

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.12.1124>

육각형 격자를 사용한 부드러운 경로생성

정동원*

Smooth Path Generation using Hexagonal Cell Representation

Dongwon Jung*

ABSTRACT

This paper deals with smooth path generation using B-spline for fixed-wing unmanned aerial vehicles maneuvering in 2D environment. Hexagonal cell representation is employed to model the 2D environment, which features increased connectivity among cells over square cell representation. Subsequently, hexagonal cell representation enables smoother path generation based on a discrete sequence of path from the path planner. In addition, we present an on-line path smoothing algorithm incorporating B-spline path templates. The path templates are computed off-line by taking into account all possible path sequences within finite horizon. During on-line implementation, the B-spline curves from the templates are stitched together repeatedly to come up with a reference trajectory for UAVs. This method is an effective way of generating smooth path with reduced on-line computation requirement, hence it can be implemented on a small low-cost autopilot that has limited computational resources.

초 록

본 논문에서는 2차원 공간에서 기동하는 고정익 무인항공기의 장애물 회피를 위한 부드러운 경로계획을 생성하는 문제를 다룬다. 2차원 장애물맵의 이산화 모델링을 위해 육각형 격자를 채택하였고, 이는 사각형 격자에 비해 연결성이 높아 부드러운 경로계획 생성이 가능하도록 하였다. 특히 본 논문에서 제안된 경로템플릿 기법은 일정거리 단위로 조합 가능한 대표경로들(경로템플릿)을 사용하여 무인항공기의 기준경로를 생성하는 방법이고, 온라인 경로계획 생성에서 계산량을 줄여 메모리 및 연산리소스가 제한되는 소형 오토파일럿에서도 적용이 가능하다는 장점이 있다.

Key Words : Hierarchical Path Control(계층적 경로제어), Path planning(경로계획), Path generation(경로생성), Hexagonal cell(육각형격자), Path templates(경로템플릿), B-spline

1. 서 론

무인항공기의 성공적인 임무 수행을 위해 주

위 환경을 정확하게 인지하고 상황에 맞는 유도 제어를 수행하는 것은 매우 중요하다. 특히 장애물 회피기능은 기본적으로 요구되는 기능으로써 군용 무인항공기의 보급품 배송임무 혹은 정찰임무에서 무인항공기의 운용에 위협을 가하는 적 레이더 기지 또는 지형지물을 회피하는 경로를 찾거나 혹은 민간용 무인항공기가 도심 상황을 모니터링 하기 위해서 복잡한 건물환경으로부터

† 2011년 8월 4일 접수 ~ 2011년 11월 22일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원

교신저자: djung@kari.re.kr

대전 유성구 과학로 115

무인항공기의 안전을 보장하기 위한 필수적인 기능이다.

이런 요구로 문헌에서는 다양한 방법의 장애물 회피기법을 연구해 왔다. 먼저 전역경로계획법(Global Path Planning)은 주위환경 및 장애물맵의 이산화 모델링을 바탕으로 경로해를 계산하는 기법이다[1-3]. 이 방법에서는 무인항공기를 동역학적 특성 고려없이 질점모델로 가정하여 경로를 계산하고 별도의 기구학적 제약조건을 고려한 유도법칙에 따라 무인항공기 경로유도를 수행하게 된다. 반면, 최근에는 동역학적 모델을 사용한 장애물회피 최적화 기법이 제안되었다. 대표적인 MILP(Mixed Integer Linear Programming) 기법에서는 무인항공기의 동역학적 모델변수와 장애물 회피를 위한 변수를 이산화시켜 최적화에 포함시킴으로써 결과적으로 앞서의 경로계획법보다 최적해에 가까운 경로를 계산한다[4-6]. 이 방법에서는 많은 수의 최적화 변수를 다루게 되므로 결과적으로 해를 찾기 위한 시간이 증가하게 되어 경로해의 실시간성을 보장하기는 어렵다. 따라서 실시간성이 중요한 장애물회피 경로계획법에서는 무인항공기를 질점모델로 가정한 후 이산화된 경로계획을 계산하고 이의 실행은 하위계층인 Reflexive 계층에서 담당하는 계층적 구조의 제어구조를 채택하는 것이 효과적임이 알려져 있다[7, 8].

이산화 경로계획법으로부터 무인항공기가 추종 가능한 부드러운 궤적을 생성하는 문제는 참고문헌 [9, 10]에서 다루어 졌다. 사각형 격자를 채택한 경로계획법에서 경로는 서로 인접하는 일련의 사각형 격자들의 집합으로 주어지고, 격자들로 이루어진 채널 내부에 배치된 B-spline 곡선으로 경로궤적을 생성하게 된다. B-spline 경로궤적은 경로계획법의 장애물회피 요구조건을 만족시킴과 동시에 고정익 무인항공기가 추종 가능한 부드러운 기준궤적이 된다. 4방향 연결법을 사용할 경우 이산화 경로는 사각형 격자의 계단식 배치로 주어지고 B-spline 곡선은 계단이 꺾이는 부분에서 곡률(Curvature)의 변화가 커지는 단점이 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 경로궤적이 격자의 꺾임 배치에 따라 곡률이 커지는 현상을 극복하기 위한 기법을 다루게 된다. 이를 위해 이차원 공간을 사각형 격자 대신 육각형 격자를 사용하여 분할한다. 육각형 격자는 이웃한 격자와 6방향으로 인접하기 때문에 사각형 격자의 계단식 경로보다 세분화된 이산화 경로를 만들 수 있으므로, 결과적으로 궤적생성에서 부드러운 경로궤적을 만들 수 있게 된다. 또한 참

고문헌 [10]에서 제안된 경로템플릿 기법을 육각형 격자에 적용하여 오프라인에서 미리 계산된 B-spline 경로템플릿을 사용하여 온라인 경로계획 생성이 가능함을 수치 시뮬레이션을 통해 확인한다.

본 논문은 2.1장에서 장애물 존재확률을 적용한 장애물 회피 경로계획법을 알아보고, 2.2장에서는 육각형 격자를 이용하는 경로템플릿 생성을 다룬다. 2.3장에서는 경로템플릿을 활용한 온라인 경로생성 및 수치 시뮬레이션 결과를 보인다.

II. 본 론

2.1 장애물 회피 경로계획법

본 연구에서는 일정고도를 비행하는 무인항공기가 장애물을 회피하면서 목적지에 도달하는 임무를 가진다고 가정한다. 2차원 공간에서 장애물맵은 지형지물의 고도정보에 근거한 장애물 존재 확률분포로 표현될 수 있다. 즉, 장애물맵은 위치 $x \in R^2$ 에서 장애물이 존재할 확률을 $p(x)$ 라고 하고 이 확률값의 2차원적 분포로 정의된다. 장애물 회피 경로계획법에서 장애물맵을 사용하는 것은 일반적으로 사용되는 도형기반 (다각형 혹은 타원형) 모델링 기법에 비하여 형상을 정의하기 어려운 복잡한 장애물 환경을 모델링하는데 효과적이다. 또한, 장애물 존재여부가 확률적으로 결정되기 때문에 미확인 장애물이 존재하는 환경에서 근거리 센서등을 통해 수집된 장애물 정보를 확률적 병합기법을 통해 장애물맵에 반영하고 경로계획을 수행하는 동적 경로계획법에도 응용될 수 있다. Fig. 1은 지형지물의 고도를 기준으로 확률값으로 정규화된 장애물맵을 보인다. 무인항공기의 운용고도를 기준으로 적색으로 나타난 부분(지도 우측하단)은 무인항공기의 경로를 가로막는 장애물이 존재함을 의미하고 반대로 청색으로 나타난 부분(좌측 상단)은 개방공간(Free space)을 의미한다.

일반적으로 전역 경로계획법은 장애물맵을 이산화(Discretize)하고 위상그래프 (Topological graph)를 구하는 모델링으로부터 시작된다. 모델링을 위한 방법에는 Quadtree, Visibility 그래프, Voronoi 다이어그램, 확률적 로드맵 기법등 다양한 방법이 문헌에서 보고되고 있다. 본 논문에서는 Fig. 1의 장애물맵 모델링에 적합한 격자분할 모델링 방법을 사용한다. 기본적인 격자분할 모델링 방법은 Fig. 1(a)에 보여진 사각형 격자(Square cell)를 사용하는 방법이다. 그래프 탐색

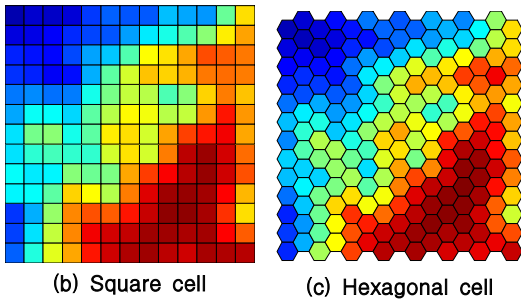


Fig. 1. Cell-based map representation

기법을 적용하기 위한 위상그래프는 각 격자들의 집합으로 노드집합을 구성하고, 인접 격자와의 연결관계로부터 위상그래프의 에지(Edge) 집합을 구하게 된다. 참고문헌 [11]에서는 단위 격자를 육각형 격자로 채택하는 방법을 제시하고 있다. 기하학적으로 육각형 격자는 삼각형 격자, 사각형 격자와 더불어 이차원 평면을 모자이크 (Tessellation) 할 수 있는 도형이므로, Fig. 1(b)에 보이듯이 장애물맵을 효과적으로 모델링 할 수 있음을 알 수 있다.

위상그래프가 계산되면 그래프 탐색기법(예: Dijkstra 또는 A* 알고리즘)을 적용하여 경로(Path)를 서로 인접하는 격자들의 순서집합(Ordered set)으로 계산하게 된다. 사각형 격자를 사용하는 경로계획에서는 격자의 꼭짓점을 통해 연결되는 8방향 연결법을 사용하기도 하지만 경로템플릿을 통한 경로계획 생성 기법에서는 격자의 변을 통해 연결되는 4방향 연결법을 사용하였다[10]. 이는 8방향 연결법의 꼭짓점을 통한 인접 격자 연결에서 채널의 폭이 정의되지 않는다는 단점을 극복하고 적절한 채널 최적화 문제를 설정하고 풀기 위함이다. 4방향 연결법을 통해 계산되는 경로는 90도 단위로 꺾이는 계단형태로 나타나게 되고, 경로계획 생성에서 꺾이는 격자에서 B-spline 곡선의 곡률(Curvature) 변화가 집중되어 생성된 B-spline 경로곡선의 완곡도가 떨어지게 된다. 반면에 경로계획에서 육각형 격자를 채택할 경우에는 하나의 격자가 인접 격자와 6방향으로 접하게 되고, 이는 경로가 꺾일 때 각도변화가 90도(사각형 격자)에서 60도(육각형 격자)로 작아짐을 의미한다. 앞서 사각형 격자와 비교하면 육각형 격자를 이용한 경로계획은 B-spline 곡선을 사용한 경로계획 생성에서 곡률변화가 경로를 따라

분산되는 효과가 있다.

본 연구에서는 이차원 장애물맵에서 출발점과 도착점을 잇는 장애물회피 최단거리 경로를 계산한다. 일반적인 최단거리 경로 탐색법은 A* 알고리즘으로서, 최소의 계산으로 효과적으로 경로해를 찾아준다. 이것은 휴리스틱(Heuristic) 함수를 사용하여 도착점 근접에 대한 평가를 계산과정에 반영하기 때문에 적은 계산 과정으로 빠르게 경로해를 도출하게 된다. A* 알고리즘을 적용하기 위해서는 경로비용에 대한 휴리스틱 함수가 임의의 세 개의 노드사이에서 삼각부등식 조건을 만족시켜야 하므로, 적절한 휴리스틱 함수의 선택이 중요하게 된다[12]. 본 연구에서 채택하고자 하는 장애물 존재확률과 관련된 경로비용은 확률 함수로서 A* 알고리즘의 휴리스틱 함수로 채택되기에는 적당하지 않다. 따라서 본 논문에서는 확률적인 경로비용을 고려한 장애물회피 최단 경로해를 위해 Dijkstra 알고리즘을 적용하도록 한다.

장애물회피 최단거리 경로계획 문제는 다음과 같이 정의된다. Fig. 1에서와 같이 장애물맵의 이산화된 격자분할 모델링 후 각 격자와 인접한 격자와의 관계에 따라 위상그래프 $G=(V,E)$ 를 구한다. 이때 하나의 격자 c_v 는 그래프상의 노드 $v \in V$ 에 대응되고, 두 개의 인접한 노드 u 와 v 는 방향성이 있는 에지 $(u,v) \in E$ 로 연결된다. 각 에지에는 이동비용이 할당되게 되고, Fig. 2에 보이는 것처럼 방향성에 따라 다른 값을 가지게 된다. 이동비용은 최단거리 경로와 장애물 회피를 고려한 값을 계산하여 할당한다. 먼저 장애물 회피를 고려한 이동비용을 계산하기 위하여, 임의의 공간의 각 위치에서 장애물이 존재하는 사건을 독립사건이라고 가정하고 $p(v)$ 를 인접노드에서 바라보는 v 의 장애물 확률이라고 정의한다. 경로계획법으로부터 계산되는 경로는 시작노드 (v_0)에서 도착노드(v_q)까지 $q+1$ 개의 인접한 노드로 구성된 $Q=\{v_0, v_1, \dots, v_q\}$ 의 순서집합이고, 각 에지간에 순서대로 할당된 확률은 $p(v_1), \dots, p(v_q)$ 로 설정한다. 이동하는 경로를 따라 누적되는 장애물 존재확률을 p_A 라 하고 각 사건의 독립성을 이용한 확률의 곱셈법칙을 적용하면 $p_A = p(v_1)p(v_2) \dots p(v_q)$ 와 같이 계산된다. 결과적으로 최적화된 장애물회피 경로는 p_A 값을 최소로 하는 경로가 선택되어야 한다. 한편 Dijkstra 알고리즘은 시작점에서 도착점까지 에지의 이동비용의 누적된 합이 최소가 되는 경로를 찾게 되므로 곱의 형태로 표현된 누적확률을 사용하기 위해서는 이동비용을 합의 형태로 바꾸어

1) 격자 중심선의 각도변화가 120도인 경우는 최적조건에 따라 발생하지 않으므로 제외한다.

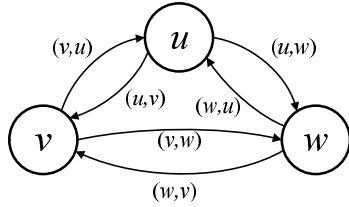


Fig. 2. Edge cost assignment among nodes

야만 한다. 이를 위하여 $\tilde{p}(v_i) = 1 - p(v_i)$ 라는 새로 정의된 확률을 사용하면 장애물회피 경로는

$$\tilde{p}_A = \tilde{p}(v_1)\tilde{p}(v_2) \cdots \tilde{p}(v_q) \quad (1)$$

의 누적 확률값이 값이 1에 근접하는 경로임을 유추할 수 있다. 식 (1)의 양변에 로그를 취하고 음의 부호를 적용하면 경로를 따라 계산된 확률비용은 다음과 같다.

$$J_p = -\log \tilde{p}_A \quad (2)$$

$$= -\log \prod_{i=1}^q \tilde{p}(v_i) = \sum_{i=1}^q -\log \tilde{p}(v_i)$$

따라서 $J_p > 0$ 이고 장애물을 회피하는 경로일 수록 0으로 작아지는 확률비용을 갖게 된다. 식 (2)를 참조하여 각 에지의 이동비용은 확률비용과 거리비용을 포함하여 다음과 같이 결정된다.

$$J(u,v) = -\log(1 - p(v)) + \alpha \|c_u - c_v\|_2 \quad (3)$$

여기서 두 번째 항은 두 격자 간의 기하학적인 거리이고, α 는 사용자 지정 가중치로써 α 값이 큰 경우 계산된 경로가 좀 더 최단거리 경로에 가깝게 계산된다. 식 (3)의 이동비용은 방향성을 가지게 되고 보통 $J(u,v) \neq J(v,u)$ 이다(Fig. 2 참조). 위상그래프에서 계산된 경로 Q 를 q 개의 연속한 인접한 노드로 정의한다면 식 (3)의 에지의 이동비용을 고려하여 경로를 따라 누적된 이동비용은 다음과 같다.

$$g(v_i) = g(v_{i-1}) + J(v_{i-1}, v_i) \quad i = 1, \dots, q \quad (4)$$

위 식에서 $g(v_k)$ 는 시작노드 v_0 에서 노드 v_k ($k < q$)까지의 경로를 따라 누적된 경로비용으로 볼 수 있고, Dijkstra 알고리즘은 식 (4)의 누적경로비용을 최소화하는 경로를 계산하게 된다.

2.2 육각형 격자를 사용한 경로템플릿

계층적구조의 경로제어법에서 경로생성문제는 이산화된 경로계획으로부터 무인항공기가 추종 가능한 부드러운 경로계획을 생성하는 방법을 의

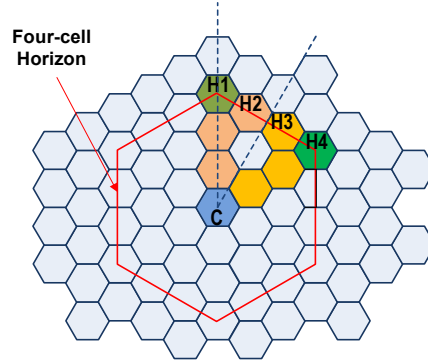


Fig. 3. Boundary cells at 4-cell distance

미한다. 본 연구에서는 경로계획을 표현하기 위해 B-spline 곡선을 채택하였다. B-spline은 적은 수의 파라미터로 복잡한 모양을 쉽게 표현할 수 있고, 길이 및 회전변환에서 곡선의 형태를 유지하고, 곡선의 부분 설계변경이 용이하고, 특히 무엇보다 B-spline 곡선은 기본적으로 부드러운 곡선이므로 경로계획적으로 사용되기에 적합하다.

2.1장의 경로계획법은 무인항공기의 위치 변동이 있을 때마다 매번 현재 위치를 시작점으로 하여 도착점에 이르는 경로를 반복적으로 계산하게 된다. 이 방법은 주변의 장애물맵의 변화가 크지 않은 경우에 동일한 형태의 경로를 반복적으로 계산하게 되므로 비효율적인 방법이다. 따라서 경로 재계산의 빈도를 줄이기 위하여 Receding Horizon 기법과 유사하게 경로계획을 일정거리마다 재계산하는 방법을 채택하도록 한다.

Fig. 3에서 무인항공기의 현재 위치는 중앙의 파란색 격자(C)이고 경로계획을 재계산하는 경계면은 4격자 거리인 경우를 가정한다. 최종 도착점은 경계면 바깥에 존재한다고 가정하면²⁾ 계산된 경로는 항상 경계면에 위치한 18개의 격자중의 하나를 통과하게 된다. 이 때 같은 격자들이 반복적으로 배치되는 경우를 제외시키면 경계면에 이르는 경로의 가짓수는 유한하게 된다[13]. 특히 회전변환 및 대칭변환을 활용하면 여러 종류의 경로로부터 유사한 형태를 갖는 경로를 모아서 경로템플릿을 구성할 수 있다. 경로템플릿을 구성하는 대표경로를 찾기 위해 Fig. 3에 보인 4격자거리의 경계면 격자들을 고려한다. 그림에서 H2와 H3 격자에 이르는 경로는 사선벡터에 대해 대칭인 관계이고, H1과 H4 격자에 이르

2) 최종 도착점이 거리범위 내에 있다면 경로템플릿을 사용하는 경로는 항상 존재하게 된다.

는 경로는 60도 회전변환 관계임을 알 수 있다. 같은 방법으로 나머지 경계면 격자들에 대해서도 대칭 및 회전변환 관계를 적용할 수 있으므로 대표경로 집합은 중앙의 시작격자에서 H1과 H2 격자에 도달하는 경로들만 고려하기로 한다.

육각형 격자를 사용한 경로계획법에서 계산된 경로를 표기하기 위하여 다음과 같은 기호를 사용한다. 시작 격자에서의 초기방위각 ψ_0 과 격자간 이동에서 방위각 방향으로 이동할 경우 F(전진; Forward)라 하고, 입사방위각을 기준으로 방위각이 증가(+60도)하는 방향에 위치한 격자로 이동할 경우 R(우측 격자로 진행; Move Right), 방위각이 감소(-60도)하는 방향에 위치한 격자로 이동할 경우 L(좌측 격자로 진행; Move Left)의 기호를 사용한다. 예를 들면, Fig. 4(a)의 경로는 각각 (0)FFR 또는 (0)FFL의 기호로 표현이 가능하다. 이와 같은 경로기호를 사용하면 경로의 대칭변환 및 회전변환을 표현하기가 수월해진다. 대칭변환은 경로기호 R과 L을 서로 치환함으로써 적용이 가능하고 회전변환은 초기방위각의 각도 증감으로 적용된다. 예로써 Fig. 4(b)는 시계 방향으로 60도 회전변환을 보이고 있고, 경로기호는 (0)FFR에서 $(\pi/3)$ FFR와 같이 회전변환이 적용됨을 알 수 있다. 이러한 경로표기법을 바탕으로 Fig. 3의 경계면의 H1 및 H2 격자에 도달하는 경로의 조합을 찾기 위해 다음의 3가지 조건을 고려한다.

- 경계면 격자조건 (Terminal)
- 비중첩 경로조건 (Self-avoiding)
- 최적 경로조건 (Optimality)

첫 번째 조건은 4격자 거리에 위치하는 경계면에 도달하는 경로는 각 기호의 개수와 연관되어 결정된다. 즉, F는 1의 증분을 가지고, R과 L은 연속적으로 발생하지 않는다면 각각 1의 증분을 가지고, 연속적으로 발생한 경우에는 합쳐서 1의 증분을 갖도록 한다. 경계면 격자조건을 만족시키는 경로는 경로기호의 증분의 합이 3이 되어야만 한다. 두 번째 조건은 경로는 같은 격자를 반복적으로 방문하지 않는다는 조건으로, 고

리모양 경로(Cyclic path)를 경로템플릿에서 제외시키는 역할을 한다. 마지막으로 최적경로 조건은 두 격자가 하나 이상의 경로로 연결이 된다면 최적 경로는 이동비용을 최소화하는 경로가 선택된다는 의미이다. 이를 알아보기 위해 세 개의 서로 인접한 격자 c_u, c_v, c_w 를 고려한다. 이 때 $c_u \rightarrow c_v \rightarrow c_w$ 의 경로와 $c_u \rightarrow c_w$ 의 경로의 이동비용을 비교하면, 식 (3)을 참조하여 다음의 부등식이 만족됨을 알 수 있다.

$$J(u,v) + J(v,w) > J(u,w) \quad (5)$$

따라서, $c_u \rightarrow c_w$ 가 최적 경로로 선택이 되어야 한다. 이러한 사항들을 고려하면 경계면 격자 H1과 H2에 이르는 경로는 Table 1에 나타난 5가지 경로로 한정되게 된다.

4격자 거리의 경계면에 도달하는 경로템플릿이 결정되면, 참고문헌 [10]에서 제안된 방법으로 각각의 경로템플릿에 해당하는 B-spline 경로곡선을 오프라인으로 미리 계산한다. 이는 경로를 이루는 격자들을 일정한 폭을 갖는 채널로 생각하고 B-spline 곡선이 채널내부에 배치되도록 구속조건을 가진 최적화를 수행하여 B-spline 경로템플릿을 구한다. Fig. 5에 계산된 B-spline 경로템플릿 대표 경로궤적을 보이고 있다. 그림에서 채널은 빨간색과 파란색 선으로 나타나지고 채널 안쪽에 검은색 실선의 B-spline 곡선이 놓여짐을 보인다. 따라서 경로궤적은 경로계획의 결과에 따라 장애물(채널 바깥쪽)을 회피하도록 생성되게 된다. 본 논문에서는 오프라인 최적화 기법을 통해 계산된 경로템플릿 곡선은 B-spline의 내재적인 특징인 최소 비틀림 에너지를 갖도록 계산되므로, 곡률에 관한 강한 구속조건(Hard constraints)을 사용하지 않아도 부드러운 곡선이 생성되게 된다. 하지만 실제 무인항공기의 어떤 비행조건에서 곡률(또는 최소 회전 반경)에 대한 구속조건이 존재하는 경우를 고려하면, 본 논문에서 얻어진 B-spline 경로템플릿은 곡선의 최대 곡률값에 대한 구체적인 정보를 갖고 있지 않으므로 최대 곡률값으로 구속된 부드러운 경로궤적 생성이

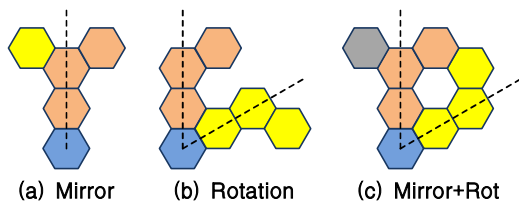


Fig. 4. Path template transform methods

Table 1. Representative path templates

No.	Init. Heading	Path words
1	0	FFF
2	$\pi/3$	FLLR
3	0	FRL
4	0	FFR
5	$\pi/3$	FLF

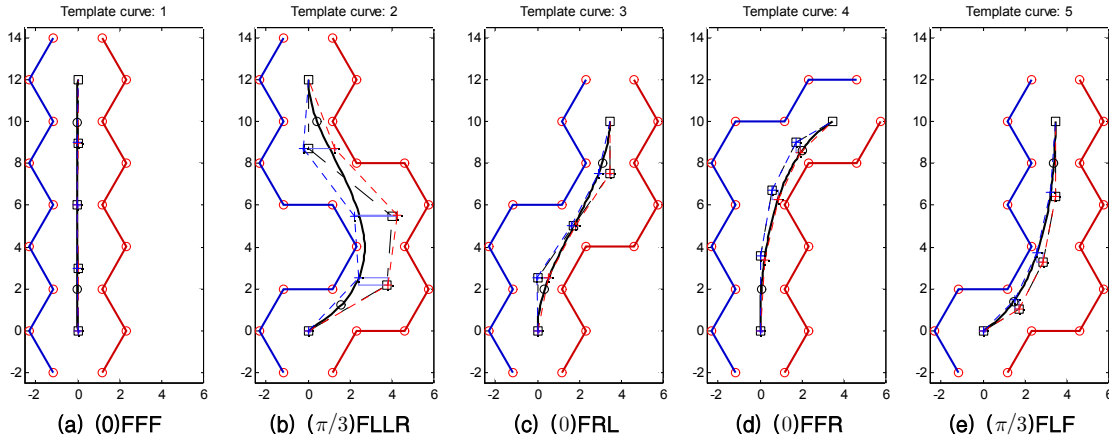


Fig. 5. Offline Optimaton results for B-spline Path Templates

어려울 수도 있다. 이를 해결하기 위해서는 오프라인 최적화 과정에서 곡선의 최대 곡률값에 대한 강한 구속조건을 포함하여 B-spline 경로곡선 템플릿을 계산하는 방안을 고려하여야 한다.

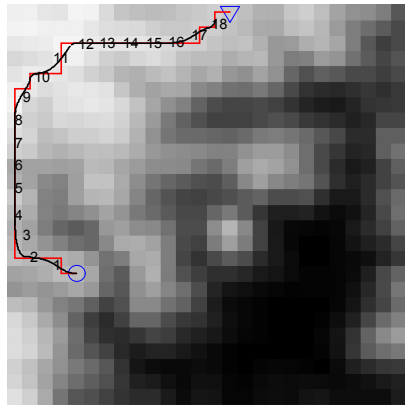
2.3 시뮬레이션을 통한 수치결과 비교

본 장에서는 육각형 격자를 사용한 경로계획법과 B-spline 경로템플릿을 사용한 경로계획 생성문제의 수치 시뮬레이션 결과를 통하여 참고문헌 [10]의 결과에 대비 본 논문에서 제안된 방법의 우수성을 보이도록 한다.

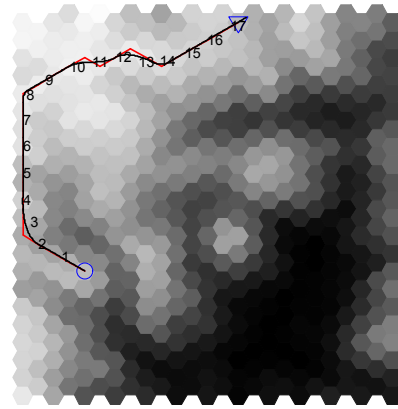
경로템플릿을 사용한 온라인 경로생성 방법은 참고문헌 [10]의 Section V에서 제안되었다. 이 방법에 의하면 먼저 현재 위치로부터 도착점까지 이산화 경로를 경로계획법으로부터 계산하고, 현재 위치에서 일정 격자거리(경계면 격자)까지의 경로에 대해 경로템플릿을 적용한다. 이 때 경로템플릿의 실제 경로로의 대칭 및 회전변환 정보를 이용하여, 해당 B-spline 경로템플릿의 Affine 변환을 수행하여 경로계획 세그먼트를 계산한다. 위의 일련의 과정은 무인항공기가 최종 도착점에 도달할 때까지 일정 격자거리마다 순차적으로 반복되므로 경계면 연결격자에서 앞뒤의 B-spline 경로곡선간의 불연속성이 존재하게 된다. 참고문헌 [10]에서는 이러한 불연속성을 제거하기 위해 연속된 앞뒤의 B-spline 경로곡선을 천이(Transient) B-spline곡선으로 연결(Stitching)하는 방법을 제안하였다. 천이 B-spline곡선은 두 개의 B-spline 곡선의 경계조건에 따라 3차 도함수까지의 연속조건을 만족시키도록 계산되어 지므로 시작 위치에서부터 최종 도착점까지의 순차적으로 이어진 전체 경로계획이 위치, 기울기 및 곡률의 연속조

건을 만족시키는 연속된 부드러운 곡선이 되게 된다.

Fig. 6에서는 동일 조건에서 사각형 격자와 육각형 격자를 사용한 경로계획과 각각의 경로템플릿을 사용하여 생성된 경로계획을 보이고 있다. 경로템플릿은 모두 4격자거리를 사용하였고 육각형 격자의 크기는 서로 마주보는 변(side)사이의 거리가 사각형격자의 한 변의 길이와 같도록 설정하였다. Fig. 7에서는 Fig. 6의 경로계획에 대한 각 세그먼트별 길이와 곡률변화를 보이고 있다. 특히 Fig. 7(b)에서 육각형 격자 경로템플릿을 이용한 경로계획 생성에서 각 세그먼트의 평균곡률(Curvature)의 변화가 작은 부드러운 경로계획이 생성된 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)의 8, 14번 세그먼트에 대해서 사각형 격자가 육각형 격자의 경우보다 낮은 곡률변화를 가짐은 다음과 같이 설명될 수 있다. 사각형 격자의 경우 8번 12번 세그먼트는 천이 B-spline곡선으로 각 세그먼트 앞뒤로 진행방향의 변화폭이 작아 해당하는 천이 B-spline 세그먼트의 곡률값이 작은 반면, 육각형 격자는 해당 세그먼트의 전후로 진행방향의 변화폭이 상대적으로 크게 되어 해당 천이 B-spline 세그먼트에 곡률변화가 부분적으로 집중되어서 나타난 결과이다. 하지만 경로계획 전체 영역에서 비교할 경우에는 육각형 격자를 사용하였을 때 경로의 꺾임에 따른 곡률변화가 여러 격자로 분산되어 전체적으로 부드러운 경로계획이 생성된 것으로 판단된다. Table 2에서는 다양한 조건에서 사각형 격자와 육각형격자의 경로템플릿을 사용하여 생성된 경로계획의 성능을 보이고 있다. 일반적으로 육각형 격자를 사용하여 생성된 경로계획의 길이가 사각형 격자를 사용하

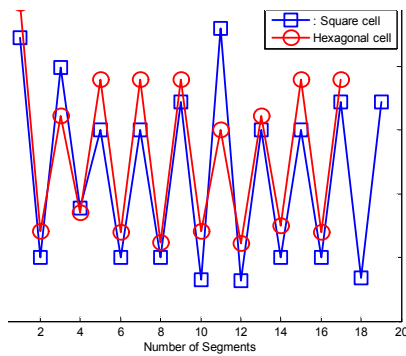


(a) Path generation using square cells

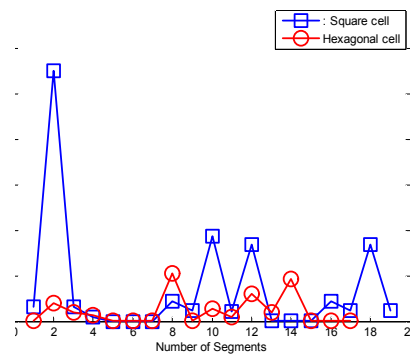


(b) Path generation using hexagonal cells

Fig. 6. Path generation comparison



(a) Segment lengths of each B-spline



(b) Segment curvature of each B-spline

Fig. 7. Path performance comparison

Table 2. Case study for various scenarios

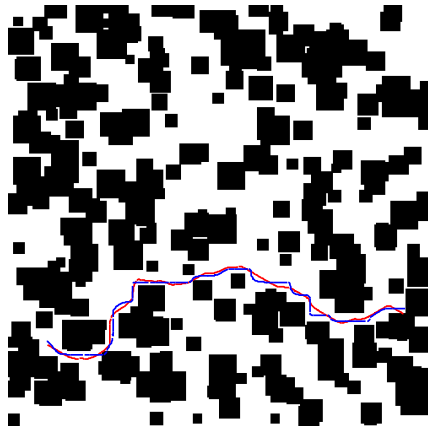
Case	Total length		Smoothness		Comp.
	SQ	HEX	SQ	HEX	
I	195.9	166.8	0.0007	0.0006	86%
II	399.1	426.6	0.0017	0.0008	47%
III	315.9	308.3	0.0017	0.0007	41%
IV	248.7	261.2	0.0014	0.0012	86%

였을 때보다 짧다고는 말할 수 없으나, 단위길이 당 곡률변화를 비교하였을 때 육각형 격자를 사용한 경우에 좀 더 부드러운 경로계획이 생성됨을 확인할 수 있다. 마지막으로 Fig. 8에서 복잡한 장애물맵에서 경로계획 및 경로생성 결과를 보이고 있다. Fig. 8(a)은 실제 장애물맵상에 놓여진 경로계획을 나타내며 빨간색으로 나타난 경로계획은 육각형 격자 경로템플릿을 사용하였을 때의 경로계획으로 Fig. 8(b)에서 확인할 수 있듯

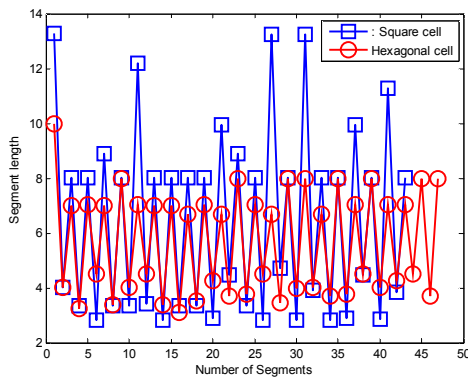
이 사각형 격자 경로템플릿을 사용하였을 때와 비교하여 육각형 격자를 사용하였을 때 부드러운 경로계획이 얻어짐을 알 수 있다.

III. 결 론

본 연구에서는 2차원 공간에서 비행하는 고정익 무인항공기가 장애물을 회피하기 위한 부드러운 경로계획을 생성하는 문제를 다루었다. 본 논문에서 제안된 방법은 계층적 구조로 구성되어 있고 상위레벨의 경로계획법과 하위레벨의 경로계획 생성기법이 유기적으로 연관되어 효과적으로 경로계획을 생성함을 보였다. 2차원 공간의 모델링을 위하여 육각형 격자를 사용하여 경로가 꺾이는 부분에서 유연한 경로계획이 얻어지게 하였고, 장애물맵을 통한 장애물 확률비용을 Dijkstra 알고리즘에 포함시켜 효과적으로 장애물 회피 경로계획을 계산하도록 하였다. 특히 본 연구에서는



(a) Path generation using hexagonal cells



(b) Segment curvature of each B-spline

Fig. 8. Path generation in a cluttered map

참고문헌 [10]에서 제안된 경로템플릿 기법을 육각형 격자에 적용하여 B-spline 경로템플릿을 사용한 온라인 경로계획을 생성하는 알고리즘을 제시하였다. 계산시간이 많이 요구되는 경로템플릿 계산은 오프라인에서 미리 계산해 놓음으로써 온라인 경로생성에서 적은 계산으로 경로계획을 빠르게 생성할 수 있음을 보였다. 따라서 본 논문에서 제시된 방법은 메모리 및 연산을 위한 리소스가 제한된 소형 무인항공기용 저사양 오토파일럿에서도 구현이 가능하다는 장점이 있다.

일반적으로 무인항공기는 임무 수행전 운용영역에 대한 정보가 미리 주어지지 않거나 임무 수행동안 주변 환경이 동적으로 변하는 상황에서 경로를 계획하고 실행하여야 한다. 이 경우 본 논문에서 제시한 방법은 무인항공기의 위치에 따른 주변 환경 정보의 변화에 의해서 계산된 경로가 일정 영역 안에 갇히게 되는 국부해(Local minimum)의 형태로 나타날 수도 있다. 이를 극

복하는 방법으로 수행된 경로계획을 모니터링 하면서 발생 가능한 국부해를 제외시키는 경로계획법에 관한 연구가 필요하게 된다.

참고문헌

- 1) Kanayama, Y. and Hartman, B. I., "Smooth Local Path Planning for Autonomous Vehicles," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, May 1989, pp.1265~1270.
- 2) Klein, R., "Concrete and Abstract Voronoi Diagrams," Lecture notes in Computer Science, Vol. 400, 1989.
- 3) Lozano-Perez, T. and Wesley, M. A., "An Algorithm for Planning Collision-Free Path Among Polyhedral Obstacles," Communications of the ACM, Vol. 22, no. 10, 1979, pp.560~570.
- 4) Richards, A. and How, J., "Aircraft Trajectory Planning with Collision Avoidance using Mixed Integer Linear Programming," American Control Conference, Jun. 2002, pp. 1936~1940.
- 5) Richards, A., How, J., Schouwenaars, T., and Feron, E., "Plume Avoidance Maneuver Planning Using Mixed Integer Linear Programming," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Aug. 2001, AIAA-2001-4091.
- 6) Schouwenaars, T., Moor, B. D., Feron, E., and How, J., "Mixed Integer Programming for Multi-Vehicle Path Planning," European Control Conference, 2001, pp.2603~2608.
- 7) Hong, K. S., Tamba, T. A., Song, J. B., "Mobile Robot Control Architecture for Reflexive Avoidance of Moving Obstacles," Advanced Robotics, Vol. 22, No. 13-14, 2008, pp.1397~1420.
- 8) Jung, D., "Hierarchical Path Planning and Control of a Small Fixed-wing UAV: Theory and Experimental Validation," Ph. D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2007.
- 9) Jung, D. and Tsiotras, P., "Multiresolution On-line Path Planning for Small Unmanned Aerial Vehicles," American Control Conference,

Seattle, WA, 2008, pp.2744~2749.

10) Jung, D. and Tsiotras, P., "On-line Path Generation for Small Unmanned Aerial Vehicles Using B-Spline Path Templates," AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Honolulu, HI, 2008, AIAA-2008-7135.

11) Sujit, P. B. and Ghose, D., "Search using Multiple UAVs with Flight Time Constraints,"

IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 40, No. 2, 2004, pp.491~509.

12) Pearl, J., Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Boston, MA, 1984.

13) Madras, N. and Slade, G. "Self-Avoiding Walk," Boston, MA: Birkhauser, 1993.