

3차원 환경 기반 무인 항공기 생존성 극대화를 위한 이동 경로 계획

김기태[†] · 전건욱

국방대학교 운영분석학과

A Path Planning to Maximize Survivability for Unmanned Aerial Vehicle based on 3-dimensional Environment

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 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.). For accomplishing the UAV's missions, guarantee of survivability should be preceded. The main objective of this study is the path planning to maximize survivability for UAV based on 3-dimensional environment. A mathematical programming model is suggested by using MRPP(Most Reliable Path Problem) and solved by transforming MRPP into SPP(Shortest Path Problem). This study also suggests a A*PS algorithm based on 3-dimensional environment to UAV's path planning. According to comparison result of the suggested algorithm and SPP algorithms (Dijkstra, A* algorithm), the suggested algorithm gives better solution than SPP algorithms.

Keyword: unmanned aerial vehicle, path planning, most reliable path problem, shortest path problem, survivability

1. 서론

오늘날 전자, 광학, 컴퓨터, 인공지능, 정보통신 등에서 첨단 과학기술이 발전함에 따라 인명피해를 최소화하면서 전쟁의 목적을 달성하기 위하여 공중, 지상, 수상, 수중의 모든 영역에서 무인화 체계가 활용되고 있으며, 이러한 무인화 체계 중에서 가장 먼저 실전용으로 활용된 체계는 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)이다. UAV란 조종사가 탑승하지 않은 상태에서 지상의 원격 조종 또는 사전에 입력된 프로그램에 따라 비행하거나 비행체 스스로 주위 환경을 인식하고 판단하여 자

율적으로 비행하는 비행체를 말한다(The Office of the Secretary of Defense, 2007). UAV는 주로 군사 목적으로 개발 및 사용되었으며, 단순정찰 위주의 영상정보 수집을 넘어 이제는 매우 다양한 용도로 활용되고 있고, 1990년대 이후의 전쟁들에서 탁월한 효능을 발휘하였다.

이러한 UAV의 운용효과를 기대하기 위해서는 UAV가 주어진 임무를 수행할 때 적의 대공무기(Surface to Air Weapon, SAW)에 격추되지 않을 확률인 생존성이 확보되어야 한다(DAPA, 2009). 생존성이란 어떤 체계가 적대적인 인공 환경을 견디어 내고, 지정된 임무를 달성하는데 필요한 능력에서 임무를 실

[†]연락처 : 김기태, 122-875 서울특별시 은평구 수색동 205번지 국방대학교 운영분석학과,

Fax : 02-309-6233, E-mail : navystar52@naver.com

투고일(2011년 07월 20일), 심사일(1차 : 2011년 10월 10일, 2차 : 2011년 10월 18일), 게재확정일(2011년 10월 19일).

폐할 만큼의 손상을 입지 않을 정도에 대한 척도로 정의된다 (MIL-STD-721B, 1972).

본 연구에서는 UAV의 생존성을 UAV가 주어진 임무를 수행함에 있어 장애물에 충돌하지 않고, 적의 대공무기에 격추되지 않을 확률로 정의하였다. 3차원 환경에서의 UAV 생존성을 극대화하는 이동 경로를 계획하기 위해 최대 신뢰 경로 문제 (Most Reliable Path Problem, MRPP)를 이용하여 수리모형을 구축하였고, 대수(Logarithm)를 이용하여 최단 경로 문제(Shortest Path Problem, SPP)로 변환하였으며, 변환된 문제에 본 연구에서 제안한 3차원 기반 A*PS(A-star with Post Smoothing) 알고리즘을 이용하여 문제를 해결하였다.

2. 경로 문제 및 기존 연구 고찰

UAV 이동 경로 계획은 기지에서 출발하여 목표 지점으로 비행하는 경로를 계획하는 것이며, MRPP를 이용하여 모형화하고, MRPP로 모형화된 문제는 SPP로 변환하여 해결한다.

MRPP는 두 지점간의 경로 중에서 가장 신뢰도가 높은 경로를 결정하는 문제이며, 네트워크에서 두 지점을 연결하는 호의 신뢰도는 그 구간에 고장이 발생하지 않을 확률로 정의된다(Lee, 2003). 따라서 이동 경로의 신뢰도는 그 경로를 구성하는 호 신뢰도의 곱으로 나타낼 수 있다. 비선형함수 형태인 MRPP의 목적함수에 대수와 음수를 취하면 선형함수 형태의 SPP 목적함수로 변환할 수 있다. SPP로 변환된 문제를 해결한 후 해를 다시 지수(Exponential) 환원하면 원문제인 MRPP의 해를 구할 수 있다. MRPP를 이용한 경로 계획 연구로 Kim and Yeom(1983)은 목적함수에 대수를 취하여 SPP로 변환한 후 계산시간을 줄이기 위해 해싱(Hashing)기법을 적용한 Dijkstra 알고리즘으로 미사일의 이동 경로를 계획하였으며, Shupenus and Barr(2000)는 미사일을 발사한 후 위치가 노출된 이동발사 차량이 적의 공격을 회피하기 위한 이동 경로를 산출하였다. Jun and D'Andrea(2002)는 목적함수에 대수를 취하여 SPP로 변환한 후 Ford-Bellman 알고리즘을 이용하여 UAV의 이동 경로를 계획하였으며, Hossain and Sayed(2005)는 지진과 같은 사건을 고려하여 네트워크의 최대 신뢰 경로를 계획하였다. Kim *et al.* (2010)은 수상함에 의해 탐색활동이 이루어지고 있는 해역에서 임무를 수행하기 위해 목표지점이나 표적에 접근하는 잠수함의 잠항능력을 고려하여 생존율을 극대화하는 최적의 이동 경로를 계획하였다.

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. SPP를 이용한 경로 계획 연구는 선박의 항해 경로 계획이나 차량의 내비게이션 시스템에서의 경로 계획과 같이 실생활과 가장 밀접하게 응용되고 있으며, 최근에는 UAV, 이동 로봇(Mobile Robot), 무인 차량(Unmanned Ground Vehicle), 무인 잠수정(Unmanned Underwater

Vehicle) 등 무인화 시스템의 이동 경로 계획에 활용되고 있다. SPP를 이용한 UAV의 경로 계획에 관한 연구로 Bortoff(2000)는 보로노이 선도(Voronoi Diagram)를 이용하여 적의 레이더 탐지를 회피하기 위한 이동 경로를 계획하였으며, Jia and Vagners(2004)는 병렬 진화 알고리즘(Parallel Evolutionary Algorithm)을 이용하였다. Gao *et al.*(2005)은 UAV의 초기 속력과 침로를 입력하고, 이후 비행하면서 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)으로 속력과 침로를 3단계(+, 0, -)로 변경하여 이동 경로를 계획하였으며, Nikolos and Brintaki(2005)는 우수해로 수렴하는 성능과 효율성을 향상시킨 차별화된 진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)을 적용하였다. Weiss *et al.*(2006)은 Dijkstra 알고리즘을 적용하였으며, Mitsutake and Higashino(2008)는 A*(A-star) 알고리즘을 이용하여 집중 강우 지역을 피해서 비행하기 위한 이동 경로를 계획하였다. Sathyaraj *et al.*(2008)은 이동 경로를 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 이동 경로를 계획하였다.

기존의 UAV 이동 경로 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 이동 경로를 계획하였다.

MRPP와 SPP를 이용한 UAV 이동 경로 계획의 기존 연구는 다음 <표 1>과 같다.

표 1. UAV 경로 계획 기존 연구

연구자	유형	기법
Bortoff(2000)	SPP	Voronoi Diagram
Jun and D'Andrea(2002)	MRPP	Ford-Bellman
Nikolos <i>et al.</i> (2003)	SPP	EA
Jia and Vagners(2004)	SPP	PEA
Gao <i>et al.</i> (2005)	SPP	GA
Nikolos and Brintaki(2005)	SPP	EA
Weiss <i>et al.</i> (2006)	SPP	Dijkstra
Mittal and Deb(2007)	SPP	NSGA- II
Sanders and Ray(2007)	SPP	NSGA- II
Mitsutake and Higashino(2008)	SPP	A*
Sathyaraj <i>et al.</i> (2008)	SPP	Dijkstra, A*, Ford-Bellman, Floyd-Warshall
Gonzalez <i>et al.</i> (2009)	SPP	NSGA- II
Sujit and Beard(2009)	SPP	PSO

기존의 UAV 이동 경로 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. 또한 일부 3차원 환경을 기반으로 하는 연구도 UAV 고도의 표현을 2단계(고, 저) 또는 3단계(+, 0, -)로 단순화하여 적용하고 있다. 따라서 UAV 비행 환경과 유사한 3차원 환경을 기반으로 하는 현실적인 UAV 이동 경로의 계획이 필요하다.

3. 문제 모형화 및 수리모형

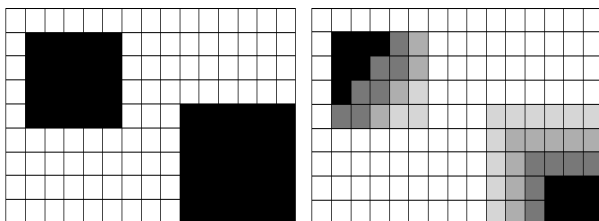
생존성 극대화를 위한 UAV 이동 경로 계획 문제의 모형화를 위해서는 다음의 요소들을 고려해야 한다.

- 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 활동 공간의 형태

UAV의 경로 계획의 목적은 목표 지점까지 장애물과 위협을 회피하여 이동함으로써 생존성을 극대화하는 경로를 생성하는 것이다. UAV와 장애물 및 적의 대공무기는 주어진 공간을 벗어나지 않으며, 이를 활동 공간으로 정의한다. 본 연구에서는 활동 공간을 표현하기 위하여 격자 지도(Grid Map)를 사용하였다. 격자 지도는 일반적인 공간을 격자로 나누고, 그 격자 안에 장애물이나 위협을 표시한 지도이며(Mckerrow, 1993), 다음 <그림 1>과 같이 일반 격자 지도(General Grid Map)와 확률 격자 지도(Probability Grid Map)가 있다.



(가) 일반 격자 지도 (나) 확률 격자 지도

그림 1. 격자 지도

<그림 1>(가)의 일반 격자 지도는 장애물의 유무만을 구별하여 격자 안에 표시한 지도이며, 산악, 계곡 등의 지형이나 건물과 같은 장애물이 있는 환경에 적합하다. <그림 1>(나)의 확

률 격자 지도는 장애물의 유무가 아니라 장애물이 존재할 확률을 담고 있는 지도이며, 센서나 대공무기처럼 탐지 확률 또는 격추 확률을 갖고 있는 체계에 적합하다.

본 연구에서는 3차원 환경을 모형화하기 위하여 6면체 형태의 셀을 이용한 격자 지도를 구성하였으며, 3차원 환경의 격자 지도는 다음 <그림 2>와 같다.

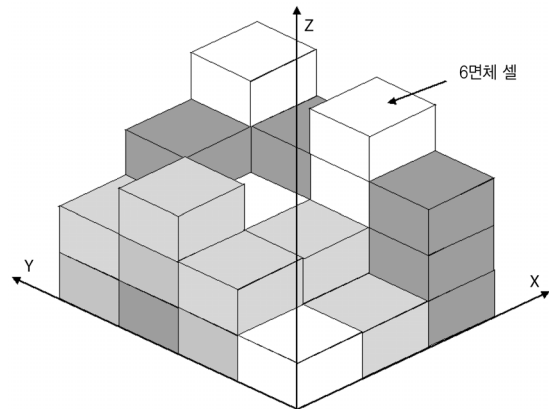
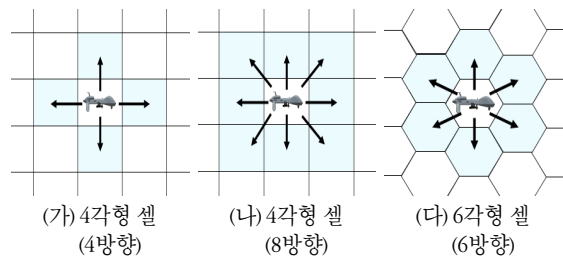


그림 2. 3차원 환경의 격자 지도

3.2 UAV 이동 방법

UAV 이동 방법은 활동 공간을 구성하고 있는 격자 지도의 셀 형태에 따라 결정된다. 2차원 환경을 기반으로 셀을 이용하여 경로를 계획한 기존 연구에서의 셀 형태는 4각형 또는 6각형 셀이며, 셀 형태에 따른 UAV 이동 방법은 다음 <그림 3>과 같다.



(가) 4각형 셀 (4방향) (나) 4각형 셀 (8방향) (다) 6각형 셀 (6방향)

그림 3. 2차원 환경에서의 UAV 이동 방법

<그림 3>(가)의 4각형 셀은 4방향으로 이동이 가능하고, <그림 3>(나)의 4각형 셀은 대각선을 포함한 8방향으로 이동이 가능하며, <그림 3>(다)의 6각형 셀은 6방향으로 이동이 가능한 모형이다.

본 연구에서는 2차원 환경의 셀 중에서 대각선을 포함하여 8방향으로 이동이 가능한 <그림 3>(나)를 기반으로 하는 3차원 환경의 6면체 형태 셀을 사용하였으며, UAV 이동 방법은 <그림 4>(가)와 같이 수평(Horizon) 8방향, <그림 4>(나)와 같이 수직(Vertical) 18방향[위쪽(Upside) 9방향, 아래쪽(Downside) 9방향]의 총 26방향으로 이동이 가능한 모형을 사용하였다.

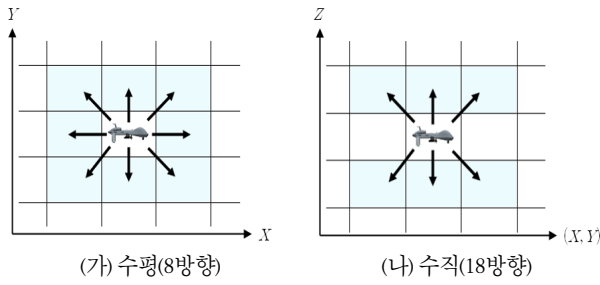


그림 4. 3차원 환경에서의 UAV 이동 방법

3.3 UAV 생존 확률

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

$$PS_{UAV} = 1 - PK \quad (1)$$

여기서, PS_{UAV} 는 UAV의 생존 확률이며, PK 는 장애물 충돌 확률 또는 적 대공무기의 격추 확률(Probability of Kill, PK)이다. 적 대공무기의 격추 확률은 적 대공무기의 성능(사정거리, 운용 고도, 운용자 능력 등)과 환경(지형, 기상 등)에 영향을 받는다.

본 연구에서는 장애물이 존재하는 셀에서의 UAV 생존 확률은 $PK=1$ 을 적용하여 0으로 하였으며, 적 대공무기가 존재하는 셀에서의 UAV 생존 확률은 Wagner *et al.*(1999)이 탐지 모형에서 제시한 포아송 과정(Poisson Process)으로 가정하고, UAV와 적 대공무기의 거리에 따라 다음 식 (2)와 같이 산정하였다.

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

여기서, 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 (3)과 같다.

$$\beta = \text{최대 사정거리} / \text{최대 운용고도} \quad (3)$$

셀 $u(x_u, y_u, z_u)$ 에 위치한 UAV와 셀 $w(x_w, y_w, z_w)$ 에 위치한 적 대공무기의 수평거리 H_{range} 는 다음 식 (4)와 같으며, 수직거리 V_{range} 는 다음 식 (5)와 같다.

$$H_{range} = \sqrt{(x_w - x_u)^2 + (y_w - y_u)^2} \quad (4)$$

$$V_{range} = \beta(z_w - z_u) \quad (5)$$

UAV와 적 대공무기의 유클리드 거리 d_{uw} 는 식 (3)~식 (5)를 이용하여 구할 수 있으며, 다음 식 (6)과 같다.

$$d_{uw} = \sqrt{(H_{range})^2 + (V_{range})^2} \quad (6)$$

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

식 (6)을 이용하여 산출한 d_{uw} 가 적 대공무기의 최대 사정거리 이내($0 \leq d_{uw} \leq \text{최대 사정거리}$)이면 d_{uw} , 최대 사정거리 밖($d_{uw} > \text{최대 사정거리}$)이면 $Big M$ 을 식 (2)에 적용하여 생존 확률을 산정하였다. W 개의 적 대공무기가 중첩되어 있는 경우 격추 확률 PK 는 병렬(Parallel) 신뢰도 개념에 의거하여 다음 식 (7)과 같이 산출된다.

$$PK = 1 - \prod_{w \in W} \{1 - \exp(-\alpha_w \cdot d_{uw})\} \quad (7)$$

여기서, α_w 는 적 대공무기 종류별 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터이며, 식 (2)와 식 (7)을 이용하여 산정한 W 개의 적 대공무기가 중첩되어 있는 경우 UAV 생존 확률은 다음 식 (8)과 같다.

$$PS_{UAV} = \prod_{w \in W} \{1 - \exp(-\alpha_w \cdot d_{uw})\} \quad (8)$$

3.4 수리모형

본 연구에서는 MRPP를 이용하여 UAV의 생존성 극대화를 위한 이동 경로 계획 모형을 구축하였으며, 수리모형 구축을 위한 가정사항은 다음과 같다.

- 활동 공간은 3차원 환경의 6면체 셀로 구성된 격자 지도이다.
- UAV는 활동 공간 내에서만 활동하며, 인접한 수평 · 수직의 셀(26방향)로만 이동이 가능하다.
- UAV의 수평 · 수직 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, UAV와 적 대공무기는 거리에 따른 포아송 과정이다.

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

$$S = \{(1, 1, 1), (1, 1, 2), \dots, (x, y, z)\} : \text{활동 공간}$$

$$S_i : \text{셀 } i \text{에서 UAV가 이동 가능한 셀의 집합, } S_i \subset S$$

- 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 j 에서의 UAV 생존 확률
- PS_{UAV} : UAV의 생존 확률

$$\ln PS_{UAV} = \ln \prod_{j \in S} \left(\sum_{i \in S} PS_j \cdot x_{ij} \right) \tag{17}$$

$$= \sum_{j \in S} \sum_{i \in S} \ln PS_j \cdot x_{ij}$$

$$\text{Maximize } \sum_{j \in S} \sum_{i \in S} \ln PS_j \cdot x_{ij} \tag{18}$$

$$= \text{Minimize } \sum_{j \in S} \sum_{i \in S} -\ln PS_j \cdot x_{ij}$$

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

<결정변수>

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

<수리모형>

Maximize

$$PS_{UAV} = \prod_{j \in S} \left(\sum_{i \in S} PS_j \cdot x_{ij} \right) \tag{9}$$

Subject to

$$\sum_{j \in S_s} x_{sj} - \sum_{i \in S_s} x_{is} = 1 \tag{10}$$

$$\sum_{j \in S_t} x_{tj} - \sum_{i \in S_t} x_{it} = -1 \tag{11}$$

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

$$\sum_{i \in S_j} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in S \tag{13}$$

$$\sum_{i \in S_p} x_{ip} - \sum_{j \in S_p} x_{pj} = 0 \quad \forall p \in S \tag{14}$$

$$x_{ii} = 0 \quad \forall i \in S \tag{15}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in S \tag{16}$$

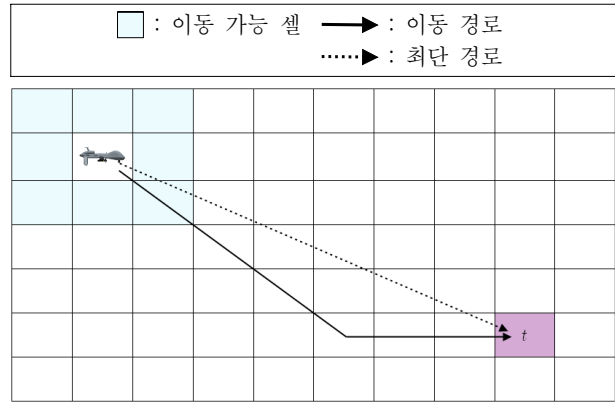
위 수리모형의 목적함수 식 (9)는 UAV의 생존성을 극대화하는 것으로 이동 경로상의 각 셀에서 UAV가 장애물을 회피하거나 적 대공무기에 격추되지 않을 확률의 곱으로 표현하였다. 식 (10)과 식 (11)은 UAV의 출발과 도착이 출발 지점과 목표 지점에서만 이루어짐을 의미하며, 식 (12)와 식 (13)은 인접 셀로만 UAV의 이동을 허용하는 제약이다. 식 (14)는 UAV가 임의의 인접 셀로 이동한 후에 반드시 다른 인접 셀로 출발해야 한다는 이동의 연속성을 나타내며, 식 (15)는 UAV가 제자리 비행을 하지 않는다는 의미이다. 식 (16)은 셀 간의 UAV 이동이 있으면 1, 없으면 0을 나타내는 결정변수 제약이다.

식 (9)와 같이 비선형함수 형태인 이동 경로 계획 수리모형의 목적함수에 대수를 이용하면 다음 식 (17)과 같이 선형함수 형태로 나타낼 수 있고, 음수를 취하면 다음 식 (18)과 같이 각 셀의 비용이 $-\ln PS_j$ 이고, 비용을 최소화하는 SPP 목적함수로 변환할 수 있다.

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

4. 3차원 환경 기반 A*PS 알고리즘

셀을 이용한 활동 공간에서 생존성 극대화를 위한 UAV 이동 경로를 계획하는 경우 UAV의 방향 변경은 45도 단위로 한정될 수밖에 없으며, 다음 <그림 5>와 같이 비효율성을 보일 수 있다.



Search)으로 최단 경로를 찾아내며, 휴리스틱 함수는 다음 식 (19)와 같다.

$$f(i) = g(i) + h(i) \quad (19)$$

여기서, $g(i)$ 는 출발 지점에서 임의의 특정 교점 i 에 이르는 최소 비용을 의미하고, $h(i)$ 는 임의의 특정 교점 i 로부터 목표 지점에 이르는 최소의 비용을 추정한 비용이며, $f(i)$ 는 출발 지점에서 임의의 특정 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 격자 지도의 $h(i)$ 는 교점 i 에서 목표 지점까지의 대각선 거리(Diagonal Distance)를 적용하였으며, 확률 격자 지도는 대각선 거리에 $10^{-\log(\text{number of cell})}$ 을 곱하여 적용하였다. A* 알고리즘의 의사코드는 다음 <그림 6>과 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  $\ni$  N
L13        continue
L14      else if OPEN list  $\ni$  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 and add N to OPEN List
L20    return failure

```

그림 6. A* 알고리즘 의사코드

4.2 Path Smoothing Procedure

셀을 이용하여 계획한 이동 경로의 비효율성을 개선하기 위하여 Botea et al.(2004)이 Path Smoothing 개념을 제시하였다. 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 것이다. 본 연구에서는 3차원 환경에 적합한 Path Smoothing Procedure를 제시하였으며, 의사코드는 다음 <그림 7>과 같다.

```

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

```

그림 7. 3차원 환경에서의 Path Smoothing Procedure 의사코드

5. 실험 및 결과 분석

UAV의 생존성을 극대화하는 이동 경로를 계획하기 위하여 장애물이 존재하는 경우와 적의 대공무기가 존재하는 2개의 예제를 생성하였다. A*PS 알고리즘을 이용하여 이동 경로를 계획하였고, Dijkstra 및 A* 알고리즘의 실험 결과와 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

UAV의 이동 경로를 계획하는 실험은 장애물이 존재하는 경우(예제 1)와 적 대공무기가 존재하는 경우(예제 2)를 대상으로 Dijkstra, A*, A*PS 알고리즘을 이용하여 이동 경로를 계획한 후 해의 품질 및 연산 시간을 측정하였다. 실험 환경은 격자 지도를 기반으로 하며, 대각선을 포함해 수평 및 수직의 26방향으로 이동이 가능하고, 셀 하나의 크기가 1NM×1NM×1,000ft인 6면체 셀을 이용하여 100×100×30의 300,000셀 격자 지도를 구축하였다.

장애물이 존재하는 경우인 예제 1은 일반 격자 지도를 이용하여 활동 공간을 구축하였으며, 활동 공간 내에 장애물 수가 전체 셀의 5%, 10%, 20%, 30%이고, 장애물의 위치를 임의로 한 4개의 문제를 생성하였다. 각 10회 실험 후 계획된 UAV 이동 경로의 이동 거리와 연산 시간의 평균값을 산출하였다.

적 대공무기가 존재하는 경우인 예제 2는 확률 격자 지도를 이용하여 활동 공간을 구축하였으며, UAV 이동 경로의 이동 거리와 생존 확률 및 연산 시간을 산출하였다. 출발 지점의 고도는 5,000ft로 하였으며, 목표 지점의 고도는 10,000ft, 5,000ft, 3,000ft의 3가지 경우를 적용하였다. 적 대공무기의 위치는 Kim and Yeom(1983)이 제시한 예제와 동일하게 지상에 112개가 위치하는 것으로 적용하였고, 적 대공무기는 장거리(Long-range), 중거리(Medium-range), 단거리(Short-range)의 3종류로 구성하였으며, 종류별 성능 및 환경 영향을 고려한 파라미터(α)와

표 2. 적 대공무기 성능 및 수량

종류	α	최대 사정거리	최대 운용고도	수량
장거리	0.1	50NM	70,000ft	7
중거리	0.5	30NM	50,000ft	25
단거리	1.0	10NM	30,000ft	80

표 5. 장애물이 존재하는 예제 1 실험 결과

장애물	Dijkstra		A*		A*PS	
	이동 거리	연산 시간	이동 거리	연산 시간	이동 거리	연산 시간
5%	138.68NM	1,575.15초	138.97NM	0.32초	135.71NM	0.40초
10%	139.89NM	1,486.27초	140.62NM	0.37초	136.93NM	0.42초
20%	142.26NM	1,411.62초	144.17NM	0.51초	139.45NM	0.57초
30%	145.14NM	1,359.38초	147.25NM	0.58초	141.20NM	0.64초
평균	141.49NM	1,458.11초	142.75NM	0.45초	138.32NM	0.51초

최대 사정거리, 최대 운용고도, 수량은 다음 <표 2>와 같다.

5.2 수리모형 검증

본 연구에서 제시한 수리모형의 검증을 위해 예제 2를 축소시켜 실험하였으며, 축소실험 예제의 데이터는 다음 <표 3>과 같다. 축소실험 예제에 CPLEX, Dijkstra, A* 알고리즘을 적용하여 이동 경로, 생존 확률, 연산 시간을 산출한 후 각각 비교하였으며, 축소실험 결과는 다음 <표 4>와 같다.

표 3. 축소실험 예제 데이터

활동 공간	출발 지점	목표 지점	적 대공무기	
			위치	성능
10×10×3 (300셀)	(4, 2, 1)	(9, 9, 3)	(2, 5, 1)	$\alpha = 1$ 최대 사정거리 : 5NM 최대 운용고도 : 3,000ft
			(6, 4, 1)	
			(10, 10, 1)	

표 4. 축소실험 결과

구분	CPLEX	Dijkstra	A*
이동 경로	(4, 2, 1) → (5, 3, 2) → (5, 4, 3) → (6, 5, 3) → (7, 6, 3) → (8, 7, 3) → (9, 8, 3) → (9, 9, 3)		
이동 거리	9.9042NM		
생존 확률	0.9153		
연산 시간	15.45초	2.57초	0.02초

CPLEX, Dijkstra, A* 알고리즘을 이용한 축소실험 결과 이동 경로와 생존 확률이 모두 동일하게 산출되어 본 연구에서 제시한 수리모형의 타당성을 입증하였다. 또한 A* 알고리즘이 목표 지점으로서의 방향성을 나타내는 휴리스틱 함수를 적절히 사용함으로써 CPLEX 및 Dijkstra 알고리즘과 같이 최적의 경로를 제공하는 것을 확인하였으며, 연산 시간은 A* 알고리즘이 0.02초로 CPLEX나 Dijkstra 알고리즘에 비해 빠른 것으로 나타났다.

5.3 실험 결과 분석

장애물이 존재하는 예제 1을 대상으로 Dijkstra, A*, A*PS 알고리즘을 이용하여 해의 품질 및 연산시간을 측정하였으며, 장애물 수에 따른 각 문제별 10회 실험 후 UAV 이동 거리와 연산 시간의 평균값을 산출한 실험 결과는 다음 <표 5>와 같다.

표 6. 적 대공무기가 존재하는 예제 2 실험 결과

구 분		Dijkstra	A*	A*PS
10,000ft	이동 거리	140.63 NM	142.77 NM	137.32 NM
	생존 확률	0.7830	0.7830	0.7830
	연산 시간	1,214.38초	0.57초	1.18초
5,000ft	이동 거리	142.81 NM	143.14 NM	139.10 NM
	생존 확률	0.7657	0.7628	0.7816
	연산 시간	1,327.19초	2.04초	2.67초
3,000ft	이동 거리	147.25 NM	149.83 NM	138.16 NM
	생존 확률	0.7372	0.7328	0.7672
	연산 시간	1,318.55초	12.40초	13.09초

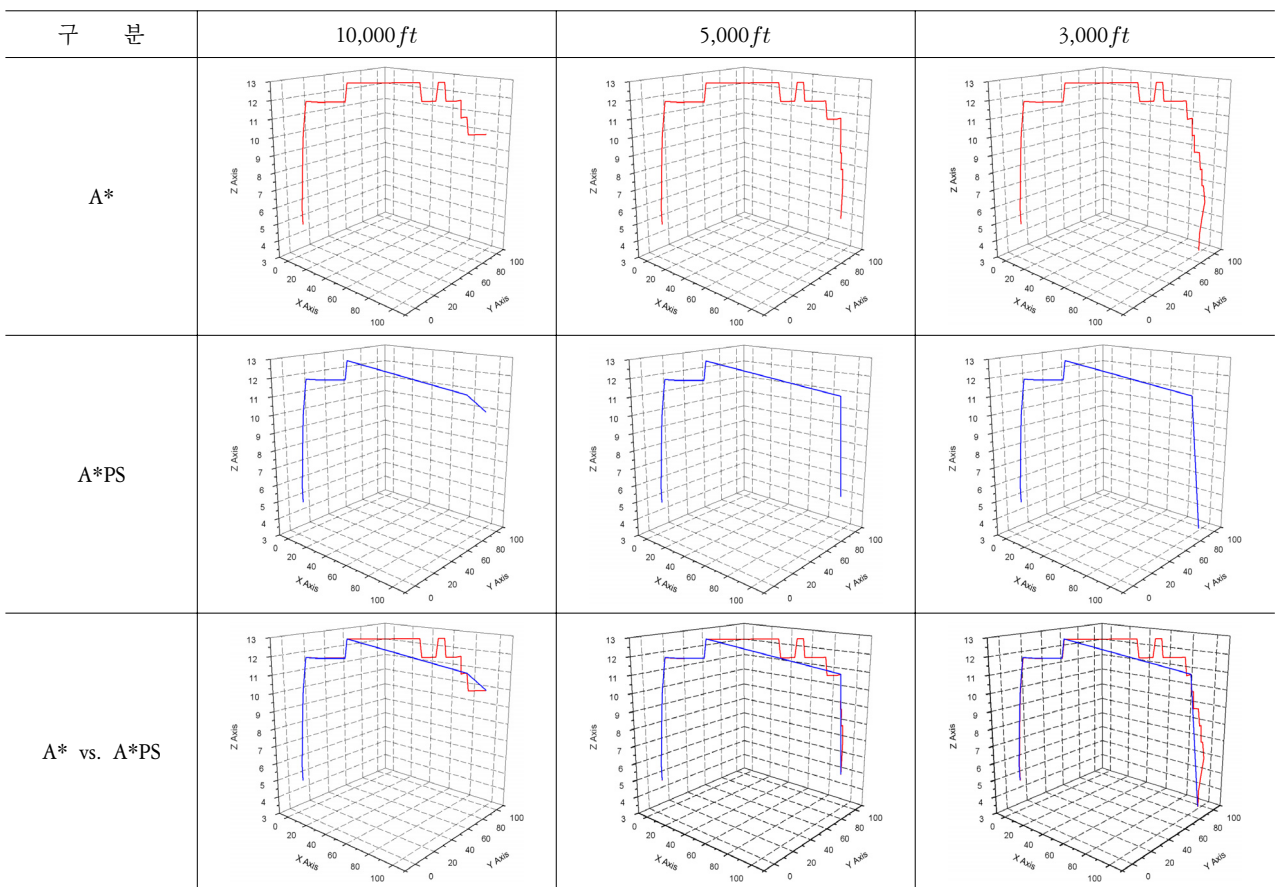


그림 8. UAV 이동 경로(예제 2)

3개의 알고리즘을 적용한 예제 1 실험 결과 UAV 이동 경로의 이동 거리는 A*PS 알고리즘이 평균 138.32로 모든 경우에서 최단으로 산출되었으며, Dijkstra 알고리즘에 비해 평균 2.24%, A* 알고리즘에 비해 평균 3.10%의 거리를 단축하였다. 연산 시간은 A* 알고리즘이 평균 0.45초로 가장 짧게 소요되었고, A*PS 알고리즘은 평균 0.51초로 근소하게 소요되었다.

적 대공무기가 존재하는 예제 2를 대상으로 Dijkstra, A*, A*PS 알고리즘을 이용하여 해의 품질 및 연산시간을 측정하였으며, 목표 지점의 고도에 따른 UAV 이동 경로의 이동 거리,

생존 확률 및 연산 시간을 산출한 실험 결과는 다음 <표 6>과 같다.

3개의 알고리즘을 적용한 예제 2 실험 결과 목표 지점의 고도가 10,000ft인 경우 UAV의 생존 확률이 모두 동일하게 산출되었으며, 목표 지점의 고도가 5,000ft, 3,000ft인 경우 생존 확률은 A*PS 알고리즘이 0.7816, 0.7672로 가장 높게 산출되었다. UAV 이동 경로의 이동 거리는 A*PS 알고리즘이 137.32~139.10 NM로 목표 지점의 모든 고도에서 최단으로 산출되었으며, Dijkstra 알고리즘에 비해 2.35~6.17%, A* 알고리즘에 비해 2.82

~7.79%를 단축하였다. 확률 격자 지도를 사용한 예제 2는 적 대공무기 성능에 의해 활동 공간의 대부분의 셀에 장애물이 존재하게 되어 목표 지점의 고도가 낮아지거나 일반 격자 지도를 사용한 예제 1에 비해 계산량이 많아져 연산 시간이 증가하였다. 연산 시간은 A* 알고리즘이 0.57~12.40초로 목표 지점의 모든 고도에서 가장 짧게 소요되었고, A*PS 알고리즘은 A* 알고리즘의 연산 시간에 Post Smoothing 과정인 Path Smoothing Procedure를 수행하는 0.61~0.69초의 연산 시간이 추가된 1.18~13.09초가 소요되었다. A*, A*PS 알고리즘으로 계획한 예제 2의 UAV 이동 경로는 다음 <그림 8>과 같다.

장애물이 존재하는 경우와 적 대공무기가 존재하는 경우의 예제를 이용하여 UAV 생존성을 극대화하는 이동 경로를 계획한 결과 A*PS 알고리즘이 우수한 해를 제공하였다. 이는 A*PS 알고리즘이 최초 A* 알고리즘을 이용하여 이동 경로를 계획한 후 Path Smoothing Procedure를 수행함으로써 셀을 이용한 활동 공간의 비효율성이 제거되어 품질이 우수한 해를 도출하였으며, A* 알고리즘의 연산 시간에 Post Smoothing 과정인 Path Smoothing Procedure를 수행하기 위한 0.61~0.69초의 짧은 연산 시간이 추가되는 등 알고리즘의 우수성을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 3차원 환경에서의 UAV 생존성을 극대화하는 이동 경로 계획하기 위해 MRPP를 이용한 수리모형을 구축하였고, 대수를 이용하여 SPP로 변환한 후 CPLEX를 이용하여 수리모형을 검증하였다. 또한 A* 알고리즘을 기반으로 Post Smoothing 과정인 Path Smoothing Procedure가 추가된 3차원 기반 A*PS 알고리즘을 이용하여 문제를 해결하였으며, Dijkstra, A* 알고리즘과 비교 결과 해의 품질이 우수하고, 연산 시간이 비교적 짧아 이동 경로 계획에 효율적임을 확인할 수 있었다.

UAV의 실전화가 급속도로 이루어지고 있으며, 향후 유인 항공기의 대부분을 대체하게 될 것이다. 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

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*.
 DAPA (2009), *UAV, the Leading Part of the Future War*, Defense Acquisition Program Administration.
 Elsayed, E. A. (1996), *Reliability Engineering*, Addison Wesley Longman Inc.

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*.
 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.
 Hossain, P. and Sayed, N. S. B. (2005), Network Performance Improvement under Stochastic Events with Long-term Effects, *Transportation*, 32(1), 65-85.
 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., Park, S. H., Cho, S. J., and Jeon, G. W. (2010), An Optimal Path Planning for Survival Rate Maximization of Submarine, *Journal of the Military Operations Research Society of Korea*, 36(3), 135-145.
 Kim, S. H. and Yeom, G. (1983), Path Optimization for Aircraft, *Journal of the Korean Operations Research*, 8(1), 11-18.
 Lee, S. H. (2003), *Theory and Applications of Meta Network*, Korea National Defense University.
 Ma, W., Tang, S., and Wang, K. (2008), Competitive Analysis for the Most Reliable Path Problem with Online and Fuzzy Uncertainties, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 22(1), 195-206.
 Mckerrrow, P. J. (1983), *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley Publishing.
 MIL-STD-721B (1972), Definition of Effectiveness Terms for Reliability, Maintainability, Human factors, and Safety, *Microelectronics and Reliability*, 11, 429-433.
 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.
 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*.
 Sathiyaraj, 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.
 Shupenus, J. and Barr, D. (2000), Information Loss due to Target Mobility, *Military Operations Research*, 4(4), 31-43.
 Sujit, P. B. and Beard, R. (2009), Multiple UAV Path Planning using Anytime Algorithms, *Proceedings of the American Control Conference*.
 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
현재 : 국방대학교 운영분석학과 박사과정
관심분야 : 최적화, 경로계획, 군사 OR, 메타
휴리스틱, 신뢰도 최적화



전진욱

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