

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(6), 488-496(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.6.488

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

다수의 위협과 복수의 목적지가 존재하는 임무에서 복수 무인기의 생존율 극대화를 위한 최적 경로 계획 및 분석

정성식, 장대성, 박현진, 성태현, 안재명*

Optimal path planning and analysis for the maximization of multi UAVs survivability for missions involving multiple threats and locations

Seongsik Jeong, Dae-Sung Jang, Hyunjin Park, Taehyun Seong and Jaemyung Ahn*

Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

This paper proposes a framework to determine the routes of multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) to conduct multiple tasks in different locations considering the survivability of the vehicles. The routing problem can be formulated as the vehicle routing problem (VRP) with different cost matrices representing the trade-off between the safety of the UAVs and the mission completion time. The threat level for a UAV at a certain location was modeled considering the detection probability and the shoot-down probability. The minimal-cost path connecting two locations considering the threat level and the flight distance was obtained using the Dijkstra algorithm in hexagonal cells. A case study for determining the optimal routes for a persistent multi-UAVs surveillance and reconnaissance missions given multiple enemy bases was conducted and its results were discussed.

초 록

본 연구에서는 각각 다른 목적지에서 다수의 임무를 수행해야 하는 복수 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAVs)의 경로를 결정할 때, 무인항공기의 생존가능성을 고려하여 경로를 결정하는 프레임워크를 제안하였다. 본 라우팅 문제는 무인항공기 안전과 임무 완료시간 간의 trade-off 를 나타내는 비용 매트릭스를 이용한 차량경로문제(Vehicle Routing Problem, VRP)로 정의할 수 있다. 특정위치에서 무인항공기의 위협 레벨은 감지될 확률과 격추될 확률을 고려하여 모델링 하였고, 위협 레벨과 비행거리를 고려한 두 지역 간의 최소비용경로는 육각형격자(Hexagonal cells)에서 Dijkstra 알고리즘을 사용하여 결정하였다. 또한, 지속적으로 다수의 적을 감시·정찰하는 임무를 수행하는 복수 무인항공기의 최적경로를 결정하는 case study를 수행하였으며, 그 결과를 논의하였다.

Key Words : UAV(무인항공기), Path Planning(경로 계획), Survivability(생존가능성), Traveling Salesman Problem(외판원문제), Mission Success Probability(임무성공 확률)

† Received : November 26, 2014 Revised : May 19, 2015 Accepted : May 19, 2015

* Corresponding author, E-mail : jaemyung.ahn@kaist.ac.kr

I. 서론

무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)는 조종사가 탑승하지 않고 지정된 임무를 수행할 수 있도록 제작된 비행체로서 사람이 탑승하지 않기 때문에 인명 손실에 대한 위험 없이 위협요소가 존재하거나 오염된 지역에서의 작전수행이 가능하다. 또한 유인항공기에 비해 상대적으로 조작 방법이 손쉽고 기체 소형화를 통해 레이더 피탐성 감소가 가능하다는 장점을 가지고 있다[1]. 이러한 장점으로 인해 무인항공기는 감시정찰, 공격, 전자정보전 등 군사적 용도에서부터 기상 관측, 방송촬영, 물류 배송 등의 민간 활용 분야까지 폭넓은 분야에서 활용되고 있다. 이에 따라, 미국, 이스라엘 등의 선진국을 중심으로 세계 각국에서 무인항공기 개발이 활발히 이루어지고 있으며 구글, 아마존 등의 다국적 기업도 무인항공기를 활용한 서비스 사업에 뛰어드는 등 항공우주산업 분야에서 가장 빠른 성장세를 기록하고 있다. 향후 민간 무인항공기 시장이 활성화된다면 그 발전 속도는 더욱 더 빨라질 것이다.

무인항공기 운용에서 중요한 요소 중 하나는 경로 계획(path planning)이다. 경로 계획이란 현재 위치로부터 목적지에 도달하는 과정에서 걸리는 시간이나 거리, 소모 연료 등을 고려하여 효과적인 이동 경로를 사전에 계획하는 것이다. 일반적인 경로 계획 문제에서는 주로 경로의 길이나 이동에 걸리는 시간을 비용으로 고려하여 최소화 하는 문제, 즉 최단 거리 경로나 최소 시간 경로를 찾는다. 하지만 군사적 목적으로 운용하는 무인항공기의 경로 결정 문제의 경우, 거리나 시간뿐만 아니라 아닌 다른 비용을 함께 고려하는 문제로 접근할 필요가 있다. 예를 들어, 적진에서 임무 수행을 하는 경우 지상의 탐지레이더, 대공포, 미사일등 다수의 위협에 대한 위험성 정도를 최소화 하며 임무를 수행할 수 있도록 경로를 계획할 수 있다.

Dogan[2]은 다수의 위협이 존재하는 지역의 위험도를 Multivariate gaussian distribution으로 표현한 후 경로의 위험도를 분석하였고, Yun et al.[3]은 두 개의 레이더 사이에서 피탐성을 최소화하는 무인항공기의 유도제어 문제를 다루었다. Novy and Jacques[4]는 레이더의 신호강도를 고려하여 항공기의 최적 경로를 결정하였으며, Bortoff[5]와 Kant[6]는 Voronoi Diagram을 이용하여 적의 레이더에 의한 탐지를 회피하는 경로를 계획하였다. 또한 확률론적 접근방법을 이용한 연구도 많이 진행되고 있는데, Lee et al.[7]은

확률적 모델링을 통해 UAV의 충돌가능성을 분석하였으며, Kim et al.[8]과 Jun[9]은 영역을 셀로 분할하고 각 셀의 위험도를 분석한 확률 지도를 만든 후 최적경로를 탐색하였다.

하지만 기존 연구의 경우 위험도 분석을 수행할 때, 레이더의 성능 모델이 단순하거나[2], 적의 존재유무만을 판단하여 분석하였다[8]. 또한 Voronoi Diagram을 이용하여 구한 최적 경로는 장애물과의 충돌에 대한 위험성은 작지만 최적 경로가 아니라는 단점이 있다[10].

본 논문에서는 복수의 무인항공기가 다수의 위협이 존재하는 지역에서 복수의 목적지를 모두 방문해야하는 임무를 가지고 있을 때, 무인항공기의 격추확률과 고장확률을 모델링하고 이를 바탕으로 무인항공기의 생존성을 최대화하는 경로 최적화 기법을 제안하였다. 또한 이때의 임무 성공 가능성 분석을 수행하였다.

II. 위험도 모델링

레이더, 미사일 등의 위협요소가 존재하는 적진에서 임무를 수행하는 무인항공기가 추락할 경우는 크게 적에 의해 격추되거나 고장으로 인해 추락하는 것을 고려할 수 있다. 움직이는 물체를 격추하기 위해서는 우선 그 물체를 탐지해야한다. 따라서 격추 확률은 탐지 확률과 탐지되었을 때 격추될 확률로 나누어 고려할 수 있다. 또한 격추될 확률만 고려할 경우 위험지역을 피하기 위해 비효율적으로 긴 비행경로를 선택할 수 있기 때문에, 비행시간에 따른 무인항공기의 고장확률을 고려하였다.

따라서 본 논문에서는 무인항공기의 위험도를

- 1) 적군의 레이더에 의해 탐지될 위험
- 2) 적군에게 탐지되었을 때 격추당할 위험
- 3) 무인항공기의 고장 위험

으로 나누어 분석하였다. 각각의 사건은 N (적의 공격으로 격추된 사건), D (적의 레이더에 의해 탐지되는 사건), B (고장으로 인해 추락한 사건)으로 표현하고, 위험도를 다음과 같이 확률 모델을 적용하여 수학적으로 모델링 하였다.

2.1 탐지확률 모델링

레이더의 탐지거리, 정확도 등의 성능은 레이더의 종류나 조건에 따라 그 분석방법이 다양하고, 많은 요소들을 고려해야 한다. 본 논문에서는 거리에 따른 레이더의 탐지 성능을 분석하기 위하여, 레이더 종합적인 성능을 나타내는 Signal

to Noise Ratio(SNR) 공식(1)과, SNR에 따른 레이더 탐지 확률 공식(3)을 이용하여 거리에 따른 탐지 확률을 분석하였다.

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B F_n L} \quad (1)$$

여기서 P_S 는 signal power, P_N 은 noise power, P_T 는 peak transmit power를 나타내며, G_T 와 G_R 는 송수신 안테나 이득이다. 또한 λ 는 레이더 송신파 파장, σ 는 표적의 radar cross-section(RCS)을 의미하며, R 는 레이더로부터 거리, k 는 Boltzmann 상수, T_0 는 system effective temperature($^{\circ}K$), B 는 유효 잡음 대역폭, F_n 는 radar noise figure, L 은 general loss factor를 나타낸다.

(1)식에서 무인항공기의 크기 등에 따라 변하는 σ 와 무인항공기로부터 레이더까지의 거리인 R 을 제외한 나머지 파라미터들은 레이더 성능에 의해 결정되는 상수이므로 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다[11].

$$SNR = \alpha \frac{\sigma}{R^4} \quad (2)$$

또한, Swerling 1 target, 단일 스캔 조건에서의 SNR에 따른 탐지확률은 다음과 같이 표현할 수 있다[12].

$$P(D) = P(FA) \frac{1}{1+SNR} \quad (3)$$

이를 식(2)과 결합하여 거리에 따른 레이더의 탐지 확률 공식을 얻을 수 있다.

$$P(D) = P(FA) \frac{R^4}{\alpha\sigma + R^4} \quad (4)$$

여기서, $P(D)$ 는 탐지 확률, $P(FA)$ 는 레이더 성능에 의해 결정되는 오경보 확률(probability of false alarm)을 의미한다[11]. 이를 통하여 레이더의 성능과 무인항공기의 RCS가 주어졌을 때 레이더와 항공기 사이의 상대거리에 따른 탐지확률을 구할 수 있다. 본 문제에서는 실제 레이더 성능을 고려하여 각 파라미터를 $P(FA) = 10^{-6}$, $\alpha = 5.119 \times 10^5$, $\sigma = 1$ 로 가정하였다. 다음 Fig. 1과 Fig. 2는 가정한 조건하에서 SNR에 따른 탐지확률과, 거리에 따른 탐지확률 그래프이다.

본 논문에서는 다수의 위협이 존재하는 경우를 고려하기 때문에, 다수의 레이더가 존재할 경우의 탐지확률 모델링을 수행해야한다. 각 레이

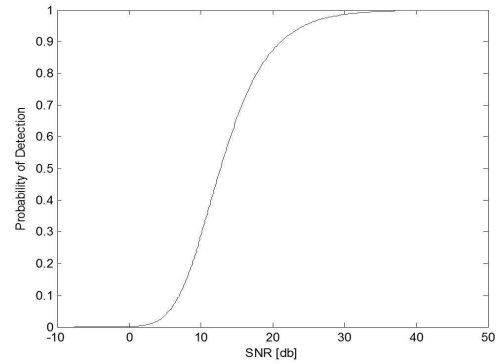


Fig. 1. Detection probability according to SNR

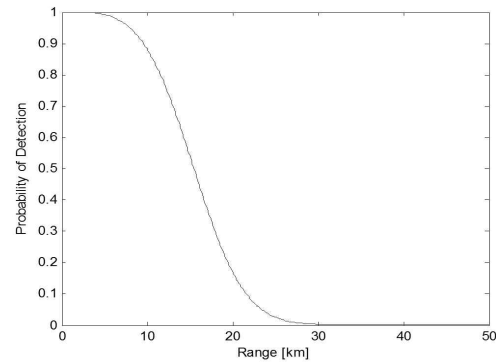


Fig. 2. Detection probability according to Range

더의 거리에 따른 탐지확률은 Fig. 2와 같은 확률 분포를 가지며, 각각의 레이더에 의해 탐지되는 사건은 상호 독립이라 가정한다. 즉, k 개의 레이더가 존재하는 지역에서 무인항공기가 단위 시간동안 (x, y, z) 위치에 존재할 때 탐지될 확률은 식(5)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 $P(\bar{D})$ 는 탐지되지 않을 확률을 의미한다.

$$P(D)|_{x,y,z} = 1 - \prod_{i=1}^k P(\bar{D}_i)|_{x,y,z} \quad (5)$$

2.2 격추확률 모델링

움직이는 무인항공기를 격추하기 위해서는 우선 그 기체를 탐지해야한다. 따라서 다수의 위협이 존재하는 지역에서 무인항공기가 격추될 확률은 탐지확률과 탐지되었을 때 적군에 의해 격추될 확률로 구분해서 분석할 수 있다. 또한 탐지가 되지 않았을 경우는 격추될 확률이 없다고 가정하였다. 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(N) &= P(N|D)P(D) + P(N|\bar{D})P(\bar{D}) \\ &= P(N|D)P(D) \end{aligned} \quad (6)$$

조건부 확률인 $P(N|D)$ 는 적의 레이더에 탐지

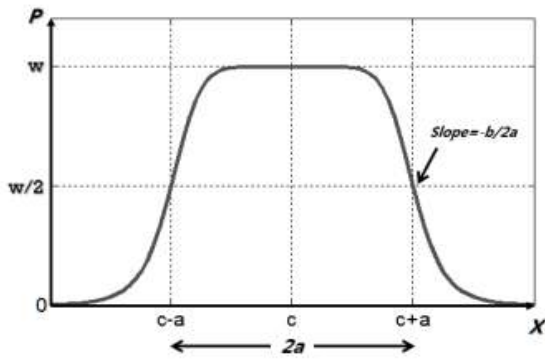


Fig. 3. Distribution graph of $P(N|D)$

되었을 경우 격추될 확률을 의미하며, 적군의 위치와 규모, 무기 종류에 따라 그 범위와 격추 확률 등이 달라질 것이다. 이를 표현하기 위해 bell shaped function을 적용하여 확률 분포를 다음과 같이 모델링하였다.

$$P(N|D) = \frac{1}{1 + \left| \frac{(x-c)}{a} \right|^{2b}} \cdot w \quad (7)$$

여기서 $(x-c)$ 는 무인기와 대공포, 미사일 등의 공격 수단을 보유하고 있는 적군 사이의 상대 거리를 나타낸다. a 는 적군의 공격 가능 범위, b 는 거리에 따른 격추 확률 감소 기울기, w 는 최대 격추확률을 나타낸다.

공격할 수단을 가지고 있는 적군이 l 개 존재하고 있는 상황에서 무인항공기가 탐지 되었을 경우, 격추 될 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(N|D)|_{x,y,z} = 1 - \prod_{i=1}^l (1 - P(N_i|D)|_{x,y,z}) \quad (8)$$

$P(N_i|D)|_{x,y,z}$ 는 i 번째 적에 의해 무인항공기가 격추될 확률이다. 각각의 확률은 상호 독립이다.

2.3 고장확률 모델링

실제 에이전트 운용에서 고장으로 인한 위협이 높은 비율을 차지한다[13]. 따라서 고장확률을 고려하여 경로를 결정해야하며, 이를 고려하지 않고 격추될 확률만 고려할 경우 위험지역을 피하기 위해 비효율적으로 긴 비행경로를 선택할 수도 있다. 이 문제를 해결하기 위해 비행시간에 따른 무인항공기의 고장 확률($P(B)$)을 고려하였다.

$$P(B) = P_b^t \quad (9)$$

여기서 P_b 는 단위 시간 당 고장확률을 의미하

며, UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS ROAD-MAP[13]에서 공개된 값을 참고하여 비행시간 당 고장확률을 가정 하였다.

III. 최적 경로 결정

본 연구에서 다루고자 하는 문제는 다수의 위협이 존재하는 상황에서 복수의 목적지를 방문하고 돌아오기까지 복수무인항공기의 생존가능성을 최대화하는 최적 이동경로를 구성하는 문제이다. 3장에서는 앞서 수행한 위험도 확률모델을 바탕으로, 각 지점사이의 생존확률을 최대화 하는 최적경로 결정방법을 제안하고, 차량경로문제로 접근하여 복수의 목적지를 방문하는 최적 경로를 결정하는 프레임워크를 제안한다.

3.1 두 지점사이의 최적 경로 결정

3.1.1 그래프 이론과 최단경로 기법

그래프는 정점들과 그 사이를 연결하는 간선들로 구성되어 있다. 이를 통해 현상이나 사물들 간의 관계를 표현할 수 있으며, 각 간선에 가중치를 주어 그 정도를 표현할 수 있다. n 개의 정점의 집합 V 와 이들 간에 존재하는 간선의 집합 E 로 구성된 그래프 G 는 다음과 같이 표현한다[14].

$$G = (V, E) \quad (10)$$

주어진 그래프 $G = (V, E)$ 에서, 출발점으로부터 도착점까지의 경로는 일련의 간선들로 이루어져 있다. 최단경로를 찾는 알고리즘은 이 경로를 구성하는 간선들의 가중치 합을 최소로 하는 경로를 찾는 것으로서, 모든 간선에 대해 음의 가중치를 허용하지 않는 Dijkstra 알고리즘과 음의 가중치를 허용하는 Bellman-Ford 알고리즘 등이 있다[14]. 본 논문에서는 항상 최단 경로 탐색을 보장하는 Dijkstra 알고리즘을 사용하여 출발점과 도착점사이의 최단경로를 결정하였다.

3.1.2 문제정의

각 지점사이의 최적 경로를 최단경로기법을 적용하여 구하기 위해선 무인항공기의 활동영역을 그래프 $G = (V, E)$ 로 표현해야한다. 본 연구에서는 그래프로 표현하기 위해 활동 영역을 셀(cell)로 분할하였다. 균일한 크기로 평면을 분할할 수 있는 기하학적 도형인 3각형, 4각형, 6각형의 셀 중, 자유도가 큰 정6각형 형태의 셀(Fig. 5)을 사용하였다. 여기서 자유도가 크다는 의미는 현재의 셀에서 이동 가능한 이웃한 셀의 개수가 많다는 것을 의미한다. 6각형 셀의 경우 근처

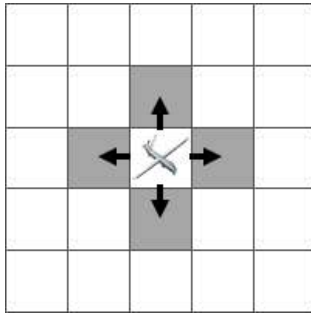


Fig. 4. Tetragonal cell

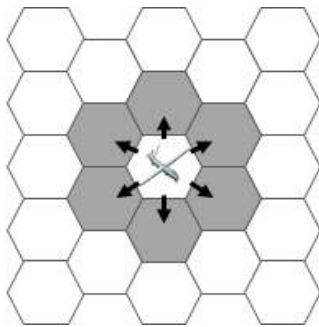


Fig. 5. Hexagonal cell

이웃한 6개의 정점으로 이동할 수 있다.

각 셀의 중심은 그래프 이론의 정점이며 무인항공기는 매 시간 하나의 셀 안에 위치한다. 각 정점사이의 거리는 단위시간동안 무인항공기의 이동거리와 같으며, 단위 시간이 경과 시에 인접 셀로 반드시 이동해야 한다고 가정하였다. 또한 각 정점을 이은 선분은 이동 경로 및 간선을 뜻한다.

각 정점에는 위치정보와 2장에서 정의한 확률 모델에 따른 그 지점에서의 탐지확률($P(D)$)과 격추확률($P(MD)$) 정보가 들어있으며, 이 정보를 간선의 가중치에 반영하여 목적지까지 무인항공기의 생존확률을 최대화하는 경로를 구성하고자 한다.

각 간선(이동경로)의 가중치에 생존 확률을 반영하기 위해서는 다음과 같은 과정이 필요하다. 현재의 셀에서 이웃한 다른 셀로 이동하는 경로의 탐지확률($P(D)$)과 탐지 되었을 때 격추 될 확률($P(MD)$)은 두 정점의 평균값으로 계산한다. 각 장점사이의 거리는 단위시간동안 무인항공기의 이동거리와 같기 때문에, 고장확률($P(B)$)은 모든 임의의 간선에 대해 같은 값을 갖는다.

무인항공기가 고장으로 인해 추락하는 사건과 격추되는 사건은 독립사건이기 때문에 무인항공기의 생존확률은 식(11)과 같이 표현 할 수 있다.

$$P(S) = [1 - P(MD)P(D)][1 - P(B)] \quad (11)$$

이를 바탕으로 두 지점간의 생존확률을 최대

화하는 경로를 결정하는 최적화 문제의 목적은 다음과 같다.

$$\max P_S \quad (12)$$

where

$$P_S = \prod_{(u,v) \in E(H)} P(S_{uv}) \quad (13)$$

여기서 (u,v) 는 u 에서 출발하여 v 로 들어가는 간선을 나타내며, $E(H)$ 는 선택된 경로 H 에 속하는 간선들을 의미한다. $P(S_{uv})$ 는 u,v 사이 경로의 생존확률을 나타낸다.

이러한 목적함수를 갖는 최대 생존확률 경로 결정 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다.

- 최대 생존확률 경로 결정 문제 : 주어진 무향그래프 $G=(V,E)$ 에서 임의의 간선 $(u,v) \in E$ 의 가중치가 생존확률 $P(S_{uv})$ 를 갖고 출발지점 s 와 도착지점 t 가 주어져 있을 때, P_S 를 최대화하는 $s-t$ -경로 H 를 찾는 문제.

3.1.3 최단경로 문제로의 전환

간선의 가중치 합을 최소로 하는 Dijkstra기법을 적용하기 위해서는 식 (13)과 같이 곱으로 표현된 목적함수를 다른 형태로 변환해야 한다.

곱을 합으로 표현하기 위하여 양변을 \log 변환하였으며, 최소화 문제로 만들기 위해 양변에 음수를 취하여 최적화 문제의 목적을 다음과 같은 형태로 변환하였다.

$$\min -\log P_S \quad (14)$$

where

$$-\log P_S = - \sum_{(u,v) \in E(H)} \log P(S_{uv}) \quad (15)$$

위와 같은 과정을 통하여 3.1.2에서 정의한 문제를 최단거리문제로 변환하여 생존 확률을 최대화 하는 최적경로를 구할 수 있다.

3.2 다중 지점에서의 최적 경로 결정

차량경로문제(Vehicle Routing Problem, VRP)는 주어진 제약조건 하에서 출발지에서 출발한 차량들이 모든 목적지를 방문하고 돌아오는데 소모되는 비용을 최소화하는 문제이다. 또한 VRP는 차량 적재량에 제약이 있는 CVRP(Capacitated Vehicle Routing Problem), 시간에 제약이 있는 VRPTW(Vehicle Routing Problem with Time Window), 복수의 거점이 존재하는 MDVRP(Multiple Depot Vehicle Routing Problem), 확률적 요소를 고려한 SVRP(Stochastic Vehicle Routing Problem) 등 제약 조건에 따라 다양하

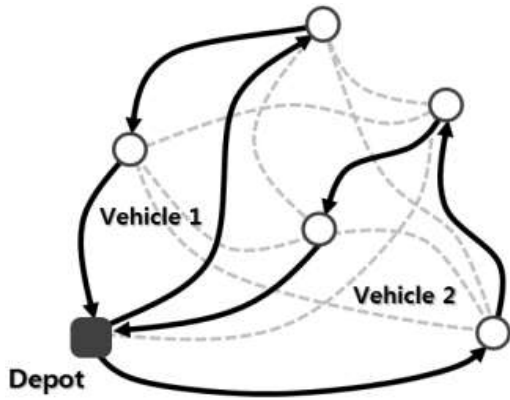


Fig. 6. Traveling location and all possible paths

게 분류되며 많은 연구가 진행되고 있다[15]. 특히 본 논문과 같이 확률적인 요소를 적용한 SVRP의 경우 크게 목적지에 고객이 존재하지 않을 확률을 고려한 Stochastic customers, 고객의 요구에 대한 불확실성을 고려한 Stochastic demands, 각 경로의 걸리는 시간에 대한 불확실성을 고려한 Stochastic times 분야가 주로 연구되어지고 있다.

일반적인 VRP에서의 비용은 주로 이동거리나 소요시간을 환산하여 계산한다. 본 논문에서는 각 경로의 무인항공기 생존확률을 비용으로 환산하여, 전체 목적지를 방문하고 돌아올 때까지의 생존확률을 최대화하는 경로를 찾고자 한다.

Figure 6은 1개의 출발지와 5개의 목적지, 2대의 Vehicle로 구성되어있는 차량경로문제이다. 각 정점사이의 간선(점선)은 3.1장에서 설명한 것과 같이 모델링한 그래프에서 Dijkstra 알고리즘을 적용하여 구해진 무인항공기의 생존확률을 최대화 하는 최적경로이다. 이때의 각 간선은 그 경로의 무인항공기 생존확률을 가중치로 갖고, 이를 바탕으로 VRP를 수행하여 전체 경로를 결정한다. 모든 목적지를 방문하고 돌아올 때까지 생존확률을 최대화 하는 것이 목적이며, 모든 목적지를 방문하되 각각의 지점은 한번씩만 방문되어야 하고, 각 무인항공기의 최대 비행시간을 제약조건으로 고려하였다.

일반적으로 VRP문제는 NP-hard 문제로서 문제의 크기가 커질수록 계산량이 지수적으로 증가하게 되며, 해를 제공하지 못하는 경우도 생긴다. 무인항공기의 임무의 경우 비행거리와 시간의 제약으로 인해 문제의 크기의 크지 않을 것이라 판단하여, 본 논문에서는 모든 경우의 수에 대해 분석하는 방법으로 최적 경로를 탐색하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 분석

4.1 Threat Map

다수의 위협이 존재하는 시나리오를 설정한 후 2장에서 정의한 확률 모델을 적용하여 최종 격추 확률지도(Threat Map)를 얻을 수 있다. Table 1은 시나리오에서 고려한 무인항공기 제원을 표로 나타낸 것이며, Fig. 7은 각각 적군의 레이더에 의해 탐지될 확률지도(왼쪽)와 레이더에 탐지되었을 때 적군의 무기 체계에 의해 격추될 확률지도(오른쪽)이다. Fig. 8은 최종 격추 확률지도이며 출발기지('○') 1곳과 8곳의 목적지('△')가 표시되어있다.

Table 1. Scenario uav specification

RCS	1 m ²
Cruising Speed	130 km/h
Cruising Altitude	1 km
Maximum Flight Time	6 hours
The Number of UAVs in Operation	2 UAVs
Failure Rate [count/hour]	1,000/100,000

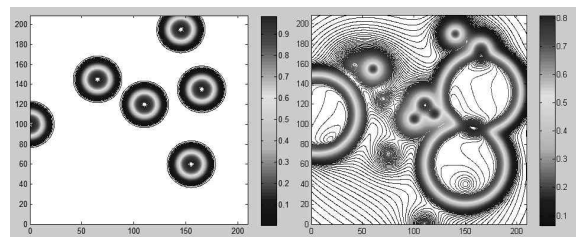


Fig. 7. $P(D)$ and $P(N|D)$ contours in the area of operations

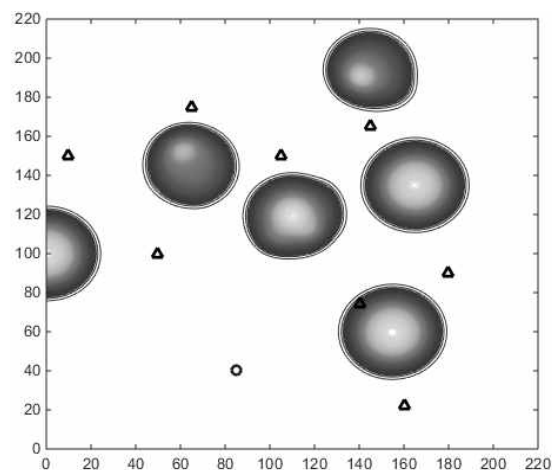


Fig. 8. Total threat map

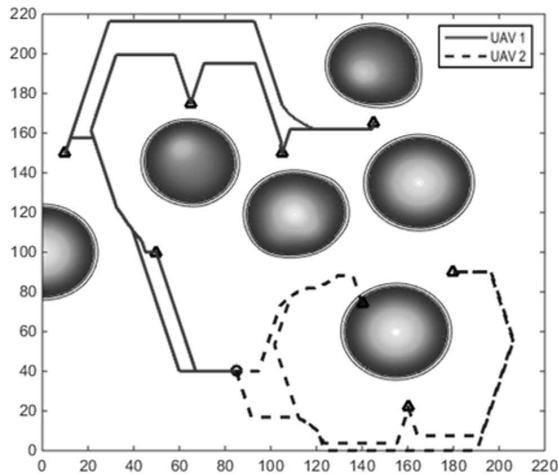


Fig. 12. Result for maximization of UAVs survivability for $P_b = 0$

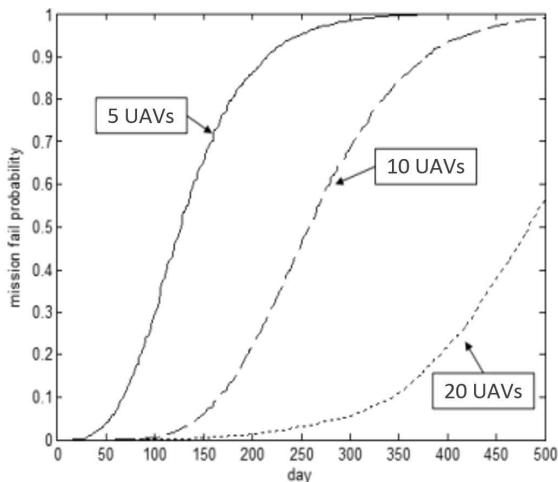


Fig. 13. Mission failure probability

12.48% 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 얻어진 경로에 대하여 고장확률을 고려하여 무인항공기의 생존 가능성을 분석해보면 76.36%로 생존확률이 더 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

4.3 임무 성공 가능성 분석

4.3장에서는 위의 과정을 통하여 얻어진 최적 경로의 UAV 추락확률을 바탕으로 복수의 목적지를 지속적으로 감시 정찰하는 임무를 수행할 때, 임무의 성공가능성을 분석하였다.

각 목적지의 불확실성은 시간에 따라 선형적으로 증가한다고 가정하였으며, 각각 일정 기준 이상이 될 때 그 지역을 방문해야 하는 임무가 발생한다고 가정하였다. 목적지를 방문하라는 임무가 발생하였지만, UAV가 모두 추락하여 더 이상 임무를 수행하지 못하게 될 경우 임무가 실패하였다고 정의하였다. 몬테카를로 시뮬레이션을

5000번 수행하여 얻어진 임무 실패확률은 다음과 같다. 똑같은 환경에서 보유하고 있는 UAV의 대수에 따라 임무 실패확률이 변하는 정도를 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 다수의 위협이 존재하는 상황에서 복수의 목적지를 방문해야하는 임무를 수행하는 무인항공기의 생존가능성을 최대화 하는 최적 경로 결정 방법을 제안하였다. 레이더의 성능, 적군 무기의 종류, 규모 등을 고려하여 다수의 위협에 대해 위험도를 평가하고 수치적 값을 얻기 위하여 각각의 확률모델을 설계 하였다. 주로 시간이나 거리의 최소화 문제로만 접근했던 기존 차량경로문제(VRP)들과 달리 각 간선에 생존확률을 가중치로 두어 그 확률을 최대화 하는 경로를 최적경로를 결정하였다. 각 정점들 사이의 최대 생존확률 경로를 다익스트라(Dijkstra)알고리즘을 이용하여 구한 후 VRP를 수행하여 전체 최적 경로를 결정하였다.

본 연구로 얻어진 결과를 통해 위험도를 최소화 하는 경로를 결정할 수 있으며, 생존확률 최대화, 총 이동거리 최소화, 임무수행시간 최소화의 각 목적함수에 따라 그 경로와 결과 값들이 어떻게 결정되는지 확인할 수 있다. 또한 지속적으로 임무를 수행할 때, 그 임무의 성공가능성을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 '이종 자율 무인기 협업체계 선행연구' 과제(계약번호 UE124026JD)의 일환으로, 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) Mylander, W. C., Wagner, D. H., "Naval Operations Analysis," Naval Institute Press, Annapolis, Maryland, 1999.
- 2) Dogan, A., "Probabilistic Approach in Path Planning for UAVs," In IEEE international symposium on intelligent control, Houston, October 2003, pp.608-613.
- 3) Yoon, S. J., Ahn, J. J., Nam, G. W., "A Study on the UAV Guidance and Control Minimizing Radar Exposure," Proceedings of

the 2004 KSAS Spring Conference, 2004, pp.318-321

4) Novy, M. C., Jacques, D. T., Pachter, M., "Air Vehicle Optimal Trajectories Between Two Radars," Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, AK, 2002.

5) Bortoff, S. A., "Path Planning for UAVs," Proceedings of the American Control Conference, 2000.

6) Kant, G., "Algorithms for Drawing Planar Graph," Ph. D. Thesis, Utrecht University, 1993.

7) Lee, H. T., Meyn, L. A., and Kim, S. "Probabilistic safety assessment of unmanned aerial system operations." Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.36, No.2, 2013, pp. 610-617.

8) Kim, K. T., Park, S. H., Cho, S. J., Jeon, G. W., "An Optimal Path Planning for Survival Rate Maximization of Submarine," Journal of the Military Operations Research Society of Korea, Vol.36, No.3, 2010, pp.135-145

9) Jun, M. S., D'Andrea, R., "Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain and Adversarial Environments," Cooperative

Control: Models, Applications and Algorithms Cooperative Systems Vol.1, 2003, pp. 95-110.

10) Woo, K. S., Park, J. H., Huh, U. Y., "Dynamic Path Planning for Mobile Robots Using Fuzzy Potential Field Method," The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.61, No.2, 2012, pp.291-297.

11) Skolnik, M. I., "Radar handbook." NewYork, McGrawHill, 1990.

12) DiFranco, J. V., Rubin, W. L., "Radar Detection," Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1968.

13) "Unmanned aircraft systems roadmap 2005 - 2030." Defense Technical Information Center, 2005.

14) Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., and Stein, C. "Introduction to algorithms." Cambridge, MIT press, 2001.

15) Moon, G. J., Park, S. M., "Analysis and Reconstruction of Vehicle Speeds to Design an Efficient Time Dependent VRP Heuristic," Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol.35, No.1, 2012, pp.140-147.