

동적인 위협이 존재하는 전장에서의 무인 항공기 지역경로계획

김기태* · 남용근** · 조성진***†

*합동군사대학교 해군대학

**한성대학교 산업경영공학과

***국방대학교 군사운영분석학과

A Local Path Planning for Unmanned Aerial Vehicle on the Battlefield of Dynamic Threats

Ki Tae Kim* · Yong Keun Nam** · Sung Jin Cho***†

*The Navy College, Joint Forces Military University

**Department of Industrial and Management Engineering, Hansung University

***Department of Military Operations Research, Korea National Defense University

An unmanned aerial vehicle (UAV) is a powered aerial vehicle that does not carry a human operator, uses aerodynamic forces to provide vehicle lift, can fly autonomously or be piloted remotely, can be expendable or recoverable, and can carry a lethal or non-lethal payload. An UAV is very important weapon system and is currently being employed in many military missions (surveillance, reconnaissance, communication relay, targeting, strike, etc.) in the war. To accomplish UAV's missions, guarantee of survivability should be preceded. The main objective of this study is a local path planning to maximize survivability for UAV on the battlefield of dynamic threats (obstacles, surface-to-air missiles, radar etc.). A local path planning is capable of producing a new path in response to environmental changes. This study suggests a *Smart A** (Smart A-star) algorithm for local path planning. The local path planned by *Smart A** algorithm is compared with the results of existing algorithms (*A* Replanner*, *D**) and evaluated performance of *Smart A** algorithm. The result of suggested algorithm gives the better solutions when compared with existing algorithms.

Keywords : Unmanned Aerial Vehicle, Local Path Planning, *Smart A**(Smart A-star), Dynamic Threat

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 활용

된 체계는 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)이다. UAV는 조종사가 탑승하지 않은 상태에서 지상의 원격 조종 또는 사전에 입력된 프로그램에 따라 비행하거나 비행체 스스로 주위 환경을 인식하고 판단하여 자율적으로 비행하는 비행체를 말한다[15]. 1990년대 이후에 발생한 실전에서 UAV는 다양한 임무에 활용되었으며, 인명피해를 최소화하면서 전쟁 목적 달성에 기여할

수 있는 중요한 무기체계라 할 수 있다. 이러한 UAV를 이용하여 적의 정보를 획득하거나 공격 임무를 달성하기 위해서는 생존성 보장이 선행되어야 하며, 본 연구에서는 UAV 생존성을 UAV가 주어진 임무를 수행함에 있어 장애물에 충돌하지 않고, 적의 대공무기에 격추되지 않을 확률로 정의하였다.

경로계획은 전역경로계획(Global Path Planning, GPP)과 지역경로계획(Local Path Planning, LPP)으로 나눌 수 있다. 전역경로계획은 출발지점에서 목표지점까지의 사전에 인지된 위협 환경을 고려하여 경로를 계획하는 것이며[6], 임무를 수행해야 하는 UAV가 이륙하기 전에 지상에서 정보자산을 통해 식별된 장애물이나 적의 위협을 고려하여 생존성 극대화 경로를 계획하는 것이다. 지역경로계획은 UAV가 보유한 탐지 센서를 통해 획득한 정보를 이용하여 좁은 범위의 영역에서 이동경로를 계획하는 것이며, 전역경로를 따라 UAV가 비행하던 중 탐지 센서를 통해 획득한 동적인 위협(새로운 장애물이나 적 대공무기)을 회피하기 위한 경로를 실시간으로 재계획하는 것이다.

본 연구에서는 UAV의 생존성을 극대화하는 지역경로를 계획하고자 한다. 기지에서 출발한 UAV가 사전에 계획된 전역경로를 따라 목표지점으로 이동 중 탐지 센서로 획득한 새로운 장애물과 적의 대공위협을 회피하기 위하여 비행경로를 재계획하는 문제이다. 6면체(Hexahedron) 형태의 격자형 셀(Cell)로 구성된 격자지도(Grid Map)를 기반으로 하는 3차원(3-dimensions) 환경을 구축하였고, 지역경로계획을 위한 *Smart A** 알고리즘을 제안하였으며, UAV의 생존성을 극대화하기 위한 지역경로를 계획하였다.

2. 기존 연구 고찰

전장에서 UAV가 보유한 센서를 통해 탐지된 정보가 네트워크를 통해 빠르게 교환이 가능하므로 생존성을 극대화하는 지역경로계획에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. O'Rourke et al.[11]은 금단검색법(Tabu Search, TS)을 이용하여 중요도, 제한된 작전구역, 풍속, 위협 등의 정보를 고려한 UAV의 지역경로를 계획하였으며, Jun and D'Andrea [5]는 UAV의 안전성을 극대화하기 위하여 새로운 장애물을 회피하는 경로계획에 Ford-Bellman 알고리즘을 적용하였다. Nikolos et al.[10]은 3차원 환경에서 UAV가 탑재한 센서의 정보를 이용하여 탐지거리 만큼의 경로를 산출하고, 산출된 경로의 약 2/3지점에서 센서의 정보를 업데이트 한 후 경로를 재 산출하는 절차를 반복하여 지역경로를 계획하였으며, 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm,

EA)을 적용하였다. Gao et al.[3]은 UAV의 초기 속력과 침로를 입력한 후 비행하면서 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)으로 속력과 침로를 3단계(+, 0, -)로 변경하면서 경로를 계획하였으며, Weiss et al.[17]은 변화하는 위협을 고려한 경로계획에 Dijkstra 알고리즘을 반복 수행하였다. Mitsutake and Higashino[8]는 집중 강우 지역에 관한 정보를 10분 간격으로 수신한 후 *A** 알고리즘을 이용하여 UAV 경로를 재산출하였으며, Takebayashi et al.[14]은 3대의 UAV가 임무를 수행하던 중 임의의 시점에 한 대가 격추되면 나머지 2대가 남은 임무지역을 할당받아 경로를 재산출하는 진화 연산(Evolutionary Computation, EC)을 제시하였다. Sujit and Beard[13]는 새로운 장애물 탐지 시 UAV의 속도를 고려하여 장애물의 회피가 가능한 시간 내에 새로운 경로를 탐색하는 입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization, PSO)를 제시하였다.

UAV의 지역경로계획에 관한 기존 연구는 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> UAV 지역경로계획 기존 연구

연구자	해법
O'Rourke et al.[11]	TS
Jun and D'Andrea[5]	Ford-Bellman
Nikolos et al.[10]	EA
Gao et al.[3]	GA
Weiss et al.[17]	Dijkstra
Mitsutake and Higashino[8]	<i>A*</i>
Takebayashi et al.[14]	EC
Sujit and Beard[13]	PSO
This study	<i>Smart A*</i>

UAV 지역경로계획에 관한 기존 연구는 대부분 2차원 환경을 기반으로 하고 있다. 이는 3차원 환경이 2차원 환경에 비해 표현이나 구성이 복잡하고, 계산량이 증가하기 때문이며, 일부 3차원 환경을 기반으로 하는 연구도 고도의 표현을 2단계(고, 저) 또는 3단계(+, 0, -)로 단순화하여 적용하고 있다. 현실적인 UAV 경로의 계획을 위해서는 UAV 비행 환경과 유사한 3차원 환경을 기반으로 하는 연구가 필요하다. 또한 대부분의 지역경로계획 알고리즘이 전역경로계획에 사용한 알고리즘을 반복 수행하여 변화하는 위협에 대한 경로 재계획하고 있으며, 이는 넓은 영역에서 경로를 재계획하므로 많은 연산 시간이 소요되는 단점이 있다. 실시간 획득한 정보를 바탕으로 위협을 회피하기 위해 빠르고 정확한 지역경로계획 알고리즘이 필요하다.

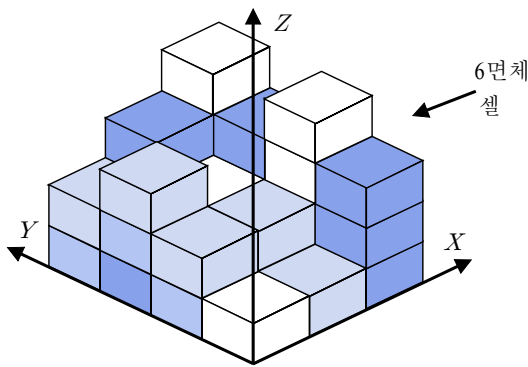
3. 문제 모형화 및 지역경로계획 알고리즘

본 장에서는 UAV 경로계획 문제를 모형화하기 위한 활동공간의 형태, UAV 이동방법, UAV 생존확률 산정 방법에 대해 살펴보고, 지역경로계획을 위한 *Smart A** 알고리즘을 제시한다.

3.1 문제 모형화

본 연구에서 활동공간은 UAV와 장애물 및 적 대공무기가 존재하고, 이들의 활동이 이루어지는 공간으로 정의하였으며, 활동공간을 표현하기 위해 김기태·전건욱 [1]과 같이 격자지도를 사용하였다. 격자지도는 활동공간을 격자로 나누고, 그 격자 안에 장애물이나 위협을 표시한 지도이며[7], 장애물이 존재하는 환경에는 일반격자지도 (General Grid Map)를 사용하고, 적 대공무기가 존재하는 환경에는 격추 확률을 갖고 있는 확률격자지도(Probability Grid Map)를 적용하였다.

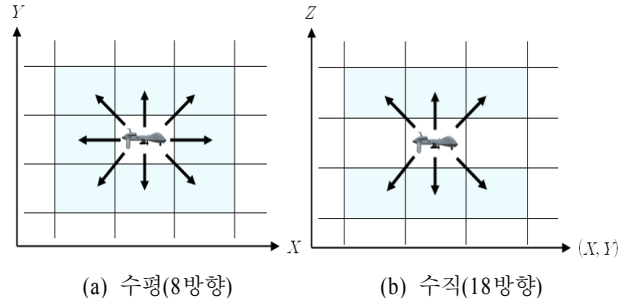
본 연구에서는 2차원 환경의 셀 중에서 4각형 셀을 3차원 환경으로 모형화한 6면체 형태의 셀을 사용하여 격자지도를 구성하였으며, 3차원 환경의 격자지도는 다음 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 3차원 환경의 격자지도

UAV 이동방법은 활동공간을 구성하는 격자지도의 셀 형태에 따라 결정된다. 본 연구에서는 6면체 형태의 셀에서 대각선으로 이동이 가능한 모형을 사용하였고, UAV 이동은 수평(Horizon) 8방향, 수직(Vertical) 18방향[위쪽(Upside) 9방향, 아래쪽(Downside) 9방향], 총 26방향으로 이동이 가능하며, 다음 <그림 2>와 같다.

UAV 생존확률은 주어진 임무를 수행함에 있어 장애물에 충돌하지 않고, 적의 대공무기에 격추되지 않을 확률이며, 본 연구에서는 김기태·전건욱[1]과 같이 장애물이 존재하는 셀에서의 생존확률은 0으로 하였으며, 적 대공무기가 존재하는 셀에서의 생존확률은 Wagner et al.[16]이



<그림 2> UAV 이동방법

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 파라미터이다. 3차원 환경에서의 적 대공무기 최대 사정거리는 중력을 포함한 외력의 영향으로 고도가 증가할수록 감소하므로 UAV와 적 대공무기의 거리 산정시 고도에 따른 사정거리 보상 가중치 β 를 적용하였으며, 다음 식 (2)와 같다.

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

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

$$d_{uw} = \sqrt{(H_{range})^2 + (V_{range})^2} = \sqrt{(x_w - x_u)^2 + (y_w - y_u)^2 + \{\beta(z_w - z_u)\}^2} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 산출한 d_{uw} 가 적 대공무기의 최대 사정거리 이내($0 \leq d_{uw} \leq \text{최대 사정거리}$)이면 d_{uw} 를 적용하여 생존확률을 산정하였으며, 최대 사정거리 밖($d_{uw} > \text{최대 사정거리}$)이면 *Big M*을 식 (1)에 적용하여 UAV의 생존확률을 1로 하였다. 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.

문제 모형화를 위한 가정사항은 다음과 같다.

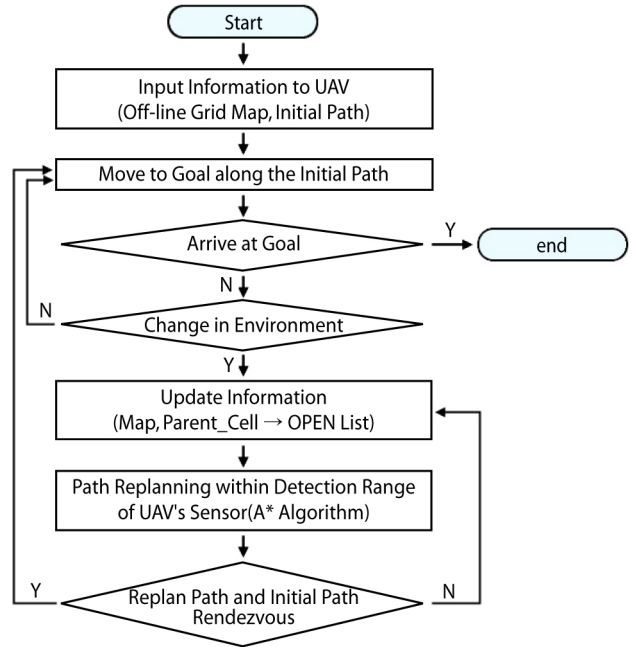
- 활동공간은 3차원 환경의 6면체 셀로 구성된 격자 지도이다.
- UAV는 활동공간 내에서만 활동하며, 인접한 수평·수직의 셀(26방향)로만 이동이 가능하다.
- UAV의 수평·수직 방향 변경은 하나의 셀 내에서 가능하다.
- UAV의 임무수행을 위한 출발 및 도착 지점은 알려져 있다.
- 식별된 장애물 위치, 적 대공무기의 위치와 성능 및 환경 영향 파라미터는 알려져 있다.
- UAV가 보유한 센서의 탐지능력은 알려져 있다.
- UAV 생존확률은 장애물에서는 0, UAV와 적 대공무기는 거리에 따른 포아송 과정이다.

3.2 지역경로계획 알고리즘(*Smart A**)

본 연구에서 UAV의 지역경로를 계획하기 위하여 *Smart A** 알고리즘을 제안하였다. *Smart A** 알고리즘은 오프라인 환경에서 전역경로계획에 사용한 *A** 알고리즘을 반복 사용하므로 표현 및 구성이 용이하다는 *A* Replanner* 알고리즘[18]의 장점과 온라인 환경에서 변화된 매우 작은 영역 안에서의 이동경로계획을 재수립함으로써 연산 시간이 짧게 소요되는 *D** 알고리즘[12]의 장점을 혼합한 알고리즘이다. *Smart A** 알고리즘의 수행절차는 다음 <그림 3>과 같다.

- Step 1 : 오프라인 환경정보를 바탕으로 구성된 활동공간의 격자지도와 이동경로를 UAV에 입력한다.
- Step 2 : UAV는 오프라인 환경에서 계획된 초기 이동경로를 따라 출발지점에서 목표지점으로 이동한다.
- Step 3 : 이동 중 UAV가 보유한 센서의 탐지거리 내에서 격자지도의 변경(새로운 장애물 또는 위협 탐지) 여부를 확인한다.
- Step 4 : 격자지도 변경시(새로운 장애물 또는 위협 탐지) 변경된 셀의 부모 셀을 *CLOSED* 목록에서 삭제하고, *OPEN* 목록에 포함한다.
- Step 5 : *A** 알고리즘을 이용하여 UAV가 보유한 센서의 탐지거리 내에서 이동경로를 재계획한다.
- Step 6 : UAV는 재계획된 이동경로를 따라 이동하며, 'Step 3~Step 5'를 반복한다.
- Step 7 : UAV의 재계획된 이동경로와 초기 이동경로가 만나면 재계획을 중지하고, 초기 이동경로를 따라 이동한다.
- Step 8 : 목표지점에 도착할 때까지 'Step 3~Step 7'

을 반복하며, 목표지점에 도착하면 알고리즘을 종료한다.



<그림 3> *Smart A** 알고리즘 수행절차

*Smart A** 알고리즘에서 새로운 장애물이나 위협을 탐지시에 회피경로를 재계획하기 위하여 사용되는 *A** 알고리즘은 Hart et al.[4]이 제시하였으며, 계산량을 줄이고 탐색 속도를 높이기 위하여 목표지점의 방향성을 나타내는 휴리스틱 함수를 이용해 더욱 유망한 교점들을 깊이 우선 탐색(Depth First Search)하는 알고리즘으로 의사코드는(Pseudo Code) 다음 <그림 4>와 같다.

```

function A* (s,t)
    CLOSED list = the empty set
    OPEN list = {s}
    g(s) = 0, f(s) = h(s) = h_calc[s, t]
    while OPEN list is not an empty set
        Cur_Cell = Select_Min f(OPEN list)
        if Cur_Cell = goal
            return Best_Path
        remove Cur_Cell from OPEN list
        add Cur_Cell to CLOSED list
        each adjacent cell C of Cur_Cell
            if CLOSED list ∩ C
                continue
            else if OPEN list ∩ C
                calculate g(C), h(C), f(C)
                relaxation (C, adjacent in OPEN list)
            else
                calculate g(C), h(C), f(C)
                Cur_Cell & add C to OPEN List
    return failure
    
```

<그림 4> *A** 알고리즘 의사코드

A^* 알고리즘에 사용되는 휴리스틱 함수는 다음 식 (5)와 같다.

$$f(i) = g(i) + h(i) \tag{5}$$

여기서, $g(i)$ 는 출발지점에서 임의의 특정 교점 i 에 이르는 최소 비용을 의미하고, $h(i)$ 는 임의의 특정 교점 i 에서 목표지점에 이르는 최소의 비용을 추정된 비용이며, $f(i)$ 는 출발지점에서 임의의 특정 교점 i 를 거쳐 목표지점에 이르는 총 경로의 최소 비용을 추정된 값이다. 본 연구에서 A^* 알고리즘의 휴리스틱 함수는 일반격자지도의 경우 특정 교점에서 목표지점까지의 대각선 거리 (Diagonal Distance)를 적용하였으며, 확률격자지도의 경우 대각선 거리에 $10^{-\log(\text{number of cell})}$ 을 곱하여 적용하였다.

4. 실험 및 결과 분석

UAV의 생존성을 극대화하는 지역경로를 계획하기 위하여 2가지 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 알고리즘의 성능을 측정하는 실험을 실시하였으며, 두 번째 실험은 새로운 위협에 따른 지역경로를 계획하였다. 실험에 활용한 알고리즘은 MATLAB을 이용하여 구축하였으며, Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU(3.16GHz, 2GB RAM) 환경의 컴퓨터에서 수행하였다.

4.1 실험 계획

본 연구에서 제안한 *Smart A** 알고리즘의 성능을 측정하기 위한 첫 번째 실험은 *A* Replanner* 알고리즘과 *D** 알고리즘을 대상으로 경로 재계획 연산시간을 측정하였다. 실험 예제는 100×100의 10,000개 셀로 이루어진 일반격자지도를 구성하였으며, UAV의 탐지거리는 10셀을 적용하였다. 예제 1은 장애물의 수가 전체 셀의 30%이고, 오프라인 정보를 이용하여 계획한 이동경로상에 UAV가 인지하지 못한 5×2의 10개 셀로 구성된 장애물 2개를 생성한 후 장애물 회피를 위한 경로 재계획 연산시간을 측정하였으며, 예제 2는 장애물 수를 1~5개까지 하나씩, 10~50개까지 10개씩 증가시키면서 장애물 수 증가에 따른 경로 재계획 연산시간을 측정하였다.

두 번째 실험은 *Smart A** 알고리즘을 이용하여 3차원 환경에서 새로운 위협에 따른 UAV 지역경로를 계획하였다. 셀 크기가 1NM×1NM×1,000ft인 6면체 셀을 이용하여 100×100×30의 300,000개 셀로 이루어진 격자지도를 구축하였으며, UAV의 탐지거리는 10NM을 적용하였다. 예제 3은 장애물이 존재하는 경우로 일반격자지도를 이용하여 구성하였으며, 활동공간 내에 장애물 수가 전

체 셀의 5%, 10%, 20%, 30%이고, 장애물의 위치를 임의로 한 4개의 문제를 생성하였다. UAV가 인지하지 못한 장애물을 5% 추가 생성한 후 지역경로를 계획하였으며, 이동거리, 새로운 장애물 탐지 횟수, 경로 재계획 횟수, 경로 재계획 연산시간을 산출하였다. 예제 4는 적 대공무기가 존재하는 경우로 확률격자지도를 이용하여 구성하였으며, 적 대공무기는 김세현·염건[2]이 제시한 예제와 동일하게 지상에 112개가 위치하는 것으로 적용하였다. 출발지점 및 목표지점의 고도는 5,000ft를 적용하였으며, UAV가 인지하지 못한 적 대공무기 12개를 추가 적용한 후 이동거리, 생존확률, 새로운 적 대공무기 탐지 횟수, 경로 재계획 횟수, 경로 재계획 연산시간을 산출하였다.

4.2 알고리즘 성능 측정

알고리즘 성능을 측정하기 위하여 예제 1에 3개의 알고리즘을 적용한 후 경로 재계획 연산시간을 측정한 실험 결과는 다음 <표 2>와 같다.

<표 2> 예제 1 실험 결과

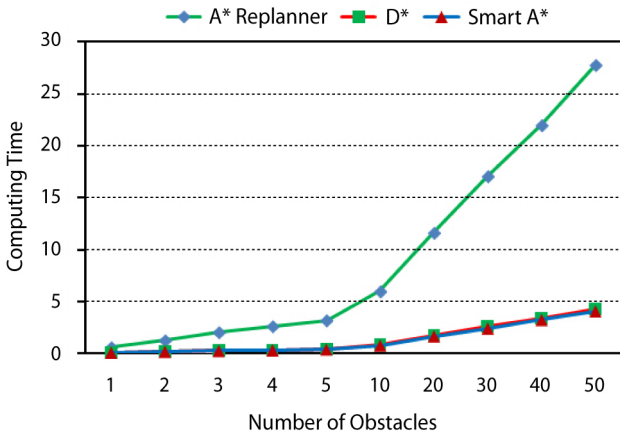
알고리즘	<i>A* Replanner</i>	<i>D*</i>	<i>Smart A*</i>
연산시간	1.23초	0.21초	0.19초

예제 1 실험 결과 경로 재계획에 소요되는 연산시간은 *Smart A** 알고리즘이 가장 최단인 0.19초로 산출되었고, *D** 알고리즘이 유사한 0.21초, *A* Replanner* 알고리즘의 연산시간이 1.23초로 가장 많이 소요되었다.

예제 2를 이용하여 장애물 수 증가에 따른 경로 재계획 연산시간을 측정한 실험 결과는 다음 <표 3> 및 <그림 5>와 같다.

<표 3> 예제 2 실험 결과

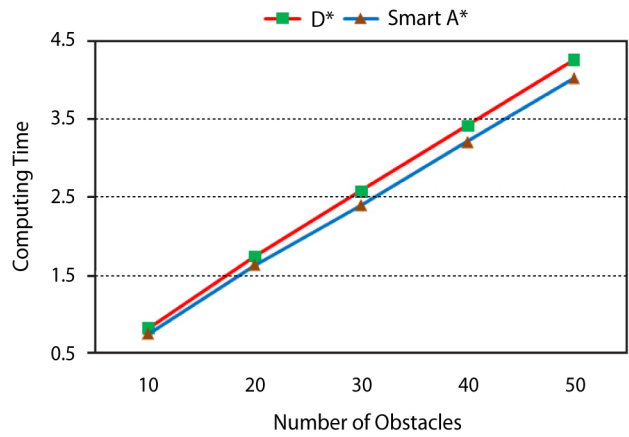
장애물 수	<i>A* Replanner</i>	<i>D*</i>	<i>Smart A*</i>
1	0.57초	0.09초	0.09초
2	1.23초	0.21초	0.19초
3	2.01초	0.28초	0.27초
4	2.58초	0.35초	0.33초
5	3.14초	0.40초	0.39초
10	5.92초	0.82초	0.75초
20	11.54초	1.74초	1.63초
30	16.96초	2.57초	2.39초
40	21.85초	3.41초	3.20초
50	27.62초	4.25초	4.02초



<그림 5> 장애물 수 증가에 따른 경로 재계획 연산시간

예제 2 실험 결과 *A* Replanner* 알고리즘의 연산시간이 장애물 1개시 0.57초, 장애물 5개시 3.14초, 장애물 50개시 27.62초로 장애물 수의 증가에 따라 연산시간이 크게 증가하였으며, *D** 알고리즘은 0.09~4.25초, *Smart A** 알고리즘은 0.09~4.02초로 연산시간이 미세하게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 장애물이 다수인 경우 *A* Replanner* 알고리즘은 *D** 및 *Smart A** 알고리즘과 비교시 연산시간의 차이가 크게 증가하는 것을 확인하였다. 다수의 장애물 증가시에 *D** 알고리즘과 *Smart A** 알고리즘의 경로 재계획 연산시간을 측정 한 실험 결과는 다음 <그림 6>과 같다.

*D** 알고리즘은 장애물 10개시 0.82초, 장애물 50개시 4.25초의 연산시간이 소요되었으며, *Smart A** 알고리즘과 연산시간 비교시 장애물 10개시 0.07초의 차이가 발생하였으나 장애물이 50개시 0.23초의 차이가 발생하는 등 장애물 증가에 따라 차이가 점차 증가하는 것을 확인하였다.



<그림 6> 다수 장애물 증가시 경로 재계획 연산시간

2개의 예제를 이용하여 알고리즘의 성능을 측정 한 실험 결과 변화된 환경의 일부분만 탐색하여 경로를 재계획하기 때문에 연산시간이 짧고, 장애물의 수가 증가함에 따라 연산시간이 미세하게 증가하는 등 *Smart A** 알고리즘의 성능이 우수한 것을 확인하였다.

4.3 UAV 지역 이동경로계획

성능이 우수한 *Smart A** 알고리즘을 이용하여 3차원 환경에서 새로운 위협에 따른 UAV의 지역경로를 계획하였다. UAV가 인지하지 못한 새로운 장애물이 추가된 예제 3을 대상으로 산출한 실험 결과는 다음 <표 4>와 같다.

예제 3 실험 결과 사전에 인지된 장애물만을 고려하여 최초 계획한 전역경로의 이동거리는 평균 138.32NM로 산출되었으며, 지역경로는 새로운 장애물 탐지에 따른 회피기동으로 인하여 이동거리가 평균 1.81NM 증가한

<표 4> 예제 3 실험 결과

인지된 장애물	전역경로		지역경로		
	이동거리	이동거리	장애물 탐지 횟수	경로 재계획 횟수	경로 재계획 연산시간
5%	135.71NM	137.15NM	17회	4회	0.25초
10%	136.93NM	138.88NM	12회	3회	0.18초
20%	139.45NM	141.52NM	14회	3회	0.20초
30%	141.20NM	142.98NM	14회	3회	0.19초
평균	138.32NM	140.13NM	14.2회	3.2회	0.20초

<표 5> 예제 4 실험 결과

전역경로		지역경로				
이동거리	생존확률	이동거리	생존확률	대공무기 탐지 횟수	경로 재계획 횟수	경로 재계획 연산시간
139.10NM	0.7816	158.71NM	0.7704	6회	3회	0.52초

140.13NM로 산출되었다. UAV가 최초 계획된 전역경로를 따라 목표지점으로 이동 중에 평균 14.2회의 장애물을 탐지하였으며, 경로에 영향을 미치는 장애물을 회피하기 위한 경로 재계획은 평균 3.2회 수행하였다. 장애물 회피를 위한 경로 재계획에 평균 0.20초의 연산시간이 소요되었으며, 경로 재계획 1회당 약 0.06초가 소요되었다.

UAV가 인지하지 못한 새로운 적 대공무기가 추가된 예제 4를 대상으로 산출한 실험 결과는 다음 <표 5>와 같다.

예제 4 실험 결과 사전에 인지된 적 대공무기만을 고려하여 최초 계획한 전역경로의 이동거리는 139.10NM, 생존확률은 0.7816으로 산출되었고, 지역경로는 새로운 적 대공무기 탐지에 따른 회피기동으로 인하여 이동거리가 19.61NM 증가한 158.71NM로 산출되었으며, 생존확률은 UAV의 회피기동에도 불구하고 추가된 적 대공무기에 의해 0.0112(1.43%) 감소한 0.7704로 산출되었다. UAV가 최초 계획된 전역경로를 따라 목표지점으로 이동 중에 6회의 적 대공무기를 탐지하였으며, 경로에 영향을 미치는 적 대공무기를 회피하기 위한 경로 재계획은 3회 수행하였다. 적 대공무기 회피를 위한 경로 재계획에 0.52초의 연산시간이 소요되었으며, 경로 재계획 1회당 약 0.17초가 소요되었다.

예제 4에서 추가된 적 대공무기를 고려하지 않고, 최초 계획한 전역경로를 따라 목표지점으로 이동한 경우와 지역경로의 생존확률을 비교하였으며, 비교 결과는 <표 6>과 같다.

<표 6> 생존확률 비교 결과

구 분	전역경로	지역경로
생존확률	0.3182	0.7704

최초 계획한 이동경로를 따라 목표지점으로 이동한 경우 UAV의 생존확률은 재계획 이동경로의 생존확률 대비 0.4522(58.70%) 감소한 0.3182로 산출되었다. 새로운 적 대공무기 탐지에 따른 회피기동으로 인하여 이동거리가 증가하지만 UAV의 생존성을 보장하기 위해서는 UAV 센서에 의해 탐지되는 적 위협을 고려한 이동경로 재계획의 중요성을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 6면체 형태의 격자형 셀로 구성된 격자 지도를 기반으로 하는 3차원 환경을 구축하였고, 지역경로 계획을 위한 *Smart A** 알고리즘을 제안하였으며, UAV의 생존성을 극대화하기 위한 지역 이동경로를 계획하였다.

*Smart A** 알고리즘을 이용한 실험 결과 변화된 환경의 일부분만 탐색하여 경로를 재계획하기 때문에 연산시간이 짧고, 장애물의 수가 증가함에 따라 연산시간이 미세하게 증가하는 등 기존의 *A* Replanner* 알고리즘 및 *D** 알고리즘에 비해 성능이 우수한 것을 확인하였다. 또한 3차원 환경에서 새로운 위협에 따른 UAV의 지역경로를 계획한 결과 새로운 적 대공무기 탐지에 따른 회피기동으로 인하여 이동거리가 증가하지만 UAV의 생존성을 보장하기 위해서는 UAV 센서에 의해 탐지되는 적 위협을 고려한 이동경로 재계획의 중요성을 확인하였다.

UAV의 실전화가 급속도로 이루어지고 있으며, 향후 유인 항공기의 대부분을 대체하게 될 것이다. 군사작전에서 성공적인 UAV의 임무수행을 보장하기 위해서는 생존성이 극대화되는 경로의 계획이 요구될 것이다. 오늘날 네트워크를 기반으로 작전임무 수행시 실시간 정보교환이 가능하므로 획득한 정보를 바탕으로 위협을 회피하기 위해 빠르고 정확한 경로계획에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 김기태, 전건욱; “*A*PS-PGA*를 이용한 무인 항공기 생존성 극대화 경로 계획”, 산업경영시스템학회지, 34(3) : 16-26, 2011.
- [2] 김세현, 염 건; “비행체의 경로최적화”, 한국OR학회지, 8(1) : 11-18, 1983.
- [3] Gao, X., Fu, X., and Chen, D.; “A Genetic-Algorithm-Based Approach to UAV Path Planning Problem,” *Proceedings of the WSEAS International Conference on Simulation, Modeling, and Optimization*, 2005.
- [4] Hart, P. E., Nilsson, N. J., and Raphael, B.; “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,” *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*, 4(2) : 100-107, 1968.
- [5] Jun, M. S. and D’Andrea, R.; “Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain and Adversarial Environments,” *Cooperative Control : Models, Applications and Algorithms*, 2002.
- [6] Khatib, O.; “Real Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots,” *International Journal of Robotics Research*, 5(10) : 90-98, 1985.
- [7] Mckerrow, P. J.; “Introduction to Robotics,” *Addison-Wesley Publishing*, 1993.
- [8] Mitsutake, K. and Higashino, S.; 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.

- [9] Nagib, G. and Gharieb, W.; "Path planning for a mobile robot using Genetic Algorithm," *Proceedings of the Robotics*, 2004.
- [10] Nikolos, I. K., Valavanis, K. P., Tsourveloudis, N. C., and Kostaras, A. N.; "Evolutionary Algorithm based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation," *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part B : Cybernetics*, 33(6) : 898-912, 2003.
- [11] O'Rourke, K. P., Bailey, T. G., Hill, R. R., and Carlton, W. B.; "Dynamic Routing of Unmanned Aerial Vehicles using Reactive Tabu Search," *Military Operations Research*, 6(1) : 5-30, 2001.
- [12] Stentz, A.; "Optimal and Efficient Path Planning for Unknown and Dynamic Environments," *Carnegie Mellon Robotics Institute Technical Report*, CMU-RI-TR-93-20, 1993.
- [13] Sujit, P. B. and Beard, R.; "Multiple UAV Path Planning using Anytime Algorithms," *Proceedings of the American Control Conference*, 2009.
- [14] Takebayashi, T., Ishii, M., and Higashino, S.; "Real-time Path Planning Method for Multiple UASs," *Proceedings of the KSAS-JSASS Joint International Symposium on Aerospace Engineering*, 2008.
- [15] The Office of the Secretary of Defence; "Unmanned Aircraft System Roadmap 2007~2032," *U. S. DoD*, 2007.
- [16] Wagner, D. H., Mylander, W. C., and Sanders, T. J.; "Naval Operations Analysis," *Naval Institute Press*, Annapolis, Maryland, 1999.
- [17] Weiss, B., Naderhirn, M., and del Re, L.; "Global Real-Time Path Planning for UAVs in Uncertain Environment," *Proceedings of Computer Aided Control System Design*, 2006.
- [18] Zelinsky, A.; "A Mobile Robot Exploration Algorithm," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(6) : 707-717, 1992.