

GPS 불능의 추락한 UAV 위치 탐지를 위한 공중통신 중계기 운용 모델

오 동 한*, 이 종 관*, 임 재 성°, 김 경 우**

An Airborne Communication Relay UAV Model for Locating the GPS-Denied Crashed UAV

Donghan Oh*, Jongkwan Lee*, Jaesung Lim°, Kyungwoo Kim**

요 약

본 논문은 GPS 수신이 불안정한 지역에서 추락한 UAV가 특정 신호를 송신할 시 공중통신 중계기를 운용하여 신속하게 추락 UAV를 찾기 위한 운용 모델을 제안한다. UAV를 활용한 작전 운용을 위해서는 UAV의 SWaP(Size, Weight and Power)에 대한 고려가 필요하다. 제안하는 모델의 공중통신 중계기는 추락 UAV의 송신 신호와 자신의 위치를 지상통제소로 실시간 중계한다. 지상통제소는 중계된 신호를 TDOA로 계산하여 추락 UAV의 위치를 추정하고 추정위치 정확도 향상을 위해 공중통신 중계기에게 경로를 제공한다. 육군 대대급 전장 환경을 가정하여 제안하는 모델을 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현하였다. 전장에서 추락 UAV의 효율적인 위치 탐지를 위해 공중통신 중계기의 이동을 통해서 위치 정확도를 향상시켰다. 성능평가 결과 GPS를 사용하지 않고도 전장 환경에서 추락 UAV를 효과적으로 찾을 수 있는 가능성을 확인하였다.

Key Words : Airborne Communication relay UAV, Crashed UAV, Ground Control Station, Locating, Non-GPS

ABSTRACT

In this paper, we propose an application model of airborne communication relay UAV(Umanned Aerial Vehicle) that finds out the crashed UAV in GPS-denied environment as using signals of the crashed UAV. For operation as making use of UAV, SWaP(Size, Weight and Power) constraints of UAV must be considered. In the proposed model, Airborne communication relay UAV transmits real-time signals of the crashed UAV and its location to the GCS. GCS estimates the location of the crashed UAV based on TDOA(Time Difference of Arrival) and provides the trajectory to airborne communication relay UAV for the crashed UAV to improve its accuracy of the estimated location. The proposed model implemented the army battalion battlefield with computer simulation. We improved the location accuracy through movement of airborne communication relay UAV for efficiently detecting the location of the crashed UAV in the battlefield. We confirmed effectively the possibility of locating the crashed UAV without using GPS information.

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다. (UD160070BD)

♦ First Author : Ajou University, Department of NCW, dhehdgks85@ajou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Ajou University, Department of NCW, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

* Department of Computer Science, Korea Military Academy, c13525@kma.ac.kr, 정회원

** Agency for Defense Development, kkw5288@add.re.kr

논문번호 : 201903-021-C-RU, Received March 15, 2019; Revised March 29, 2019; Accepted March 30, 2019

I. 서 론

인력손실을 막기 위해 개발된 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)는 현대 기술이 고도로 발전하게 되면서 단순히 조종사의 생존성 보장뿐만 아니라 광범위한 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있다. 특히 군에서는 드론봇 부대를 창설하고 드론/UAV 운용 특기를 신설하였다. 군은 UAV를 통해 감시, 정찰, 물자보급, 상황공유, 정밀타격 등 공중에서 전장의 우위를 확보하려한다. 현재 전장에서 정찰기나 위성과 같은 장비는 높은 유지비용으로 제한된 지역에서 정해진 용도로만 사용하고 있다. 반면 UAV를 사용한다면 저비용으로 신속하게 작전 지역에 전개할 수 있고 인력을 절감하며 통신이 제한되는 지역에서는 통신 중계기로 활용할 수 있다^[1].

미래 전장을 주도할 유·무인 복합무기체계는 대부분 GPS(Global Positioning System) 수신기를 탑재하여 사용자의 위치를 인식한다. 현재 운용중인 UAV의 위치정보 또한 GPS에 의존하여 사용되고 있다. 하지만 GPS 위성은 지상으로부터 약 2만 km 상공에 위치하고 있어 수신기와 거리가 매우 멀다. 그러므로 수신기까지 GPS 신호가 도달하더라도 신호세기가 미약하다. 이러한 이유로 인해 GPS 신호를 스푸핑(spoofing)공격으로 변조하거나 GPS 재밍(jamming) 공격으로 수신기에 전파 방해할 수 있다. UAV가 GPS 공격과 같은 사이버 공격을 받는다면 UAV를 통제하는 통제권자와 통신이 끊겨 추락할 확률이 높다. UAV는 GPS 공격뿐만 아니라 물리적인 충돌, 악기상, 조종 실수 등으로 추락할 수 있다^[2]. 추락과 같은 위급 상황에 UAV는 스스로 판단하여 능동적으로 대처하기 어렵다. 군 작전 중 UAV가 추락하면 정찰 정보 및 UAV 제원이 외부로 노출되어 아군의 작전의도와 군사자료가 유출될 수 있다. 일례로 2012년 미군의 RQ-170이 이란 상공에 추락함으로써 UAV가 복제되었다^[3].

현재 UAV가 추락할시 추락한 UAV의 위치를 탐지하기 위한 방법으로 두 가지 시스템이 운용 가능하다. 첫 번째 시스템은 상공에서 일반적으로 사용하는 ADS-B이다^[4]. 두 번째 시스템은 군에서 많이 사용하는 Beacon신호다^[5]. ADS-B 시스템과 Beacon신호는 기체가 추락하면 응급코드를 발송한다. 두 가지 시스템 모두 UAV내의 통신시스템과는 별도의 송신기를 탑재하여 GPS 위치정보를 송출한다. 이러한 추가적인 송신기 탑재는 UAV의 SWaP(Size, Weight and Power)문제로 인해 지속적이고 효율적인 UAV운용을

저해한다. 그리고 우리나라 면적의 70%는 산악지형이다. 상공에서 작전 운용중인 UAV가 추락하면 산지에 추락할 확률이 높다. 산지에 추락한 UAV의 위치정보는 굴절, 산란, 회절, 반사, 손실 등 여러 요인으로 인해 오차가 발생하여 위치정보의 신뢰성이 떨어진다. 그러므로 추락 UAV가 지상통제소에게 추락여부와 위치정보를 전송하기 위해서는 산악지형의 BLoS(Beyond Line of Sight), NLoS(None-Line of Sight) 상황을 극복하는 것이 중요하다. 현재 UAV 추락 시 위치 판별 및 탐지기술의 대부분은 GPS 위치정보를 사용하고 있다. 따라서 작전 운용중인 UAV가 추락한다면 GPS 위치정보를 이용하지 않고 지형적인 제약을 극복하여 위치를 탐지하는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 전장 환경에서 운용되고 있는 UAV가 추락하여 특정 신호를 송출할 때 지상통제소(Ground Control Station)에서 공중통신 중계기를 출동시켜 신속하게 추락 UAV의 위치를 탐지하는 모델을 제안한다. UAV의 SWaP 문제를 해결하기 위해 공중통신 중계기 내에 추가적인 부품을 탑재하지 않고 내부의 통신링크를 사용한다. 공중통신 중계기는 추락 UAV로부터 받은 신호를 별도의 처리 없이 그대로 지상통제소로 전달하며 선회비행을 통해 산악지형의 BLoS와 NLoS를 극복한다. 추락 UAV의 위치가 고정되어 신호를 송출하기 때문에 공중통신 중계기 1기를 가지고 TDOA 계산이 가능하다. 지상통제소에서 공중통신 중계기를 추락 UAV의 추정위치로 이동시킴으로서 송수신기간의 거리로 발생하는 오차 값을 줄인다. 제안하는 모델의 성능을 분석하기 위해 육군 대대의 전장 환경을 고려하여 모의실험 환경을 구축하였으며 공중통신 중계기의 제원은 육군의 송골매 무인기를 사용하였다. 모의실험을 통해 제안하는 모델을 사용하면 GPS 위치정보를 사용하지 않고도 전장에서 추락 UAV의 위치 탐지 가능성을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서 UAV 추락 시 위치 탐지하는 관련 기술들을 소개하고 UAV를 활용한 TDOA 측위 기법의 제한사항에 대해 설명한다. 3장에서 시스템 모델과 순서도를 통하여 어떻게 추락 UAV의 위치를 탐지 하는지에 대해 설명한다. 4장에서 육군 대대의 전장 환경을 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현하여 현재 사용하는 송골매의 제원으로 모의환경에 적합한 송골매 운용 방안을 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관련연구

2.1 ADS-B 시스템

ADS-B 시스템은 증가하는 항공기 및 무인기들의 충돌을 방지하고 공중 전체의 원활한 관제 기능을 향상시키기 위해 국제민간항공기구에서 제안한 기술이다. ADS-B 송신기를 부착한 기체는 1,090 MHz 전송 링크를 사용하여 기체의 고도, 속도, 위치 등과 같은 비행 정보들을 0.5 ~ 1초 사이의 주기를 가지고 실시간으로 자신의 정보를 방송한다. 방송된 신호는 지상 통제소나 다른 기체들의 ADS-B 수신기로 전달된다. 지상통제소는 수신되는 신호를 판별하고 다른 기체들과 정보를 공유하여 원활한 공역통제와 기체간의 충돌을 방지한다.

ADS-B 시스템은 추락 전용 응급코드 메시지는 존재하지 않는다. 다만 응급코드 메시지를 통해 추락 유무를 판별할 수 있다. 송신기가 부착된 UAV의 위치 정보가 장시간 같은 자리에 위치하여 연료부족 메시지를 송출하는 경우다. 이때 ADS-B를 탑재한 기체의 위치정보는 GPS 신호를 기반으로 위치를 판별한다. 그러므로 전장에서 ADS-B 시스템은 GPS 위치정보에 의존적이며 전장에서 GPS 공격에 의한 신호 변조 및 전파 방해에 취약하다. 또한 기체에 ADS-B 송신기를 별도로 부착해야 하는 단점이 있다.

2.2 Emergency Radio Beacon 시스템

Beacon신호는 상공에 비행중인 기체가 추락, 조난되었을 때 406 MHz 주파수 대역을 사용하여 전달되는 응급신호다. UAV와 같이 사람이 타지 않는 기체는 지상의 장애물을 탐지해야 하고 기체가 착륙하였을 때 안전착륙인지 불시착인지 기체 내부에 설치된 프로세서를 통해 판별한다. 추락한 UAV는 제어를 통해 긴급신호를 제외한 UAV내의 전력을 최대한 감축시키고 조난신호를 일정하게 송출한다.

Beacon신호를 송출하는 기체도 GPS 위치정보에 의존한다. GPS 신호가 불안정하거나 GPS를 사용할 수 없는 지역에서는 위치 탐지하기가 어렵다. 또한 Beacon프로세서를 UAV내에 탑재해야하고 UAV가 산악지형에 추락하게 되었을 때 신호를 송신하는 동안 가시선 미확보로 발생하는 전파 문제를 극복하기 어렵다.

2.3 참조노드를 활용한 TDOA 측위 기법

전장에서 국지적으로 재밍(jamming)공격이 발생될 때 위성항법 시스템을 대체하기 위해 소수의 참조노

드(UAV)를 활용하여 수신기가 위치 탐지하는 기법이 제안되었다⁶⁾. 전장 환경에서 위성항법시스템의 신호가 불안정하거나 사용할 수 없다고 판단되었을 때, 다수의 UAV를 해당 지역에 전개하여 신속하게 측위 서비스를 제공하는 기법이다.

3차원 환경에서 UAV를 사용하여 측위를 하려면 최소 4기 이상의 UAV가 필요하다. 다수의 UAV가 전개된 상황에서 UAV의 메시지를 수신한 UAV가 위치 계산을 하려면, TDOA 알고리즘 연산을 수행해야 한다. UAV의 SWaP 문제로 인해 잦은 위치 계산은 UAV 운용능력을 감소시킨다. 또한 UAV의 계산 결과 값은 UAV간의 위치, UAV간의 시간동기에 영향을 받는다. 왜냐하면 추정위치의 정확도는 UAV의 기하학적인 배치와 시간동기, TDOA 계산자의 성능이 주된 요인이기 때문이다. 그러므로 효율적인 위치추정을 위해서는 UAV를 위치 정확도가 높은 지점에 실시간으로 위치시켜야 한다. 결과적으로 전장 환경에서 UAV가 계산하는 것은 비효율적이며 계산 정확도 측면에서 오차가 크다.

III. 제안 운용 모델

3.1 시스템 모델

UAV가 추락하여 위치가 고정된 상태에서 일정한 주기로 신호를 송출할 때, 1기의 공중통신 중계기가 이동하며 추락한 UAV의 신호를 수신하면 다수의 UAV가 수신하는 효과를 얻을 수 있다. 예를 들어 추락한 UAV가 1초 주기의 신호를 송신할 때, 1기의 공중통신 중계기가 180km/h의 속도로 1km의 선회반경으로 원형 비행하는데 약 125초 소요되며 이때 수신한 신호 프레임은 총 125개가 된다. 추락 UAV의 신호는 공중통신 중계기에 탑재되는 통신시스템을 이용하여 지상통제소로 중계한다⁷⁾. 지상통제소에서 중계로 수신한 추락 UAV의 신호를 TDOA로 계산하여 UAV의 SWaP 문제를 극복할 수 있다. 중계된 신호를 지상통제소에서 위치 계산을 하더라도 성능이 크게 떨어지지 않는다⁸⁾. 또한 추락 UAV가 산지에 추락하여 위치정보가 부정확하더라도 효율적으로 공중통신 중계기의 위치를 이동시켜 산악지형의 NLoS와 BLoS를 극복할 수 있다. UAV 운용을 위해서는 UAV를 직접적으로 조종하는 지상통제소, 지상통제소와 실시간으로 통신하며 비행하는 UAV로 구성된다. UAV는 필수적으로 지상통제소로부터 제어링크로 비행통제를 받으며 데이터링크를 통해 실시간으로 상황정보를 공유한다.

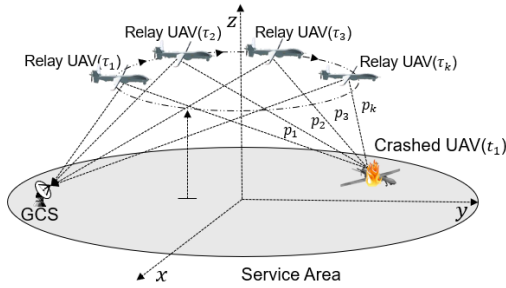


그림 1. 공중통신 중계기를 이용한 추락 UAV 위치탐지 구조
Fig. 1. Structure for locating the crashed UAV as using airborne communication relay UAV

그림 1은 제안하는 운용 모델의 시스템 모델로서 GPS 위치정보가 불안정한 지역에서 UAV가 추락하여 데이터링크 송신부가 이상 없이 주기적인 신호를 송출할 때, 공중통신 중계기가 송출된 신호를 지상통제소로 중계하여 지상통제소에서 추락 UAV의 신호를 수신하는 2-hop 통신 구조를 나타낸다. 지상통제소에서 작전 운용중인 UAV가 추락하여 데이터링크가 끊기면 지상통제소는 UAV가 추락했다고 인지하고 공중통신 중계기를 출동시킨다.

3.2 공중통신 중계기 운용 절차

제안하는 운용 모델에서는 지상통제소가 추락 UAV의 신호를 수신함에 따라 수행하는 절차를 단계별로 구성되며 그림 2와 같이 순서도로 표현된다.

3.2.1 추락 UAV 위치 추정

사전에 공중통신 중계기는 송수신기와 자체항법장치(GPS, INS)를 탑재한다. 공중통신 중계기가 상공에 비행하며 수신된 신호를 사용하여 추락 UAV의 위치 계산을 하면 공중통신 중계기가 단위 시간당 이동한 거리만큼 시간이 상쇄되는 도플러 효과로 인해 위치 오차가 발생한다. 그러므로 추락 UAV의 위치계산은 지상통제소에서 수행한다. 공중통신 중계기는 별도의 처리과정 없이 추락 UAV의 신호와 자신의 위치를 지상통제소로 실시간 전송하고, 지상통제소는 공중통신 중계기로부터 전달받은 추락 UAV의 신호와 공중통신 중계기의 위치를 이용하여 TDOA로 추락 UAV의 위치를 계산한다. 3차원 환경에서 TDOA 계산을 하려면 최소 4개의 신호를 수신하여야 계산이 가능하다. 그러므로 지상통제소는 공중통신 중계기가 최소 4개 이상의 다른 위치에서 송신한 신호를 수신하여 추락 UAV의 위치계산이 가능하다. 표 1은 본 논문에서 사용하는 기호와 그 의미를 나타낸다.

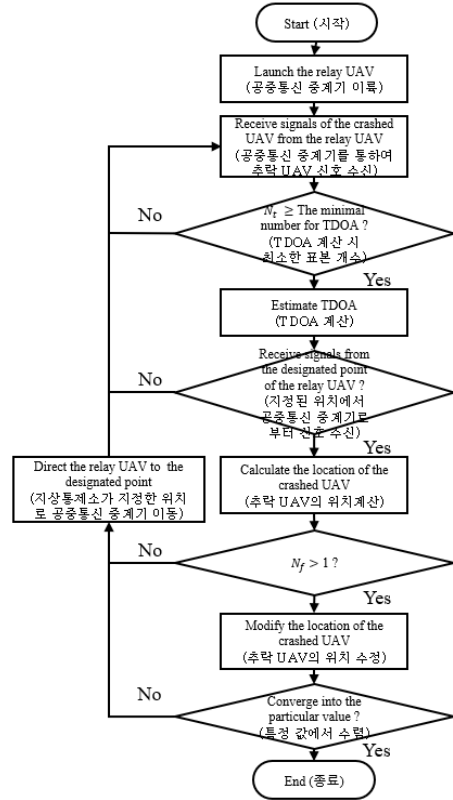


그림 2. 제안모델의 순서도
Fig. 2. Flowchart of Proposed Model

표 1. 기호 및 의미
Table 1. Symbols and meaning

| Symbol | Meaning |
|--------------|--|
| N_t | Number of samples for estimating TDOA (TDOA 계산 시 표본 개수) |
| N_f | Number of relay UAV flight (공중통신 중계기의 비행 횟수) |
| p_i | Pseudo range between relay UAV and crashed UAV (공중통신 중계기와 추락 UAV간의 의사거리) |
| p_l | Distance between relay UAV and GCS (지상통제소와 공중통신 중계기간의 거리) |
| p_j | Sample mean of pseudo ranges (의사거리들의 평균) |
| t_i | Transmission time of crashed UAV (추락 UAV의 송신 시간) |
| τ_i | Received time at GCS (지상통제소 수신 시간) |
| ϵ_i | Total errors arisen by transmission (전파간 발생한 오류) |

| Symbol | Meaning |
|-----------------------------|---|
| c | Speed of light (빛의 속도) |
| $\underline{R}_{U(\tau_i)}$ | Position vector of relay UAV at τ_i (공중통신 중계기가 τ_i 위치에서의 위치벡터) |
| \underline{R}_{t_i} | Position vector of crashed UAV at t_i (추락 UAV가 t_i 위치에서의 위치벡터) |
| $\hat{\underline{R}}_{t_i}$ | Estimated position of crashed UAV (추락 UAV의 추정위치) |

그림 3은 공중통신 중계기가 중계한 추락 UAV의 신호가 지상통제소에 도착한 시점을 나타낸다. 추락 UAV가 송신한 시각을 t_i 라고 할 때에 지상통제소에서 수신한 시간은 τ_i 로 표현된다. 이때 식 (1)과 같이 추락 UAV와 지상통제소간의 의사거리 p_i 를 나타낼 수 있다. 의사거리 p_i 에서 지상통제소가 공중통신 중계기의 위치정보를 실시간으로 수신하기 때문에 지상통제소와 공중통신 중계기간의 거리 p_i 은 감소한다.

$$p_i = (c \times (\tau_i - t_i) + \epsilon_i) - p_l \quad (1)$$

식 (1)에서 c 는 빛의 속도를 의미하며 ϵ_i 는 전파 송신시간동안 생겨나는 오차를 의미한다. 계산한 의사거리를 유클리드 공간의 3차원의 직교좌표계에서 위치벡터로 표현하면 식 (2)와 같이 지상통제소와 추락 UAV간의 거리 차를 구할 수 있다. ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

$$\begin{aligned} \rho_i &= \| \underline{R}_{U(\tau_i)} - \underline{R}_{t_i} \| \\ &= \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 $\| \cdot \|$ 는 유클리드 공간의 노름벡터를 의미하며 $\underline{R}_{U(\tau_i)}$ 는 공중통신 중계기의 위치벡터, \underline{R}_{t_i} 는 추락한 UAV의 위치벡터를 의미한다. 공중통신 중계기가 첫 번째 위치에서 n 번째 위치까지 이동하는 동안 지상통제소는 수신한 신호를 비선형 최소제곱법 (LSM, Least Squares Method)으로 식 (3)과 같이 표

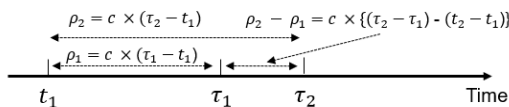


그림 3. 추락 UAV의 신호 차
Fig. 3. Difference between signals of the crashed UAV

현할 수 있다⁹⁾. 이를 이용하여 식 (4)와 같이 지상통제소에서 추락 UAV의 신호와 공중통신 중계기의 위치정보를 이용하여 추락 UAV의 추정위치 $\hat{\underline{R}}_{t_i}$ ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$)를 계산한다.

$$\begin{aligned} \underline{H} &= \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 \end{bmatrix}, \quad \hat{\underline{R}}_{t_i} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix}, \\ \underline{Z} &= \begin{bmatrix} \rho_1^2 - \rho_2^2 + x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ \rho_1^2 - \rho_3^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ \vdots \\ \rho_1^2 - \rho_n^2 + x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\hat{\underline{R}}_{t_i} = \frac{1}{2} (\underline{H}^T \underline{H})^{-1} \underline{H}^T \underline{Z} \quad (4)$$

3.2.2 공중통신 중계기 이동 및 추정위치 수정

TDOA가 계산할 수 있는 신호의 요구량이 충족될 시점부터 지상통제소는 수신된 신호들을 TDOA로 계산하여 추락 UAV의 위치를 추정한다. 지상통제소에서 TDOA로 계산 하는 것과 상관없이 공중통신 중계기는 지상통제소에서 정해진 경로를 지상통제소 상공에서 원형비행 한다. 공중통신 중계기는 지상통제소에서 지정한 경로를 원형비행 하여 원점으로 도착한다. 공중통신 중계기가 비행하는 동안 지상통제소에서 계산된 추락 UAV의 추정위치는 순차적으로 누적된다. 지상통제소는 공중통신 중계기가 원점에 도착할시 누적된 추락 UAV의 추정위치들의 평균 의사거리를 계산한다.

$$p_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (c \times (\tau_k - t_k) + \| \underline{R}_{U(\tau_k)} - \underline{R}_{t_k} \|) \quad (5)$$

식 (5)는 공중통신 중계기가 지정된 경로를 비행하는 동안 지상통제소에서 계산된 추정위치들의 평균 의사거리를 나타낸다. p_j 는 공중통신 중계기가 k 번째 위치로까지 이동하는 동안 계산된 평균 의사거리이며 t_k 와 τ_k 는 k 번째에 추락 UAV가 송신한 시각과 이때 지상통제소에서 수신한 시간을 나타낸다. $\| \underline{R}_{U(\tau_k)} - \underline{R}_{t_k} \|$ 는 k 번째에서 추정된 공중통신 중계기와 추락 UAV사이의 거리를 의미한다.

식 (6)은 지상통제소에서 지정한 경로를 공중통신 중계기가 비행하여 계산된 추락 UAV의 추정위치가

며 (x, y, z) 좌표로 나타난다.

$$P_{j(x,y,z)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x, y, z) \quad (6)$$

지상통제소는 공중통신 중계기와 추락 UAV간의 거리를 기준으로 추정된 추락 UAV 위치 방향으로 다음 비행지점을 지정해준다. 공중통신 중계기는 추락 UAV의 추정위치를 근거로 다음 경로를 비행하며 지상통제소는 동일한 제안방법으로 추락 UAV의 추정 위치를 계산하고 계산된 값을 수정해 나간다. 지상통제소는 공중통신 중계기를 점진적으로 이동시켜 공중통신 중계기와 추락 UAV의 거리를 줄인다. 최종적으로 추락 UAV의 추정위치는 공중통신 중계기와 추락 UAV간의 거리에 따라 특정 값으로 수렴된다. 추정위치는 일정거리에 도달하면 변경되지 않는다. 지상통제소는 추정위치가 수렴되는 지점에서 공중통신 중계기를 복귀시킨다.

IV. 모의실험

4.1 모의실험 환경

모의실험은 임의의 육군 보병대대의 전장 환경을 설정하였다. 공중통신 중계기는 현재 육군에서 사용하고 있는 송골매(RQ-101) 무인기 플랫폼을 사용하였다. 의사거리 추정 시 발생하는 오차 요인은 다중경로 오차를 고려하였으며 SatNav toolbox를 사용하였다. 추락 UAV의 추정위치는 송골매를 10,000번 비행시켜 계산되는 평균값을 사용하였다.

그림 4와 같이 모의실험 범위는 가로, 세로 10km로 설정하여 컴퓨터 시뮬레이션에 구축하였다. 지상통

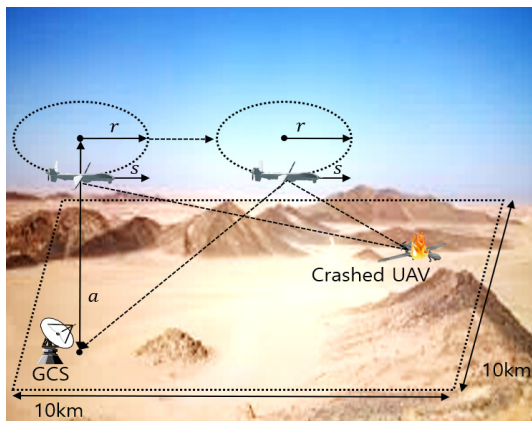


그림 4. 전장 환경 모델
Fig. 4. Battlefield Model

제소와 추락 UAV간의 거리는 전장 환경에서 가장 먼 좌표지점 (0, 0), (10000, 10000)에 위치시켜 송골매의 성능을 분석하였다. 추락 UAV는 (10000, 10000) 지점에 위치하며 주기적으로 신호를 송출하도록 설정하였다. 지상통제소는 (0, 0)지점에 위치시켜 최초 송골매가 지상통제소 상공을 기준으로 원형 비행하며 추락 UAV의 위치를 계산한다. 추정위치 방향으로 1km 지점마다 원형 비행하며 추정위치를 수정하며 이동하도록 설정했다.

송골매의 운용 변수는 표 2와 같다. 송골매의 운용 능력에 따라 평균 속도(140km/h), 최고 속도(180km/h), 최고 운용고도(4.5km)를 참고하여 변수를 설정하였다. 선회반경은 작전환경을 고려하여 송골매의 비행 운용범위가 전장 환경의 절반이 넘지 않는 2km로 설정하였다. 추락 UAV의 신호주기는 어떤 송신기를 쓰는지에 따라 다르게 나타날 것이다. 대표적으로 상용에서 쓰이는 ADS-B(1s), 펄스신호로 감지되는 감시레이더 (SSR)의 갱신주기(4s), 연합 작전에 사용되는 Link-16 (12s)을 기준으로 송신 주기를 정하였다.

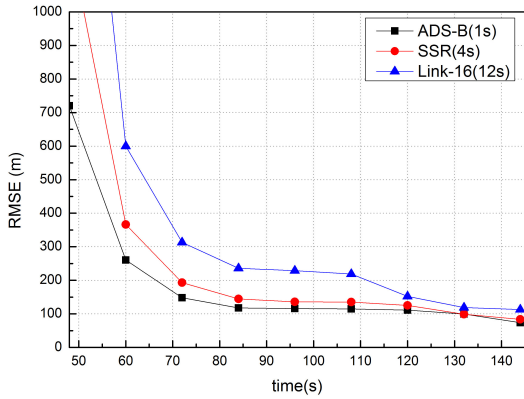
표 2. 송골매(RQ-101) 운용 변수
Table 2. RQ-101 Application parameters

| Parameters (변수) | Values (값) |
|----------------------------------|-------------------|
| Range of Area (범위) | 10 X 10 (km) |
| Speed of UAV (송골매 속도) | 140, 180 (km/h) |
| Altitude of UAV (송골매 고도) | 1, 2, 3, 4.5 (km) |
| Turning radius of UAV (송골매 선회반경) | 1, 1.5, 2 (km) |
| Signal intervals (신호 주기) | 1, 4, 12 (s) |

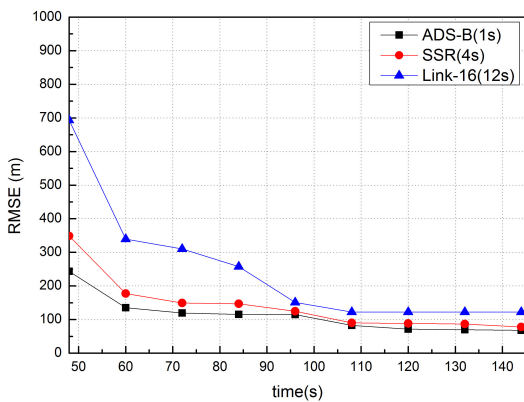
4.2 모의실험 결과

그림 5는 모의실험 환경에서 지상통제소와 추락 UAV는 가장 먼 지점에 각각 위치하여 추락 UAV의 송신 주기와 송골매의 속력에 따른 RMSE(Root Mean Square Estimation)를 비교한 그래프이다.

실험 결과 추락 UAV의 신호 전송 주기가 빠를수록 RMSE가 낮게 나타난다. ADS-B와 SSR은 Link-16에 비해 상대적으로 신호의 프레임 개수가 12, 3의 배수로 증가한다. 그리고 ADS-B와 SSR은 Link-16보다 추정위치의 RMSE가 100m 지점에 일찍 수렴한다. 왜냐하면 TDOA는 계산하고자 하는 값이



(a) 송골매 속도 : 140km/h (Altitude=1km, Radius=1km)

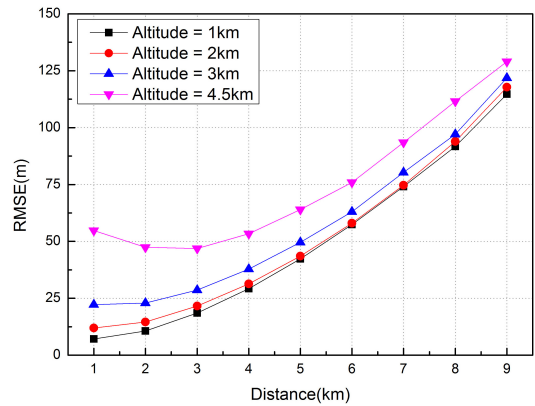


(b) 송골매 속도 : 180km/h (Altitude=1km, Radius=1km)

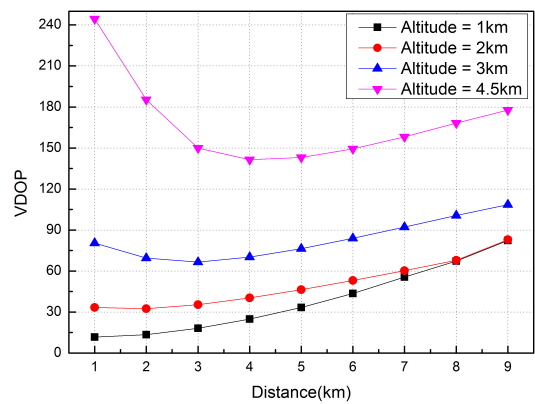
그림 5. 송골매 속력에 따른 RMSE 비교
Fig. 5. Comparison of RMSE according to speed of RQ-101

많아질수록 예측 오차 값이 감소하기 때문이다. 또한 송골매가 고속력으로 비행하는 것이 효과적이다. 왜냐하면 RMSE는 송골매의 기하학적인 배치가 영향을 끼치는데, 송신 주기가 같을 때에 최고속력의 송골매가 평균속력의 송골매보다 상공에 배치되는 간격이 넓기 때문이다.

그림 6은 그림 5에서 확인된 송골매의 최고속력인 180km/h로 설정하여 제안하는 운용모델을 적용하였을 때 송골매의 고도 변화에 따라 나타나는 위치 오차를 나타낸다. UAV가 추락하게 되면 신호의 송신 주기는 지상통제소에서 설정할 수 없기 때문에 주기가 가장 긴 Link-16(12s) 신호를 보낸다고 가정했다. 송골매의 고도는 1km의 저고도에서 최고 운용 고도인 4.5km로 설정하여 각 운용 모델마다 추정위치로 이동하였을 때, 송골매의 고도 변화가 위치 오차에 어떤 영향을 끼치는지에 대해 비교하였다. 그래프에서 x축의 단위는 송골매의 비행 중심점과 추락 UAV의 추정



(a) RMSE measurement
(Speed=180km/h, Intervals=12s, Radius=1km)



(b) VDOP measurement
(Speed=180km/h, Intervals=12s, Radius=1km)

그림 6. 송골매의 고도 변화에 따른 오차 비교
Fig. 6. Comparison of estimation according to altitude of RQ-101

위치간의 거리이다.

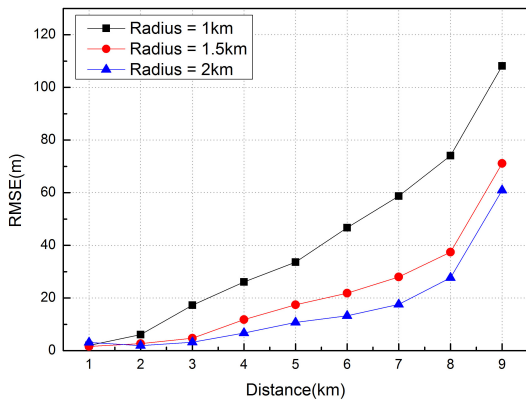
RMSE와 더불어 고도 변화에 따른 오차 비교를 위해 DOP(Dilution of Precision)를 사용하였다. DOP는 수신기의 기하학적인 배치에 따라 결정되는 오차 계수를 나타낸다^[10]. 본 그래프에서 송골매는 비행경로가 같고 고도만 다르기 때문에 3차원 평면상에서 x, y 축은 고정되고 z축만 변경된다. 그러므로 DOP에서 z축을 의미하는 수직오차 VDOP(Vertical Dilution of Precision)를 오차 비교에 사용하였다.

실험 결과 송골매가 저고도로 비행하는 것이 RMSE와 VDOP가 낮게 나타난다. 왜냐하면 송골매와 추락 UAV간의 거리가 멀어질수록 TDOA 계산과정에서 오차 값도 커져 결과적으로 오차의 평균값이 높아지고 오차 편차 또한 높아지기 때문이다. 고도가 높은 송골매는 추락 UAV의 추정위치와의 거리가 운

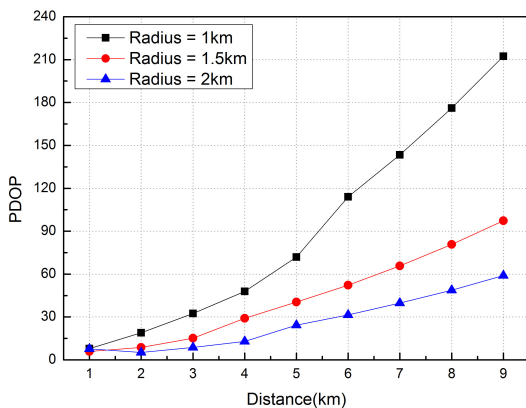
용고도보다 낮아지면 오차 평균값이 높아진다. 따라서 운용고도가 4.5km로 설정되어 비행하는 송골매는 추정위치와의 거리가 2km, 3km 부근에서 RMSE와 VDOP가 상승하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 그림 6과 같이 최고속력의 송골매가 12초 주기의 신호를 사용하여 제안하는 운용모델을 적용할 때, 송골매의 선회반경 변화로 나타나는 오차 값을 비교하기 위한 그래프이다. 선회반경은 좌우 경로가 서로 다르기 때문에 3차원 평면상에 (x, y, z) 위치오차를 나타내는 PDOP(Position Dilution of Precision)를 사용하여 오차를 비교하였다.

실험 결과 송골매의 선회반경이 높을수록 RMSE와 PDOP가 더 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 왜냐하면 선회반경이 높을수록 상공에서 송골매가 배치되는 간격이 넓기 때문에 RMSE와 PDOP값이 낮게 나타난다.



(a) RMSE measurement (Speed=180km/h, Intervals=12s, Altitude=1km)



(b) PDOP measurement (Speed=180km/h, Intervals=12s, Altitude=1km)

그림 7. 송골매의 선회반경 변화에 따른 오차 비교
Fig. 7. Comparison of estimation according to turning radius of RQ-101

다. 하지만 선회반경이 높은 송골매는 RMSE 감소대 비 비행시간은 선형적으로 늘어난다. 또한 선회반경이 2km로 비행하는 송골매는 추락 UAV의 추정위치와의 거리가 1km인 지점에서 RMSE가 3m로 나타나며 선회반경이 상대적으로 낮은 송골매들보다 RMSE와 PDOP가 높게 나타난다. 이는 송골매의 선회반경이 송골매와 추락 UAV간의 거리보다 길면 추락 UAV의 오차 평균값과 오차 편차가 높아지기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 GPS가 불안정한 지역에서 UAV가 추락하여 주기적인 신호를 송출할 때, 공중통신 중계기를 통하여 지상통제소에서 추락한 UAV의 신호를 중계 받아 신속하게 추락 UAV의 추정위치를 찾는 공중통신 중계기의 운용 모델을 제안하였다.

제안하는 운용 모델에서는 UAV가 추락하여 주기적인 신호를 송출할 때, 공중통신 중계기가 송출된 신호를 지상통제소로 중계하여 지상통제소에서 추락 UAV의 신호를 수신하는 2-hop 통신 구조이다. 공중통신 중계기는 내부 통신링크를 사용하여 중계한다. 지상통제소에서 중계된 추락 UAV의 신호를 계산하여 위치를 추정함에 따라, 공중통신 중계기의 내부 연산을 위해 추가 장비를 탑재할 필요가 없어 UAV의 SWaP 제한사항을 극복할 수 있다.

전장에서 UAV가 추락하여 신호를 송신하게 되면 GPS 공격으로 신호가 변조될 가능성이 있다. 그러므로 위치정보가 수신된다 하더라도 GPS 신뢰성이 보장되기가 어렵다. 또한 산악지형에 추락하면 BLoS, NLoS로 인해 직접 송신이 불가능하거나 전파송신 시 생겨나는 오차로 인해 부정확한 신호가 수신될 수도 있다. 제안하는 운용 모델을 사용하면 추락 UAV의 송신신호를 계산하기 때문에 GPS 정보를 사용하지 않고 추락 UAV의 추정위치를 찾을 수 있다. 모의실험을 통하여 육군 대대의 전장 환경에서 송골매가 최고 속력으로 저고도, 넓은 선회반경으로 비행하는 것이 RMSE와 DOP가 낮게 나타남을 확인하였다. 제안하는 모델을 적용하여 송골매의 원형비행 중심점과 추락 UAV의 추정위치간의 거리가 1km 지점에서 위치를 추정하였을 때 추락 UAV의 실제위치와 추정위치의 오차가 2m 지점으로 수렴했다. 이는 GPS 위치 정보를 사용하는 것이 제한되는 실제 전장에서 제안하는 운용모델의 활용가능성을 보여주었다.

References

[1] Y. Zeng, et al., "Wireless communication with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May 2016.

[2] D. Erdos, et al., "An experimental UAV system for search and rescue challenge," *IEEE Aerospace and Electron. Syst. Mag.*, vol. 28, no. 5, pp. 32-37, Feb. 2018.

[3] D. He, et al., "Communication security of unmanned aerial vehicles," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 4, pp. 134-139, Aug. 2017.

[4] D. Hempe, "Airworthiness approval of automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) out systems," *Advisory Circular*, no. 20-165B, pp. 1-113, 2010.

[5] J. M. Martinez-Heredia, et al., "Development of an emergency radio beacon for small unmanned aerial vehicles," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 21570-21581, Apr. 2018.

[6] D. Kim, K. Lee, M. Park, and J. Lim, "UAV-baerd localization scheme for battlefiled environments," *IEEE Milcom*, pp. 562-567, San Diego, CA, USA, Feb. 2013.

[7] B. Li, et al., "Development and testing of a Two-UAV communication relay system," *Sensors*, vol. 16, no. 10, pp. 1696, Jul. 2017.

[8] M. O. Hasna and M-S. Alouini, "A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 6, pp. 1963-1968, Nov. 2004.

[9] H. Jee, J. Lee, and J. Lim, "Optimal airborne relay point selection scheme for battlefields using single UAV," *J. KICS*, vol. 43, no. 6, pp. 1028-1036, Jun. 2018.

[10] R. B. Langley, "Dilution of precision," *GPS world*, vol. 10, no. 5, pp. 52-59, Oct. 1999.

오 동 한 (Donghan Oh)



2015년 2월 : 육군3사관학교 정
보공학 학사
2018년 3월~현재 : 아주대학교
NCW학과 석사과정
<관심분야> 항법 및 측위, 국
방전술통신
[ORCID:0000-0002-8885-5323]

이 종 관 (Jongkwan Lee)



2000년 3월 : 육군사관학교 전
자공학 학사
2004년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과 석사
2014년 2월 : 아주대학교 NCW
학과 박사
2017년 12월~현재 : 육군사관학
교 컴퓨터과학과 조교수

<관심분야> 사이버전, 국방전술통신, Dynamic
TDMA
[ORCID:0000-0003-2195-2417]

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자
공학 학사
1985년 2월 : KAIST 영상통신
석사
1994년 2월 : KAIST 디지털통
신 박사
1998년 3월~현재 : 아주대학교
소프트웨어학과 정교수

2004년 3월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연
구센터장
<관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방
전술통신
[ORCID:0000-0003-0080-9398]

김 경 우 (Kyungwoo Kim)



2000년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 학사

2002년 2월 : 경북대학교 전자
전기컴퓨터공학과 석사

2005년 5월 : M.S. Electrical
and Computer Engineering,
University of Florida, FL,
USA

2012년 5월 : Ph.D. Electrical and Computer
Engineering, University of Florida, FL, USA

2012년 5월~2013년 8월 : Post Doctor Researcher,
Electrical and Computer Engineering, University
of Florida, FL, USA

2013년 9월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원
<관심분야> 전술정보통신, 전술무전기, 무선신호처
리, Stochastic Data Analysis