

## 불법드론 탐지를 위한 PSO 기반 군집드론 최적화 정찰궤적계획

# Optimal Surveillance Trajectory Planning for Illegal UAV Detection for Group UAV using Particle Swarm Optimization

임원호<sup>1</sup> · 정형찬<sup>1</sup> · 호등<sup>2</sup> · 아람기르<sup>2</sup> · 장경희<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 항공산업시스템공학과

<sup>2</sup>인하대학교 전자공학과

WonHo Lim<sup>1</sup> · HyoungChan Jeong<sup>1</sup> · Teng Hu<sup>2</sup> · Alamgir<sup>2</sup> · KyungHi Chang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Aviation Industry and System Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

<sup>2</sup>Department of Electronic Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

### [요 약]

드론기술은 민수용과 군사용 양 분야에서 전도유망한 기술이나, 규정과 관련법의 미성숙으로 불법드론이 오남용 되고, 사회 안전에 심각한 위협이 되고 있다. 본고에서는 PSO (particle swarm optimization)에 기반을 둔 군집드론 궤적계획기를 개발하여, 군집정찰드론들에게 최적화된 3차원 궤적탐지기술을 제공한다. 나아가서, 에너지소비도, 비행위험도 및 SAP (surveillance area priority)와 부합하는 군집 목적물 최적화 함수를 제시하고 평가한다. 군집 비행 시뮬레이션 결과는, 제안한 궤적계획기로 생성한 궤적은 에너지 소비도 및 비행위험도를 최소화 하며 탐색한다는 것을 입증해준다.

### [Abstract]

The use of unmanned aerial vehicle (UAV) have been regarded as a promising technique in both military and civilian applications. Nevertheless, due to the lack of relevant and regulations and laws, the misuse of illegal drones poses a serious threat to social security. In this paper, aiming at deriving the three-dimension optimal surveillance trajectories for group monitoring drones, we develop a group trajectory planner based on the particle swarm optimization and updating mechanism. Together, to evaluate the trajectories generated by proposed trajectory planner, we propose a group-objectives fitness function in accordance with energy consumption, flight risk. The simulation results validate that the group trajectories generated by proposed trajectory planner can preferentially visit important areas while obtaining low energy consumption and minimum flying risk value in various practical situations.

**Key word** : 3D path planning, Particle swarm optimization, Group unmanned aerial vehicles, Group trajectory planner.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.5.382>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 29 September 2020; Revised 6 October 2020

Accepted (Publication) 23 October 2020 (30 October 2020)

\*Corresponding Author; KyungHi Chang

Tel: +82-32-860-8422

E-mail: khchang@inha.ac.kr

## I. 서론

드론은 원격감시, 데이터수집, 드론 간 통신, 재난감시 등 군사 사용과 민수용 양 분야에서 점점 더 중요하게 되었으나, 법과 규정의 미비, 드론의 오남용으로 공공안전에 심각한 위협을 주고 있다 [1]-[4]. 불법드론을 막아내는 안티드론 기술은 운영 지역 내에서 불법드론을 탐지하도록 정찰드론을 비행시키는 항행기술이다. 정찰드론은 한정된 추진지동력을 쓰기 때문에, 가용한 감시궤적은 물리적인 제약을 고려하여 설계해야 한다. 드론의 기본요소로서 자율비행 모드에 필수적인 드론궤적계획 문제는 그동안 많은 연구가 있었으며, 출발지에서 목적지까지 가용한 경로를 찾는 것을 최적화 문제로 표현 할 수 있다. 최적의 궤적은 에너지 소비, 경로길이 등의 인덱스를 최대화하거나 최소화 하는 경로에 관계가 있다. 최적화 된 경로를 제공하기 위해서 그동안 많은 연구자들이 다수의 궤적계획기를 제안해왔다.

T. Turke 등은 SA (simulated annealing) 알고리즘 기반의 경로계획기를 제안했으나, 2D레이더에 한정된 환경에서 근사 최적화 경로를 얻는 것이다 [5]. S. J. Yoo 등은 A\* 알고리즘을 적용했으나, 이 또한 WSN (wireless sensor network) 무선네트워크 환경 하에서 감지정보를 기반으로 최적의 드론궤적을 제공하는 것이다 [6]. 그러나 이러한 제안들은 2D환경에 적용력을 갖는 것으로서, 더 많은 제약사항이 있는 3D공간에는 적용하기 곤란하다. 3D 궤적계획에는, D\* 알고리즘, RRT (rapidly-exploring random tree) 알고리즘, evolutionary 알고리즘 등을 사용한다 [7] - [9]. 궤적문제에 최적의 해법을 찾는 것은 NPT (nondeterministic polynomial time complete) 이고, EA (evolutionary algorithm) 알고리즘은 매우 복잡한 3D궤적계획 문제를 다루는데 장점을 갖는다 [10]. X. H. Li 등이 제한한 VND(variable neighborhood descend)는 다중 농업용 드론을 위한 enhanced genetic-PSO에 기반을 둔 궤적계획기이나, 최적화 인덱스는 운영시간과 경로길이로서 제한적이다 [11].

본고의 목적은 불법드론의 존재를 감지하기 위해서 활동하는 군집 정찰드론들에게 어떤 운영지역을 감시하는 동안 최적의 탐지궤적을 제공하는 것으로, PSO와 SAP (surveillance area priority)에 기반을 둔 궤적계획기를 제안한다. 더불어, 3D환경에 궤적계획기를 확장 적용하며, 제한한 적합성 함수와 일치하는 최적의 궤적을 얻는다. 궤적계획기를 사용한 군집 목적물 적합성 함수는 모든 가능한 궤적으로부터 에너지소비 뿐만 아니라 드론의 기동성, 비행위험도 등의 비용결정요소를 갖고, 그러한 함수들은 드론 궤적계획에서 기존의 수많은 접근법과 차별화한다. 이 논문의 나머지 장은 다음과 같다. 2장에서는 문제점을 지형과 궤적표현으로 설명한다. 3장에서는 궤적최적화를 위한 군집 목적물 적합성 함수를 소개하고, 4장에서는 제한한 군집 궤적계획기를 소개한다. 5장에서는, 군집 궤적계획기의 성능 분석과 시뮬레이션 결과를 그림으로 보여주며, 최종적으로 6 장에서는 유의미한 결론을 제공한다.

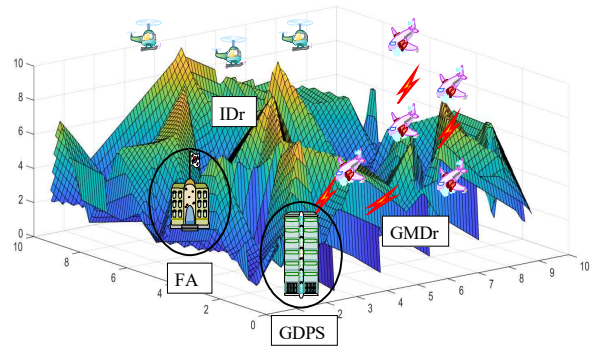


그림 1. 운영 시나리오  
Fig. 1. Operation scenario.

## II. 시스템모델과 문제점 공식화

### 2-1 문제점 도출

Fig. 1.처럼, 군집 정찰드론들은 감시영역 전체를 감시하여 불법드론을 탐지하며, 탐색하는 동안에 비행금지영역에 들어 가지 않도록 조건을 명시한다. 적대적 드론으로 간주되어 파괴되지 않도록, 정찰드론은 드론감시 지상시스템인 GBDS (ground-based detection system) 지역에 접근할 수 없도록 한다. 드론-지상 링크나 ad-hoc방법으로 군집정찰 드론들끼리 통신 환경을 갖는다고 가정하며, 정찰드론들은 비행하는 동안에 서로가 정보를 공유할 수 있다. 시뮬레이션 실험에서, Fig. 2.에서 보여주는 것처럼 운영영역 전체를 셀이라고 부르는 여러 개의 작은 영역으로 나누었으며, 금지영역은 적색으로 표현했다. 정찰드론은 광각 카메라 이미지 센서의 경사도 범위에 있는 한 지점에서 4개의 셀을 탐지한다고 가정 한다.

### 2-2 지형표현

링크상호간의 전파손실을 계산하는 채널이득에 대한 일반 공식은 실제 교외지형과 유사하게 지면에 지형을 표현하기 위해 (1) 식과 같은 변형 Shekel's Foxhole 함수를 적용했다.

$$Alt_d(x) = \sum_{i=1}^{10} \frac{0.1}{\sum_{j=1}^{10} (x_j - \eta_{ij})^2 + \gamma_i} \quad (1)$$

파라미터  $\eta$ 와  $\gamma$ 는 다양한 지형을 나타나게 한다. 드론의 궤적계획에는 적용할 벤치마킹이 많지 않기 때문에 산들이 있는 실제 지형의 교외환경을 적용했다.

### 2-3 궤적표현

시뮬레이션 실험에서, 최적화 알고리즘으로 궤적을 연속적인 3차원 경로로 발생시키며, 가능한 경로는  $i$  번째 경유 점을  $w_i = (x_i, y_i, z_i)$  요소를 갖는 벡터로 표현하고, 식(2)와 같다.

$$Trajectory = (w_1, w_2, \dots, w_{N_w}) \quad (2)$$

식(2)에서  $N_w$ 는 가능한 궤적에 나타나는 경유 점의 수이다.

### III. 드론궤적 최적화를 위한 적합성 함수

이 장에서는, 제한한 군집 드론 경로계획 알고리즘으로 발생하는 궤적을 평가하기 위해서, 여덟 개의 최적화 인덱스를 갖는 군집 목적물 적합성함수를 제안한다. 최적화 프로세스 인덱스로, 그것들을 두 그룹으로 나누고 서로 다른 우선 수준을 할당했다. (I) 그룹의 최적화 요소들(에너지소비 위험도, 비행위험도와 탐지지역 우선도)을 목적에 맞게 최대화해야 하며, (II) 그룹은 지형, 금지구역, 회전각도, 비행경사도와 군집드론 충돌 회피 등의 제약사항을 갖고, 드론은 물리적인 한계점을 만족해야 한다. 표1은 이러한 등급과 그것들을 계산하는 공식을 나타낸다. 항상 모든 가능한 드론궤적들 중에서, 더 높은 적합성을 갖는 값 하나를 선택 한다.

$$F_{fitness} = F_{objective} + TC + FAC + TAC + FSC \quad (3)$$

$F_{objective}$ 는 최적의 궤적을 제공하도록 함수의 값을 최대화해야 하는 목적함수이며, 나머지 부분은 궤적 계획 전에 만족해야 하는 제약사항에 관한 것이다.

#### 3-1 목적함수 설계

목적함수는 궤적계획의 질을 개선하는데 적용하는 최적화

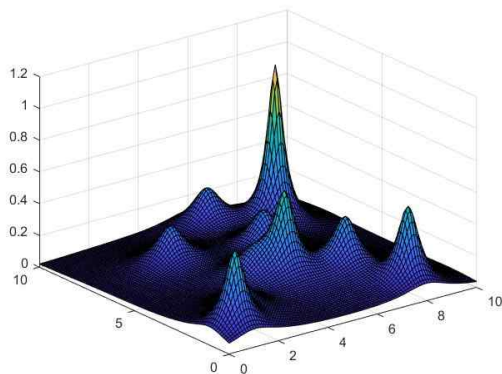


그림 2. 탐색지형 표현  
Fig. 2. Representation for terrain of surveillance.

표준이다. 에너지소비도, 비행위험도와 탐지영역 중요도 등의 요소에 가중치를 갖는 목적함수를 정의했으며, 목적함수는 (4)와 같이 정의한다.

$$F_{objective} = -w_1 F_{EC} - w_2 F_{FR} + w_3 F_{SAI} \quad (4)$$

$F_{EC}$ ,  $F_{FR}$ 과  $F_{SAI}$ 는  $[0, 1]$  범위에서 정의하고,  $w_i (i = 1, 2, 3)$ 은 후보경로를 평가할 때에 중요도 차이를 반영하는 가중치 요소이며, 에너지를 덜 쓰고 비행위험도가 더 작은 경로와, 더 중요도가 높은 탐지영역을 선택한다. 그러므로 에너지소비도와 비행위험도는 음의 값으로, 탐색영역의 중요도는 양의 값으로 명시한다.

#### 1) 에너지 소비도(EC)

소형드론은 일반적으로 축전지동력을 사용하므로, 축전지가 완전히 방전되기 전에 비행을 끝내야 한다. 따라서 드론의 속도가 운영시간 동안 일정하다고 가정하고, EC 공식으로 나타낸다.

$$F_{EC} = \frac{\sum_{i=1}^{N_w-1} EC_i}{\max EC} \quad (5)$$

$$EC_i = P_u \times t_{i,i+1} \quad (6)$$

$$t_{i,i+1} = \frac{d_{i,i+1}}{\nu} \quad (7)$$

$$d_{i,i+1} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (8)$$

$EC_i$ 는  $i$  지점에서  $(i+1)$  지점으로 비행할 때의 연료소비량이다.  $P_u$ 는 단위시간 동안 속도  $\nu$ 를 갖는 에너지 소비량이다.  $t_{i,i+1}$ 은  $i$  지점에서  $(i+1)$  지점으로 이동하는 비행시간이다.  $EC_i$  최대치는 일반화된 고정 값이고, 다음과 같다.

$$\max EC = (N_w - 1) \times P_u \times \frac{d_{\max}}{\nu}, \quad (9)$$

$$d_{\max} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$X, Y$ 와  $Z$ 는 운영공간의 상한치 경계 값이며 적절한 값으로 조정한다.

#### 2) 비행위험도(FR)

크기와 중량 등 군집정찰드론의 물리적 요소들은 정찰비행

표 1. 최적화 인덱스 등급

Table 1. Classification for optimization indexes.

I. Optimization Objectives					
Name	Energy Consumption		Flight Risk	Surveillance Area Importance	
Abbreviation	EC		FR	SAI	
Equation	(5-9)		(10-13)	(14-16)	
Priority level	2nd		2nd	2nd	
Value/ Range	[0,1]		[0,1]	[0,1]	
II. Constraints					
Name	Terrain	Forbidden Area	Turning Angle	Flying Slope	Collision Avoidance
Abbreviation	TC	FAC	TAC	FSC	CAC
Equation	(17)	(18)	(19-20)	(21-22)	(23)
Priority level	1st	1st	1st	1st	1st
Value/Range	[0,Q]	[0,Q]	[0,Q]	[0,Q]	[0,Q]

하는 중에 만나는 눈과 비 등의 기상상태에 적응성을 갖게 한다. 높은 고도에서는 바람이 더 강하기 때문에 비행고도에 따라 정찰드론이 사고로 파괴될 위험도 커지며, 이에 기반을 둔 환경 위험도와 비행고도 위험도 등의 두 가지 위험도를 정의한다.

(1)환경위험도

환경위험도는 무작위성이 강하기 때문에 수학적인 모델을 만드는데 어려움이 따르며, 이를 간단하게 하기 위해서 어떤 경우 점에서의 위험도를 임의로 발생시킨다.  $r_{i,i+1}^e$ 은  $i$ 번째와  $(i+1)$ 번째 사이의 환경치의 합으로 나타내는 환경위험도이다.

(2)비행고도 위험도

비행고도 위험도는 두 경우점 사이의 비행고도차에 비례하고, 비행고도 위험도  $r_{i,i+1}^a$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$r_{i,i+1}^a = \chi \times (Z_{i+1} - Z_i) \tag{10}$$

$\chi$ 는 제어파라미터로 고정 값이며, 비행위험도는 위치기반 파라미터이고 비행하는 동안 드론의 비행고도와 기상상태에 따라 증가하거나 감소한다.

$$F_{FR} = \frac{\sum_{i=1}^{N_w-1} FR_i}{\max FR} \tag{11}$$

$$FR_i = w_{ER} r_{i,i+1}^e + w_{AR} r_{i,i+1}^a, \quad w_{ER} + w_{AR} = 1 \tag{12}$$

$FR_i$ 는  $i$ 번째 경우 점에서  $(i+1)$ 번째 경우 점으로의 비행 위험도이고,  $w_{ER}$ 과  $w_{AR}$ 은 환경위험성과 비행고도위험도의 가중치이다.  $\max FR$ 은 표준화한 고정 값이고, (13)식과 같다.

$$\max FR = (N_w - 1) \times [w_{AR} \times Z + w_{ER} \times (2 \times \max r^e)] \tag{13}$$

식(13)에서,  $\max r^e$ 는 가장 높은 환경위험도를 말한다.

3) 탐지지역 우선도(SAI)

군집정찰드론이 어떤 탐지활동을 수행할 때는 첫 번째로 중요한 지역을 우선 탐지하도록 한다. SAI값은 셀에서 탐지지역의 우선도에 따라 다른 값을 준다. 실험에서, 셀 전체에 걸쳐서 임의의 SAI값을 할당했다.

$$F_{SAI} = \frac{\sum_{i=1}^{N_w-1} SAI_i(t)}{\max SAI} \tag{14}$$

$$SAI_i = \sum_{cellx \in N(i)} \nu_{cellx}(t) \tag{15}$$

$$\max SAI = N_w \times N_n \times V_{\max} \tag{16}$$

$SAI_i(t)$ 와  $\nu_{cellx}(t)$ 는 비행시간  $t$ 일 때 셀 $x$ 와  $i$ 번째 경우 점의 SAI값이다.  $N(i)$ 는  $i$ 번째 경우 점으로부터 탐색하도록 정한 셀이며,  $N_n$ 은  $N(i)$  개수이고  $V_{\max}$ 는 최대치 SAI값이다.

3-2 함수설계 제약사항

제약함수는 가능한 경로를 평가하는데 쓰며, 만족할 때 제약 사항은 0 이지만 만족하지 못할 때는 부정적인 값  $Q$ 를 갖는다. -1보다 작은  $Q$ 값이면 가능한 경로의 적합한 값으로 대가를 줄 수 있으며, 모든 제약함수가 최적화 프로세스를 만족하는 가능한 궤적을 얻을 수 있다.

**1) 지형 제약사항(TC)**

군집정찰드론은 산과 충돌하는 지형을 거처서 비행할 수 없으며, 비행고도는 정찰할 지형의 고도보다 더 높아야 한다. 어떤 지점  $(x, y)$  의 지형고도 값을 돌려주는 지형함수  $Altd(x, y)$  는 3장에서 설명하였으며 지형 제약사항은 다음식과 같다.

$$TC=0, TC=\sum_{i=1}^{N_w} TC_i \tag{17}$$

$$where TC_i = \begin{cases} Q, & \text{if } z_j < Altd(x_i, y_i) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

**2) 금지구역 제약사항(FAC)**

정부의 민감 지역 등 어떤 특정한 지역에서는 규정에 따라 비행이 허용되지 않는다. 정당한 경로는 금지구역을 피하도록 설계해야 하며, 계산의 편의상 그러한 금지구역을 사각형 형태라고 가정한다. 따라서 금지구역 제한사항은 다음 함수로 정할 수 있다.

$$FAC=0, FAC=\sum_{i=1}^{N_w} FAC_i \tag{18}$$

$$where FAC_i = \begin{cases} Q, & \text{if } waypoint i \text{ Range}(x_i, y_i) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$where Range(x_j, y_j) = (l_x \leq x_j \leq u_x) \cap (l_y \leq y_j \leq u_y)$$

x와 y의 하방경계  $l_x$ 와  $l_y$ 는 j번째 금지구역의 하방경계로 조율한 것이고, x와 y의 상방경계  $u_x$ 와  $u_y$ 는 j번째 금지구역의 상방경계로 조율한 것이다.

**3) 회전각 제약사항(TAC)**

Fig. 4.에서 보는 것처럼 회전각도는 수평방향으로 이전 방향과 현재 방향 사이의 각도로 정의한다. 실행경로는 군집드론이 쉽게 기동할 수 있도록 적당하게 유연해야 하며, 드론의 회전각도는 유효 회전각도 최대치보다 더 작아야 한다. 이러한 제약사항은 (19)식과 같다.

$$TAC=0, TAC=\sum_{i=2}^{N_w-1} TAC_i \tag{19}$$

$$where TAC_i = \begin{cases} Q, & \text{if } \theta_i > \theta_{max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\theta_i$ 는 i번째 경유 점  $(x_i, y_i, z_i)$  의 회전각도이고  $\theta_{max}$ 는 유효한 최대 회전각도이며 회전각도  $\theta_i$ 는 다음식과 같다.

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{(x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1}) \cdot (x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)^T}{\|(x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1})\|_2 \cdot \|(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)\|_2}\right) \tag{20}$$

$\|x\|_2$ 는 벡터  $x$ 의 norm 값이다.

**4) 비행경사도 제약사항(FSC)**

수평방향으로 유연한 회전각과, 하강각, 상승각 등의, 수직방향으로 드론의 기동에 따른 비행 경사도를 표현했다. Fig. 4.처럼 하강비행은 현재의 경유 점에서 다음 경유 점까지의 수평과 방향사이의 경사도로 정의하며, 하강비행은 최대의 하강각과 상승각 사이의 범위 안에 있어야 한다. 그러므로 FSC는 식 (21)로 정의할 수 있다.

$$FSC=0, FSC=\sum_{i=2}^{N_w} FSC_i \tag{21}$$

$$where FSC_i = \begin{cases} Q, & \text{if } r_i \notin [\tan(\alpha_{max}), \tan(\beta_{max})] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\alpha_{max}$ 와  $\beta_{max}$ 는 허용되는 최대치 하강각과 상승각이다.  $r_i$ 는 i번째 경유 점  $(x_i, y_i, z_i)$ 에서의 비행경사도이다. Zheng 등은 [9]에서 (22)와 같은 공식을 제안했다.

$$r_i = \frac{z_i - z_{i-1}}{\|(x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1})\|_2} \tag{22}$$

**5) 군집드론 충돌회피 제약사항(CAC)**

두 개의 분리된 궤적에서, 드론들끼리 충돌을 피하도록 최소의 안전거리를 유지해야 하며 충돌회피 제약사항은 다음식과 같다.

$$CAC=0, CAC=\sum_{i=1}^{N_w^a} \sum_{j=1}^{N_w^b} CAC_{ij} \tag{23}$$

$$where CAC_{ij} = \begin{cases} Q, & \text{if } d_{ij}^{mm} < d_{min} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$where d_{ij}^{mm} = \sqrt{(x_j^m - x_i^n)^2 + (y_j^m - y_i^n)^2 + (z_j^m - z_i^n)^2}$$

군집드론 궤적계획에서 복잡한 탐지임무를 수행할 때, 드론들이 그들 사이의 혼잡을 피하도록 경로를 설계해야 한다.

$d_{min}$ 은 충돌을 피하기 위한 최소안전거리이고,  $d_{ij}^{mm}$ 는 Nn 번째 드론궤적의 i번째 경유 점과 m 번째 드론궤적의 j번째 경유점사이의 데카르트 거리이다.

**IV. 사건감지 기반의 탐지지역 우선도 갱신방법**

이 장에서는, 사건감지에 기반을 둔 탐지지역 우선도 갱신 과정을 제안한다. 정찰드론이 감시지역 안에서 불법드론을 감지했을 때 정보를 갱신하며, 군집정찰드론이 다음 비행을 시작

할 때에 다른 정찰드론들과 갱신 정보를 공유한다. 더불어, 어떤 비행에서도 탐지하지 않았던 영역의 SAI값을 증가시키며 군집정찰드론이 다음비행을 할 때 탐색할 수 있도록 한다. 같은 지역을 반복 탐색하는 것을 피하기 위해서, 이미 탐색한 지역은 SAI값을 감소시킨다. 이에 따라 SAI값을 갱신하는 4가지 경우를 정의한다.

- 어떤 셀에서 불법드론이 감지되면, 그것의 이웃 셀 또한 탐색해야하며 이웃한 셀의 SAI값을 증가시킨다.
- 한 셀의 SAI값이 과거의 평균적인 SAI값과 비교하여 변화가 빠르면 그 셀의 SAI값은 조정해야 한다.
- 어떤 셀이 기본 비행시간 보다 더 긴 시간 동안 탐색된 적이 없을 때는 SAI값을 증가시켜야 한다.
- 어떤 셀을 이미 탐색했다면 SAI 값을 감소시킨다. 관계식은 다음과 같다.

첫 번째 경우에,  $|SAI_i(t) - SAI_i(t-1)| > th_{event}$  일 때,  $i$  번째 경우 점에서 불법드론이 탐색되었던 셀에서 또 다시 사건이 다시 발생할 수도 있다는 것을 포함하고, 그러한 셀의 SAI값은 (24)식으로 갱신한다.

$$\nu_{cell_x}(t) = \max[\nu_{max}, \gamma_1 \times \nu_{cell_x}(t-1)], \gamma_1 > 1 \quad (24)$$

$SAI_i(t)$ 가  $t$ 번째 비행하는 동안의  $i$ 번째 경유점 SAI값이고,  $\nu_{cell_x}(t)$ 은  $t$ 번째 비행하는 동안의 셀  $x$ 의 SAI값을 나타낸다.

$th_{event}$ 와  $\nu_{max}$ 는 사건감지 한계점이고 최대 SAI값이다.

두 번째 경우에, 결정 값은 셀  $x$ 의 현재의 SAI값과 과거의 평균SAI값이 사전에 갱신된 한계값  $th_{update}$ 보다 더 크다면, 그 때에 그 것의 SAI값은  $\max[\nu_{max}, f_{cell_x}(t)]$ 로 갱신한다. 두 번째 (25-26) 과 같이 정형화한다.

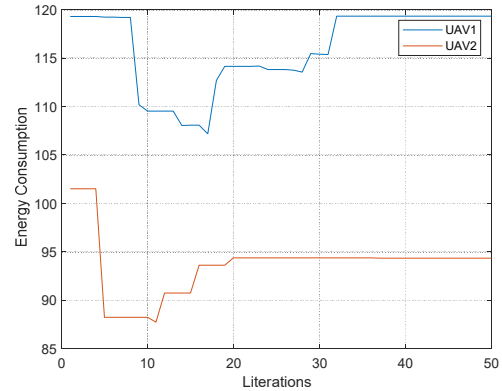
$$\nu_{cell_x}(t) = \begin{cases} \nu_{cell_x}^i, & \text{if } |\overline{V_{cell_x}(t-2)} - \nu_{cell_x}(t-1)| < th_{update} \\ \max[\nu_{max}, f_{cell_x}(t)], & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

$$f_{cell_x}(t) = \log(\lambda \times |\overline{V_{cell_x}(t-2)} - \nu_{cell_x}(t-1)| + 1) \times \nu_{cell_x}(t-1) \quad (26)$$

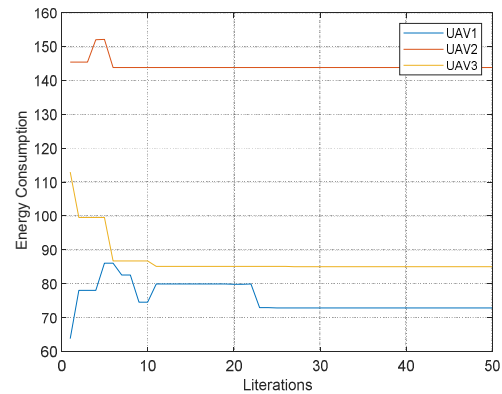
$\overline{V_{cell_x}(t-2)}$ 는 첫 비행시간부터  $(t-2)$ 번째 비행시간까지의 평균 SAI를 나타내고,  $\nu_{cell_x}^{ini}$ 은 셀의 초기 SAI 값이며,  $\lambda$ 는 특정 제어파라미터이다.

세 번째 경우는, 어떤 셀이 임계값  $th_{flight}$  시간이 지나도록 탐색안한 셀이라면, 식(27)을 사용하여 그 셀의 SAI값을 증가시킨다.

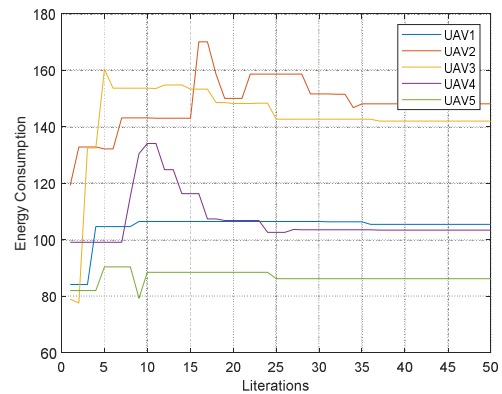
$$\nu_{cell_x}(t) = \max[\nu_{max}, \gamma_2 \times \nu_{cell_x}(t-1)], \gamma_2 > 1 \quad (27)$$



(a)



(b)



(c)

그림 3. PSO 기반의 군집드론 궤적 최적화 수행 (a) 두 대의 군집드론 에너지소비도, (b) 세 대의 군집드론 에너지 소비도, (c) 다섯 대의 군집드론 에너지 소비도

Fig. 3. PSO trajectory optimization performance in terms of (a) two UAV group energy consumption, (b) three UAV group energy consumption, (c) five UAV group energy consumption

네 번째 경우는, 어떤 셀을 이미 탐색했다면, 그 셀의 SAI값

을 식(28)에 따라서 감소시킨다.

$$v_{cellx}(t) = \min[v_{\min}, \gamma_3 \times v_{cellx}(t-1)], \gamma_3 < 1 \quad (28)$$

### V. PSO 기반의 군집 궤적계획기 제안

이 장에서는, 표준PSO기반의 갱신 메커니즘과 탐지지역 우선도에 따르는 군집정찰드론 궤적계획기를 제안한다. PSO를 적용하는 궤적계획기는 군집 정찰드론들 서로에게 최적화 궤적을 제공하며, 군집 목적물 적합성 함수는 모든 가능한 비행 궤적들로 부터 최적의 비행 경유 점을 제공하는데 사용한다. CAC는 충돌을 감지하며, 하나의 비행시간당 최적의 궤적계획을 산출하고 다음 비행을 하기 전에 SAI값을 갱신한다. 자세한 내용은 파트별로 설명한다.

#### 5-1 군집 정찰드론 최적화

새들의 군집행위에 기반을 둔 것으로 탐색 알고리즘으로서 널리 쓰이는 PSO는 Kennedy 와 Eberhart 가 1995에 제안한 것으로 최적화 문제를 해결하는데 사용한다 [12]. 먹이를 찾는 과정에서, 새들은 속도와 위치를 그 자신과 새들 무리가 모은 정보에 기반을 두어 갱신한다. PSO는, 개체 간에 무작위로 초기화된 후에 개체 상호간에 속도와 위치를, 개체 간에 이전의 사회적 무리군집에서 개체의 최적 위치, 개별적인 개체의 최적 위치와 속도에서 다시 새롭게 초기화하기를 반복한다. 수학적 공식은 다음과 같으며, 개체의 수를  $P$ , 개체의 차원을  $D$ , 반복 횟수를  $N$ 이라고 하자.  $i^{th}$  번째 개체에서,  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 와  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  는 개체의 속도와 위치벡터를 반복적으로 나타내준다. 표준 PSO에서, 두 종류의 비용값  $P_{i,best}$  는 한 개체의 개별적인 최솟값이고,  $S_{best}$  는 모든 개체들의 군집 최솟값으로, 식(29)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{i,best} &= (p_{i1,best}, p_{i2,best}, \dots, p_{iD,best}) \\ S_{best} &= (s_{1,best}, s_{2,best}, \dots, s_{D,best}) \end{aligned} \quad (29)$$

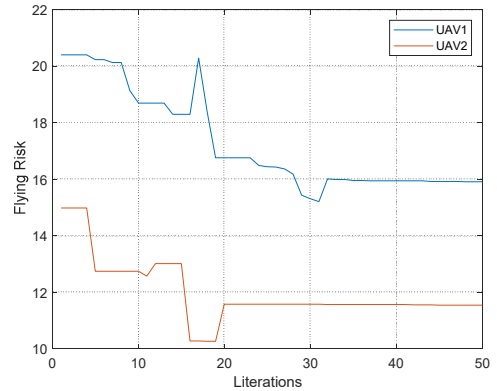
일단 두 비용 값을 결정하면, 서로의 차원에서 개체의 속도와 위치를 식(30)로서 다시 갱신한다.

$$\begin{aligned} v_{ij}^{k+1} &= wv_{ij}^k + c_1r_1(p_{ij,best} - x_{ij}^k) + c_2r_2(s_{j,best} - x_{ij}^k) \\ x_{ij}^{k+1} &= x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \end{aligned} \quad (30)$$

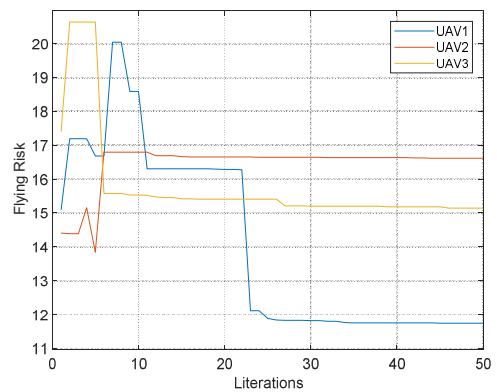
where  $i = 1, 2, \dots, P$   $j = 1, 2, \dots, D$   $k = 1, 2, \dots, N$

식(30)에서,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 0과 1사이의 무작위 값이다.

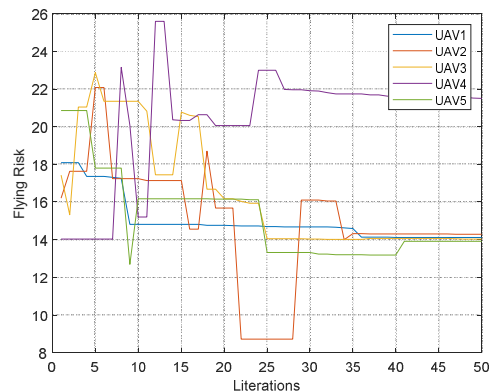
$w$ 는 현재 반복에 과거 반복한 속도의 영향을 반영하는 관성 파라미터이다.  $c_1$ 과  $c_2$ 는 자기인식과 사회지식을 나타내며, 개체 자신으로부터 군집전체까지의 직관능력을 표현한다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. PSO 기반의 군집드론 궤적 최적화 수행 (a) 두 대의 군집드론 비행위험도, (b) 세 대의 군집드론 비행위험도, (c) 다섯 대의 군집드론 비행위험도

Fig. 4. PSO trajectory optimization performance in terms of (a) two UAV group flight risk, (b) three UAV group flight risk, (c) five UAV group flight risk

#### 5-2 제안한 궤적계획기

제한한 궤적계획기에서, 유용한 비행경로는 경유 점 순서와 경로길이 단편들로 구성한다. 시뮬레이션 실험에서, 여덟 개의 경유 점 궤적을 적용했으며, 전체 제어 영역을 단위 셀 영역으로 나누었다. 제한한 궤적계획기의 처리과정은 직교코드 알고리즘을 따른다. 첫째로, 탐색비행시간이 전체운영영역을 감당할 수 있도록 추정해서 모든 셀의 SAI값을 초기화한다.

다음으로, 군집 드론들에게 최적의 궤적을 제공할 수 있도록 PSO를 응용하였으며, 군집 정찰드론들에게 최적의 경로를 제공한다.

첫째로,  $N_{par}$  개체의 위치와 속도벡터를 무작위로 발생시키고,  $P_{t,best}$ 와  $S_{best}$ 를  $x_t$ 와  $x_{N_{par}}$ 로 제 각각 초기화한다.

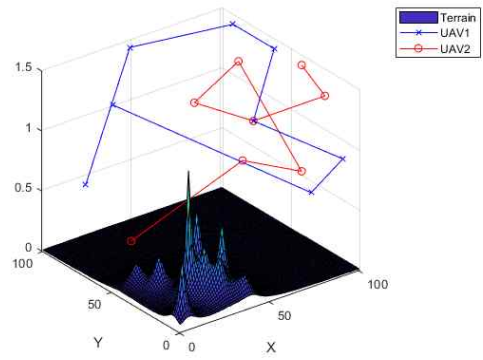
다음으로, 개체간의 위치와 속도 벡터를 공식(30)로 갱신하며, 제한한 군집 목적물 적합성 함수를 사용하여 여러 목적물과 제약사항 함수를 포함하여 새롭게 갱신된 개체를 평가한다. 그 후로, 모든 개체의 적합 값에 기반을 두어  $P_{t,best}$ 와  $S_{best}$ 를 갱신하며, 반복횟수가  $N_{iter}$ 와 같다면, 첫 번째 정찰 드론을 위한 최적화 궤적을 저장한다.

최종적으로, 군집정찰드론 사이에 같은 지역 탐색을 반복하거나, 경유점이 겹치는 문제를 피해야 하므로, 다음 정찰드론에게 맞춤 궤적을 보내기에 앞서 탐색했던 셀들의 SAI값을 감소 시킴으로 탐색 효율이 개선된다. 충돌회피 제약사항은 정찰드론 궤적 간에 존재할 수도 있는 충돌을 탐지하는데 적용한다. CAC가 만족하지 않으면, 되돌아가서 과정을 다시 반복한다. 군집정찰드론 들에게 최적의 경로는 오직 CAC가 만족할 때 얻을 수 있다.

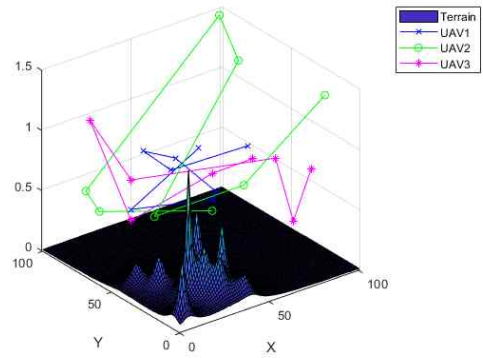
표 2. 주 시뮬레이션 파라미터

Table 2. Main simulation parameters.

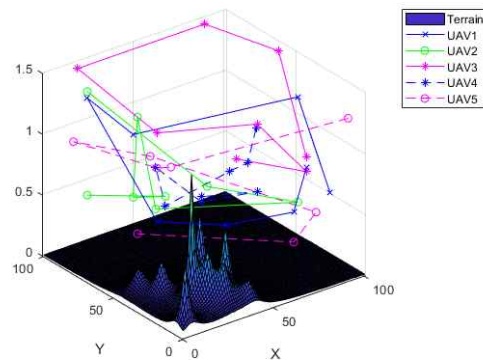
Parameters	Symbols	values
Grid size	-	20*20
Operation space	-	20*20*1.5
Group MDr number		2,3,5
Group MDr unit power		20
Group MDr speed		10
Particle number		32,64,128,256,512
Iteration number		50,100
Event detection threshold		20
Flight time threshold		2
SAI update control	,	1.5/0.2
Maximal turning angle		
Maximal gliding angle		
Maximal climbing angle		
Minimal safe distance		0.2
Initial SAI value		1~10
Initial environmental risk		1~5



(a)



(b)



(c)

그림 5. 군집 드론 최적화 궤적 3D 표현 (a) 두 대의 UAV 군집비행, (b) 세 대의 UAV 군집비행, (c)다섯 대의 UAV 군집비행

Fig. 5. The optimal trajectory in 3-D representation for (a) two UAV group flight, (b) three UAV group flight (c) five UAV group flight

그 후로, 다음 비행을 시작하기 전에 공식(22) - (25)를 써서 SAI값을 갱신해야 한다. 끝으로, 비행시간이  $N_{flight}$ 와 같을 때, 금지지역을 제외한 전체 운영 영역을 감당하는 모든 최적의 궤적 경로계획을 군집 정찰 드론들에게 제공한다.



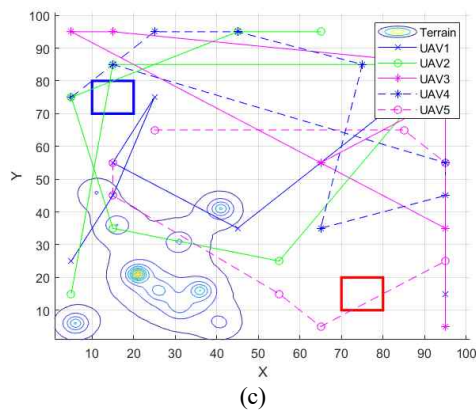
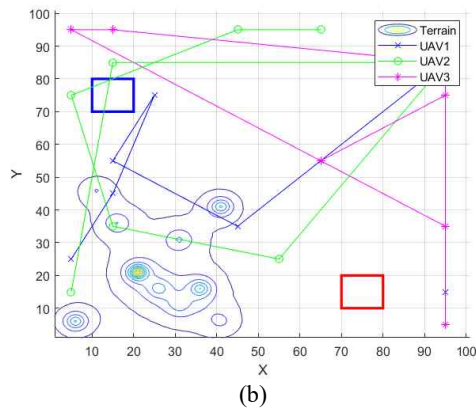
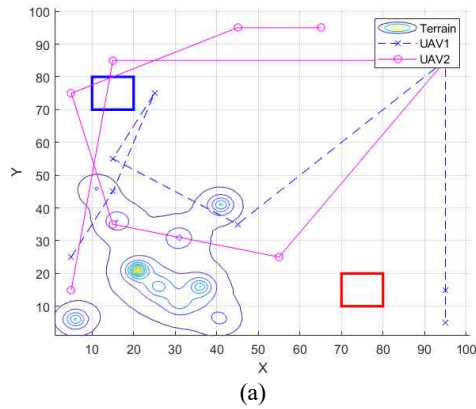


그림 6. (a) 두 대의 UAV 군집비행, (b) 세 대의 UAV 군집비행, (c) 다섯 대의 UAV 군집비행 궤적계획기 결과

Fig. 6. Multi UAV trajectory planning results for (a) two UAV group flight, (b) three UAV group flight (c) five UAV group flight

## VI. 시뮬레이션 결과

이 장에서는, 시뮬레이션 결과로 군집드론 궤적계획기의 성능평가와 수율개선 효과를 나타낸다.

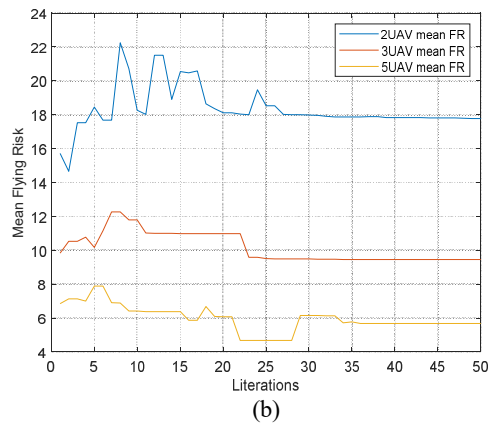
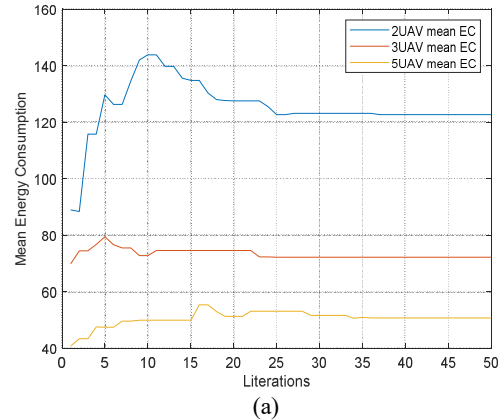


그림 7. (a) 평균 에너지소비도, (b) 평균 비행위험도에 기반을 둔 궤적 최적화 수행

Fig. 7. PSO trajectory optimization performance in terms of (a) mean energy consumption, (b) mean flight risk.

### 6-1 군집드론 궤적계획기의 성능평가

MATLAB 시뮬레이션으로 두 대의 군집 정찰드론, 세 대의 군집정찰 드론, 다섯 대의 군집정찰 드론으로 수회의 비행을 반복하게 하여 평가한다.

첫째로, 제안한 궤적계획기에 의해 만들어진 최적의 궤적 솔루션을 평가하고, 만들어진 궤적에 기반을 둔 SAI 갱신 메커니즘이 합리적인지 확인한다. V. Roberge 등이 제안한 PSO 파라미터 초기화 시뮬레이션의 주 파라미터는 테이블 II와 같다.

5장에서, 제안한 적합함수의 최적의 적합 값에 개체수가 어떻게 영향을 주는지를 보여주며, 적합 값은 반복횟수와 개체증가에 따라 더 빠르게 수렴한다. Fig. 3.와 Fig. 4.에서 첫 비행시간의 에너지소비, 비행 위험도를 보여준다. 반복횟수의 증가에 따라, 두 정찰드론의 에너지 소비와 비행위험도는 최소화되고 탐지지역 우선도가 최대화 되는 동안 적합한 값을 유지하며,

그것은 제안한 궤적계획기가 최적이라는 것을 의미한다. 모든 궤적을 3D로 발생시키며, Fig. 5.(a), (b)와 (c)에서 두 대의 군집드론, 세대의 군집드론과 다섯 대의 군집드론의 최적화 궤적을 3D로 표현하였다. Fig. 6.에서 금지구역과 사각탐지 구역은 각각 청색과 적색의 사각형으로 표시하였으며 (a), (b)와 (c)에서 두 대, 세대, 다섯 대 군집드론의 최적화 궤적을 표현했다. 군집비행이 서로에게 겹치지 않도록 경유 점을 고려하고, 그것으로 제안한 궤적계획기가 아주 효율적으로 운영 영역을 탐색하게 하며, 비행시간동안 군집드론의 최적화 적합 값을 합산한다.

### 6-2 군집 드론 궤적계획기의 수율 개선효과

Fig. 6.에서 (a) 두 대의 UAV 군집비행, (b) 세 대의 UAV 군집비행, (c)다섯 대의 UAV 군집비행 궤적계획기결과로 비행 궤적을 보여준다. Fig. 7.에서는 (a) 평균 에너지소비도, (b) 평균 비행위험도에 기반을 둔 궤적 최적화 수행결과를 보여준다. 도표에 나온 것처럼 2UAV, 3UAV, 5UAV로 군집드론의 수를 늘려가면서 실험을 반복함에 따라서 평균 에너지소비도와 평균 비행위험도가 개선되고 수율이 향상되는 것을 알 수 있다.

## VII. 결 론

본 논문에서 제안한 군집드론 궤적계획기는 어떤 운영지역에서 군집 드론들에게 불법드론의 존재를 탐지하는 자율비행을 할 수 있도록 해준다. 궤적계획기를 평가하는 조건으로 에너지소비, 비행위험도와 탐지지역 우선도 등 여덟 개의 최적화 인덱스를 갖는 군집 목적물 적합성 함수를 갖는다. 최적화 궤적은 적합성 함수 값을 최대화하여 얻으며, 탐색 지역에서 새로운 사건이 발생했을 때 탐지지역 우선도를 효과적으로 갱신한다. 시뮬레이션 결과는 본 제안이 군집 드론들에게 높은 적합 값과 충돌 회피 궤적을 제공하고 적응성을 갖는 것을 입증하였다.

## Acknowledgments

본 연구는 교육부(MIST)가 후원하는 한국연구재단(NRF)의 기초 과학 연구 프로그램의 연구 결과로 수행되었음. (2019R1F1A1061696)

## References

[1] E. Salami, C. Barrado, and E. Pastor, "UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas," *Remote Sens*, Vol. 6, No. 11, pp. 11051–11081, Nov. 2014.  
 [2] Q. Yang and S. J. Yoo, "Optimal UAV path planning: sensing

data acquisition over IoT sensor networks using multi-objective bio-inspired algorithms," *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 13671-13684, 2018.  
 [3] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," *IEEE Communications Magazine*, Vol.54, No. 5, pp.36-42, May. 2016.  
 [4] A. Abdallah, M. Ali, J. Mistic, and V. Mistic, "Efficient security scheme for disaster surveillance UAV communication networks," *Information*, Vol. 10, No. 2, p. 43, Jan. 2019,  
 [5] T. Turker, O. K. Sahingoz, and G. Yilmaz, "2D path planning for UAVs in radar threatening environment using simulated annealing algorithm," in *Proceeding of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Denver: CO, pp. 56-61, 2015.  
 [6] S. J. Yoo, J. H. Park, S. H. Kim, and A. Shrestha, "Flying path optimization in UAV-assisted IoT sensor networks," *ICT Express*, Vol. 2, No. 3, pp.140-144, 2016.  
 [7] J. Carsten, D. Ferguson, and A. Stentz, "3D field D: improved path planning and replanning in three dimensions," in *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing: China, pp. 3381-3386, 2006.  
 [8] K.Yang and S.Sukkarieh, "Real-time continuous curvature path planning of UAVS in cluttered environments," in *Proceeding of 5th International Symposium on Mechatronics and Its Applications*, Amman: Jordan, pp. 1-6, 2008.  
 [9] C. Zheng, L. Li, F. Xu, F. Sun, and M. Ding, "Evolutionary route planner for unmanned air vehicles," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 4, pp. 609-620, Aug. 2005.  
 [10] R. J. Szczerba, "Threat netting for real-time, intelligent route planners," in *Proceeding of Information, Decision and Control. Data and Information Fusion Symposium, Signal Processing and Communications Symposium and Decision and Control Symposium*, Adelaide: SA, pp. 377-382, 1999.  
 [11] X.Li, Y.Zhao, J.Zhang, and Y.Dong, "A Hybrid PSO algorithm based flight path optimization for multiple agricultural UAVs," in *Proceeding of IEEE 28th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, San Jose: CA, pp. 691-697, 2016.  
 [12] J.Kennedy and R.Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceeding of Neural Networks, IEEE International Conference*, Perth: WA, Vol.4, pp. 1942-1948, 1995.



**임 원 호 (WonHo Lim)**

1993년 2월 : 송실대학교 전자공학과 (공학사),  
2013년~현재 : 인하대학교 항공산업시스템공학과 (박사과정),  
2010년~2018년 : ㈜동일건축 상무 외,

※관심분야 : Group UAV, Particle swarm Optimization, 3D Path Planning, AI

2001년 8월 : 송실대학교 정보통신학과 (공학석사)

1982년~2009년 : 한국통신

2019년~현재 : ㈜신화엔지니어링 상무



**정 형 찬 (HyoungChan Jeong)**

1994년 2월 : 동의대학교 전자통신공학과 (공학사),  
2013년~현재: 인하대학교 항공산업시스템공학과 (박사과정),  
1999년 8월~현재: 인천국제공항공사 항행처 계기착륙팀

※관심분야 : UAV, 이동통신, 음향공학, NAVI-AID COMM

2004년 8월 : 인천대학교 정보통신대학원 (공학석사)

1995년 1월~1999년 7월: 한국공항공사 제주지사



**호 등 (Teng Hu)**

2016년 : 통신공학 Chongqing University

2017년~2018년 : 인하대학교 전자공학과 (교환학생)

※관심분야 : Mobile ad-hoc networks for UAV and anti-drone technology using AI



**아람기르 (Alamgir)**

2016년 8월 : 공주대학교 전자공학과 (공학사)

2020년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학석사)

2020년~현재 : 인텍전기전자주식회사 주임연구원

※관심분야 : Mobile ad-hoc networks for UAV and anti-drone technology using AI, Maritime & underwater communications using machine learning.



**장 경 희 (KyungHi Chang)**

1985년2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사),

1992년8월 : Texas A&M Univ., EE Dept. (Ph.D.),

1992년~2003년 : 한국전자통신연구원 이동통신연구소 무선전송방식연구팀장

2003년~현재 : 인하대학교 전자공학과 교수

※관심분야: 3GPP LTE-A & 5G Systems, HetNet, Public Safety & Mobile Ad-hoc Networks, Maritime/Underwater Communications

1987년2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1989년~1990년 : 삼성종합기술원 주임연구원