

3차원 격자지도 기반 생존성 극대화를 위한 다수 무인 항공기 임무경로 계획

김기태^{1*} · 전건욱²

¹합동군사대학교 해군대학 / ²국방대학교 운영분석학과

Mission Path Planning to Maximize Survivability for Multiple Unmanned Aerial Vehicles based on 3-dimensional Grid Map

Ki Tae Kim¹ · Geonwook Jeon²

¹Naval War College, Joint Forces Military University

²Department of Operations Research, Korea National Defense University

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 humans. UAVs are currently employed in many military missions and a number of civilian applications. 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 Multiple UAVs's path planning to maximize survivability. A mathematical programming model is composed by using MRPP (Most Reliable Path Problem) and MTSP (Multiple Traveling Salesman Problem). After transforming MRPP into Shortest Path Problem (SPP), *A*PS_PGA* applies a path planning for multiple UAVs.

Keyword: unmanned aerial vehicle, path planning, most reliable path problem, shortest path problem, *A**(A-star), parallel genetic algorithm

1. 서론

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(The Office of the Secretary of Defense, 2007). UAV는 획득의 경제성과 전투요원의 생존성이 보장되는 무기체계로 현재 및 미래의 각종 군사작전에서 이용가치가 점점 높아지고 있으며, 높은 잠재력을 가진 UAV는 전장에서 정찰, 기만, 공격 등의 다양한 임무를 수

행한다. 하지만 UAV는 임무 가능시간, 유효한 탑재능력 등의 제한을 가지고 있으므로 다수 UAV의 임무 계획이 필요한 실정이며, 임무 완수를 보장하기 위하여 UAV의 생존성이 극대화 되도록 임무지점에 대한 순회경로와 임무지점 간 이동경로의 동시 계획이 필요하다.

본 연구에서는 다수 UAV의 생존성을 극대화하는 임무경로를 계획하고자 한다. 다수 UAV의 임무경로 계획 문제는 제한된 임무능력을 보유한 UAV가 기지에서 출발하여 임무를 수행해야 할 다수의 셀에서 임무를 수행한 후 다시 기지로 복귀하는 문제이며, 장애물과 적의 대공위협을 회피하여 UAV의 생

존성이 극대화되도록 임무를 수행해야 할 셀 간의 이동경로와 다수 셀들의 순회경로를 계획하는 문제이다. 최대신뢰경로 문제(Most Reliable Path Problem, MRPP)와 복수순회판매원문제(Multiple Traveling Salesman Problem, MTSP)를 이용하여 다수 UAV의 생존성을 극대화하는 임무경로를 계획하기 위한 수리모형을 구축하였으며, 대수(Logarithm)를 이용하여 MRPP를 최단경로문제(Shortest Path Problem, SPP)로 변환한 후 A^*PS (A^* -star with Post Smoothing) 알고리즘을 이용하여 이동경로를 계획하고, 병렬 유전자 알고리즘(Parallel Genetic Algorithm, PGA)을 이용하여 다수 UAV의 순회경로를 계획하였다.

2. 기존 연구 고찰

UAV의 이동경로 계획에 관한 연구로 Bortoff(2000)는 보로노이 선도(Voronoi Diagram)를 이용하여 적의 레이더 탐지를 회피하기 위한 UAV 이동경로를 계획하였으며, Jun and D'Andrea(2002)는 목적함수에 대수를 취하여 SPP로 변환한 후 Ford-Bellman 알고리즘을 이용하여 경로를 계획하였다. Jia and Vagners(2004)는 병렬 진화 알고리즘(Parallel Evolutionary Algorithm)을 이용하였으며, Gao *et al.*(2005)은 UAV의 초기 속력과 침로를 입력하고, 이후 비행하면서 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)으로 속력과 침로를 3단계(+, 0, -)로 변경하여 경로를 계획하였다. Nikolos and Brintaki(2005)는 우수해로 수렴하는 성능과 효율성을 향상시킨 차별화된 진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)을 적용하였으며, Weiss *et al.*(2006)은 Dijkstra 알고리즘을 적용하여 UAV 이동경로를 계획하였다. Mitsutake and Higashino(2008)는 A^* (A^* -star) 알고리즘을 이용하여 집중 강우 지역을 피해서 비행하기 위한 이동경로를 계획하였으며, Sathyaraj *et al.*(2008)은 이동경로를 계획하기 위한 SPP 알고리즘(Ford-Bellman, Floyd-Warshall, Dijkstra, A^*)을 비교한 후 A^* 알고리즘의 성능이 우수함을 보였고, Sujit and Beard(2009)는 입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization)를 이용하여 이동경로를 계획하였다.

기존의 UAV 이동경로 계획에 관한 연구는 대부분 2차원 환경에서의 연구이며, 최근 들어 3차원 환경에서의 연구가 이루어지고 있다. Canny and Rief(1987)는 3차원 환경에서의 SPP가 NP-hard 문제임을 증명하였으며, Nikolos *et al.*(2003)은 3차원 환경에 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm)을 적용하였고, Mittal and Deb(2007), Sanders and Ray(2007), Gonzalez *et al.*(2009)은 NSGA-II(Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II)를 이용하여 산악과 계곡으로 이루어진 지형을 고려한 3차원 환경에서의 이동경로를 계획하였다. Kim and Jeon(2011)은 3차원 환경에서 A^*PS 알고리즘을 이용하여 UAV의 생존성을 극대화하는 이동경로를 계획하였다.

UAV의 순회경로 계획에 관한 연구로 Cunningham and Roberts(2001)는 12대의 UAV를 이용하여 124개 지점의 센서 네트워크를 구축하기 위해 총 비용을 최소화하는 Adaptive Path Planning 알고리즘을 적용하여 순회경로를 계획하였으며, Harder *et al.*

(2004)은 금단 검색법(Tabu Search, TS)를 기반으로 하는 아키텍처를 제안하고, Solomon(1987)이 제시한 VRPTW(Vehicle Routing Problem with Time Windows) 예제에 적용하였다. Russell and Lamont(2005)는 GA를 CVRP(Capacitated VRP) 예제에 적용하여 UAV의 순회경로를 계획하였으며, Rathinam and Sengupta(2006)는 2-Approximation 알고리즘을 이용하여 다수의 기지가 존재하는 경우 총 비용이 최소화되는 UAV의 순회경로를 계획하였다. Mitsutake and Higashino(2008)는 A^* 알고리즘으로 임무지점 간 경로를 산출한 후 진화 연산(Evolutionary Computation, EC)을 이용하여 UAV 순회경로를 계획하였으며, Takebayashi *et al.*(2008)은 EC를 이용하여 32개 임무지역에 대한 UAV의 수가 최소화하도록 순회경로를 계획하였다. Peng and Gao(2008)는 VRPSD(VRP with Stochastic Demand)의 확률적 수요를 확률적 정찰 시간으로 변경하였으며, Insert와 Nearest Neighbor를 이용하여 총 임무 시간과 UAV 수를 최소화하는 순회경로를 계획하였다. Obermeyer(2009)는 UAV의 광학 카메라로 정보·감시·정찰 임무를 수행하기 위한 순회경로 계획에 GA를 적용하였다.

UAV의 이동 및 순회경로 계획에 관한 기존 연구는 다음 <Table 1>과 같다.

Table 1. Literature Review of UAV's Path Planning

Researcher	Type	Methodology
Bortoff(2000)	SPP	Voronoi Diagram
Cunningham and Roberts(2001)	TSP	Adaptive Path Planning
Jun and D'Andrea(2002)	MRPP	Ford-Bellman
Nikolos <i>et al.</i> (2003)	SPP	EA
Jia and Vagners(2004)	SPP	PEA
Harder <i>et al.</i> (2004)	MTSP	TS
Gao <i>et al.</i> (2005)	SPP	GA
Nikolos and Brintaki(2005)	SPP	EA
Russell and Lamont(2005)	MTSP	GA
Weiss <i>et al.</i> (2006)	SPP	Dijkstra
Rathinam and Sengupta(2006)	TSP	2-Approximation
Mittal and Deb(2007)	SPP	NSGA-II
Sanders and Ray(2007)	SPP	NSGA-II
Mitsutake and Higashino(2008)	SPP TSP	A^* , EC
Sathyaraj <i>et al.</i> (2008)	SPP	Dijkstra, A^* , Ford-Bellman, Floyd-Warshall
Takebayashi <i>et al.</i> (2008)	MTSP	EC
Peng and Gao(2008)	MTSP	Insert, Nearest Neighbor
Obermeyer(2009)	TSP	GA
Gonzalez <i>et al.</i> (2009)	SPP	NSGA-II
Sujit and Beard(2009)	SPP	PSO
Kim and Jeon(2011)	MRPP	A^*PS

기존의 UAV 임무경로 계획에 관한 연구의 대부분이 2차원 환경을 기반으로 하였으며, 3차원 환경이 2차원에 비해 표현이나 구성이 복잡하고, 많은 계산량이 필요하기 때문에 3차원 환경을 기반으로 하는 연구가 미흡하였다. 기존 연구는 출발 지점에서 목표 지점까지의 이동경로를 계획하거나 출발 지점과 임무수행을 위한 지점들의 순회경로 계획에 관한 각각의 연구이다. UAV는 운용 기지에서 이륙하여 임무를 수행하기 위한 임무지점들을 비행한 후 다시 기지로 복귀하는 개념으로 운용하고 있으며, 임무수행을 보장하기 위해 생존성이 극대화되는 임무지점 간의 이동경로와 순회경로의 동시 계획이 필요하다. 본 연구에서는 UAV 비행 환경과 유사한 3차원 환경을 기반으로 A^* 알고리즘의 단점을 극복한 A^*PS 알고리즘을 적용하여 이동경로를 계획하고, PGA를 이용하여 다수 UAV의 순회경로를 계획하였다.

3. 임무경로 계획 문제 모형화 및 수리모형

본 장에서는 UAV 임무경로 계획 문제를 모형화하기 위한 활동공간의 형태, UAV 이동방법, UAV 생존확률 산정 방법을 제시하고, UAV의 임무능력을 고려한 다수 UAV 경로 계획 수리모형을 구축하였다.

3.1 임무경로 계획 문제 모형화

본 연구에서는 UAV가 활동하고, 장애물 및 적 대공무기(Surface to Air Missile, SAM)가 존재하는 공간을 활동공간으로 정의하였다. 활동공간의 표현에 장애물의 유무가 아닌 장애물이 존재할 확률을 담고 있어 센서나 대공무기처럼 탐지확률 또는 격추확률을 갖고 있는 체계에 적합한 확률격자지도를 사용하였으며, 6면체 형태의 셀을 이용하여 3차원 환경의 활동공간을 구성하였다.

UAV 이동방법은 활동공간을 구성하고 있는 격자지도의 셀 형태에 따라 결정된다. 본 연구에서는 2차원 환경의 셀 중에서 대각선을 포함하여 8방향으로 이동이 가능한 4각형 셀을 3차원 환경으로 모형화한 6면체 형태의 셀을 사용하였으며, UAV 이동방법은 다음 <Figure 1>과 같이 수평(Horizon) 8방향, 수직(Vertical) 18방향[위쪽(Upside) 9방향, 아래쪽(Downside) 9방향]의 총 26방향으로 이동이 가능한 모형을 사용하였다.

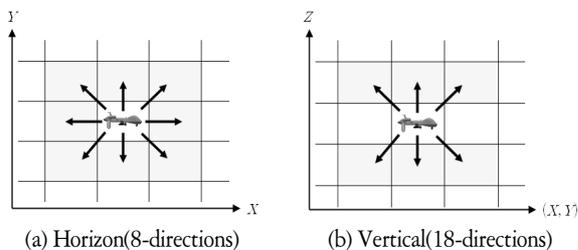


Figure 1. UAV's Moving Method in 3-Dimensional Environment

UAV의 생존확률은 주어진 임무를 수행함에 있어 장애물에 충돌하지 않고, 적 대공무기에 격추되지 않을 확률로 정의하며, 본 연구에서는 장애물이 존재하는 셀에서의 생존확률은 0으로 하였으며, 적 대공무기가 존재하는 셀에서의 생존확률은 Wagner *et al.*(1999)이 탐지 모형에서 제시한 포아송 과정(Poisson Process)으로 가정하고, UAV와 적 대공무기의 거리에 따라 다음 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$PS_{UAV} = 1 - \exp(-\alpha \cdot d_{uw}) \quad (1)$$

여기서, PS_{UAV} 는 UAV의 생존확률이고, α 는 적 대공무기의 성능 및 환경 영향을 나타내는 파라미터이며, d_{uw} 는 셀 u 에 위치한 UAV와 셀 w 에 위치한 적 대공무기의 유클리드 거리(Euclidean Distance)를 나타낸다. 적 대공무기의 최대 사정거리는 중력을 포함한 외력의 영향으로 고도가 증가할수록 감소하므로 UAV와 적 대공무기의 수직거리 산정시 고도에 따른 사정거리 보상 가중치 β 를 적용하였으며, 다음 식 (2)와 같다.

$$\beta = \text{최대 사정거리} / \text{최대 운용고도} \quad (2)$$

셀 $u(x_u, y_u, z_u)$ 에 위치한 UAV와 셀 $w(x_w, y_w, z_w)$ 에 위치한 적 대공무기의 유클리드 거리 d_{uw} 는 다음 식 (3)과 같다.

$$d_{uw} = \sqrt{(H_{range})^2 + (V_{range})^2} \quad (3)$$

$$= \sqrt{(x_w - x_u)^2 + (y_w - y_u)^2 + \{\beta(z_w - z_u)\}^2}$$

식 (3)을 이용하여 산출한 d_{uw} 가 적 대공무기의 최대 사정거리 이내($0 \leq d_{uw} \leq$ 최대 사정거리)이면 d_{uw} , 최대 사정거리 밖($d_{uw} >$ 최대 사정거리)이면 $Big M$ 을 식 (1)에 적용하여 생존확률을 산정하였다. W 개의 적 대공무기가 중첩되어 있는 경우 UAV 생존확률은 다음 식 (4)와 같다.

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

여기서, α_w 는 적 대공무기 종류별 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터이다.

3.2 수리모형

본 연구에서는 MRPP-MTSP를 이용하여 다수 UAV의 생존성 극대화를 위한 임무경로 계획 수리모형을 구축하였으며, 수리모형 구축을 위한 가정은 다음과 같다.

- 활동공간은 3차원 환경의 6면체 셀로 구성된 격자지도이다.
- UAV는 활동공간 내에서만 활동하며, 인접한 수평·수직의 셀(26방향)로만 이동이 가능하다.

- UAV의 수평 · 수직 방향 변경은 하나의 셀 내에서 가능하다.
- 모든 UAV의 출발과 복귀는 기지에서만 이루어진다. 각 셀에서의 임무는 UAV 1회 방문으로 완수된다. 다수 UAV의 생존성을 극대화하는 임무경로 계획 수리모형에 적용되는 용어 및 첨자는 다음과 같다.

x, y, z : 셀 좌표
 $S = \{(1, 1, 1), (1, 1, 2), \dots, (x, y, z)\}$: 활동공간
 S_i : 셀 i 에서 UAV가 이동 가능한 셀의 집합, $S_i \subset S$
 M : UAV의 임무 셀 집합, $M \subset S$
 $K = \{1, 2, \dots, k\}$: UAV 집합
 P : 임무 셀 a 에서 임무 셀 b 로의 이동경로에 포함된 셀 집합, $P \subset S$
 i, j : 셀, $i, j \in S$
 a, b : 임무 셀, $a, b \in M$
 k : UAV, $k \in K$
 s : 기지, $s \in S$
 p : 임의의 중간 셀, $p \in S$
 q : 임의의 중간 임무 셀, $q \in M$
 m : 임무 셀의 수
 C_m : UAV의 임무능력
 PS_j : 셀 j 에서의 UAV 생존확률
 PS_{ab} : 임무 셀 a 에서 임무 셀 b 로 이동할 때의 UAV 생존확률
 PS_{UAV} : k 대 UAV의 평균 생존확률

다수 UAV의 생존성을 극대화하는 임무경로를 계획하기 위한 결정변수와 수리모형은 다음과 같다.

<결정변수>

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{셀 } i \text{에서 셀 } j \text{로 UAV } k \text{가} \\ & \text{이동하면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases} \quad \begin{matrix} \forall i \in S \\ \forall j \in S \\ \forall k \in K \end{matrix}$$

$$y_{abk} = \begin{cases} 1, & \text{임무 셀 } a \text{에서 임무 셀 } b \text{로 UAV} \\ & k \text{가 이동하면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases} \quad \begin{matrix} \forall a \in M \\ \forall b \in M \\ \forall k \in K \end{matrix}$$

u_a, u_b : 부분 경로 방지를 위한 변수

<수리모형>

Maximize

$$PS_{UAV} = \left[\sum_{k \in K} \left\{ \prod_{a \in M} \left(\sum_{b \in M} PS_{ab} \cdot y_{abk} \right) \right\} \right] / K$$

$$= \left[\sum_{k \in K} \left[\prod_{a \in M} \left[\sum_{b \in M} \left[\prod_{j \in S} \left(\sum_{i \in S} PS_j \cdot x_{ijk} \right) \right] \cdot y_{abk} \right] \right] \right] / K \quad (5)$$

Subject to

$$\sum_{j \in S} x_{sjk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in S} x_{isk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{b \in M} y_{sbk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{a \in M} y_{ask} = 1 \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{j \in S} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in S, k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{i \in S} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in S, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{a \in M} \sum_{k \in K} y_{abk} = 1 \quad \forall b \in M, b \neq s \quad (12)$$

$$\sum_{b \in M} \sum_{k \in K} y_{abk} = 1 \quad \forall a \in M, a \neq s \quad (13)$$

$$\sum_{i \in S_p} x_{ipk} - \sum_{j \in S_p} x_{pj k} = 0 \quad \forall p \in S, k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{a \in M} y_{aqk} - \sum_{b \in M} y_{qbk} = 0 \quad \forall q \in M, k \in K \quad (15)$$

$$\sum_{a \in M} \sum_{b \in M} y_{abk} \leq C_m + 1 \quad \forall k \in K \quad (16)$$

$$u_a - u_b + m \cdot \sum_{k \in K} y_{abk} \leq m - 1 \quad 2 \leq a \neq b \leq m \quad (17)$$

$$x_{iik} = 0 \quad \forall i \in S, k \in K \quad (18)$$

$$y_{aak} = 0 \quad \forall a \in M, k \in K \quad (19)$$

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

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

수리모형의 목적함수 식 (6)은 각 셀 간의 이동과 임무 셀 간의 이동을 결정하는 2개의 결정변수를 이용하여 다수 UAV의 생존성을 극대화하는 비선형함수로 구축하였다. 각 UAV의 이동경로 생존확률은 임무 셀 간 이동경로상의 각 셀에서 UAV가 장애물을 회피하거나 적 대공무기에 격추되지 않을 확률의 곱이며, 각 UAV의 생존확률은 순회경로상의 각 UAV의 이동경로 생존확률의 곱으로 표현하였고, 다수 UAV의 평균 생존확률을 극대화하였다. 식 (7)에서 식 (10)은 모든 UAV의 출발과 도착이 기지에서만 이루어지며, UAV가 중복 사용되지 않음을 의미한다. 식 (11)과 식 (12)는 인접 셀로만 UAV의 이동을 허용하는 제약이며, 식 (13)과 식 (14)는 각 임무 셀에 1대의 UAV만 방문할 수 있다는 제약이다. 식 (15)는 모든 UAV가 임의의 인접 셀로 이동한 후에 반드시 다른 인접 셀로 출발해야 한다는 의미이며, 식 (16)은 모든 UAV가 임의의 임무 셀로 이동한 후에 반드시 다른 임무 셀로 출발해야 한다는 이동의 연속성을 나타낸다. 식 (17)은 Miller *et al.*(1960)이 제시한 부분 순환로의 형성을 방지하는 제약식(Sub-tour Elimination Constraints)이며, 식 (18)과 식 (19)는 모든 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.

식 (6)과 같이 비선형함수 형태인 목적함수에 대수를 이용하면 다음 식 (22)와 같이 선형함수 형태로 나타낼 수 있고, 음수를 취하면 다음 식 (23)과 같이 각 셀의 비용이 $-\ln PS_j$ 이고,

비용을 최소화하는 SPP-MTSP의 목적함수로 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \ln PS_{UAV} \\
 &= \frac{\ln \sum_{k \in K} \left[\prod_{a \in M} \left[\sum_{b \in M} \left\{ \prod_{j \in S} \left(\sum_{i \in S} PS_j \cdot x_{ijk} \right) \right\} \cdot y_{abk} \right] \right]}{K} \\
 &= \frac{\sum_{k \in K} \sum_{a \in M} \sum_{b \in M} \ln \left\{ \prod_{j \in S} \left(\sum_{i \in S} PS_j \cdot x_{ijk} \right) \right\} \cdot y_{abk}}{K} \quad (22) \\
 &= \frac{\sum_{k \in K} \sum_{a \in M} \sum_{b \in M} \sum_{j \in S} \sum_{i \in S} \ln PS_j \cdot x_{ijk} \cdot y_{abk}}{K} \\
 & \text{MAX} \frac{\sum_{k \in K} \sum_{a \in M} \sum_{b \in M} \sum_{j \in S} \sum_{i \in S} \ln PS_j \cdot x_{ijk} \cdot y_{abk}}{K} \quad (23) \\
 &= \text{MIN} \frac{\sum_{k \in K} \sum_{a \in M} \sum_{b \in M} \sum_{j \in S} \sum_{i \in S} -\ln PS_j \cdot x_{ijk} \cdot y_{abk}}{K}
 \end{aligned}$$

변환된 문제를 해결한 후 해를 다시 지수 환원하면 다수 UAV의 평균 생존확률을 구할 수 있으며, 생존성이 극대화되는 각 UAV의 경로를 구할 수 있다.

4. 경로 계획 알고리즘(A^*PS_PGA)

본 연구에서는 6면체 형태의 셀로 구성된 3차원 환경에서 다수 UAV 생존성을 극대화하는 임무경로 계획을 위하여 A^*PS_PGA 를 적용하였다. A^*PS 알고리즘을 이용하여 임무 셀 간의 이동경로와 생존확률 및 이동거리를 산출한 후 PGA를 이용하여 다수 UAV의 생존성을 극대화하는 임무 셀들의 순회경로를 계획하였으며, A^*PS_PGA 수행절차는 다음 <Figure 2>와 같다.

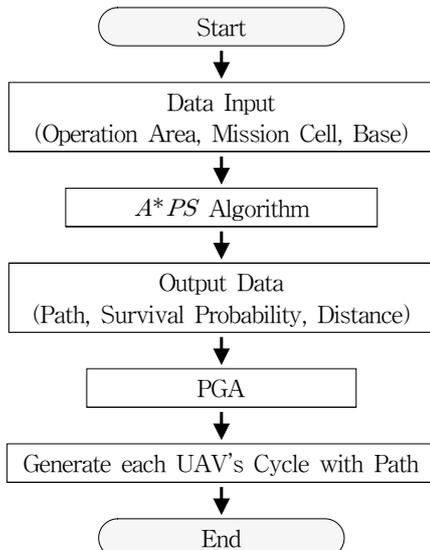


Figure 2. A^*PS_PGA

4.1 A^*PS 알고리즘

임무 셀 간의 이동경로 계획에 적용한 A^*PS 알고리즘은 A^* 알고리즘을 이용하여 최초 이동경로를 계획한 후 Post Smoothing 과정으로 경로를 부드럽게 하는 Path Smoothing Procedure를 적용한 알고리즘이다.

Hart *et al.*(1968)이 제안한 A^* 알고리즘은 계산량을 줄이고 탐색 속도를 높이기 위해 목표 지점의 방향성을 나타내는 휴리스틱 함수를 이용해 더욱 유망한 교점들을 깊이 우선 탐색 (Depth First Search)하는 알고리즘이다.

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

여기서, $g(i)$ 는 출발 지점에서 임의의 특정 교점 i 에 이르는

```

L1 function Obstacle_Check [ $C_i(x_i, y_i, z_i), C_j(x_j, y_j, z_j)$ ]
L2   if ( $x_i := x_j, y_i := y_{lb}, y_j := y_{ub}$ )
L3      $S_V := (z_j - z_i) / \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$ 
L4     for ( $x := x_i, y := y_{lb}$  to  $y_{ub}$ )
L5        $z_{lb} := \text{round} [z_i + \{y - (\sqrt{x_i^2 + y_i^2}) - 0.5\} \times S_V]$ 
L6        $z_{ub} := \text{round} [z_i + \{y - (\sqrt{x_i^2 + y_i^2}) + 0.5\} \times S_V]$ 
L7       if ( $y := y_{lb}$ )  $z_{lb} := z_i$ 
L8       if ( $y := y_{ub}$ )  $z_{ub} := z_j$ 
L9       for ( $z := z_{lb}$  to  $z_{ub}$ )
L10        if [ $C(x, y, z) := \text{obstacle}$ ] OBSTACLE; break
L11      return NOT_OBSTACLE
L12   if ( $y_i := y_j, z_i := z_{lb}, z_j := z_{ub}$ )
L13     for ( $x := x_i, y := y_i, z := z_{lb}$  to  $z_{ub}$ )
L14       if [ $C(x, y, z) := \text{obstacle}$ ] OBSTACLE; break
L15     return NOT_OBSTACLE
L16   else  $S_H := (y_j - y_i) / (x_j - x_i)$ 
L17      $S_V := (z_j - z_i) / \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$ 
L18     for ( $x := x_i$  to  $x_j$ )
L19        $y_{lb} := \text{round} [y_i + (x - x_i - 0.5) \times S_H]$ 
L20        $y_{ub} := \text{round} [y_i + (x - x_i + 0.5) \times S_H]$ 
L21       if ( $x := x_i$ )  $y_{lb} := y_i$ 
L22       if ( $x := x_j$ )  $y_{ub} := y_j$ 
L23       for ( $y := y_{lb}$  to  $y_{ub}$ )
L24          $z_{lb} := \text{round} [z_i + \{y - (\sqrt{x_i^2 + y_i^2}) - 0.5\} \times S_V]$ 
L25          $z_{ub} := \text{round} [z_i + \{y - (\sqrt{x_i^2 + y_i^2}) + 0.5\} \times S_V]$ 
L26         if ( $y := y_{lb}$ )  $z_{lb} := z_i$ 
L27         if ( $y := y_{ub}$ )  $z_{ub} := z_j$ 
L28         for ( $z := z_{lb}$  to  $z_{ub}$ )
L29           if [ $C(x, y, z) := \text{obstacle}$ ] OBSTACLE; break
L30       return NOT_OBSTACLE
L31 function Path Smoothing Procedure ( $C_i, C_j$ )
L32   for ( $i := 0$  to  $i < C_{num}$ )
L33     for ( $j := C_{num}$  to  $j > i$ )
L34       if Obstacle_Check ( $C_i, C_j$ ) := NOT_OBSTACLE
L35         remove cells between  $C_i$  and  $C_j, i := j$ ; break
  
```

Figure 3. Pseudo Code of Path Smoothing Procedure in 3-Dimensional Environment

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

최초 이동경로를 계획한 후 Borea *et al.*(2004)이 제시한 경로를 부드럽게 하는 개념이 적용된 3차원 환경에 적합한 Path Smoothing Procedure를 적용하였다. Path Smoothing Procedure는 최초 이동경로로 계획된 셀들의 집합에서 각각의 셀에 대해 다른 셀과의 가능한 모든 직선을 추출한 후 장애물과 접촉하지 않으면서 길이가 가장 긴 직선을 선정하고, 선정된 직선의 두 셀은 격자 단위를 무시한 직선으로 연결하는 것이며, 3차원 환경의 Path Smoothing Procedure 의사코드는 <Figure 3>과 같다.

4.2 병렬 유전자 알고리즘(PGA)

임무 셀들의 순회경로 계획에 Grefenstette(1981)가 제안한 여러 개의 GA를 병렬로 연결하여 주기적으로 정보를 교환하는 섬 모델(Island Model) 형태의 PGA를 기반으로 하고, 초기 모집단(Population) 생성에 Nearest Neighbor Search(NNS), 해 개선에 2-opt 기법을 적용하였다. PGA의 수행절차는 다음 <Figure 4>와 같다.

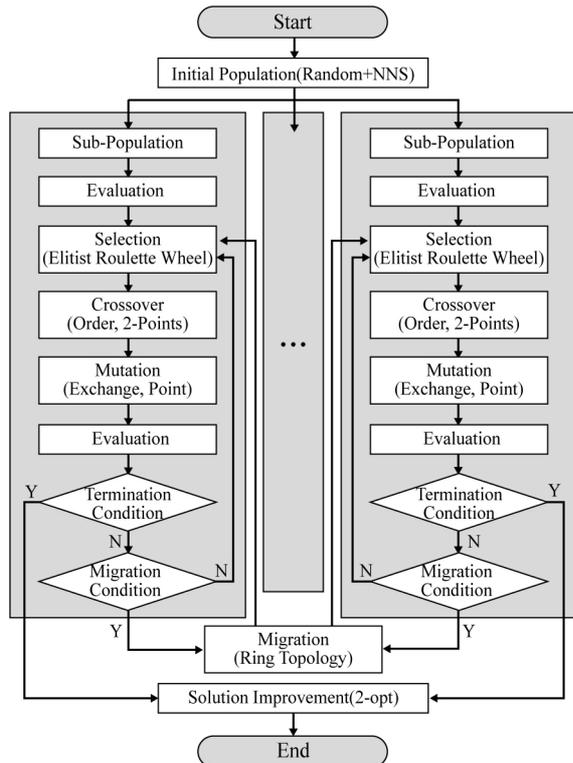


Figure 4. PGA

유전자 표현(Gene Representation)은 정수 문자열로 다음 <Figure 5>와 같이 일차원 배열의 형태로 나타내었으며, 유전자는 UAV의 임무 셀 방문순서를 나타낸다.

방문순서	3	1	4	7	5	6	2
번호	3	1	3	2	1	1	2

Figure 5. Gene Representation

<Figure 5>에서 1번 UAV는 기지에서 출발하여 1번 임무 셀에서 최초 임무를 수행하고, 이후 5번, 6번 임무 셀에서 임무를 수행한 후 기지로 복귀하는 것을 의미하며, 각 UAV의 순회경로는 1번 UAV B-1-5-6-B, 2번 UAV B-7-2-B, 3번 UAV B-3-4-B로 구성된다.

모집단은 초기 모집단과 부분 모집단(Sub-population)이 있으며, 초기 모집단 생성에 NNS와 임의생성 기법을 혼용하였으며, 생성된 초기 모집단은 부분 모집단에 균등하게 분배하였다. 적합도 평가(Evaluation)는 유전 연산을 통해 생성된 모집단이 UAV 임무능력 제약에 대한 실행 불가능 해를 포함할 수 있으므로 벌금함수(Penalty Function, P_c)를 사용하였으며, 다음 식 (25)와 같다.

$$P_c = \begin{cases} 1, & \text{total distance} \leq C_m \\ 10, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

다수 UAV의 평균 생존확률이 높은 순회경로가 우수한 해로 평가되기 위해서는 평균 생존확률에 대수와 음수를 취한 비용 $-\ln PS_{UAV}$ 가 최소화되어야 하고, 실행 불가능 해가 선택되지 않도록 하기 위하여 경로비용에 벌금함수를 곱한 값의 역수를 사용하였으며, 다음 식 (26)과 같다.

$$fitness = \frac{1}{-\ln PS_{UAV} \cdot P_c} \quad (26)$$

선별(Selection)은 세대별 우수한 해의 생존을 보장하고, 지역 해로의 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)를 통해 방문순서가 중복되면 UAV의 순회경로가 형성되지 않으므로 본 연구에서 방문순서는 순서 교차(Order Crossover)와 교환 돌연변이(Exchange Mutation)를 적용하였으며, 방문순서의 각 임무 셀에 할당된 UAV의 번호는 동일하게 할당되어도 무방하므로 번호는 2점 교차(Two-Points Crossover)와 점 돌연변이(Point Mutation)를 실시하였다.

섬 모델을 기반으로 하는 PGA를 적용한 본 연구의 이주 (Migration)는 다음 <Figure 6>과 같이 부분 모집단이 원형으로 배열된 원형 이웃구조(Ring Topology)를 사용하였으며, 이주 개체는 엘리트 룰렛 휠 방법을 이용하여 선별한 후 복제하여 이주시키고, 낮은 적응도를 갖는 개체를 새로 이주한 개체와 교체하였다.

유전 및 이주 파라미터는 해의 품질과 수렴 속도에 미치는 영향을 비교하는 반복 실험하여 비교한 후 문제의 특성에 맞는 파라미터를 선정하여 적용하였으며, 다음 <Table 2>와 같다.

PGA를 이용하여 생성된 해 중에서 가장 우수한 하나의 해를 대상으로 2-opt를 적용하였으며, 2-opt 적용 후 적합도가 개선되면 그 결과를 반영하여 해를 개선하였다.

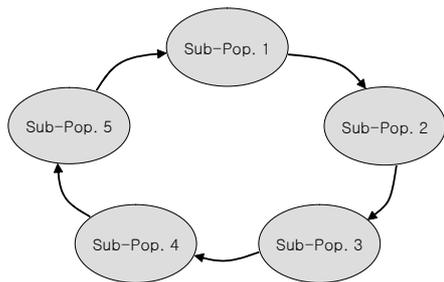


Figure 6. Ring Topology

Table 2. Genetic and Migration Parameters

Parameter		Value	
Genetic Parameter	Pop-size	500	
	Crossover Rate	0.45	
	Mutation Rate	0.03	
	End Condition(Generation)	1,000	
Migration Parameter	Sub-pop.	No.	5
		Size	100
	Migration Interval	100	
	Migration Rate	0.15	

는 경우(예제 1)와 적 대공무기가 존재하는 경우(예제 2)를 대상으로 해의 품질 및 연산시간을 측정하였다. 활동공간은 격자지도를 기반으로 하며, 대각선을 포함해 수평 및 수직의 26 방향으로 이동이 가능하고, 셀 하나의 크기가 1NM×1NM×1,000ft인 6면체 셀을 이용하여 100×100×30의 300,000셀 격자지도를 구축하였다. UAV 임무능력은 5개, 7개, 10개의 임무지점에서 수행 가능한 것으로 설정하였다.

예제 1은 일반 격자지도를 이용하여 활동공간을 구축하였으며, 활동공간 내에 임의로 위치한 장애물 수가 전체 셀의 30%이고, 기지를 포함한 임무지점이 10개, 25개, 50개인 총 3개의 문제를 생성하였다. UAV의 대수는 임무지점의 수를 UAV 임무능력으로 충족 가능한 대수의 하한으로 적용하였다. A*PS_PGA를 이용하여 각 10회 실험한 후 계획된 다수 UAV 경로의 총 이동거리, 연산시간 평균값, 최적해 제공횟수를 산출하였다.

예제 2는 확률 격자지도를 이용하여 활동공간을 구축하였으며, 기지를 포함한 임무지점이 10개, 25개, 50개인 총 3개의 문제에 UAV의 대수는 임무지점의 수를 UAV 임무능력으로 충족 가능한 대수를 하한으로 적용하였다. 적 대공무기 위치는 Kim and Yeom(1983)이 제시한 예제와 동일하게 112개를 지상에 위치하는 것을 적용하였고, 장·중·단거리의 3종류로 구성하였으며, 종류별 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터(α)와 최대 사정거리, 최대 운용고도, 수량은 다음 <Table 3>과 같다.

Table 3. Capacity and Quantity of SAM

Type	α	Max. Range	Max. Altitude	Quantity
Long	0.1	50NM	70,000ft	7
Medium	0.5	30NM	50,000ft	25
Short	1.0	10NM	30,000ft	80

A*PS_PGA를 이용하여 각 10회 실험한 후 계획된 다수 UAV 임무경로의 총 이동거리, 평균 생존확률, 연산시간 평균값, 최적해 제공횟수를 산출하였다.

5. 실험 및 결과 분석

다수 UAV 생존성을 극대화하는 임무경로를 계획하기 위하여 장애물이 존재하는 경우와 적의 대공무기가 존재하는 2개의 예제를 생성하고, A*PS_PGA로 해를 산출한 후 CPLEX 최적해와 비교하였다. 실험에 활용한 알고리즘은 MATLAB을 이용하여 구축하였으며, 컴퓨터는 Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU(3.16 GHz, 2GB RAM) 환경에서 수행하였다.

5.1 실험 계획

다수 UAV의 임무경로를 계획하는 실험은 장애물이 존재하

5.2 실험 결과 분석

예제 1을 대상으로 A*PS_PGA와 CPLEX를 이용하여 임무지점과 UAV 수에 따른 각 문제별 10회 실험 후 UAV 임무경로의 이동거리 및 연산시간 평균값과 최적해 제공횟수를 산출한 실험 결과는 다음 <Table 4>와 같다.

다수 UAV의 경로 계획 실험 결과 예제 1에서 임무지점이 10개인 경우 A*PS_PGA는 10회 실험 모두 최적해를 도출하였고, 임무지점이 25개인 경우 장애물의 수에 따라 4~5회 최적해를 제공하였다. UAV의 임무능력에 따른 대수가 감소함에 따라 계획된 경로의 총 이동거리가 단축되었다. 임무지점이 10개인 경우 임무능력이 다르고 대수(2대)가 동일한 UAV를 이용하여

Table 4. Result of Experiment Problem 1

Number of Mission Cell	UAV(Quantity /Capability)	<i>A*PS_PGA</i>			CPLEX	
		Total Distance(<i>NM</i>)	Computation time(sec.)	Number of Optimal	Total Distance(<i>NM</i>)	Computation time(sec.)
10	2/5	489.17	17.83	10	489.17	1,719.34
	2/7	467.65	17.91	10	467.65	1,665.27
	1/10	422.52	17.88	10	422.52	1,624.05
20	5/5	623.53	63.09	4	616.29	13,752.67
	4/7	602.08	63.24	4	596.73	13,194.21
	3/10	581.76	62.81	5	576.24	12,379.53
30	10/5	829.64	116.50	·	·	·
	7/7	816.80	115.27	·	·	·
	5/10	792.67	117.38	·	·	·

경로를 계획한 결과 총 이동거리는 UAV 임무능력이 5개 지점일 때 489.17, 7개 지점일 때 467.65로 산출되었으며, 이는 동일한 대수를 이용하여 경로를 계획할 때 임무능력이 우수한 UAV로 계획한 경로의 총 이동거리가 짧게 산출되는 것을 알 수 있었다. 연산시간은 *A*PS_PGA*가 최소 17.83초, 최대 115.27초가 소요된 반면 CPLEX는 최소 1,624.05초, 최대 13,752.67초가 소요되었다. 임무지점의 수가 증가함에 따라 연산시간이 급격히 증가하는 NP-hard의 특성을 보였으며, 임무지점이 50개인 대형 예제의 경우 CPLEX는 해를 도출하지 못하였다.

예제 1에서 임무지점이 25개인 경우를 대상으로 UAV의 임무능력에 따른 대수를 적용하여 CPLEX 및 *A*PS_PGA*로 도출한 경로의 총 이동거리 오차(%*Error*)를 다음 식 (27)을 이용하여 비교하였으며, 비교 결과는 다음 <Table 5>와 같다.

$$\%Error = \frac{|Near\ Optimal - Optimal|}{Optimal} \times 100 \quad (27)$$

Table 5. Error of Total Distance(Experiment Problem 1, Mission Cell 25)

UAV(Quantity /Capability)	<i>A*PS_PGA</i> (<i>NM</i>)	CPLEX (<i>NM</i>)	% <i>Error</i>
5/5	623.53	616.29	1.17%
4/7	602.08	596.73	0.90%
3/10	581.76	576.24	0.96%

UAV의 임무능력에 따른 대수별 *A*PS_PGA*로 계획한 임무경로는 CPLEX에 비해 0.90~1.17%, 평균 1.01%의 총 이동거리 오차를 보였다.

예제 2를 대상으로 *A*PS_PGA*와 CPLEX를 이용하여 해의 품질 및 연산시간을 측정하였으며, 임무지점과 UAV 수에 따른 각 문제별 10회 실험 후 다수 UAV 경로의 총 이동거리, 평균 생존확률 및 연산시간 평균값과 최적해 제공횟수를 산출한 실험 결과는 다음 <Table 6>과 같다.

Table 6. Result of Experiment Problem 2

Number of Mission Cell	UAV(Quantity /Capability)	<i>A*PS_PGA</i>				CPLEX		
		Total Distance(<i>NM</i>)	Mean of Survivability	Computation time(sec.)	Number of Optimal	Total Distance(<i>NM</i>)	Mean of Survivability	Computation time(sec.)
10	2/5	559.31	0.8410	40.37	10	559.31	0.8410	1,779.10
	2/7	664.84	0.9241	40.14	10	664.84	0.9241	1,734.83
	1/10	558.97	0.8934	39.68	10	558.97	0.8934	1,682.39
20	5/5	973.27	0.8925	173.50	3	966.28	0.8869	14,179.24
	4/7	881.62	0.8673	172.34	3	874.49	0.8565	14,064.91
	3/10	816.04	0.8218	173.93	4	811.57	0.8307	13,923.07
30	10/5	1,329.64	0.8182	631.05	·	·	·	·
	7/7	1,250.18	0.8037	631.12	·	·	·	·
	5/10	1,163.73	0.7814	629.51	·	·	·	·

다수 UAV의 경로 계획 실험 결과 예제 2에서 임무지점이 10개인 경우 A^*PS_PGA 는 10회 실험 모두 최적해를 도출하였고, 임무지점이 25개인 경우 장애물의 수에 따라 3~4회 최적해를 제공하였다. UAV의 임무능력에 따른 대수가 감소함에 따라 계획된 경로의 총 이동거리가 단축되었으며, 평균 생존확률은 UAV 대수가 증가함에 따라 높아지는 것을 확인하였다. 임무지점이 10개인 경우 임무능력이 다르고 대수(2대)가 동일한 UAV를 이용하여 경로를 계획한 결과 UAV 임무능력이 5개 지점일 때 총 이동거리는 559.31, 평균 생존확률은 0.8410으로 산출되었으며, UAV 임무능력이 7개 지점일 때 총 이동거리는 664.84로 증가하였고, 평균 생존확률은 0.9241로 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 동일한 대수를 이용하여 경로를 계획할 때 임무능력이 우수한 UAV는 비록 총 이동거리가 증가하지만 평균 생존확률을 높이기 위한 경로를 계획하였기 때문이다. 연산시간은 A^*PS_PGA 가 최소 39.68초, 최대 631.12초가 소요된 반면 CPLEX는 최소 1,682.39초, 최대 14,179.24초가 소요되었다. 예제 2도 예제 1과 같이 임무지점의 수가 증가함에 따라 연산시간이 급격히 증가하는 NP-hard의 특성을 보였으며, 임무지점이 50개인 대형 예제의 경우 CPLEX는 해를 도출하지 못하였다.

Table 7. Error of Survivability(Experiment Problem 2, Mission Cell 25)

UAV(Quantity /Capability)	A^*PS_PGA	CPLEX	%Error
5/5	0.8925	0.8869	0.63%
4/7	0.8673	0.8565	1.26%
3/10	0.8218	0.8307	1.07%

예제 2에서 임무지점이 25개인 경우를 대상으로 UAV의 임무능력에 따른 대수를 적용하여 CPLEX 및 A^*PS_PGA 로 도출한 경로의 평균 생존확률 오차(%Error)를 식 (27)을 이용하

여 비교하였으며, 비교 결과는 <Table 7>과 같다.

UAV의 임무능력에 따른 대수별 A^*PS_PGA 로 계획한 경로는 CPLEX에 비해 0.63~1.26%, 평균 0.99%의 평균 생존확률 오차를 보였다.

A^*PS_PGA 로 계획한 임무지점이 10개인 예제 2의 UAV의 임무능력에 따른 대수별 다수 UAV 임무경로는 다음 <Figure 7>과 같다.

다수 UAV의 생존성을 극대화하는 임무경로 계획 실험 결과 A^*PS 알고리즘을 이용하여 임무지점 간의 비효율성이 제거된 이동경로를 계획하고, 순회경로 계획에 여러 개의 부분 모 집단을 운용하여 서로 독립적이면서 병렬적으로 진화하는 효율성이 뛰어난 PGA를 적용함으로써 CPLEX에 비해 비교적 짧은 연산시간에 품질이 우수한 해와 임무지점의 수가 증가한 경우에도 해를 제공할 수 있었다.

예제 2의 임무지점이 10개인 문제에서 UAV 임무능력이 5개 임무지점인 경우를 대상으로 UAV의 생존성을 극대화하는 경우와 이동거리를 최소화하는 경우의 2가지 목적함수에 따른 UAV 임무경로를 비교하였으며, 비교 결과는 다음 <Table 8>과 같다.

목적함수에 따른 UAV의 경로 비교 결과 UAV 임무능력이 5개 임무지점인 경우 생존성을 극대화하는 UAV 경로의 이동거리는 599.31로 이동거리를 최소화하는 경로의 432.12에 비해 38.69% 증가하지만 생존확률은 0.8410로 이동거리를 최소화하는 경로의 0.4447에 비해 89.12% 높아졌다. UAV 임무능력이 7개 임무지점인 경우 생존성을 극대화하는 UAV 경로의 이동거리는 664.84로 이동거리를 최소화하는 경로의 411.40에 비해 61.60% 증가하지만 생존확률은 0.9241로 이동거리를 최소화하는 경로의 0.5099에 비해 81.23% 높아지는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 3차원 환경에서 다수 UAV의 생존성을 극대화하

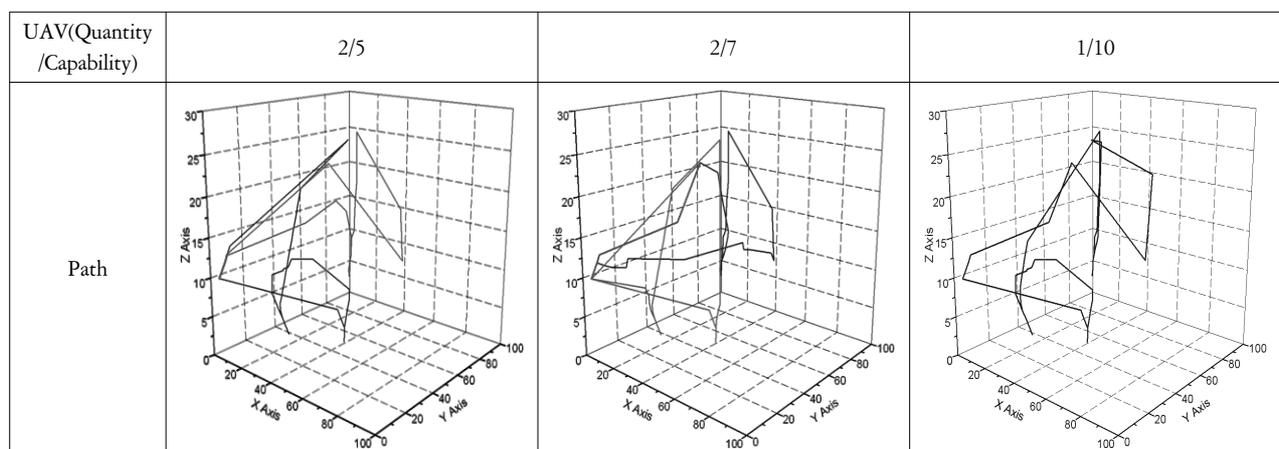


Figure 7. Path for Multiple UAVs(Experiment Problem 2, Mission Cell 10)

Table 8. Comparison by Objective Function(Experiment Problem 2, Mission Cell 10)

UAV Capability	Objective Function	Path	Total Distance(NM)	Survivability	
5	MAX Survivability	UAV 1	1(4, 2, 10) → 5(75, 10, 7) → 2(34, 34, 12) → 6(41, 11, 5) → 3(80, 7, 29) → 1(4, 2, 10)	260.23	0.8934
		UAV 2	1(4, 2, 10) → 7(17, 47, 15) → 9(2, 97, 3) → 4(12, 92, 25) → 10(61, 69, 11) → 8(6, 76, 21) → 1(4, 2, 10)	299.09	0.7917
		Sum of Total Distance and Mean of Survivability		559.31	0.8410
	MIN Distance	UAV 1	1(4, 2, 10) → 2(34, 34, 12) → 5(75, 10, 7) → 3(80, 7, 29) → 6(41, 11, 5) → 1(4, 2, 10)	176.27	0.4239
		UAV 2	1(4, 2, 10) → 7(17, 47, 15) → 8(6, 76, 21) → 9(2, 97, 3) → 4(12, 92, 25) → 10(61, 69, 11) → 1(4, 2, 10)	255.84	0.4665
		Sum of Total Distance and Mean of Survivability		432.12	0.4447
7	MAX Survivability	UAV 1	1(4, 2, 10) → 7(17, 47, 15) → 10(61, 69, 11) → 8(6, 76, 21) → 1(4, 2, 10)	226.99	0.9559
		UAV 2	1(4, 2, 10) → 3(80, 7, 29) → 9(2, 97, 3) → 4(12, 92, 25) → 6(41, 11, 5) → 2(34, 34, 12) → 5(75, 10, 7) → 1(4, 2, 10)	437.85	0.8934
		Sum of Total Distance and Mean of Survivability		664.84	0.9241
	MIN Distance	UAV 1	1(4, 2, 10) → 2(34, 34, 12) → 10(61, 69, 11) → 4(12, 92, 25) → 9(2, 97, 3) → 8(6, 76, 21) → 7(17, 47, 15) → 1(4, 2, 10)	255.31	0.5726
		UAV 2	1(4, 2, 10) → 5(75, 10, 7) → 3(80, 7, 29) → 6(41, 11, 5) → 1(4, 2, 10)	156.08	0.4541
		Sum of Total Distance and Mean of Survivability		411.40	0.5099

는 경로를 계획하기 위하여 MRPP-MTSP를 이용한 수리모형을 제시하였으며, 대수를 이용하여 MRPP를 SPP로 변환한 후 A^*PS 알고리즘을 이용하여 이동경로를 계획하고, PGA를 이용하여 순회경로를 계획하였다. 또한 3차원 환경을 모형화하기 위해 6면체 형태의 셀을 이용한 격자지도를 구성하였으며, UAV가 총 26방향으로 이동이 가능한 모형을 사용하였다.

이동경로 계획에 적합한 A^*PS 알고리즘은 A^* 알고리즘을 이용하여 최초 이동경로를 계획한 후 Post Smoothing 과정인 Path Smoothing Procedure를 수행함으로써 셀을 이용한 활동공간의 비효율성을 제거하였으며, 순회경로 계획에 여러 개의 부분모집단을 운용하여 서로 독립적이면서 병렬적으로 진화하는 PGA를 적용함으로써 비교적 짧은 연산시간에 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 인명 중시를 위하여 UAV가 유인 항공기의 상당부분 내지 거의 전부를 대체하게 될 것이다. 전쟁이나 군사작전에서 UAV의 성공적인 임무수행을 보장하기 위해서는 장애물이나 적의 대공무기 위협을 회피함으로써 생존성을 극대화할 수 있는 경로 계획이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Bortoff, S. A. (2000), Path Planning for UAVs, *Proceedings of the American Control Conference*.
- Botea, A., Muller, M., and Schaeffer, J. (2004), Near Optimal Hierarchical Path-Finding, *Journal of Game Development*, 1(1), 7-28.
- Canny, J. and Reif, J. (1987), New Lower Bound Techniques for Robot Motion Planning Problems, *Proceedings of the Annual Symposium on Foundations of Computer Science*.
- Cunningham, C. T. and Roberts, R. S. (2001), An Adaptive Path Planning Algorithm for Cooperating Unmanned Air Vehicles, *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*.
- Gao, X., Fu, X., and Chen, D. (2005), A Genetic-Algorithm-Based Approach to UAV Path Planning Problem, *Proceedings of the WSEAS International Conference on Simulation, Modeling, and Optimization*.
- Gonzalez, L. F., Lee, D. S., Walker, R., and Periaux, J. (2009), Optimal Mission Path Planning (MPP) for an Air Sampling Unmanned Aerial System, *Proceedings of the Austral-Asian Conference on Robotics and Automation*.
- Grefenstette, J. J. (1981), Parallel Adaptive Algorithm for Function Optimization, Technical Report NO.CS-81-19, *Vanderbilt University*, Computer Science Department, Nashville.
- Harder, R. W., Hill, R. R., and Moore, J. T. (2004), A Java Universal Vehicle Router for Routing Unmanned Aerial Vehicles, *International Transactions in Operational Research*, 11(3), 259-275.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., and Raphael, B. (1968), A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107.
- Jia, D. and Vagners, J. (2004), Parallel Evolutionary Algorithms for UAV Path

- Planning, *Proceedings of the AIAA Intelligent Systems Technical Conference*.
- Jun, M. S. and D'Andrea, R. (2002), Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain and Adversarial Environments, *Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms*.
- Kim, K. T. and Jeon, G. W. (2011), A Path Planning to Maximize Survivability for Unmanned Aerial Vehicle based on 3-dimensional Environment, *IE Interfaces*, 24(4), 304-313.
- Kim, S. H. and Yeom, G. (1983), Path Optimization for Aircraft, *Journal of the Korean Operations Research*, 8(1), 11-18.
- Miller, C. E., Tucker, A. W., and Zemlin R. A. (1960), Integer programming formulation of traveling salesman problems, *Journal of Association for Computing Machinery*, 7(4), 326-329.
- Mitsutake, K. and Higashino, S. (2008), An A*-EC Hybrid Path Planning Method for Waypoint Traveling Problem Considering Terrain, *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*.
- Mittal, S. and Deb, K. (2007), Three-Dimensional Offline Path Planning for UAVs using Multiobjective Evolutionary Algorithms, *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*.
- Nikolos, I. K. and Brintaki, A. N. (2005), Coordinated UAV Path Planning using Differential Evolution, *Proceedings of the International Intelligent Control*.
- Nikolos, I. K., Valavanis, K. P., Tsourveloudis, N. C., and Kostaras, A. N. (2003), Evolutionary Algorithm Based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation, *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 33(6), 898-912.
- Obermeyer, K. J. (2009), Path Planning for a UAV Performing Reconnaissance of Static Ground Targets in Terrain, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- Peng, X. and Gao, X. (2008), A Multi-Objective Optimal Approach for UAV Routing in Reconnaissance Mission with Stochastic Observation Time, *Proceedings of the International Symposium Foundations of Intelligent Systems*.
- Rathinam, S. and Sengupta, R. (2006), Lower and Upper Bounds for a Multiple Depot UAV Routing Problem, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*.
- Russell, M. A. and Lamont, G. B. (2005), A Genetic Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Routing, *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*.
- Sanders, G. and Ray, T. (2007), Optimal Offline Path Planning of a Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicle(UAV) using an Evolutionary Algorithm, *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*.
- Sathyaraj, B. M., Jain, L. C., Finn, A., and Drake, S. (2008), Multiple UAVs Path Planning Algorithms: A Comparative Study, *Journal of Fuzzy Optimization and Decision Making*, 7(3), 257-267.
- Solomon, M. M. (1987), Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints, *Operations Research*, 35(2), 254-265.
- Sujit, P. B. and Beard, R. (2009), Multiple UAV Path Planning using Anytime Algorithms, *Proceedings of the American Control Conference*.
- Takebayashi, T., Ishii, M., and Higashino, S. (2008), Real-time Path Planning Method for Multiple UASs, *Proceedings of the KSAS-JSASS Joint International Symposium on Aerospace Engineering*.
- The Office of the Secretary of Defense (2007), *Unmanned Aircraft System Roadmap 2007-2032*, U. S. DoD.
- Wagner, D. H., Mylander, W. C., and Sanders, T. J. (1999), *Naval Operations Analysis*, Naval Institute Press, Annapolis, Maryland.
- Weiss, B., Naderhirn, M., and del Re, L. (2006), Global Real-Time Path Planning for UAVs in Uncertain Environment, *Proceedings of Computer Aided Control System Design*.



김기태

해군사관학교 기계공학과 학사
국방대학교 운영분석학과 석사
국방대학교 운영분석학과 박사
현재 : 합동군사대학교 해군대학 합동기본
정규과정
관심분야 : 최적화, 경로계획, 군사 OR, 메타
휴리스틱



전건욱

공군사관학교 전자공학과 학사
고려대학교 산업공학과 석사
University of Louisville 산업공학 박사
Rutgers University 교환교수
현재 : 국방대학교 운영분석학과 교수
관심분야 : 최적화, 신뢰도, 시험평가, 셀형 제조
시스템