무인 항공기 생존성 극대화를 위한 이동 경로 계획 알고리즘 선정

김 기 태* · 전 건 욱*
*국방대학교 운영분석학과

A Selection of Path Planning Algorithm to Maximize Survivability for Unmanned Aerial Vehicle

Ki-Tae Kim* · Geon-Wook Jeon*
*Korea National Defense University Department of Operations Research

Abstract

This research is to select a path planning algorithm to maximize survivability for Unmanned Aerial Vehicle(UAV). An UAV is a powered pilotless aircraft, which is controlled remotely or autonomously. UAVs are currently employed in many military missions(surveillance, reconnaissance, communication relay, targeting, strike etc.) and a number of civilian applications(communication service, broadcast service, traffic control support, monitoring, measurement etc.). In this research, a mathematical programming model is suggested by using MRPP(Most Reliable Path Problem) and verified by using ILOG CPLEX. A path planning algorithm for UAV is selected by comparing of SPP(Shortest Path Problem) algorithms which transfer MRPP into SPP.

Keywords : Unmanned Aerial Vehicle, Path Planning Algorithm, Most Reliable Path Problem, Shortest Path Problem, Survivability

1. 서 론

무인 항공기(UAV : Unmanned Aerial Vehicle)란 조종사가 탑승하지 않은 상태에서 지상의 원격 조종 또는 사전에 입력된 프로그램에 따라 비행하거나 비행체 스스로 주위 환경을 인식하고 판단하여 자율적으로 비행하는 비행체를 말한다[30]. 세계 군사 선진국은 인명 피해를 최소화하면서 전쟁의 목적을 달성하기 위하여 무인화 체계를 공중, 지상, 수상, 수중의 모든 영역에서 활용하고 있으며, 무인화 체계 중에서 가장 먼저 실전용으로 활용된 체계가 UAV이다. 최초로 전투에 사용한 UAV는 1898년 미국의 W. Eddy가 스페인과의 전투에서 카메라를 장착한 연을 띄워 많은 사진을 획득한 것이다[3]. 이후 제1·2차 세계대전과 한국, 베트남, 중동 지역의 전쟁에서 UAV가 활용되었으며, 1990년대 이후에 일어난 걸프전(1991), 코소보전(1999), 아프간전(2001), 이라크전(2003)을 살펴보면 UAV의 효능을 확인할 수 있다[1].

UAV를 이용하여 적의 정보를 획득하거나 공격 임무를 달성하기 위해서는 생존성(Survivability) 보장이 선행되어야 하며, 생존성을 극대화하기 위한 최적의 경로를 계획하는 연구가 필요하다. 생존성이란 어떤 체계가 적대적인 인공 환경을 견디어 내고, 그의 지정된 임무를 달성하는데 필요한 능력에서 임무를 실패할 만큼의 손상을 입지 않을 정도에 대한 척도로 정의된다[21].

본 연구에서는 UAV의 생존성을 UAV가 주어진 임무를 수행함에 있어 장애물에 충돌하지 않고, 적의 대공무기에 격추되지 않을 확률로 정의하며, 상기 기술한 바와 같이 중요성이 대두되는 UAV의 생존성을 극대화하는 이동 경로를 계획하기 위한 알고리즘을 선정한다.

† 교신저자 : 김기태, 서울특별시 은평구 수색동 205번지, 국방대학교 운영분석학과
Tel: 02-300-2173, E-mail: navystar52@naver.com
2011년 4월 5일 접수; 2011년 6월 10일 수정본 접수; 2011년 6월 13일 게재확정

2. 경로 문제 및 기존 연구 고찰

UAV의 이동 경로 계획은 1736년 스위스의 수학자인 Euler[13]가 연구한 쾨니히스베르크 교량 문제(Königsberg Bridge Problem)에 의해 최초로 발표된 그래프 이론(Graph Theory)을 기반으로 한다.

그래프란 여러 대상들 사이의 관계와 정보가 점(Point)과 선(Line)으로 구성된 집합이며, $G=(V,E)$ 또는 $G=(N,A)$로 표현한다. 여기서 V와 N은 그래프 G에 있는 대상들인 정점(Vertex) 또는 교점(Node)의 집합이며, E와 A는 그래프 G에서 대상들 사이의 관계를 나타내는 선분(Edge) 또는 호(Arc)의 집합을 의미한다[4].

UAV의 이동 경로 계획은 기지에서 출발하여 목표 지점으로 비행하는 경로를 계획하는 것이며, 최대 신뢰 경로 문제(MRPP : Most Reliable Path Problem)를 이용하여 모형화하고, MRPP로 모형화된 문제는 최단 경로 문제(SPP : Shortest Path Problem)로 변환하여 해결한다. 본 절에서는 UAV의 이동 경로 계획을 위한 MRPP 및 SPP의 이론과 기존 연구에 대해 고찰하며, MRPP와 SPP에 적용되는 용어 및 첨자는 다음과 같다.

R_{path} : 경로(Path)의 신뢰도(Reliability)
C_{path} : 경로의 비용(또는 거리, 시간)
r_{arc} : 호(Arc)의 신뢰도
s : 출발 지점(Source Node)
t : 목표 지점(Terminal Node)
i : 다른 교점으로 흐름을 보내는 교점
j : 다른 교점으로부터 흐름을 받는 교점
k : 중간 교점(Intermediate Node)
$n_i = \{s \cup [1,2,\cdots,n]\}$: 교점 i의 집합
$n_j = \{[1,2,\cdots,n] \cup t\}$: 교점 j의 집합
$n_k = \{1,2,\cdots,n\}$: 교점 k의 집합
$N = \{s \cup [1,2,\cdots,n] \cup t\}$: 교점 집합
$A = \{(i,j): i \in v_i, j \in v_j, i \neq j\}$: 호의 집합
$G = (N,A)$: 무방향(Undirected) 네트워크
c_{ij} : 호 (i,j)의 비용(또는 거리, 시간)
r_{ij} : 호 (i,j)의 신뢰도

2.1 최대 신뢰 경로 문제(MRPP)

신뢰성 공학(Reliability Engineering)에서의 전통적인 신뢰도는 시스템이 주어진 사용조건 아래에서 의도된 임무기간 동안 고장발생 없이 고유의 기능을 성공적으로 수행할 수 있는 능력 또는 확률을 의미한다[5, 12].

네트워크에서 두 지점을 연결하는 호의 신뢰도는 그 구간에 고장이 발생하지 않을 확률로 정의된다[4]. 따라서 이동 경로의 신뢰도는 그 경로를 구성하는 호 신뢰도의 곱으로 나타낼 수 있으며, 다음 식 (1)과 같다.

$$R_{path} = \prod_{arc \in A} r_{arc} \tag{1}$$

MRPP는 두 지점간의 경로 중에서 가장 신뢰도가 높은 경로를 결정하는 문제이며[4], MRPP의 결정변수와 수리모형은 다음과 같다.

<결정변수>

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ 호 } (i,j)\text{가 경로에 포함되면} & \forall\ i \in n_i \\ 0, \text{ 그렇지 않으면} & \forall\ j \in n_j \end{cases}$$

<수리모형>

Maximize

$$R_{path} = \prod_{arc \in A} r_{arc} = \prod_{i \in n_i} \left\{ \sum_{j \in n_j} r_{ij} \cdot x_{ij} \right\} \tag{2}$$

Subject to

$$\sum_{j \in n_j} x_{sj} - \sum_{i \in n_i} x_{is} = 1 \tag{3}$$

$$\sum_{j \in n_j} x_{kj} - \sum_{i \in n_i} x_{ik} = 0 \qquad \forall\ k \in n_k \tag{4}$$

$$\sum_{j \in n_j} x_{tj} - \sum_{i \in n_i} x_{it} = -1 \tag{5}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall\ i \in n_i, j \in n_j, i \neq j \tag{6}$$

식 (1)을 최대화한 식 (2)는 MRPP의 목적함수를 나타내며, 경로의 신뢰도를 최대화하는 것이다. 식 (3)은 경로의 출발이 출발 지점에서만 이루어짐을 의미하고, 식 (4)는 중간 교점에 도착한 후 반드시 다른 교점이나 목표 지점으로 출발해야 한다는 네트워크 흐름의 연속성을 나타낸다. 식 (5)는 경로의 도착이 목표 지점에서만 이루어짐을 의미하며, 식 (6)은 교점 간의 호가 경로에 포함되면 1, 그렇지 않으면 0을 나타내는 결정변수 제약이다.

2.2 최단 경로 문제(SPP)

SPP는 네트워크에서 두 지점 또는 각 지점 간에 여

러 가지 경로가 있을 때 이 경로를 1회 통과하여 비용(또는 거리, 시간)을 최소화하는 경로를 구하는 문제이다. SPP 수리모형의 목적함수는 다음 식 (7)과 같으며, 결정변수와 제약함수는 MRPP와 동일하다.

$$Minimize\ C_{path} = \sum_{i \in n_i} \sum_{j \in n_j} c_{ij} \cdot x_{ij} \qquad (7)$$

비선형함수 형태인 MRPP의 목적함수 식 (2)에 대수(Logarithm)를 이용하면 선형함수 형태로 나타낼 수 있고, 음수(Negative)를 취하면 SPP 목적함수로 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\ln R_{path} = \ln \prod_{arc \in A} r_{arc} = \sum_{arc \in A} \ln r_{arc} \qquad (8)$$

$$Maximize \sum_{arc \in A} \ln r_{arc} = Minimize \sum_{arc \in A} -\ln r_{arc} \qquad (9)$$

MRPP의 목적함수인 식 (2)의 양변에 대수를 취하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (8)에 음수를 취하면 MRPP의 목적함수는 식 (9)와 같이 호의 비용(또는 거리, 시간)이 $-\ln r_{arc}$인 SPP의 목적함수로 변환된다.

변환된 문제를 SPP 알고리즘으로 해결한 후 해를 다시 지수(Exponential) 환원하면 원문제인 MRPP의 해를 구할 수 있다.

2.3 기존 연구 고찰

MRPP를 이용하여 UAV의 이동 경로를 계획한 연구로 Jun and D'Andrea[18]는 목적함수에 대수를 취하여 SPP로 변환한 후 Ford-Bellman 알고리즘을 이용하여 UAV의 이동 경로를 계획하였다.

SPP를 이용한 UAV의 이동 경로 계획에 관한 연구로 Bortoff[7]는 보로노이 선도(Voronoi Diagram)를 이용하여 적의 레이더 탐지를 회피하기 위한 이동 경로를 계획하였으며, Jia and Vagners[17]는 병렬 진화 알고리즘(Parallel Evolutionary Algorithm)을 이용하였다.

Nikolos and Brintaki[25]는 우수해로 수렴하는 성능과 효율성을 향상시킨 차별화된 진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)을 적용하였으며, Mitsutake and Higashino[22, 23]는 A* 알고리즘을 이용하여 집중 강우 지역을 피해서 비행하기 위한 이동 경로를 계획하였다. Sathyaraj et al.[28]은 이동 경로를 계획하기 위한 SPP 알고리즘(Ford-Bellman, Floyed-Warshall, Dijkstra, A*)을 비교한 후 A* 알고리즘의 성능이 우수함을 보였다. Gao et al.[14]은 UAV의 초기 속력과 침로를 입력한 후 비행하면서 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)으로 속력과 침로를 3단계(+, 0, -)로 변경하여 이동 경로를 계획하였으며, Bernhard et al.[6]은 Dijkstra 알고리즘을 이용하였다. Sujit and Beard[29]는 새로운 장애물 탐지시 UAV의 속도를 고려하여 장애물의 회피가 가능한 시간 내에 새로운 경로를 탐색하는 입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization)를 제시하였다. Mittal and Deb[24], Sanders and Ray[27], Gonzalez et al.[15]은 NSGA-Ⅱ(Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-Ⅱ)를 이용하여 산악과 계곡으로 이루어진 지형의 환경에서 이동 경로를 계획하였으며, Nikolos et al.[26]은 진화 알고리즘(EA : Evolutionary Algorithm)을 이용하여 UAV가 탑재한 센서의 정보를 이용하여 탐지거리 만큼의 경로를 산출하였다.

UAV의 이동 경로 계획에 관한 기존 연구를 연대순으로 정리 및 요약하면 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> UAV 이동 경로 계획 기존 연구

연 구 자	유형	해 법
Bortoff(2000)	SPP	Voronoi Diagram
Jun and D'Andrea (2002)	MRPP	Ford-Bellman
Nikolos et al.(2003)	SPP	EA
Jia and Vagners(2004)	SPP	PEA
Gao et al.(2005)	SPP	GA
Nikolos and Brintaki (2005)	SPP	EA
Bernhard et al.(2006)	SPP	Dijkstra
Mittal and Deb(2007)	SPP	NSGA-Ⅱ
Sanders and Ray(2007)	SPP	NSGA-Ⅱ
Mitsutake and Higashino(2008)	SPP	A*
Mitsutake and Higashino(2008)	SPP	A*
Sathyaraj et al.(2008)	SPP	Dijkstra, A*, Ford-Bellman, Floyed-Warshall
Gonzalez et al.(2009)	SPP	NSGA-Ⅱ
Sujit and Beard(2009)	SPP	PSO

3. 문제 모형화 및 수리모형

UAV 생존성 극대화를 위한 이동 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?

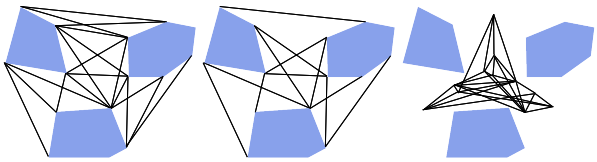
본 절에서는 UAV 이동 경로 계획 문제를 모형화하기 위한 활동 공간의 형태, UAV 이동 방법, UAV 생존 확률 산정 방법을 제시하고, 이동 경로를 계획하기 위한 수리모형을 구축한다.

3.1 문제 모형화

3.1.1 활동 공간의 형태

UAV의 이동 경로를 계획함에 있어 UAV와 장애물 및 적의 대공무기는 주어진 공간을 벗어나지 않으며, 이를 활동 공간으로 정의한다. 이를 위해서는 UAV의 활동 공간을 표현할 수 있는 지도가 활용되며, 이러한 지도를 표시하는 방법은 크게 그래프 지도(Graph Map)와 격자 지도(Grid Map)로 구분할 수 있다.

그래프 지도는 장애물이나 위협을 볼록한 다각형으로 표시하고, 다각형들의 꼭지점이나 모서리를 이용해서 지도를 만드는 방법으로 다음 <그림 1>과 같이 가시(Visuality) 그래프 지도, 접선(Tangent) 그래프 지도, 마크링크(Marklink) 그래프 지도가 있다.

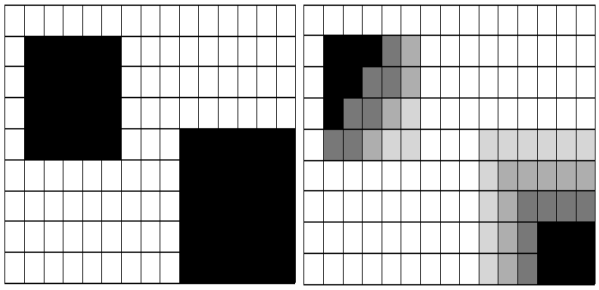


(a) 가시 (b) 접선 (c) 마크링크

<그림 1> 그래프 지도

이러한 그래프 지도는 장애물들의 모서리를 찾아야 하고, 모서리들로부터 꼭지점을 찾아서 장애물을 다각형으로 표현해야 하며, 다각형의 꼭지점간을 연결하는 호를 이용하여 지도를 구성해야 하므로 지도를 작성하는데 많은 시간이 소요된다.

격자 지도는 일반적인 공간을 격자로 나누고, 그 격자 안에 장애물이나 위협을 표시한 지도이며[20], 다음 <그림 2>와 같이 일반 격자 지도(General Grid Map)와 확률 격자 지도(Probability Grid Map)가 있다.



(a) 일반 (b) 확률

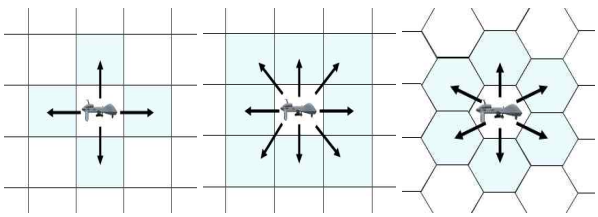
<그림 2> 격자 지도

일반 격자 지도는 장애물의 유무만을 구별하여 격자 안에 표시한 지도이며, 산악 지형이나 건물처럼 장애물이 있는 환경에 적합하다. 확률 격자 지도는 장애물의 유무가 아니라 장애물이 존재할 확률을 담고 있는 지도이며, 확률 격자 지도는 센서나 대공무기처럼 탐지 확률 또는 격추 확률을 갖고 있는 체계에 적합하다.

본 연구에서는 그래프 지도에 비해 격자 지도가 UAV 이동 경로 계획에 적합하므로 활동 공간의 모형화를 위하여 셀을 이용한 격자 지도를 구성하였다. 셀의 크기가 작을수록 현실과 유사하게 구현할 수 있으나 셀의 개수 증가로 문제의 복잡도는 커지게 된다.

3.1.2 UAV 이동 방법

UAV 이동 방법은 활동 공간을 구성하고 있는 격자 지도의 셀 형태에 따라 결정된다. 셀을 이용하여 경로를 계획한 기존 연구에서의 셀 형태는 4각형 또는 6각형 셀이며, 셀 형태에 따른 UAV 이동 방법은 다음 <그림 3>과 같다.



(a) 4각형 (b) 4각형 (c) 6각형

<그림 3> 셀 형태에 따른 UAV 이동 방법

<그림 3(a)>의 4각형 셀은 4방향으로 이동이 가능하고, <그림 3(b)>의 4각형 셀은 대각선을 포함한 8방향으로 이동이 가능하며, <그림 3(c)>의 6각형 셀은 6방향으로 이동이 가능하다.

본 연구에서는 UAV 이동 방법으로 대각선을 포함하여 8방향 이동이 가능한 <그림 3(b)>의 4각형 셀을 사용하였다.

3.1.3 UAV 생존 확률

본 연구에서 UAV의 생존성은 주어진 임무를 수행함에 있어 장애물에 충돌하지 않고, 적의 대공무기에 격추되지 않을 확률로 다음 식 (10)과 같이 정의하였다.

$$PS_{UAV} = 1 - PK \tag{10}$$

여기서, PS_{UAV}는 UAV의 생존 확률이며, PK는 장애물 충돌 확률 또는 적 대공무기의 격추 확률이다. 적 대공무기의 격추 확률은 적 대공무기의 성능(사정거리, 운용고도, 운용자 능력 등)과 환경(지형, 기상 등)에 영향을 받는다.

본 연구에서는 장애물이 존재하는 셀에서의 UAV 생존 확률은 적 대공무기 성능이 완벽한 경우이므로 $PK = 1$을 적용하여 0으로 하였으며, 적의 대공무기가 존재하는 셀에서의 UAV 생존 확률은 Wagner et al.[31]이 탐지 모형에서 제시한 포아송 과정(Poisson Process)으로 가정하고, UAV와 적 대공무기의 거리에 따라 다음 식 (11)과 같이 산정하였다.

$$PS_{UAV} = 1 - exp\ (-\alpha \cdot d_{uw}) \tag{11}$$

여기서, α는 적 대공무기의 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터이며, d_{uw}는 셀 u에 위치한 UAV와 셀 w에 위치한 적 대공무기의 유클리드 거리(Euclidean Distance)를 나타낸다. W개의 적 대공무기가 중첩되어 있는 경우 격추 확률 PK는 병렬(Parallel) 신뢰도 개념에 의거하여 다음 식 (12)와 같이 산출된다.

$$PK = 1 - \prod_{w \in W} \{1 - exp\ (-\alpha_w \cdot d_{uw})\} \tag{12}$$

여기서, α_w는 적 대공무기 종류별 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터이며, 식 (10)과 식 (12)를 이용하여 산정한 W개의 적 대공무기가 중첩되어 있는 경우 UAV 생존 확률은 다음 식 (13)과 같다.

$$PS_{UAV} = \prod_{w \in W} \{1 - exp\ (-\alpha_w \cdot d_{uw})\} \tag{13}$$

3.2 수리모형

본 연구에서는 MRPP를 이용하여 UAV의 생존성 극대화를 위한 이동 경로 계획 모형을 구축한다. 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.
- UAV의 임무수행을 위한 출발 및 도착 지점은 알려져 있다.
- 장애물의 위치와 적 대공무기의 성능 및 위치는 알려져 있다.
- UAV 생존 확률은 장애물에서는 0, 적 대공무기는 UAV와의 거리에 따른 포아송 과정이다.

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

S	=	$\{(1,1),(1,2),\cdots,(x,y)\}$: 활동 공간
S_i	:	셀 i에서 UAV가 이동 가능한 셀의 집합, $S_i \subset S$
i, j	:	셀, $i,j \in S$
s	:	출발 지점, $s \in S$
t	:	목표 지점, $t \in S$
p	:	임의의 중간 셀, $p \in S$
PS_j	:	셀 j에서의 UAV 생존 확률
PS_{UAV}	:	UAV의 생존 확률

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

<결정변수>

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

<수리모형>

Maximize

$$PS_{UAV} = \prod_{j \in S} \left(\sum_{i \in S} PS_j \cdot x_{ij} \right) \tag{14}$$

Subject to

$$\sum_{j \in S_s} x_{sj} - \sum_{i \in S_i} x_{is} = 1 \tag{15}$$

$$\sum_{j \in S_t} x_{tj} - \sum_{i \in S_i} x_{it} = -1 \tag{16}$$

$$\sum_{j \in S_i} x_{ij} = 1 \qquad \forall\ i \in S \tag{17}$$

$$\sum_{i \in S_j} x_{ij} = 1 \qquad \forall\ j \in S \tag{18}$$

$$\sum_{i\in S_i} x_{ip} - \sum_{j\in S_p} x_{pj} = 0 \qquad \forall\ p\in S \quad (19)$$

$$x_{ii} = 0 \qquad \forall\ i\in S \quad (20)$$

$$x_{ij}\in\{0,1\} \qquad \forall\ i,j\in S \quad (21)$$

위 수리모형의 목적함수 식 (14)는 UAV의 생존성을 극대화하는 것으로 이동 경로상의 각 셀에서 UAV가 장애물을 회피하거나 적 대공무기에 격추되지 않을 확률의 곱으로 표현하였다. 식 (15)와 식 (16)은 UAV의 출발과 도착이 출발 지점과 목표 지점에서만 이루어짐을 의미하며, 식 (17)과 식 (18)은 인접 셀로만 UAV의 이동을 허용하는 제약이다. 식 (19)는 UAV가 임의의 인접 셀로 이동한 후에 반드시 다른 인접 셀로 출발해야 한다는 이동의 연속성을 나타내며, 식 (20)은 UAV가 제자리 비행을 하지 않는다는 의미이다. 식 (21)은 셀 간의 UAV 이동이 있으면 1, 없으면 0을 나타내는 결정변수 제약이다.

식 (14)와 같이 비선형함수 형태인 이동 경로 계획 수리모형의 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 목적함수로 변환할 수 있다.

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

$$\begin{aligned}&Maximize \sum_{j\in S}\sum_{i\in S} \ln PS_j \cdot x_{ij} \\ &= Minimize \sum_{j\in S}\sum_{i\in S} -\ln PS_j \cdot x_{ij}\end{aligned} \quad (23)$$

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

4. 이동 경로 계획 알고리즘

MRPP로 모형화한 UAV 생존성 극대화를 위한 이동 경로 계획 문제를 SPP로 변환하였으며, SPP 알고리즘을 적용하여 문제를 해결한다. SPP는 네트워크 성질에 따라 모든 호의 길이가 양수(Positive)인 경우, 호의 길이가 음수일 수 있지만 모든 순환로(Cycle)의 길이는 양수인 경우, 순환로의 길이가 음수인 경우가 있다. 본 연구에서는 UAV의 이동 경로 계획에 적합한 모든 호의 길이가 양수인 경우의 알고리즘을 선정하기 위하여 Dijkstra 알고리즘, A* 알고리즘, A*PS 알고리즘을 적용한다.

4.1 Dijkstra 알고리즘

Dijkstra 알고리즘은 1959년 Dijkstra[10]에 의해 개발되었으며, 효율적인 알고리즘으로 평가되고 있다[11]. Greedy한 성질을 갖는 Dijkstra 알고리즘은 어떠한 호도 음수 값을 갖지 않는 네트워크에서 너비우선 탐색(Breadth-first Search)하여 주어진 출발 지점 s와 목표 지점 t 사이의 최단 경로를 구하는 알고리즘이며[9, 19], 의사코드(Pseudo Code)는 다음 <그림 4>와 같다.

```
L1  function Dijkstra (G,w,s)
L2    for each vertex v in V[G]
L3      d[v] := infinity
L4      previous [v] := undefined
L5    d[s] := 0
L6    S := empty set
L7    Q := set of all vertices
L8    while Q is not an empty set
L9      u := Extract_Min (Q)
L10     S := S union {u}
L11     for each edge (u,v) out going from u
L12       if d[v] > d[u] + w(u,v)
L13         d[v] := d[u] + w(u,v)
L14         previous [v] := u
L15   end while
```

<그림 4> Dijkstra 알고리즘 의사코드

4.2 A* 알고리즘

계산량을 줄이고 탐색 속도를 높이기 위하여 Dijkstra 알고리즘을 기반으로 휴리스틱 함수가 추가된 A*(A-star) 알고리즘이 1968년 Hart et al.[16]에 의해 제안되었다. A* 알고리즘은 출발 지점과 목표 지점으로 정의된 한 쌍의 교점에 대해서 목표 지점의 방향성을 나타내는 휴리스틱 함수를 이용하여 더욱 유망한 교점들을 우선 탐색하는 깊이 우선 탐색(Depth-first Search)으로 최단 경로를 찾아내며, 휴리스틱 함수는 다음 식 (24)와 같다.

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

여기서 $g(i)$는 출발 지점에서 임의의 특정 교점 i에 이르는 최소 비용을 의미하고, $h(i)$는 교점 i

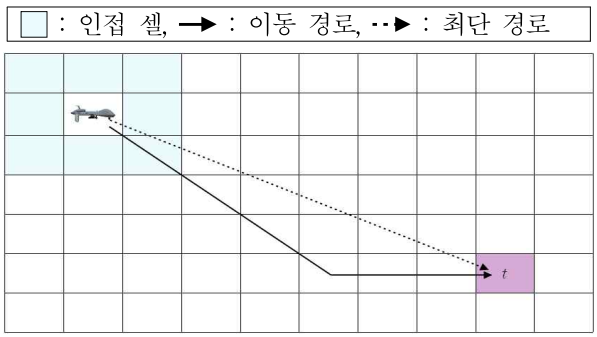
로부터 목표 지점에 이르는 최소의 비용을 추정한 비용이며, $f(i)$는 출발 지점에서 교점 i를 거쳐 목표 지점에 이르는 총 경로의 최소 비용을 추정한 값이다. A* 알고리즘의 의사코드는 다음 <그림 5>와 같다.

```
L1  function A* (s,t)
L2    CLOSED list := the empty set
L3    OPEN list := {s}
L4    g(s):= 0, f(s):= h(s):= h_calc[s,t]
L5    while OPEN list is not an empty set
L6      Cur_Node := Extract_Min f(OPEN list)
L7      if Cur_Node := goal
L8        return Best_Path
L9      remove Cur_Node from OPEN list
L10     add Cur_Node to CLOSED list
L11     each neighbor node N of Cur_Node
L12       if CLOSED list ∋ N
L13         continue
L14       else if OPEN list ∋ N
L15         calculate g(N), h(N), f(N)
L16         relaxation (N, Neighbor in OPEN list)
L17         else
L18           calculate g(N), h(N), f(N)
L19           Cur_Node & add N to OPEN List
L20   return failure
```

<그림 5> A* 알고리즘 의사코드

4.3 A*PS 알고리즘

4각형 형태의 셀을 이용한 활동 공간에서 이동 경로를 계획하는 경우 UAV의 방향 변경은 45도 단위로 한정될 수 밖에 없으며, <그림 6>과 같이 비효율성을 보일 수 있다.



<그림 6> 이동 경로의 비효율성

이러한 문제를 해결하기 위한 A*PS(A* with Post Smoothing) 알고리즘은 A* 알고리즘을 이용하여 이동 경로를 계획한 후 Botea et al.[8]이 제안한 Path Smoothing Procedure를 적용하여 경로를 부드럽게 하는 알고리즘이다. A*PS 알고리즘의 Post Smoothing 과정인 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, 선정된 직선의 두 셀은 격자 단위를 무시한 직선으로 연결하는 것이며, 의사코드는 다음 <그림 7>과 같다.

```
L1  function Obstacle_Check [C_i(x_i,y_i), C_j(x_j,y_j)]
L2    if (x_i := x_j) y_i := y_lb, y_j := y_ub
L3      for (x := x_i, y := y_lb to y_ub)
L4        if [C(x,y):=obstacle] OBSTACLE ; break
L5      return NOT_OBSTACLE
L6    else S:= (y_j − y_i)/(x_j − x_i)
L7      for (x := x_i to x_j)
L8        y_lb := round [y_i + (x − x_i − 0.5)× S]
L9        y_ub := round [y_i + (x − x_i + 0.5)× S]
L10       if (x := x_i) y_lb := y_i
L11       if (x := x_j) y_ub := y_j
L12       for (y := y_lb to y_ub)
L13         if [C(x,y):=obstacle] OBSTACLE ; break
L14       return NOT_OBSTACLE
L15 function Path Smoothing Procedure
      [C_i(x_i,y_i), C_j(x_j,y_j)]
L16   for (i := 0 to i < C_num)
L17     for (j := C_num to j > i)
L18       if Obstacle_Check (C_i, C_j)
          := NOT_OBSTACLE
L19         remove cells between C_i and C_j,
            i := j ; break
```

<그림 7> Path Smoothing Procedure 의사코드

5. 실험 및 결과 분석

UAV의 생존성 극대화를 위한 이동 경로 계획 알고리즘을 선정하기 위하여 실험 예제를 생성한 후 SPP 알고리즘(Dijkstra, A*, A*PS)을 적용하여 실험하였다. 실험에 활용한 알고리즘은 MATLAB을 이용하여 구축하였으며, Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU(3.16GHz, 2GB RAM) 환경의 컴퓨터에서 수행하였다.

5.1 실험 계획

알고리즘 선정을 위한 실험은 계산되는 교점의 수 측정(예제 1), 장애물이 존재하는 경우(예제 2)와 적 대공무기가 존재하는 경우(예제 3)에 대한 해의 품질 및 연산 시간을 측정하였다. 실험 환경은 격자 지도를 기반으로 하며, 대각선을 포함해 8방향으로 이동이 가능한 4각형 셀을 이용하여 구축하였다.

예제 1은 Dijkstra 알고리즘과 A* 알고리즘을 적용하여 환경에 따라 계산되는 교점의 수를 측정하였다. 40×40의 1,600셀 일반 격자 지도 환경을 구축하였으며, UAV의 출발 지점은 중앙 상단으로 하고, 목표 지점은 출발 지점과 수직인 중앙 하단으로 정하였다. A* 알고리즘의 휴리스틱 함수 $f(x)$에서 $g(x)$는 출발 지점에서 임의의 특정 교점 x까지 장애물을 회피하여 이르는 최소 거리를 적용하였고, $h(x)$는 교점 x로부터 목표 지점까지의 대각선 거리(Diagonal Distance)를 적용하였다. 실험 환경은 장애물이 없는 경우, 소수의 장애물이 있는 경우, 다수의 장애물이 있는 경우의 3가지 환경을 대상으로 실험하였다.

예제 2는 장애물이 존재하는 경우로 100×100의 10,000셀 일반 격자 지도 환경을 구축하였으며, 장애물의 수가 전체 셀의 5%, 10%, 20%, 30%이고, 장애물의 위치를 임의로 한 4개의 문제를 생성한 후 SPP 알고리즘(Dijkstra, A*, A*PS)을 적용하였다. A* 알고리즘의 휴리스틱 함수는 예제 1과 동일하게 적용하였으며, 각 10회 실험 후 계획된 UAV 이동 경로의 이동 거리와 연산 시간의 평균값을 산출하였다.

예제 3은 적 대공무기가 존재하는 경우로 김세헌 · 염건[2]이 제시한 MRPP 예제로 100×100의 10,000셀 확률 격자 지도 환경을 구축하였으며, 적 대공무기 112개를 적용하여 계획된 UAV 이동 경로의 거리와 생존 확률 및 연산 시간을 산출하였다. UAV의 생존 확률은 거리에 따른 포아송 과정으로 적 대공무기의 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터 $\alpha = 1.1$을 적용하였으며, SPP 문제로 변환한 후 SPP 알고리즘(Dijkstra, A*, A*PS)을 사용하였다. A* 알고리즘의 휴리스틱 함수 $f(x)$에서 $g(x)$는 위 예제 1과 동일하며, $h(x)$는 교점 x로부터 목표 지점까지 대각선 거리에 $10^{-\log(number\ of\ cell)}/1{,}000$을 곱하여 적용하였다.

5.2 수리모형 검증

본 연구에서 제시한 수리모형의 검증을 위해 예제 3을 축소시켜 실험하였으며, 축소실험 예제의 데이터는 다음 <표 2>와 같다. 축소실험 예제에 ILOG CPLEX, Dijkstra 알고리즘, A* 알고리즘을 적용하여 이동 경로, 생존 확률, 연산 시간을 산출한 후 각각 비교하였으며, 축소실험 결과는 다음 <표 3>과 같다.

<표 2> 축소실험 예제 데이터

셀	출발지점	목표지점	적 대공무기
10×10 (100셀)	(4, 2)	(9, 9)	(2, 5), (6, 4), (10, 10)

<표 3> 축소실험 결과

구 분	CPLEX	Dijkstra	A*
이동 경로	(4,2)→(5,1)→(6,1)→(7,1)→(8,1)→ (9,1)→(10,2)→(10,3)→(10,4)→ (10,5)→(10,6)→(9,7)→(8,8)→(9,9)		
생존 확률	0.6953		
연산 시간	5.04초	0.85초	0.01초

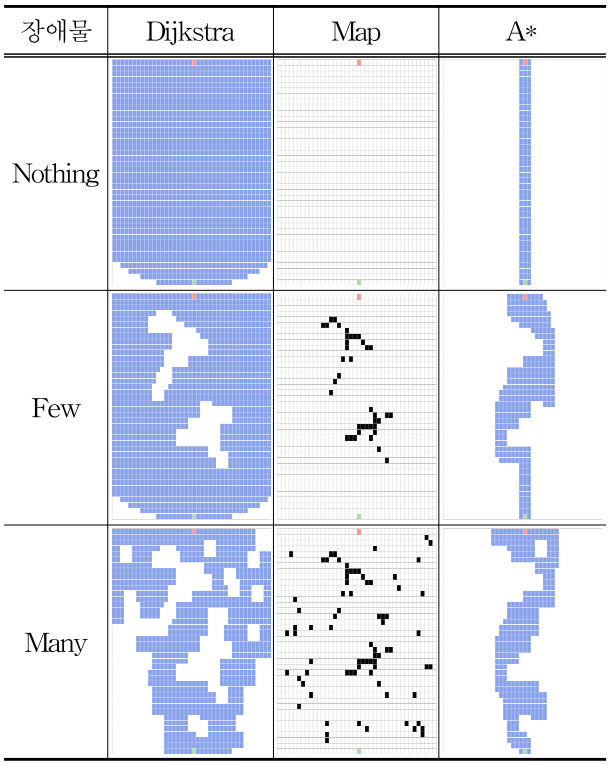
축소실험 결과 이동 경로와 생존 확률이 동일하게 산출되었으며, 이는 A* 알고리즘이 목표 지점으로의 방향성을 나타내는 휴리스틱 함수를 적절히 사용함으로써 CPLEX 및 Dijkstra 알고리즘과 같이 최적의 경로를 제공하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 수리모형의 타당성을 입증하였으며, 연산 시간은 A* 알고리즘이 0.01초로 CPLEX나 Dijkstra 알고리즘에 비해 빠른 것으로 나타났다.

5.3 실험 결과 분석

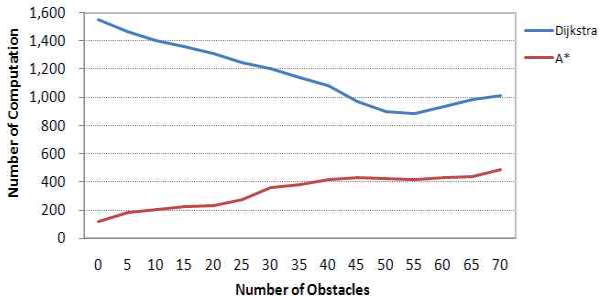
예제 1을 이용하여 3가지 환경에 따라 계산되는 교점의 수를 측정하였으며, 실험결과는 다음 <그림 8>과 같다.

실험 결과 알고리즘별로 환경에 따라 계산되는 교점의 수는 장애물이 없는 환경에서 차이가 가장 크며, 다수의 장애물이 있는 경우의 차이가 적은 것을 알 수 있다. 또한 장애물이 없는 환경에서의 실험 결과는 Dijkstra 알고리즘의 너비 우선 탐색과 A* 알고리즘의 깊이 우선 탐색의 특징을 잘 나타내고 있다. Dijkstra 알고리즘은 목적지에 대한 정보 없이 주어진 환경을

너비 우선으로 탐색하기 때문에 많은 메모리를 사용하고, 그로 인해 수행 속도가 느린 단점이 발생한다. 반면 A* 알고리즘은 목표 지점의 방향성을 나타내는 휴리스틱 함수를 이용하여 깊이 우선 탐색하기 때문에 계산량이 줄어 탐색 속도가 매우 빠르다. 임의의 위치에 장애물의 수를 5개씩 증가시키면서 알고리즘별 계산되는 교점의 수를 측정하고, 각 10회 실험 후 계산되는 교점 수의 평균값을 산출하였으며, 실험 결과는 다음 <그림 9>와 같다.



<그림 8> 예제 1 실험 결과



<그림 9> 장애물 수 증가에 따른 실험 결과

실험 결과 알고리즘별로 계산되는 교점의 수가 장애물이 거의 없는 경우에서는 큰 차이를 나타내고, 점차 장애물의 수가 증가할수록 차이가 감소하는 경향을 보였으며, Dijkstra 알고리즘에 비해 A* 알고리즘의 계산 교점 수가 매우 적은 것을 알 수 있다.

예제 2를 이용하여 해의 품질 및 연산시간을 측정하였으며, 장애물 수에 따른 각 문제별로 10회 실험 후 UAV 이동 거리와 연산 시간의 평균값을 산출한 실험 결과는 다음 <표 4>와 같다.

<표 4> 예제 2 실험 결과

장애물	Dijkstra		A*		A*PS	
	이동 거리	연산 시간	이동 거리	연산 시간	이동 거리	연산 시간
5%	149.62	41.91초	149.73	0.02초	144.86	0.04초
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	153.51	33.50초	154.71	0.04초	148.10	0.06초

실험 결과 UAV 이동 경로의 이동 거리는 A*PS 알고리즘이 최단으로 산출되었으며, Dijkstra 알고리즘에 비해 평균 3.52%, A* 알고리즘에 비해 평균 4.27%의 거리를 단축하였다. 연산 시간은 A* 알고리즘이 평균 0.04초로 가장 짧게 소요되었고, A*PS 알고리즘은 0.06초로 근소하게 소요되었다.

예제 3을 이용하여 해의 품질 및 연산시간을 측정하였으며, 실험 결과는 다음 <표 5>와 같다.

<표 5> 예제 3 실험 결과

구 분	Dijkstra	A*	A*PS
이동 거리	175.48	176.55	164.76
생존 확률	0.7215	0.7209	0.7428
연산 시간	38.26초	0.31초	0.53초

실험 결과 UAV 이동 경로의 이동 거리는 A*PS 알고리즘이 최단으로 산출되었고, Dijkstra 알고리즘에 비해 6.11%, A* 알고리즘에 비해 6.68%의 거리를 단축하였으며, 생존확률은 A*PS 알고리즘이 0.7428로 가장 높게 산출되었다. 확률 격자 지도를 사용한 적의 대공무기가 존재하는 실험 예제는 적 대공무기 사정거리에 대한 제한이 없어 활동 공간의 모든 셀에 장애물이 존재하는 문제가 되므로 일반 격자 지도를 사용한 장애물이 존재하는 예제 2에 비해 계산량이 많아져 연산 시간이 증가되었으며, A* 알고리즘이 0.31초로 가장 짧게 소요되었고, A*PS 알고리즘은 0.53초로 근소하게

소요되었다.

3개의 예제를 이용하여 계산되는 교점의 수와 해의 품질 및 연산 시간을 측정하여 비교한 결과 UAV 생존성 극대화를 위한 이동 경로 계획 알고리즘은 Dijkstra 알고리즘에 비해 계산되는 교점의 수가 적고, Dijkstra 알고리즘 및 A* 알고리즘에 비해 해의 품질이 우수하며, 연산 시간이 비교적 짧은 A*PS 알고리즘을 선정하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 UAV의 생존성을 극대화하는 이동 경로를 계획하기 위하여 MRPP를 이용한 수리모형을 제시하고, SPP로 변환한 후 ILOG CPLEX를 이용하여 해결함으로써 수리모형을 검증하였다. 또한 계산되는 교점의 수를 측정하는 실험과 해의 품질 및 연산 시간을 측정하는 실험을 통하여 UAV의 생존성을 극대화하는 이동 경로를 계획하기 위한 알고리즘을 선정하였다.

본 연구에서 UAV의 생존성을 극대화하는 이동 경로를 계획하기 위해 선정한 A*PS 알고리즘은 A* 알고리즘을 기반으로 하며, Post Smoothing 과정인 Path Smoothing Procedure가 추가된 알고리즘이다. A*PS 알고리즘은 Dijkstra 알고리즘에 비해 계산되는 교점의 수가 적고, Dijkstra 알고리즘 및 A* 알고리즘에 비해 해의 품질이 우수하며, 연산시간이 비교적 짧은 것으로 나타났다.

최근 전쟁에서 UAV의 실전화가 빠른 속도로 진행되고 있으며, 역할 및 활용이 증대되고 있다. 향후에는 인명 중시를 위하여 UAV가 유인 항공기의 상당 부분 내지 거의 전부를 대체하게 될 것이다. 전쟁이나 군사작전에서 UAV의 성공적인 임무수행을 보장하기 위해서는 적의 대공무기 위협으로부터 생존성이 극대화되는 이동 및 순회 경로의 계획이 필요하며, 다양한 알고리즘을 이용하여 최단 시간 또는 최단 거리 등의 최적 경로 계획이 필요하다고 판단된다.

7. 참 고 문 헌

[1] 공군작전사령부, 무인항공기 총람, 2010.
[2] 김세헌, 염건, 비행체의 경로최적화, 한국OR학회지, 제8권, 제1호, p.11-18, 1983.
[3] 방위사업청, 미래 전쟁의 주역 무인항공기, 2009.
[4] 이상헌, 메타 네트워크 이론 및 응용, 국방대학교, 2003.
[5] 전건욱, 무기체계 신뢰도 최적화 연구, 군사과학정책연구, 제4권, 국방대학교 안보문제연구소, 2010.
[6] W. Bernhard, N. Micheal, and S. Luigi, Global Real-Time Path Planning for UAVs in Uncertain Environment, Proceedings of the International Conference on Control Applications, 2006.
[7] S. A. Bortoff, Path Planning for UAVs, Proceedings of the American Control Conference, 2000.
[8] A. Botea, M. Muller, and J. Schaeffer, Near Optimal Hierarchical Path-Finding, Journal of Game Development, Vol.1, No.1, pp.7-28, 2004.
[9] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, Introduction to Algorithms, The MIT Press, 2001.
[10] E. W. Dijkstra, A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, Vol.1, No.1, pp.269-271, 1959.
[11] S. E. Dreyfus, An Appraisal of Some Shortest-Path Algorithms, Operations Research, Vol.17, No.3, pp.395-412, 1969.
[12] E. A. Elsayed, Reliability Engineering, Addison Wesley Longman Inc., 1996.
[13] L. Euler, Solutio Problematis ad Geometriam Situs Pertinentis, Commentarii Academiae Scientiarum Petropolitanae, Vol.8, pp.128-140, 1736.
[14] X. Gao, X. Fu, and D. Chen, A Genetic-Algorithm-Based Approach to UAV Path Planning Problem, Proceedings of the WSEAS International Conference on Simulation, Modeling, and Optimization, 2005.
[15] L. F. Gonzalez, D. S. Lee, R. Walker, and J. Periaux, Optimal Mission Path Planning (MPP) for an Air Sampling Unmanned Aerial System, Proceedings of the Austral-Asian Conference on Robotics and Automation, 2009.
[16] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics, Vol.4, No.2, pp.100-107, 1968.
[17] D. Jia and J. Vagners, Parallel Evolutionary Algorithms for UAV Path Planning, Proceedings of the AIAA Intelligent Systems Technical Conference, 2004.
[18] M. S. Jun and R. D'Andrea, Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain and Adversarial Environments, Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms, Kluwer, Boston, MA, 2002.
[19] S. M. LaValle, Planning Algorithms, Cambridge University Press, 2006.
[20] P. J. Mckerrow, Introduction to Robotics, Addison-

Wesley Publishing, 1993.
[21] MIL-STD-721B, Definition of Effectiveness Terms for Reliability, Maintainability, Human factors, and Safety, Microelectronics and Reliability, Vol.11, pp.429-433, 1972.
[22] K. Mitsutake and S. Higashino, 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.
[23] K. Mitsutake and S. Higashino, Real Time Simulation for Obstacle Avoidance using A*-EC Hybrid Path Planning Method, Proceedings of the KSAS-JSASS Joint International Symposium on Aerospace Engineering, 2008.
[24] S. Mittal and K. Deb, Three-Dimensional Offline Path Planning for UAVs using Multiobjective Evolutionary Algorithms, Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2007.
[25] I. K. Nikolos and A. N. Brintaki, Coordinated UAV Path Planning using Differential Evolution, Proceedings of the International Intelligent Control, 2005.
[26] I. K. Nikolos, K. P. Valavanis, N. C. Tsourveloudis, and A. N. Kostaras, Evolutionary Algorithm Based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol.33, No.6, pp.898-912, 2003.
[27] G. Sanders and T. Ray, 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.
[28] B. M. Sathyaraj, L. C. Jain, A. Finn, and S. Drake, Multiple UAVs Path Planning Algorithms: A Comparative Study, Journal of Fuzzy Optimization and Decision Making, Vol.7, No.3, pp.257-267, 2008.
[29] P. B. Sujit and R. Beard, Multiple UAV Path Planning using Anytime Algorithms, Proceedings of the American Control Conference, 2009.
[30] The Office of the Secretary of Defence, Unmanned Aircraft System Roadmap 2007-2032, U.S. DoD, 2007.
[31] D. H. Wagner, W. C. Mylander, and T. J. Sanders, Naval Operations Analysis, Naval Institute Press, Annapolis, Maryland, 1999.

저 자 소 개

김 기 태

해군사관학교 기계공학과를 졸업하였고, 국방대학교 운영분석(OR) 석사학위를 취득하였으며, 현재 국방대학교 운영분석학과 박사과정에 재학중이다. 주요 관심분야는 최적화, 경로 계획, 군사 OR, 메타 휴리스틱, 신뢰도 최적화 등이다.

주소: 서울특별시 은평구 수색동 205번지, 국방대학교 운영분석학과

전 건 욱

공군사관학교 전자공학과를 졸업하였고, 고려대학교 산업공학과, 미국 University of Louisville 산업공학과에서 석사 및 박사학위를 각각 취득하였다. 현재 국방대학교 운영분석학과 교수로 재직중이며, 주요 관심분야는 최적화 기법 응용, 신뢰도 분석, 시험평가, 무기체계 사전분석 및 비용분석 등이다.

주소: 서울특별시 은평구 수색동 205번지, 국방대학교 운영분석학과