

A*PS-PGA를 이용한 무인 항공기 생존성 극대화 경로 계획

김기태[†] · 전건욱

국방대학교 운영분석학과

A Path Planning to Maximize Survivability for Unmanned Aerial Vehicle by using A*PS-PGA

Ki Tae Kim[†] · Geonwook Jeon

Department of Operations Research, Korea National Defense University, Seoul 122-875

An Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is a powered pilotless aircraft, which is controlled remotely or autonomously. UAVs are an attractive alternative for many scientific and military organizations. UAVs can perform operations that are considered to be risky or uninhabitable for human. UAVs are currently employed in many military missions such as reconnaissance, surveillance, enemy radar jamming, decoying, suppression of enemy air defense (SEAD), fixed and moving target attack, and air-to-air combat. UAVs also are employed in a number of civilian applications such as monitoring ozone depletion, inclement weather, traffic congestion, and taking images of dangerous territory. For accomplishing the UAV's missions, guarantee of survivability should be preceded. The main objective of this study is to suggest a mathematical programming model and a A*PS-PGA (A-star with Post Smoothing-Parallel Genetic Algorithm) for an UAV's path planning to maximize survivability. A mathematical programming model is composed by using MRPP (Most Reliable Path Problem) and TSP (Traveling Salesman Problem). A path planning algorithm for UAV is applied by transforming MRPP into SPP (Shortest Path Problem).

Keywords : Unmanned Aerial Vehicle, Path Planning, A*, Post Smoothing, Parallel Genetic Algorithm

1. 서 론

무인화 체계 중에서 가장 먼저 실전용으로 활용된 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)는 조종사가 탑승하지 않은 상태에서 지상의 원격 조종 또는 사전에 입력된 프로그램에 따라 비행하거나 비행체 스스로 주위 환경을 인식하고 판단하여 자율적으로 비행하는 비행체를 말한다[26]. UAV는 조종사의 신체적 한계를 초과하는 3D(Dull, Dirty, Dangerous) 임무(장기 체공, 오염된 지역, 위험지역)에 투입이 가능하며, 정찰용, 표적용, 기만용, 공격용, 전투용 등으로 분류되어

개발 및 활용되고 있다[2]. UAV의 임무를 달성하기 위해서는 작전지역에서의 생존성이 보장되어야 한다. 생존성이란 어떤 체계가 적대적인 인공 환경을 견디어 내고, 그의 지정된 임무를 달성하는데 필요한 능력에서 임무를 실패할 만큼의 손상을 입지 않을 정도에 대한 척도로 정의되며[18], 본 연구에서는 UAV의 생존성을 UAV가 주어진 임무를 수행함에 있어 장애물에 충돌하지 않고, 적의 대공무기에 격추되지 않을 확률로 정의한다.

기만용 및 공격용 UAV는 소모성 무기체계이지만 정찰용, 표적용, 전투용 등으로 사용되는 UAV는 지속

적으로 활용이 가능하며, 기지에서 이륙하여 임무를 수행한 후 다시 기지로 복귀하는 개념으로 운용하고 있다. UAV는 이륙 후 임무 수행을 위해 다수의 임무 지점을 비행하게 되며, 임무 완수를 보장하기 위하여 UAV의 생존성이 극대화되도록 임무 지점들에 대한 순회 경로와 임무 지점 간 이동 경로의 동시 계획이 필요하다.

본 연구에서는 UAV의 생존성을 극대화하는 경로를 계획하고자 한다. UAV가 기지에서 출발하여 임무를 수행해야 할 지점에서 임무를 수행한 후 다시 기지로 복귀할 때 장애물과 적의 대공위협을 회피하여 생존성이 극대화되도록 임무를 수행해야 할 지점 간의 이동 경로와 임무 지점들의 순회 경로를 계획하는 문제이다. UAV의 생존성을 극대화하는 경로를 계획하기 위해 최대 신뢰 경로 문제(Most Reliable Path Problem, MRPP)와 순회 판매원 문제(Traveling Salesman Problem, TSP)를 이용하여 수리모형을 구축하였으며, 대수(Logarithm)를 이용하여 MRPP를 최단 경로 문제(Shortest Path Problem, SPP)로 변환한 후 A*PS(A-star with Post Smoothing) 알고리즘을 이용하여 이동 경로를 계획하고, 병렬 유전자 알고리즘(Parallel Genetic Algorithm, PGA)을 이용하여 순회 경로를 계획하였다.

2. 경로 문제 및 기존 연구 고찰

UAV의 경로 계획은 기지에서 출발하여 임무를 수행해야 할 지점 간의 이동 경로와 임무 지점들의 순회 경로를 계획하는 것이며, MRPP-TSP를 이용하여 모형화하고, MRPP를 SPP로 변환하여 SPP-TSP로 해결한다.

2.1 이동 경로 계획

UAV의 이동 경로 계획은 임무를 수행해야 할 지점 간의 이동 경로를 계획하는 것이다. MRPP는 두 지점 간의 경로 중에서 가장 신뢰도가 높은 경로를 결정하는 문제이며, 네트워크에서 두 지점을 연결하는 호의 신뢰도는 그 구간에 고장이 발생하지 않을 확률로 정의된다[3]. 따라서 이동 경로의 신뢰도는 그 경로를 구성하는 호 신뢰도의 곱으로 나타낼 수 있다. SPP는 네트워크에서 두 지점 또는 각 지점 간에 여러 가지 경로가 있을 때 이 경로를 1회 통과하여 비용(또는 거리, 시간)을 최소화하는 경로를 구하는 문제이다.

UAV의 이동 경로 계획에 관한 연구로 Bortoff[5]는 보로노이 선도(Voronoi Diagram)를 이용하여 적의 레이

더 탐지를 회피하기 위한 이동 경로를 계획하였고, Jun and D'Andrea[14]는 목적함수에 대수를 취하여 SPP로 변환한 후 Ford-Bellman 알고리즘을 이용하였으며, Jia and Vagners[13]는 병렬 진화 알고리즘(Parallel Evolutionary Algorithm)을 적용하였다. Gao et al.[8]은 UAV의 초기 속력과 침로를 입력하고, 이후 비행하면서 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)으로 속력과 침로를 3단계(+, 0, -)로 변경하여 이동 경로를 계획하였으며, Nikolos and Brintaki[21]는 우수해로 수렴하는 성능과 효율성을 향상시킨 차별화된 진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)을 적용하였다. Bernhard et al.[4]은 Dijkstra 알고리즘을 적용하였으며, Mitsutake and Higashino[19]는 A*(A-star) 알고리즘을 이용하여 집중 강우 지역을 피해서 비행하기 위한 이동 경로를 계획하였다. Sathyaraj et al.[24]은 이동 경로를 계획하기 위한 SPP 알고리즘(A*, Ford-Bellman, Floyd-Warshall, Dijkstra)을 비교한 후 A* 알고리즘의 성능이 우수함을 보였고, Sujit and Beard[25]는 입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization)를 이용하여 이동 경로를 계획하였다. Mittal and Deb[20], Sanders and Ray[23], Gonzalez et al.[9]은 NSGA-II(Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II)를 이용하여 산악과 계곡으로 이루어진 지형의 환경에서 이동 경로를 계획하였다.

2.2 순회 경로 계획

UAV의 순회 경로 계획은 임무를 수행해야 할 지점들의 순회 경로를 계획하는 것이다.

TSP는 판매원이 본사를 출발하여 고객이 위치하고 있는 n 개의 모든 지점을 오직 한 번씩만 방문하고, 본사로 돌아오는 순환 경로를 결정하는 과정에서 비용 또는 거리를 최소화하는 문제이다[15]. 즉, 고객이 위치한 교점 집합 N , 교점을 연결하는 호 집합 A , 호 (i, j) 의 비용이 c_{ij} 인 네트워크 $G(N, A)$ 에서 출발 지점을 출발하여 n 개의 모든 교점을 오직 한 번만 방문하고, 출발 지점으로 돌아오는 최소 비용의 Hamiltonian 순환로를 찾는 문제이다[3, 15].

UAV의 순회 경로 계획에 관한 연구로 Cunningham and Roberts[7]는 UAV를 이용하여 지상에 센서 네트워크를 구축하기 위한 순회 경로를 계획하였고, 총 비용을 최소화하는 Adaptive Path Planning 알고리즘을 적용하였으며, Mitsutake and Higashino[19]는 A* 알고리즘을 이용하여 집중 강우의 회피가 가능한 임무 지점 간 경로를 산출한 후 진화 연산(Evolutionary Computation, EC)을 이용하여 UAV의 순회 경로를 계획하였다. Obermeyer[22]는 UAV의 광학 카메라로 정보·감시·

정찰 임무를 수행하기 위한 순회 경로 계획에 GA를 적용하였다.

UAV의 이동 경로 및 순회 경로 계획에 관한 기존 연구는 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> UAV 경로 계획 기존 연구

연구자	유형	해법
Bortoff[5]	SPP	Voronoi Diagram
Cunningham and Roberts[7]	TSP	Adaptive Path Planning
Jun and D'Andrea[14]	MRPP	Ford-Bellman
Jia and Vagners[13]	SPP	PEA
Gao et al.[8]	SPP	GA
Nikolos and Brintaki[21]	SPP	EA
Bernhard et al.[4]	SPP	Dijkstra
Mittal and Deb[20]	SPP	NSGA-II
Sanders and Ray[23]	SPP	NSGA-II
Mitsutake and Higashino[19]	SPP TSP	A*, EC
Sathyaraj et al.[24]	SPP	Dijkstra, A*, Ford-Bellman, Floyed-Warshall
Gonzalez et al.[9]	SPP	NSGA-II
Sujit and Beard[25]	SPP	PSO
Obermeyer[22]	TSP	GA

기존의 UAV 경로 계획에 관한 연구는 출발 지점에서 목표 지점으로의 이동 경로를 계획하거나 출발 지점과 임무수행을 위한 지점들의 순회 경로 계획에 관한 각각의 연구이다. UAV는 운용 기지에서 이륙하여 임무를 수행하기 위한 임무 지점들을 비행한 후 다시 기지로 복귀하는 개념으로 운용하고 있으며, 임무수행을 보장하기 위해 생존성이 극대화되는 임무 지점 간의 이동 경로와 순회 경로의 동시 계획이 필요하다. 이동 경로와 순회 경로를 동시에 계획한 연구는 A*-EC 알고리즘을 이용한 Mitsutake and Higashino[19]의 연구가 유일하며, 본 연구에서는 A* 알고리즘의 단점을 극복한 A*PS 알고리즘을 적용하여 이동 경로를 계획하고, PGA를 이용하여 순회 경로를 계획하였다.

3. 문제 모형화 및 수리모형

생존성 극대화를 위한 UAV 경로 계획 문제의 모형화를 위해서는 다음의 요소들을 고려해야 한다.

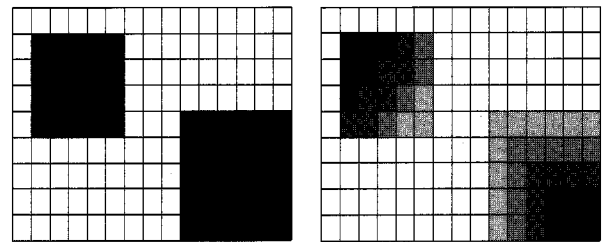
- 활동 공간의 형태는 어떻게 표현할 것인가?

- UAV의 이동 방법은 어떻게 표현할 것인가?
- UAV의 생존 확률은 어떻게 산정할 것인가?

본 절에서는 UAV 경로 계획 문제를 모형화하기 위한 활동 공간의 형태, UAV 이동 방법, UAV 생존 확률 산정 방법을 제시하고, UAV의 경로를 계획하기 위한 수리모형을 구축한다.

3.1 활동 공간 형태

본 연구에서 활동 공간은 UAV와 장애물 및 적 대공무기가 존재하고, 이들의 활동이 이루어지는 공간으로 정의하며, 활동공간을 표현하기 위한 지도는 격자 지도(Grid Map)를 사용하였다. 격자 지도는 활동 공간을 격자로 나누고, 그 격자 안에 장애물이나 위협을 표시한 지도이며[16], 다음 <그림 1(a)>와 같이 산악, 계곡 등의 지형 및 건물과 같은 장애물이 존재하는 환경에 적합하도록 장애물의 유무만을 구별하여 격자 안에 표시한 일반 격자 지도(General Grid Map)와 다음 <그림 1(b)>와 같이 센서나 대공무기처럼 탐지 확률 또는 격추 확률을 갖고 있는 체계에 적합하도록 장애물이 존재할 확률을 담고 있는 확률 격자 지도(Probability Grid Map)가 있다.



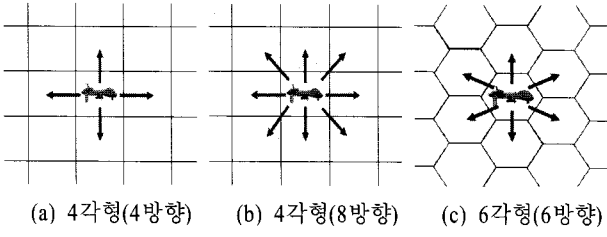
(a) 일반 격자 지도 (b) 확률 격자 지도

<그림 1> 격자 지도

3.2 UAV 이동 방법

UAV 이동 방법은 활동 공간을 구성하는 격자 지도의 셀 형태에 따라 결정된다. 셀을 이용하여 경로를 계획한 기존 연구에서의 셀 형태는 4각형 또는 6각형 셀이며, 셀 형태에 따른 이동 방법은 다음 <그림 2>와 같다.

<그림 2(a)>의 4각형 셀은 4방향으로 이동이 가능하고, <그림 2(b)>의 4각형 셀은 대각선을 포함한 8방향으로 이동이 가능하며, <그림 2(c)>의 6각형 셀은 6방향으로 이동이 가능하다. 본 연구에서는 UAV 이동 방법으로 대각선을 포함하여 8방향 이동이 가능한 <그림 2(b)>의 4각형 셀을 사용하였다.



〈그림 2〉 셀 형태에 따른 UAV 이동방법

3.3 UAV 생존 확률 산정 방법

본 연구에서 UAV 생존 확률은 주어진 임무를 수행함에 있어 장애물에 충돌하지 않고, 적의 대공무기에 격추되지 않을 확률로 정의하였으며, 다음 식 (1)과 같다.

$$PS_j = 1 - PK \quad (1)$$

여기서, PS_j 는 셀 j 에서의 UAV 생존 확률이며, PK 는 셀에서의 장애물 충돌 확률 또는 적 대공무기의 격추 확률(Probability of Kill, PK)이다.

본 연구에서는 장애물이 존재하는 셀에서의 PK 는 1을 적용하였으며, 적 대공무기 격추 확률은 적 대공무기의 성능(사정거리, 운용고도, 운용자 능력 등)과 환경(지형, 기상 등)에 영향을 받으므로 UAV 생존 확률은 Wagner et al.[27]이 탐지 모형에서 제시한 포아송 과정(Poisson Process)으로 가정하고, UAV와 적 대공무기의 거리에 따라 다음 식 (2)와 같이 산정하였다.

$$PS_j = 1 - \exp(-\alpha \cdot d_{uw}) \quad (2)$$

여기서, α 는 적 대공무기의 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터이며, d_{uw} 는 셀 u 에 위치한 UAV와 셀 w 에 위치한 적 대공무기의 유클리드 거리(Euclidean Distance)를 나타낸다. W 개의 적 대공무기가 중첩되어 있는 경우 PK 는 병렬(Parallel) 신뢰도 개념에 의거하여 다음 식 (3)과 같이 산출된다.

$$PK = 1 - \prod_{w \in W} \{1 - \exp(-\alpha_w \cdot d_{uw})\} \quad (3)$$

여기서, α_w 는 적 대공무기 종류별 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터이며, 식 (1)과 식 (3)을 이용하여 산정한 W 개의 적 대공무기가 중첩되어 있는 경우 셀 j 에서의 UAV 생존 확률은 다음 식 (4)와 같다.

$$PS_j = \prod_{w \in W} \{1 - \exp(-\alpha_w \cdot d_{uw})\} \quad (4)$$

3.4 수리모형

본 연구에서는 MRPP-TSP를 이용하여 UAV 생존성 극대화를 위한 이동 및 순회 경로 계획 모형을 구축하였으며, 수리모형 구축을 위한 가정사항은 다음과 같다.

- 활동 공간은 4각형 셀로 구성된 격자 지도이다.
- UAV는 활동 공간 내에서만 활동하며, 인접 셀(8방향)로만 이동이 가능하다.
- UAV의 방향 변경은 하나의 셀 내에서 가능하다.
- UAV 기지와 임무수행을 위한 셀은 알려져 있다.
- UAV의 출발과 복귀는 기지에서만 이루어진다.
- 각 셀에서의 임무는 UAV 1회 방문으로 완수된다.
- 장애물 위치, 적 대공무기의 위치와 성능 및 환경 영향 파라미터는 알려져 있다.
- 장애물이 존재하는 셀에서의 UAV 생존 확률은 0이며, 적 대공무기가 존재하는 셀에서의 UAV 생존 확률은 UAV와 적 대공무기의 거리에 따른 포아송 과정이다.

UAV의 생존성 극대화를 위한 이동 및 순회 경로 계획 수리모형에 적용되는 용어 및 첨자는 다음과 같다.

- $S = \{(1, 1, 1), (1, 1, 2), \dots, (x, y, z)\}$: 활동 공간
- S_i : 셀 i 에서 UAV가 이동 가능한 셀 집합, $S_i \subset S$
- M : UAV의 임무 셀 집합, $M \subset S$
- P : 임무 셀 a 에서 임무 셀 b 로의 이동 경로에 포함된 셀 집합, $P \subset S$
- i, j : 셀, $i, j \in S$
- a, b : 임무 셀, $a, b \in M$
- s : 기지, $s \in S$
- p : 임의의 중간 셀, $p \in S$
- q : 임의의 중간 임무 셀, $q \in M$
- m : 임무 셀의 수
- PS_j : 셀 j 에서의 UAV 생존 확률
- PS_{ab} : 임무 셀 a 에서 임무 셀 b 로 이동할 때의 UAV 생존 확률
- PS_{UAV} : UAV의 생존 확률

임의의 셀 j 에서의 UAV 생존 확률 PS_j 는 식 (4)와 같고, 임의의 임무 셀 a 에서 임무 셀 b 로 이동할 때의 UAV 생존 확률 PS_{ab} 는 이동 경로 계획에 의해 구할 수 있으며, 다음 식 (5)와 같다.

$$PS_{ab} = \prod_{j \in P} PS_j \quad \forall a, b \in M \quad (5)$$

UAV의 생존성을 극대화하는 이동 및 순회 경로를 계획하기 위한 결정변수와 수리모형은 다음과 같다.

<결정변수>

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{셀 } i \text{에서 셀 } j \text{로 UAV가 이동하면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases} \quad \forall i, j \in S, i \neq j$$

$$y_{ab} = \begin{cases} 1, & \text{임무 셀 } a \text{에서 임무 셀 } b \text{로 UAV가 이동하면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases} \quad \forall a, b \in M, a \neq b$$

u_a, u_b : 부분 경로 방지를 위한 변수

<수리모형>

Maximize

$$PS_{UAV} = \prod_{a \in M} \left(\sum_{b \in M} PS_{ab} \cdot y_{ab} \right) \quad (6)$$

$$= \prod_{a \in M} \left[\sum_{b \in M} \left\{ \prod_{j \in S} \left(\sum_{i \in S} PS_j \cdot x_{ij} \right) \right\} \cdot y_{ab} \right]$$

Subject to

$$\sum_{j \in S} x_{sj} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in S} x_{is} = 1 \quad (8)$$

$$\sum_{b \in M} y_{ab} = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{a \in M} y_{as} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{j \in S} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in S \quad (11)$$

$$\sum_{i \in S} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in S \quad (12)$$

$$\sum_{a \in M} y_{ab} = 1 \quad \forall b \in M \quad (13)$$

$$\sum_{b \in M} y_{ab} = 1 \quad \forall a \in M \quad (14)$$

$$\sum_{i \in S_p} x_{ip} - \sum_{j \in S_p} x_{pj} = 0 \quad \forall p \in S \quad (15)$$

$$\sum_{a \in M} y_{aq} - \sum_{b \in M} y_{qb} = 0 \quad \forall q \in S \quad (16)$$

$$u_a - u_b + m \cdot y_{ab} \leq m - 1 \quad 2 \leq a \neq b \leq m \quad (17)$$

$$x_{ii} = 0 \quad \forall i \in S \quad (18)$$

$$y_{aa} = 0 \quad \forall a \in M \quad (19)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in S \quad (20)$$

$$y_{ab} \in \{0, 1\} \quad \forall a, b \in M \quad (21)$$

수리모형의 목적함수 식 (6)은 각 셀 간의 이동과 임무 셀 간의 이동을 결정하는 2개의 결정변수를 이용하여 UAV의 생존성을 극대화하는 비선형함수로 구축하였고, UAV의 이동 경로 생존 확률은 임무 셀 간 이동 경로상의 각 셀에서 UAV가 장애물을 회피하거

나 적 대공무기에 격추되지 않을 확률의 곱이며, UAV의 생존 확률은 순회 경로상의 UAV의 이동 경로 생존 확률의 곱으로 표현하였다. 식 (7)에서 식 (10)은 UAV의 출발과 도착이 기지에서만 이루어짐을 의미하고, 식 (11)과 식 (12)는 인접 셀로만 UAV의 이동을 허용하는 제약이며, 식 (13)과 식 (14)는 각 임무 셀에 UAV가 1회만 방문할 수 있다는 제약을 의미한다. 식 (15)는 UAV가 임의의 인접 셀로 이동한 후에 반드시 다른 인접 셀로 출발해야 한다는 의미이며, 식 (16)은 UAV가 임의의 임무 셀로 이동한 후에 반드시 다른 임무 셀로 출발해야 한다는 이동의 연속성을 나타낸다. 식 (17)은 부분 순환로의 형성을 방지하기 위한 제약 식이며, 식 (18)과 식 (19)는 UAV가 제자리 비행을 하지 않는다는 의미이다. 식 (20)은 셀 간의 UAV 이동이 있으면 1, 없으면 0을 나타내며, 식 (21)은 임무 셀 간의 UAV 이동이 있으면 1, 없으면 0을 나타내는 결정변수 제약이다.

비선형함수인 목적함수 식 (6)에 대수를 이용하면 다음 식 (22)와 같이 선형함수로 표현되고, 음수를 취하면 다음 식 (23)과 같이 각 셀 비용이 $-\ln PS_j$ 이고, 비용을 최소화하는 SPP-TSP의 목적함수로 변환할 수 있다.

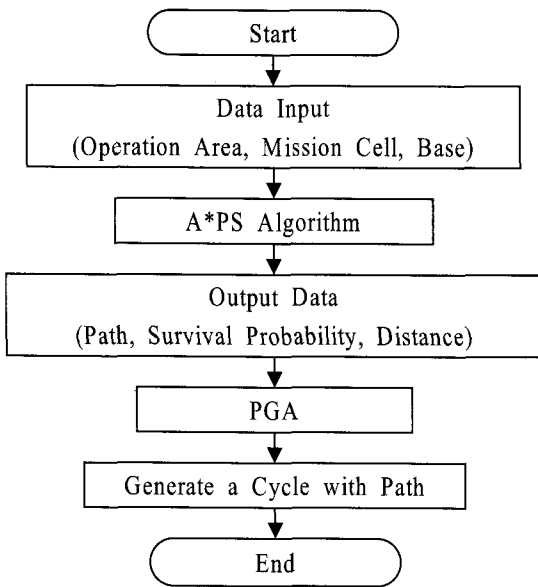
$$\begin{aligned} \ln PS_{UAV} & \quad (22) \\ &= \ln \prod_{a \in M} \left[\sum_{b \in M} \left\{ \prod_{j \in S} \left(\sum_{i \in S} PS_j \cdot x_{ij} \right) \right\} \cdot y_{ab} \right] \\ &= \sum_{a \in M} \sum_{b \in M} \ln \left\{ \prod_{j \in S} \left(\sum_{i \in S} PS_j \cdot x_{ij} \right) \right\} \cdot y_{ab} \\ &= \sum_{a \in M} \sum_{b \in M} \sum_{j \in S} \ln PS_j \cdot x_{ij} \cdot y_{ab} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Maximize} & \quad \sum_{a \in M} \sum_{b \in M} \sum_{j \in S} \ln PS_j \cdot x_{ij} \cdot y_{ab} = \quad (23) \\ \text{Minimize} & \quad \sum_{a \in M} \sum_{b \in M} \sum_{j \in S} -\ln PS_j \cdot x_{ij} \cdot y_{ab} \end{aligned}$$

변환된 문제를 해결한 후 해를 다시 지수 환원하면 원문제의 목적함수인 UAV의 생존 확률과 생존성이 극대화되는 이동 및 순회 경로를 구할 수 있다.

4. 경로 계획 알고리즘

본 연구에서는 4각형 셀로 구성된 환경에서 UAV 생존성을 극대화하는 경로 계획을 위하여 A*PS-PGA를 적용하였다. A*PS 알고리즘을 이용하여 임무 셀 간의 이동 경로와 생존 확률 및 이동 거리를 산출한 후 UAV의 생존성을 극대화하는 임무 셀들의 순회 경로 계획에 PGA를 적용하였으며, A*PS-PGA의 수행절차는 <그림 3>과 같다.



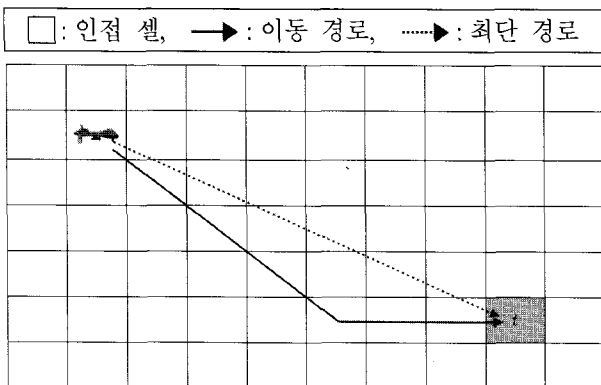
<그림 3> A*PS-PGA 수행절차

4.1 A*PS 알고리즘

셀을 이용한 활동 공간에서 UAV의 이동 경로를 계획하는 경우 UAV의 방향 변경은 한정되며, 다음 <그림 4>와 같은 비효율성이 나타난다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 A* 알고리즘을 이용하여 최초 이동 경로를 계획한 후 Post Smoothing과정으로 Path Smoothing Procedure를 수행하는 A*PS 알고리즘을 적용하였다.

Hart et al.[11]에 의해 제안된 A* 알고리즘은 계산량을 줄이고 탐색 속도를 높이기 위하여 Dijkstra 알고리즘을 기반으로 목표 지점의 방향성을 나타내는 다음 식 (24)의 휴리스틱 함수를 이용해 더욱 유망한 교점들을 깊이 우선 탐색(Depth First Search)하는 알고리즘이다.



<그림 4> 이동 경로의 비효율성

$$f(i) = g(i) + h(i) \quad (24)$$

여기서, $g(i)$ 는 출발 지점에서 임의의 특정 교점 i 에 이르는 최소 비용을 의미하고, $h(i)$ 는 교점 i 로부터 목표 지점에 이르는 최소의 비용을 추정한 비용이며, $f(i)$ 는 출발 지점에서 교점 i 를 거쳐 목표 지점에 이르는 총 경로의 최소 비용을 추정한 값이다. A* 알고리즘의 의사코드는(Pseudo Code) 다음 <그림 5>와 같다.

```

function A* (s, t)
  CLOSED list := the empty set
  OPEN list := {s}
  g(s) := 0, f(s) := h(s) := h_calc[s, t]
  while OPEN list is not an empty set
    Cur_Node := Extract_Min f(OPEN list)
    if Cur_Node := goal
      return Best_Path
    remove Cur_Node from OPEN list
    add Cur_Node to CLOSED list
    each neighbor node N of Cur_Node
    if CLOSED list  $\ni$  N
      continue
    else if OPEN list  $\ni$  N
      calculate g(N), h(N), f(N)
      relaxation(N, Neighbor in OPEN list)
    else
      calculate g(N), h(N), f(N)
      Cur_Node and add N to OPEN List
  return failure
    
```

<그림 5> A* 알고리즘 의사코드

본 연구에서 $g(i)$ 는 출발 지점에서 임의의 특정 교점 i 까지 장애물이나 적 대공무기를 회피하여 이르는 최소 거리를 적용하였고, 일반 격자 지도의 경우 $h(i)$ 는 교점 i 에서 목표 지점까지의 대각선 거리(Diagonal Distance)를 적용하였으며, 확률 격자 지도의 경우 대각선 거리에 $10^{-\log(\text{number of cell})}$ 을 곱하여 적용하였다.

A* 알고리즘을 이용하여 계획한 경로의 비효율성 개선을 위하여 Botea et al.[6]이 제시한 Path Smoothing 개념을 적용하였다. Path Smoothing Procedure는 이동 경로로 계획된 셀들의 집합에서 각각의 셀에 대해 다른 셀과의 가능한 모든 직선을 추출한 후 장애물과 접촉하지 않으면서 길이가 가장 긴 직선을 선정하고, 선

정된 직선의 두 셀은 격자 단위를 무시한 직선으로 연결하는 것이며, 의사코드는 다음 <그림 6>과 같다.

```

function Obstacle_Check[ $C_i(x_i, y_i), C_j(x_j, y_j)$ ]
  if ( $x_i := x_j, y_i := y_{lb}, y_j := y_{ub}$ )
    for ( $x := x_i, y := y_{lb}$  to  $y_{ub}$ )
      if [ $C(x, y) := obstacle$ ] OBSTACLE; break
    return NOT_OBSTACLE
  else  $S := (y_j - y_i) / (x_j - x_i)$ 
    for ( $x := x_i$  to  $x_j$ )
       $y_{lb} := round [y_i + (x - x_i - 0.5) \times S]$ 
       $y_{ub} := round [y_i + (x - x_i + 0.5) \times S]$ 
      if ( $x := x_i, y_{lb} := y_i$ )
      if ( $x := x_j, y_{ub} := y_j$ )
      for ( $y := y_{lb}$  to  $y_{ub}$ )
        if [ $C(x, y) := obstacle$ ] OBSTACLE; break
      return NOT_OBSTACLE
function Path Smoothing Procedure[ $C_i(x_i, y_i), C_j(x_j, y_j)$ ]
  for ( $i := 0$  to  $i < C_{num}$ )
    for ( $j := C_{num}$  to  $j > i$ )
      if Obstacle_Check( $C_i, C_j$ ) := NOT_OBSTACLE
        remove cells between  $C_i$  and  $C_j, i := j$ ; break
    
```

<그림 6> Path Smoothing Procedure 의사코드

4.2 병렬 유전자 알고리즘(PGA)

PGA는 Holland[12]가 제안한 SGA(Standard GA) 여러 개를 병렬로 연결하여 주기적으로 정보 교환하는 알고리즘으로 Grefenstette[10]가 제안하였다.

본 연구에서는 하나의 큰 모집단(Population)을 여러 개의 부분 모집단(Sub-population)으로 나누어 격리시키고, 격리된 각 부분 모집단이 서로 독립적으로 일정 세대 동안 진화시킨 후 어느 한 세대에서 부분 모집단 간 이주(Migration)가 이루어지는 섬 모델(Island Model)을 사용하였다. 유전자 표현(Gene Representation)은 정수 문자열로 다음 <그림 7>과 같이 일차원 배열의 형태로 나타내었으며, 유전자는 UAV의 임무 셀 방문순서를 나타낸다.

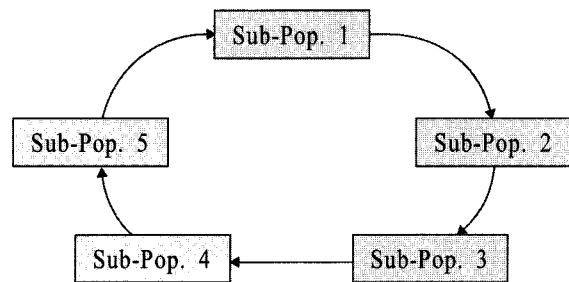


<그림 7> 유전자 표현

PGA의 모집단은 초기 모집단과 부분 모집단이 있으며, 초기 모집단은 임의생성 기법을 이용하여 생성한 후 부분 모집단에 임의로 분배하였다. 적합도 평가(Evaluation)는 UAV의 생존 확률이 높은 순회 경로가 우수한 해로 평가되기 위해 생존 확률에 대수와 음수를 취한 비용 $-\ln PS_{UAV}$ 가 최소화되어야 하므로 다음 식 (25)와 같이 순회 경로 비용의 역수를 사용하였다.

$$fitness = 1 / -\ln PS_{UAV} \quad (25)$$

선별(Selection)은 세대별 우수한 해의 생존을 보장하고, 지역해로의 수렴을 방지하기 위하여 적합도가 작은 해의 생존을 확률적으로 보장해주는 룰렛 휠(Roulette Wheel) 방법과 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되는 것을 보장하기 위하여 세대별 우수한 해는 반드시 생존할 수 있도록 하는 엘리트 방법(Elitist Method)을 혼합한 엘리트 룰렛 휠(Elitist Roulette Wheel) 방법을 적용하였다. 교차(Crossover)와 돌연변이(Mutation)는 방문순서가 중복되면 경로가 형성되지 않으므로 각각 순서교차(Order Crossover)와 교환돌연변이(Exchange Mutation)를 적용하였다. 이주를 위한 이웃구조는 다음 <그림 8>과 같이 원형 이웃구조(Ring Topology)를 사용하였으며, 이주시킬 개체 및 교체될 개체의 선별은 식 (25)의 적합도 평가 함수를 적용하였다.



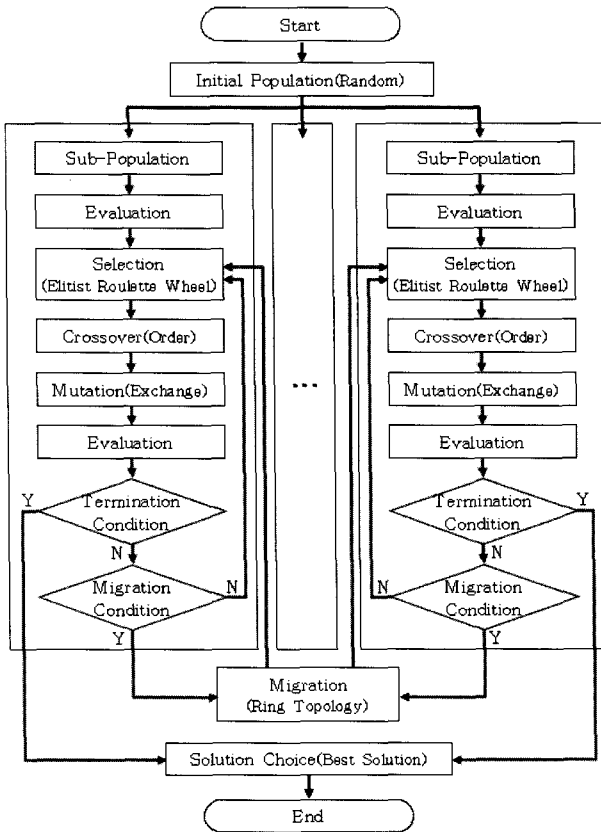
<그림 8> 원형 이웃구조

이주 및 유전 파라미터는 적합도에 미치는 영향을 반복 실험하여 비교한 후 문제의 특성에 맞는 파라미터를 선정하여 적용하였으며, 다음 <표 2>와 같다.

<표 2> 유전 및 이주 파라미터

파라미터	유전 파라미터				이주 파라미터			
	모집단 크기	교차율	돌연변이율	종료 세대 수	부분 모집단 수	이주 크기	이주 주기	이주율
값	500	0.45	0.03	1,000	5	100	100	0.15

본 연구에서 적용한 PGA의 수행절차는 다음 <그림 9>와 같다.



<그림 9> PGA 수행절차

5. 실험 및 결과 분석

UAV의 생존성을 극대화하는 경로를 계획하기 위해 2개의 예제를 생성한 후 Dijkstra, A*, A*PS 알고리즘을 이용하여 UAV 이동 경로를 산출한 후 비교하였으며, A*PS-PGA를 적용하여 UAV 이동 및 순회 경로를 산출한 후 CPLEX로 구한 최적해와 비교하였다. 실험에 활용한 알고리즘은 MATLAB을 이용하여 구축하였으며, Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU(3.16GHz, 2GB RAM) 환경의 컴퓨터에서 수행하였다.

5.1 실험 계획

실험 예제는 장애물이 존재하는 경우(예제 1)와 적 대공무기가 존재하는 경우(예제 2)를 대상으로 해의 품질 및 연산 시간을 측정하였으며, 실험 환경은 대각선을 포함하여 8방향으로 이동이 가능한 4각형 셀을 이용하여 100×100의 10,000셀 격자 지도를 구축하였다.

예제 1은 일반 격자 지도를 이용하여 장애물 수가 전체 셀의 10%, 20%, 30%이고, 장애물이 임의 위치에 존재하는 3개의 문제를 구축하였다. 예제 2는 김세현·염건 [1]이 제시한 확률 격자 지도 환경의 예제를 수정하여 구축하였으며, 최대 사정거리가 7이고, 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터 $\alpha = 1.1$ 인 적 대공무기 112개를 적용하였다.

5.2 실험 결과 분석

UAV 이동 경로를 계획하기 위하여 Dijkstra, A*, A*PS 알고리즘을 적용하였으며, 예제 1은 다음 <표 3>과 같이 각 10회 실험 후 이동 거리 및 연산 시간의 평균 값을 산출하였고, 예제 2는 다음 <표 4>와 같이 이동 거리, 생존 확률 및 연산 시간을 산출하였다.

<표 3> UAV 이동 경로 계획 실험 결과(예제 1)

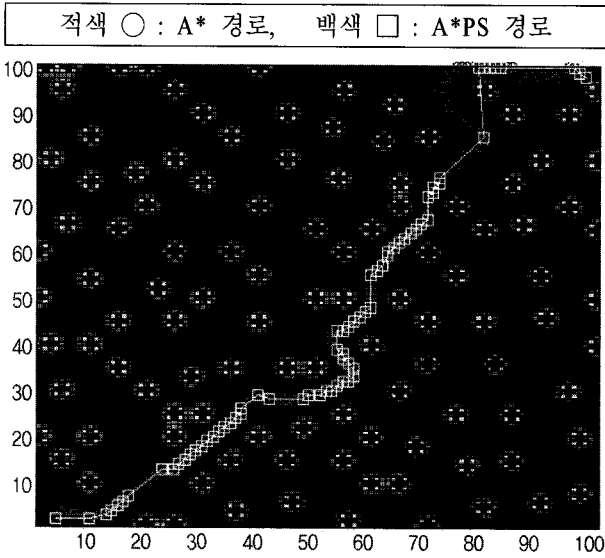
장애물	Dijkstra		A*		A*PS	
	이동 거리	연산 시간	이동 거리	연산 시간	이동 거리	연산 시간
10%	150.17	39.24초	151.76	0.03초	146.71	0.05초
20%	154.39	27.13초	155.81	0.05초	149.37	0.07초
30%	159.84	25.76초	161.52	0.06초	151.45	0.08초
평균	154.80	30.71초	156.36	0.04초	149.17	0.06초

<표 4> UAV 이동 경로 계획 실험 결과(예제 2)

구 분	Dijkstra	A*	A*PS
이동 거리	179.38	180.11	165.83
생존 확률	0.7497	0.7350	0.7710
연산 시간	35.82초	0.19초	0.36초

UAV 이동 경로 계획 실험 결과 예제 1의 모든 경우에서 A*PS 알고리즘으로 계획한 경로의 이동 거리가 최단으로 산출되었으며, Dijkstra 알고리즘에 비해 평균 3.64%, A* 알고리즘에 비해 평균 4.60%의 거리를 단축하였다. 연산 시간은 A* 알고리즘이 평균 0.04초로 가장 짧게 소요되었고, A*PS 알고리즘은 0.06초로 근소하게 소요되었다. 예제 2에서도 A*PS 알고리즘으로 계획한 경로의 이동 거리가 최단으로 산출되었고, Dijkstra 알고리즘에 비해 7.55%, A* 알고리즘에 비해 7.93%의 거리를 단축하였으며, 생존 확률은 A*PS 알고리즘이 0.7710으로 가장 높게 산출되었다. 확률 격자 지도를 사용한 예제 2는 적 대공무기 사정거리에 의해 활동 공간의 대부분 셀에 장애물이 존재하게 되어 일반 격자 지도를 사용한 예제 1에 비해 계산량이

많아져 연산 시간이 증가되었으며, A* 알고리즘이 0.19초로 가장 짧게 소요되었고, A*PS 알고리즘은 0.36초로 근소하게 소요되었다. 예제 2에서 A*, A*PS 알고리즘을 이용하여 계획한 UAV의 이동 경로는 다음 <그림 10>과 같다.



<그림 10> UAV 이동 경로(예제 2)

UAV 이동 경로 계획 실험 결과 A* 알고리즘을 이용하여 최초 이동 경로를 계획한 후 Path Smoothing Procedure를 수행함으로써 셀을 이용한 활동 공간의 비효율성이 제거되어 품질이 우수한 해를 도출하였으며, 연산 시간이 A* 알고리즘과 근소하게 소요되는 A*PS 알고리즘이 우수함을 확인할 수 있었다.

UAV의 이동 및 순회 경로를 계획하기 위하여 각 실험 예제에 임무 지점이 10개, 25개, 50개인 경우를 생성한 후 A*PS-PGA를 이용하여 각 10회 실험하였다. 예제 1은 다음 <표 5>와 같이 이동 거리 및 연산

시간의 평균값과 최적해 제공횟수를 산출하였고, 예제 2는 다음 <표 6>과 같이 이동 거리, 생존 확률 및 연산 시간의 평균값과 최적해 제공횟수를 산출하였으며, 예제 1의 이동 거리 및 예제 2의 생존 확률을 CPLEX로 구한 최적해와 다음 식 (40)을 이용하여 오차를 비교하였다.

$$\%Error = \frac{|Near\ Optimal - Optimal|}{Optimal} \times 100 \quad (40)$$

UAV 이동 및 순회 경로 계획 실험 결과 예제 1에서 임무 지점이 10개인 경우 A*PS-PGA는 10회 실험 모두 최적해를 도출하였고, 임무 지점이 25개인 경우 장애물의 수에 따라 5~8회 최적해를 제공하였으며, CPLEX로 구한 최적해와 이동 거리 오차는 평균 0.08%로 나타났다. 연산 시간은 A*PS-PGA가 최소 10.88초, 최대 61.83초가 소요된 반면 CPLEX는 최소 1,374.21초, 최대 5,681.68초가 소요되었다. 예제 2에서도 A*PS-PGA는 임무 지점이 10개인 경우 10회 실험 모두 최적해를 도출하였으며, 임무 지점이 25개인 경우 6회 최적해를 제공하였고, 생존 확률 오차는 0.39%로 나타났다. 연산 시간은 A*PS-PGA가 최소 21.57초, 최대 426.16초가 소요된 반면 CPLEX는 최소 1,451.32초, 최대 5,019.24초가 소요되었다. 임무 지점의 수가 증가함에 따라 연산 시간이 급격히 증가하는 NP-hard의 특성을 보였으며, 임무 지점이 50개인 대형 예제의 경우 CPLEX는 해를 도출하지 못하였다.

UAV 이동 및 순회 경로 계획 실험 결과 A*PS 알고리즘을 이용하여 임무 지점 간의 비효율성이 제거된 이동 경로를 계획하고, 순회 경로 계획에 여러 개의 부분 모집단을 운용하여 서로 독립적이면서 병렬적으로 진화하는 효율성이 뛰어난 PGA를 적용함으로써 비교적 짧은 연산 시간에 품질이 우수한 해를 도출할 수 있었다.

<표 5> UAV 이동 및 순회 경로 계획 실험 결과(예제 1)

장애물	임무 지점	A*PS-PGA			CPLEX		이동 거리 오차(%)
		이동 거리	연산 시간	최적해 횟수	이동 거리	연산 시간	
10%	10	393.72	10.88초	10	393.72	1,706.22초	0
	25	475.14	23.46초	5	474.36	5,681.68초	0.16
	50	593.92	56.08초	•	•	•	•
20%	10	402.77	11.69초	10	402.77	1,594.74초	0
	25	491.52	26.39초	8	491.37	5,128.16초	0.03
	50	616.68	59.36초	•	•	•	•
30%	10	419.41	11.95초	10	419.41	1,374.21초	0
	25	510.36	28.51초	7	510.08	4,948.35초	0.05
	50	637.35	61.83초	•	•	•	•

〈표 6〉 UAV 이동 및 순회 경로 계획 실험 결과(예제 2)

임무 지점	A*PS-PGA				CPLEX			생존 확률 오차(%)
	이동 거리	생존 확률	연산 시간	최적해 횟수	이동 거리	생존 확률	연산 시간	
10	431.62	0.7018	21.57초	10	431.62	0.7018	1,451.32초	0
25	525.81	0.6406	97.48초	6	523.19	0.6431	5,019.24초	0.39
50	650.90	0.5915	426.16초	•	•	•	•	•

6. 결 론

본 연구에서는 UAV의 생존성을 극대화하는 경로를 계획하기 위하여 MRPP-TSP를 이용한 수리모형을 제시하였다. 대수를 이용하여 MRPP를 SPP로 변환한 후 A*PS 알고리즘을 이용하여 이동 경로를 계획하고, PGA를 이용하여 순회 경로를 계획하였다.

A*PS 알고리즘은 A* 알고리즘을 이용하여 최초 이동 경로를 계획한 후 Post Smoothing 과정인 Path Smoothing Procedure를 수행함으로써 셀을 이용한 활동 공간의 비효율성이 제거되어 Dijkstra 및 A* 알고리즘에 비해 해의 품질이 우수하며, 연산시간이 비교적 짧아 이동 경로 계획에 효율적임을 확인할 수 있었다. 또한 순회 경로 계획에 여러 개의 부분 모집단을 운용하여 서로 독립적이면서 병렬적으로 진화함으로써 알고리즘의 효율성이 뛰어난 PGA를 적용함으로써 비교적 짧은 연산 시간에 품질이 우수한 해를 도출할 수 있었다.

최근 전쟁에서 UAV는 감시·정찰을 통한 정보 수집은 물론 항공기, 유도무기, 순항 미사일의 정밀공격 임무에 크게 기여하였으며, 무장을 장착하여 표적 획득과 동시에 직접 공격하는 전투임무를 수행하는 등 실전에서의 역할 및 활용이 증대되고 있다. 향후에는 인명중시를 위해 UAV가 유인 항공기의 대부분을 대체하게 될 것이다. 따라서 군사작전에서 성공적인 UAV의 임무수행을 보장하기 위해서는 생존성이 극대화되는 이동 및 순회 경로의 계획과 최단 시간 또는 최단 거리 등의 최적 경로 계획이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 김세현, 염건; “비행체의 경로최적화”, 한국OR학회지, 8(1) : 11-18, 1983.
- [2] 방위사업청; “미래 전쟁의 주역 무인항공기”, 방위사업청, 2009.
- [3] 이상현; “메타 네트워크 이론 및 응용”, 국방대학교, 2003.
- [4] Bernhard, W., Micheal, N., and Luigi, S.; “Global Real-Time Path Planning for UAVs in Uncertain Environment,” *Proceedings of the International Conference on Control Applications*, 2006.
- [5] Bortoff, S. A.; “Path Planning for UAVs,” *Proceedings of the American Control Conference*, 2000.
- [6] Botea, A., Muller, M., and Schaeffer, J.; “Near Optimal Hierarchical Path-Finding,” *Journal of Game Development*, 11(1) : 7-28, 2004.
- [7] Cunningham, C. T. and Roberts, R. S.; “An Adaptive Path Planning Algorithm for Cooperating Unmanned Air Vehicles,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, South Korea, 2001.
- [8] Gao, X., Fu, X., and Chen, D.; “A Genetic-Algorithm-Based Approach to UAV Path Planning Problem,” *Proceedings of the WSEAS International Conference on Simulation, Modeling, and Optimization*, 2005.
- [9] Gonzalez, L. F., Lee, D. S., Walker, R., and Periaux, J.; “Optimal Mission Path Planning(MPP) for an Air Sampling Unmanned Aerial System,” *Proceedings of the Austral-Asian Conference on Robotics and Automation*, 2009.
- [10] Grefenstette, J. J.; “Parallel Adaptive Algorithm for Function Optimization,” Technical Report NO.CS-81-19, Vanderbilt University, Computer Science Department, Nashville, 1981.
- [11] Hart, P. E., Nilsson, N. J., and Raphael, B.; “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,” *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*, 4(2) : 100-107, 1968.
- [12] Holland, J. H.; “Adaption in Natural and Artificial Systems,” *University of Michigan Press*, Ann Arbor, 1975.
- [13] Jia, D. and Vagners, J.; “Parallel Evolutionary Algorithms for UAV Path Planning,” *Proceedings of the AIAA Intelligent Systems Technical Conference*, 2004.
- [14] Jun, M. S. and D’Andrea, R.; “Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain and Adversarial Environments,” *Cooperative Control : Models, Applications and Algorithms*, 2002.

- [15] Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G., and Shmoys, D. B.; "The Traveling Salesman Problem," *John Wiley and Sons, Inc.*, NY, 1985.
- [16] Mckerrow, P. J.; "Introduction to Robotics," *Addison-Wesley Publishing*, 1993.
- [17] Miller C. E., Tucker, A. W., and Zemlin R. A.; "Integer programming formulation of traveling salesman problems," *Journal of Association for Computing Machinery*, 7(4) : 326-329, 1960.
- [18] MIL-STD-721B; "Definition of Effectiveness Terms for Reliability, Maintainability, Human factors, and Safety," *Microelectronics and Reliability*, 11 : 429-433, 1972.
- [19] Mitsutake, K. and Higashino, S.; "An A*-EC Hybrid Path Planning Method for Waypoint Traveling Problem Considering Terrain," *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2008.
- [20] Mittal, S. and Deb, K.; "Three-Dimensional Offline Path Planning for UAVs using Multiobjective Evolutionary Algorithms," *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2007.
- [21] Nikolos, I. K. and Brintaki, A. N.; "Coordinated UAV Path Planning using Differential Evolution," *Proceedings of the International Intelligent Control*, 2005.
- [22] Obermeyer, K. J.; "Path Planning for a UAV Performing Reconnaissance of Static Ground Targets in Terrain," *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2009.
- [23] Sanders, G. and Ray, T.; "Optimal Offline Path Planning of a Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicle(UAV) using an Evolutionary Algorithm," *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2007.
- [24] Sathyaraj, B. M., Jain, L. C., Finn, A., and Drake, S.; "Multiple UAVs Path Planning Algorithms : A Comparative Study," *Journal of Fuzzy Optimization and Decision Making*, 7(3) : 257-267, 2008.
- [25] Sujit, P. B. and Beard, R.; "Multiple UAV Path Planning using Anytime Algorithms," *Proceedings of the American Control Conference*, 2009.
- [26] The Office of the Secretary of Defence; "Unmanned Aircraft System Roadmap 2007~2032," *U.S. DoD*, 2007.
- [27] Wagner, D. H., Mylander, W. C., and Sanders, T. J.; "Naval Operations Analysis," *Naval Institute Press*, Annapolis, Maryland, 1999.