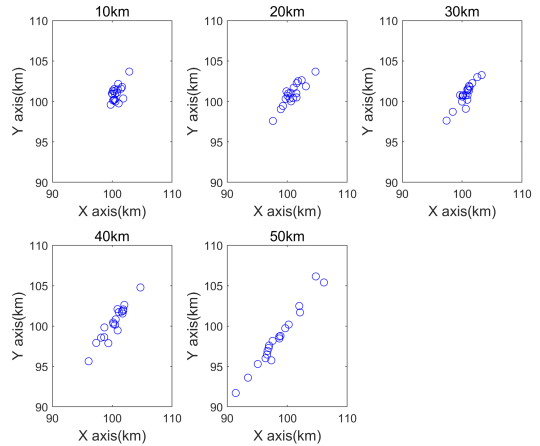


그림 13. 20회 cycle 동안 추정값
Fig. 13. Estimated radar position

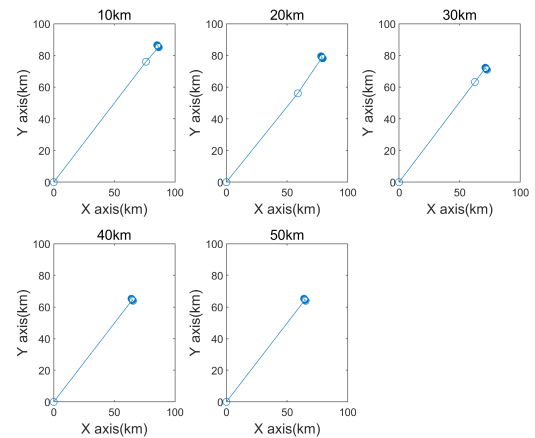


그림 14. UAV 이동 경로
Fig. 14. Trajectory of UAV

표 5. 최종 예측값 결과
Table 5. Final estimation result

	최종 예측값(km)	RMSE(km)
10km	(100.73, 100.99)	0.87
20km	(100.84, 100.91)	0.88
30km	(100.61, 100.87)	0.74
40km	(100.33, 100.42)	0.38
50km	(98.41, 98.44)	1.58

언어지는 표적 예측값의 편차가 증가하여 큰 오차를 얻을 확률이 증가한다. 각 경우에 대한 최종 예측값과 RMSE 값은 표 5와 같다. 최소거리가 50km인 경우 이외에는 1% 이하의 오차 성능을 보인다.

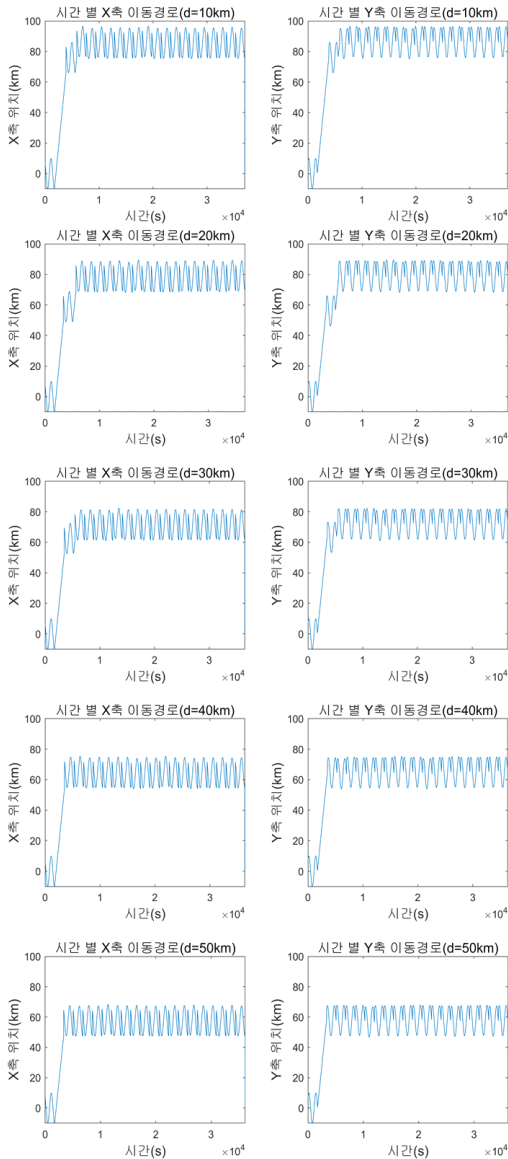


그림 15. 위치 성분 별 시간 응답
Fig. 15. Time history of UAV position components

V. 결론

본 논문에서는 단일 UAV를 통한 TDOA 기반 감시 레이더의 위치 추정 기법을 제안하였다. UAV를 활용한 기존의 레이더 위치 추정 연구에서는, 레이더의 Sidelobe 수신을 통한 위치 추정을 하거나 다중 UAV 또는 UAV와 지상 통제소의 수신기를 조합한 다중 노드 운용을 기반으로 위치 추정을 하였다. 전자는 UAV와 레이더 간 거리가 멀수록 Sidelobe를 잡기

어렵다는 점, 후자는 다중 UAV 활용을 통한 운용의 어려움과 비용의 상승, 그리고 지형에 따른 지상 통제소의 신호 탐지 장비 운용의 제약 등의 단점이 존재한다.

본 논문에서 제안한 기법은 이러한 문제들을 해결하기 위해 단일 UAV만을 이용하고, 선회 기동을 통하여 Mainlobe의 신호를 잡는 방법으로 다중 노드의 효과를 얻었다. TOA 측정값과 위치를 지상 통제소에 전송하여 TDOA를 추정하고 LSM과 EKF를 기반으로 적합한 UAV의 선회 기동 중심축 좌표를 산출하였다. 그리고 업데이트된 위치 좌표로 UAV를 이동시켜 정확도가 향상하였다.

제안 기법의 경우 UAV와 표적이 40km 이상의 거리를 유지하는 경우에도 1% 내외의 높은 정확도를 보였으며 UAV의 회전 반경이 클수록 큰 오차를 갖는 추정값을 가질 확률이 낮아지는 것을 확인하였다. 그러나 UAV의 고도의 변화에 따라 추정값에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었고, 이는 UAV와 표적 간 거리에 비해 고도 값이 상대적으로 작기 때문이다.

본 연구를 기반으로 상대적으로 정확한 장거리 위치 추정이 가능할 것으로 기대된다. 본 논문에서 제시한 TDOA 기법보다 개선된 위치 추정 알고리즘을 적용하여 더 높은 성능을 산출할 예정이다. 또한, TDOA에 FDOA, AOA 값을 추가적으로 활용하여 성능을 개선할 예정이다.

References

- [1] U.S. Joint Chief of Staffs, “*Joint Vision 2010*,” US Gov. Printing Office, Washington DC, May 1996.
- [2] Y. Ha, Y. Chung, Y. Lim, and H. Yang, “A study on the development of airborne communication network UAV for TICN,” in *Proc. KICS Summer Conf.*, vol. 2009, no. 6, pp. 607-608, Jun. 2009.
- [3] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, “Positioning using time-difference of arrival measurements,” *IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Hong Kong, 2003.
- [4] H. Du and J. Lee, “Passive geolocation using TDOA method from UAVs and ship/land-based platforms for maritime and littoral area surveillance,” *Defence Research & Development Canada*, Defence R & D Canada-Ottawa, 2004.

- [5] B. Sundaram, M. Palaniswami, S. Reddy, and M. Sinikas, "Radar localization with multiple unmanned aerial vehicles using support vector regression," *IEEE Int. Conf. Intell. Sensing and Info. Process.*, Bangalore, India, 2005.
- [6] P. Mallick, A. Routray, J. Mohapatra, and K. Jana, "Minimum variance estimators for enemy radar localization by unmanned aerial vehicles," *IEEE Int. Conf. Electron., Comput. and Commun. Technol.*, Bangalore, India, 2014.
- [7] D. Oh, J. Lee, J. Lim, and K. Kim, "An airborne communication relay UAV model for locating the GPS-Denied crashed UAV," *J. KICS*, vol. 44, no. 6, pp. 1163-1172, Jun. 2019.
- [8] J. Lee and G. Chae, "A novel algorithm for deinterleaving of D&S PRI and stagger PRI signals from the EP radar," *The J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, vol. 13, no. 11, pp. 5372-5378, Nov. 2012.
- [9] J. Han and J. Jin, "A novel method of recognizing PRI modulation type of radar signal based on support vector machine," in *Proc. IEIE Summer Conf.*, pp. 679-682, Busan, Korea, Jun. 2017.
- [10] A. Jazwinski, "*Stochastic Process and Filtering Theory*," New York: Academic Press, 1970.

이 한 결 (Hangyeol Lee)

2021년 2월 : 아주대학교 국방디지털융합학과 학사
<관심분야> UAV 제어, 항공 시뮬레이션

박 종 호 (Jongho Park)

2010년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 학사
2012년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 석사
2016년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 박사
2016년 10월~2019년 8월 : 국방과학연구소 선임연구원
2019년 9월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과 조
교수
<관심분야> 항공유도제어
[ORCID:0000-0001-5406-0306]

임 재 성 (Jaesung Lim)

1983년 2월 : 아주대학교 전자 공학 학사
1985년 2월 : KAIST 영상통신 석사
1994년 8월 : KAIST 디지털통신 박사
1995년 9월~1998년 2월 : SK 텔레콤 중앙연구원 책임
연구원
1998년 3월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과 정
교수
2006년 8월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연구
센터장
<관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방전술
통신
[ORCID:0000-0003-0080-9398]