

선회와 상승을 고려한 무인항공기의 3차원 복합 비행경로 알고리즘 연구

韓國産業技術大學校 大學院

신기술융합학과(전자공학전공)

尹 瑞 英

선회와 상승을 고려한 무인항공기의 3차원 복합 비행경로 알고리즘 연구

韓國産業技術大學校 大學院

신기술융합학과(전자공학전공)

尹 瑞 英

선회와 상승을 고려한 무인항공기의 3차원 복합 비행경로 알고리즘 연구

指導教授 崔 正 勳

이 論文을 工學碩士學位 請求論文으로 提出함.

2018年 12月

韓國産業技術大學校 大學院

신기술융합학과(전자공학전공)

尹 瑞 英

尹瑞英의 工學碩士學位論文을 認准함

심사위원장 _____ 오 재 곤 _____ 인

심 사 위 원 _____ 최 정 훈 _____ 인

심 사 위 원 _____ 김 평 수 _____ 인

한국산업기술대학교 대학원

2018年 12月

선 회 와	
상 승 을	
고 려 한	
무 인 항 공 기 의	
3 차 원	
복 합	
비 행 경 로	
알 고 리 즘	
연 구	
尹	
瑞	
英	

목 차

표 목 차	i
그림목차	ii
국문요약	iv
 제 1 장 서 론	 1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 논문의 연구 목적 및 구성	3
 제 2 장 관련 연구 및 기술동향	 5
제 1 절 무인항공기 동향	5
1. 무인항공기 개요	5
2. 무인항공기 성능	9
3. 무인항공기 위협요소	11
가. SAM-Site	11
나. 자연 지형지물	12
제 2 절 무인항공기의 비행 방법	13
1. 항공 역학 용어 해설	13
2. 무인항공기의 비행 방법	14
가. 선회 비행	15
나. 상승 비행	18
다. 하강 비행	19
제 3 절 무인항공기 경로 연구 기반 기술	22
1. 3차원 지형정보 획득을 위한 DTED	22
2. 보로노이 다이어그램	23
제 4 절 기존 무인항공기 경로 선정 기법 조사	26
1. Potential Field와 A*를 이용한 3차원 경로 선정 기법	26
2. 이동구간제어 개념 기반의 지형추종 경로 선정 기법	27
3. 다수의 위협과 복수의 목적지에서 생존성 최대화 경로 선정 기법	28
4. 무인항공기 생존성 최대화 경로 선정 기법	30

5. 3차원 환경에서 운항시간을 고려한 Smoothing 경로 선정 기법	31
제 5 절 경로 선정 기법 비교분석	33
제 3 장 제안 알고리즘 설계	35
제 1 절 알고리즘 목표	35
제 2 절 알고리즘 설계를 위한 고려 사항	36
1. 제안 알고리즘의 선행 조건	36
2. 국내 지형에 적합한 알고리즘의 개발	37
3. 지형지물의 유형	38
제 3 절 제안 알고리즘	39
1. 선회 경로 알고리즘	39
가. 확장된 보로노이 다이어그램	39
나. 확장된 보로노이 다이어그램을 이용한 선회 경로 알고리즘	40
2. 상승 및 하강 경로 알고리즘	43
3. 새로운 복합 경로 알고리즘	45
4. 곡선 경로 알고리즘	47
가. Smoothing 알고리즘을 이용한 경로 선정	47
나. 부드러운 곡선을 위한 베지에 곡선	50
다. 베지에 곡선을 이용한 개선된 smoothing 알고리즘	51
제 4 장 제안 알고리즘 검증 및 성능 분석	53
제 1 절 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션	53
1. 시뮬레이션을 위한 전제 조건	53
2. 선회와 상승을 고려한 복합 경로선정 시뮬레이션	55
3. 개선된 smoothing 경로선정 시뮬레이션	57
제 2 절 기존 연구와의 비교 분석	60
1. 경로 선정 알고리즘 비교	60
2. 곡선 경로 알고리즘 비교	63
제 5 장 결론 및 향후 연구	67
참고문헌	69
ABSTRACT	71

표 목차

표 1 A급 사고율(10만 시간당) 비교[11]	7
표 2 무인항공기 사고의 원인별 비율[11]	7
표 3 연구자별 무인항공기 사고의 인적요인 비율[11]	8
표 4 국내 무인항공기의 종류	10
표 5 DTED 레벨[9]	22
표 7 경로 선정 기법 비교분석	33
표 8 선회 경로 알고리즘	42
표 9 상승 및 하강 경로 선정 알고리즘	44
표 10 비행경로 선정 프로세스 의사코드	46
표 11 RemoEye-006A 성능	54
표 12 직선경로 및 개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과 비교	59
표 13 선회 알고리즘 및 복합 알고리즘 적용 결과 비교	62
표 14 기존 smoothing 알고리즘 및 개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과 비교	65

그림 목차

그림 1 (주)무성항공의 농자재 살포용 무인헬리콥터(FAZER)	5
그림 2 전 세계 지역별 UAS 제품 시장[1]	6
그림 3 유인기의 무인기화[10]	6
그림 4 Deagel의 Global Hawk(좌)[12], Searcher Mk 3(우)[13]	9
그림 5 SA-2	11
그림 6 울릉도 나리분지[16]	12
그림 7 무인항공기에 작용하는 힘	13
그림 8 정상선회 할 때 무인항공기 모식도	15
그림 9 정상선회 할 때 무인항공기에 작용하는 힘	16
그림 10 상승 비행 할 때 무인항공기에 작용하는 힘	18
그림 11 하강 비행 할 때 무인항공기에 작용하는 힘	20
그림 12 보로노이 다이어그램	23
그림 13 Receding Horizon에 A* 3D 알고리즘 이용하여 선정된 경로[13]	26
그림 14 지형추종 경로 선정[14]	27
그림 15 다수의 위협과 복수의 목적지에서 생존성 최대화 경로 예시[15]	29
그림 16 무인항공기 생존성 최대화 경로선정 기법 비행경로 예시[8]	30
그림 17 3차원 환경에서 운항시간을 고려한 Smoothing 경로 선정[17]	31
그림 18 한반도의 산악지대 높이	37
그림 19 지형지물의 유형	38
그림 20 기존 및 확장된 보로노이 다이어그램을 이용한 경로 선정[20]	39
그림 21 선회 비행 경로 모식도	40
그림 22 상승 및 하강 비행 경로 모식도	43
그림 23 복합 경로 모식도	45
그림 24 Smoothing 알고리즘[9]	47
그림 25 Smoothing 알고리즘 결과[9]	48
그림 26 Smoothing 알고리즘 결과 주요 지점 확대	49
그림 27 2차 베지에 곡선	50
그림 28 베지에 곡선을 이용한 개선된 smoothing 알고리즘	52
그림 29 DTED를 이용한 시뮬레이션 지역	53
그림 30 RemoEye-006A	54

그림 31	출발 지점 및 도착 지점	55
그림 32	복합경로 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과	56
그림 33	운항고도 600m에서 직선경로(좌) 및 곡선경로(우)	57
그림 34	운항고도 700m에서 직선경로(좌) 및 곡선경로(우)	58
그림 35	운항고도 800m에서 직선경로(좌) 및 곡선경로(우)	58
그림 36	지형추종 방식을 이용한 경로 선정 결과	60
그림 37	2차원에서 선회와 복합 알고리즘 경로 비교	61
그림 38	3차원에서 선회와 복합 알고리즘 경로 비교	62
그림 39	운항고도 600m에서 기존 Smoothing 알고리즘 적용 결과(좌), 개선된 Smoothing 알고리즘 적용 결과(우)	63
그림 40	운항고도 700m에서 기존 Smoothing 알고리즘 적용 결과(좌), 개선된 Smoothing 알고리즘 적용 결과(우)	64
그림 41	운항고도 800m에서 기존 Smoothing 알고리즘 적용 결과(좌), 개선된 Smoothing 알고리즘 적용 결과(우)	64

국 문 요 약

전 세계적으로 무인항공기 시장은 폭발적인 증가를 보여주고 있다. 또한 최근에는 농업, 서비스업 등 다양한 분야에 이용하고 있으며 특히 군사용으로는 감시, 정찰, 공격 등 다양한 임무에 활용되고 있다. 무인항공기의 성공적인 임무 수행을 위해선 지정된 지역까지 상대에게 적발되지 않고 높이와 위력을 가지는 지형지물과 SAM-Site에 유의하면서 이동해야한다. 이에 따라 임무의 난이도가 급격하게 상승되어 사고율과 임무 실패율이 높아진다.

무인항공기의 임무 성공률을 높이기 위해 많은 연구기관에서 경로 선정과 관련한 다양한 알고리즘 및 시뮬레이션 연구결과를 제시하고 있다.

그러나 기존에 연구된 대부분의 무인항공기 경로 선정 알고리즘은 실제 무인항공기 임무에 적용하기 힘든 2차원 공간에서 경로 선정을 진행하고 있다. 또한 3차원 경로 선정 연구는 2차원 평면상에서의 경로 선정 후 수직 정보를 적용하거나 일정한 운항고도에서의 경로 선정을 이용하여 선회 또는 상승 비행 중 한 가지 비행방법만을 이용하므로 3차원 경로 선정이라고 표현하기 어렵다. 따라서 선회와 상승 비행 중 상황에 따라 효율적인 방법을 선정하는 복합 경로 선정이 필요하다. 본 논문에서는 3차원 공간에서 위협요소인 산, 협곡과 같은 지형지물과 SAM-Site의 위력을 복합적으로 고려하여 상황에 따라 무인항공기의 실제 비행 방법인 선회, 상승, 하강 비행에 맞춘 최적의 경로를 산출하는 알고리즘을 제시한다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 통하여 제안하는 알고리즘의 효용성 검증 결과를 제시한다.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

전 세계적으로 무인항공기 시장은 폭발적인 성장을 하고 있다. 미국의 국방컨설턴트 회사인 Teal Group에 의하면 2027년이 되면 130억 달러의 규모로 성장할 것으로 예상하고 있다[1].

4차 산업혁명의 바람이 불면서 많은 국가들이 무인항공기에 깊은 관심을 갖게 되었다. 무인항공기는 과거 공군의 미사일 공격 훈련으로 사용되었지만 최근에는 농업, 항공촬영, 재난 구조, 상업 서비스 등 다양한 분야에서 사용되고 있다[2]. 특히 군사용 부분에서는 유인항공기에 비해 상대적으로 저가이며 인명피해를 줄일 수 있는 장점이 있어 전 세계적으로 유인항공기의 무인화를 추진하여 약 50%의 유인항공기가 무인항공기로 대체되었다[3].

무인항공기는 유인항공기와 다르게 조종사가 현장의 비행 상황을 원격으로 판단하게 된다. 이로 인하여 운항경로에 대한 상황 파악 미숙으로 유인항공기보다 높은 사고율을 보이고 있다. 전체적으로 무인항공기 조종사의 운전 미숙에 의한 사고율이 전체 사고율의 45%이상을 차지하고 있는 것으로 판단하고 있으며, 사전 운항 경로 숙지를 위한 시뮬레이션 기술이 해법으로 제시되고 있다[4].

따라서 많은 연구기관에서 무인항공기 경로 선정에 관련된 다양한 연구가 진행되고 있으나 대부분의 연구들은 2차원 평면상에서의 경로 선정을 하고 있다. 한편 일부 3차원 공간에서 경로 선정 알고리즘 연구는 높이 정보로 기준을 만들고 2차원 평면상에서의 경로 선정을 하는 등, 2차원 평면상에서의 경로 선정과 유사한 결과를 보여 실제 무인항공기 운용을 하는 데에

적용하기에는 연구결과가 부족한 상황이다[5][6][7][8][9].

따라서 무인항공기의 경로 선정 연구가 실제 현장에 적용하기 위해서는 2차원 평면에서의 경로제시가 아닌 실제 3차원 공간에서 무인항공기가 상승, 하강, 선회하는 비행 상황을 동시에 고려하여 효율적인 경로를 선정할 수 있는 알고리즘의 제안 및 개발이 시급한 실정이다.

제 2 절 논문의 연구 목적 및 구성

그동안 무인항공기의 경로 선정과 관련하여 많은 연구가 진행되어왔다. 하지만 대부분의 연구들은 2차원 환경에서 경로 선정을 하였다. 그러나 실제 무인항공기가 운항을 하는 곳은 3차원 공간이므로 3차원 환경에서의 경로 선정이 이루어져야한다. 또한 2차원 환경에서 위협요소에 대한 단순 회피만을 적용하며 3차원 환경에서 경로 선정을 하더라도 무인항공기의 수직 및 수평 요소를 동시에 고려하지 않으면 비효율적인 비행경로가 나올 수 있게 된다.

본 논문에서는 실제 무인항공기의 운항 환경을 고려하여 3차원 공간에서의 경로를 선정한다. 무인항공기의 운항고도를 기준으로 지형지물의 높이와 SAM-Site(Surface to Air Missile Site)의 위력을 반영하여 각 상황에 따라 선회 비행, 상승 및 하강 비행 중에 적합한 비행방법을 선정하여 유연하고 효율적인 비행경로 알고리즘을 제안한다. 또한 무인항공기의 실제 운항이 가능하도록 곡선 경로를 산출 할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무인항공기 시장의 동향과 국내 군사용 무인항공기의 종류와 무인항공기 비행 위협요소를 설명한다. 그리고 항공 역학 용어 및 무인항공기의 비행방법에 대하여 설명한다. 그 다음으로 기존 무인항공기 경로 선정과 관련하여 사용된 기술인 DTED, 보로노이 다이어그램에 대하여 설명한다. 마지막으로 기존 무인항공기의 경로 선정 관련 연구들을 설명하고 비교분석하여 그 한계점을 극복하기 위한 본 논문의 지향점을 설명한다.

3장에서는 3차원 공간에서 장애물의 형태에 따라 선회 또는 상승 비행 중 최적의 비행 방법을 선정하는 복합 비행경로 알고리즘을 설계한다. 또한 실제 무인항공기의 운항에 알맞도록 기존에 연구된 smoothing 알고리즘과 베지에 곡선을 이용하여 곡선 경로 알고리즘을 제안한다.

4장에서는 제안 알고리즘의 성능 평가 및 결과 분석을 위해 MATLAB을 통한 시뮬레이터를 설계한다. 설계한 시뮬레이터에서 국내 실제 지형정보를 토대로 하는 가상의 경찰임무를 통해 효율성을 검증한다.

5장에서는 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

제 2 장 관련 연구 및 기술동향

제 1 절 무인항공기 동향

1. 무인항공기 개요

Unmanned Aerial Vehicle(이하 무인항공기)는 기존 조종사가 직접 비행기에 탑승하여 조종하던 것에서 조종사가 비행기에 탑승하지 않은 상태로 조종하는 것을 말한다. 무인항공기는 조종사가 지상에서 조종하거나 사전에 프로그램된 경로를 통해 자동으로 비행하는 방식으로 사용되고 있다. 최근 다양한 연구기관에서 무인항공기 연구를 진행하고 있다. 이에 따라서 무인항공기의 성능 및 운항 기술 등 무인항공기 기술이 발전하고 있다. 무인항공기에 농약, 택배 상품, 카메라, 구조용 튜브 등을 부착하여 농업, 운송업, 인명구조 등 다양한 분야에 이용되고 있다[9].



그림 1 (주)무성항공의 농자재 살포용 무인헬리콥터(FAZER)

무인항공기의 기술 발전과 더불어 무인항공기 관련 시장은 비약적인 성장을 하고 있다. Teal Group에 따르면 전 세계 무인항공기 관련 시장은 2016년에 약 300억 달러에서 2025년에는 약 1100억 달러로 시장 규모가 3배 이상 성장할 것으로 예상하고 있다.

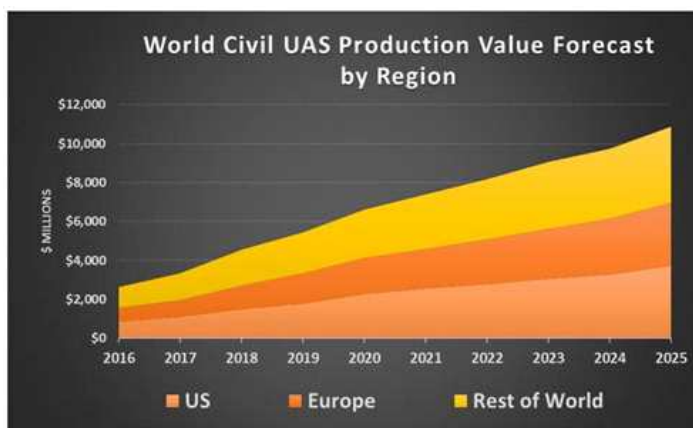


그림 2 전 세계 지역별 UAS 제품 시장[1]

우리나라 공군에서는 정찰, 공격, 수송 등 다양한 임무 수행에 사용할 비행기를 지난 10년간 유인항공기에서 무인항공기로 변경하는 작업을 추진하였다. 특히, 항공기를 이용한 임무 중 대표적인 임무인 정찰 임무에서 기존 유인기의 비율을 감소하고 무인기의 비율을 증가 시켰다.



그림 3 유인기의 무인기화[10]

하지만 빠르게 성장을 하고 있는 무인항공기의 이면에는 높은 수치의 무인항공기 사고율이 존재한다. 국토교통부의 무인항공기 안전관리제도 구축 연구 보고서에 따르면 10만 비행시간당 사고 건수를 비행기 기종별로 분류하면 표 2와 같은 결과가 나온다. 무인항공기 사고율은 유인항공기 사고율에 비해 10에서 100배 이상 높은 수치가 나온다[11].

표 1 A급 사고율(10만 시간당) 비교[11]

무인항공기		유인항공기	
기종	사고율	기종(또는 분야)	사고율
Predator	32	F-16	3
Pioneer	334	일반항공	1
Hunter	55	대형운송항공	0.01

유인항공기에 비해 높은 수치의 사고율을 보이는 무인항공기의 사고 원인은 4가지가 있다. 첫째 무인항공기의 동력 및 추진 계통의 결함, 둘째 무인항공기 조종기의 결함으로 인한 조종계통 문제, 셋째 멀리 떨어져있는 무인항공기와 조종기간의 통신 오류로 인한 통신 계통 문제, 마지막으로 조종사의 피로, 상황인식 미흡, 훈련 부족과 같은 인적요인 및 지상통제 계통 문제가 있다. 특히 이러한 사고 원인 중 사람의 실수에 의해 발생 할 수 있는 인적요인 및 지상통제 계통 부분은 전체 사고율의 20% 정도를 보인다[11].

표 2 무인항공기 사고의 원인별 비율[11]

사고 원인	무인항공기	
	국내	미군용
동력 및 추진 계통	35%	37%
조종 계통	25%	26%
통신 계통	11%	11%
인적요인 및 지상통제 계통	20%	17%
기타	9%	9%

무인항공기 사고 원인은 연구에 따라서 인적요인에 해당하는 무인항공기 사고율의 수치에 차이가 있다. 연구들에 따르면 인적요인에 의한 무인항공기 사고율은 크게 60%까지 나타난다[11]. 훈련 부족, 사전 운항환경 정보 부족으로 인한 상황인식 미흡 등의 원인으로 인한 무인항공기 사고의 인적요인 비율이 상당히 크다.

표 3 연구자별 무인항공기 사고의 인적요인 비율[11]

연구	조사대상	인적요인 비율
Schmidt & Parker, 1995	미 해군, RQ-2 Pioneer 사고 170건('86-'93)	50%이상
Seagle, 1997	미 해군, RQ-2 Pioneer 사고 203건('86-'97)	50.7%
Ferguson, 1999	미 해군, RQ-2 Pioneer 사고 228건('86-'98)	59.1%
Manning et al., 2004	미 육군, 사고 56건('95-'03)	32%
Rogers et al., 2004	미 공군(26건) 및 미 육군(22건), 사고 48건 ('93-'03)	68.8%

이러한 사고율을 낮추기 위해서는 무인항공기 조종사들의 운항환경 정보 습득 및 훈련을 위한 사전 무인항공기 경로 선정 시뮬레이션의 개발이 필요하다.

2. 무인항공기 성능

현재 우리나라를 비롯하여 미국, 이스라엘, 중국, 유럽 등 국가별로 다양한 군사용 무인항공기가 존재한다. 세계적으로 유명한 무인항공기로는 미국의 Global Hawk, 이스라엘의 Searcher Mk 3가 있다. 미국의 Global Hawk는 운용고도가 약 18,000m, 비행거리가 21,720km, 체공시간이 28시간인 고고도용 무인항공기이다[12]. 이스라엘의 Searcher Mk 3는 운용고도가 약 6,100m, 비행거리가 250km, 체공시간이 18시간인 중고도용 무인항공기이다[13]. Global Hawk와 Searcher Mk 3와 같이 무인항공기의 성능에 따라서 운용 방법이 다르다. 이와 같이 무인항공기의 성능에 따라 운용 목표와 방법이 달라지며 이에 따라서 다양한 무인항공기들이 존재한다.



그림 4 Deagel의 Global Hawk(좌)[12], Searcher Mk 3(우)[13]

우리 군에서 이용하는 군용무인항공기는 MUAV, Searcher-2, 송골매, RemoEye-006A 등이 있다. MUAV는 미국의 프레데터를 국산화하는 프로젝트의 결과로 2008년 한국산업기술대학교와 삼성탈레스가 함께 KPU-STC라는 고해상도 기술을 개발한 것으로 알려져 있으며 KPU-STC

기술을 탑재하여 중고고도용으로 2008년부터 생산 및 실전 배치되었다[14]. Searcher-2는 이스라엘의 Searcher를 도입하여 국산화한 모델로 MUAV와 동일하게 KPU-STC 기술을 이용하며 군단급 중저고도용으로 2008년부터 실전 배치되었다. 송골매는 우리 군이 보유한 최초의 국내산 무인정찰기이다. 1990년대 국방과학연구소 및 한국항공우주연구원에서 개발하여 2004년부터 사단급 저고도용 정찰기로 생산 및 실전 배치되었다[15]. RemoEye-006A는 유콘시스템社에서 개발한 무인항공기로 006A 뿐만 아니라 002B, 015 등이 있다. 다른 무인항공기들에 비해 소형이며 대대급 저고도용으로 운용되고 있다.

표 4 국내 무인항공기의 종류

용도	명칭	형상	제원/비고
중고고도	MUAV		<ul style="list-style-type: none"> ·최고속도 : 380km ·최대고도 : 15km ·운용거리 : 6,000km ·체공시간 : 24H
중저고도	Searcher-2		<ul style="list-style-type: none"> ·최고속도 : 200km ·최대고도 : 6,000m ·운용거리 : 120km ·체공시간 : 18H
저고도	송골매(RQ-101)		<ul style="list-style-type: none"> ·최고속도 : 185km ·최대고도 : 4500m ·운용거리 : 80km ·체공시간 : 6H
저고도	RemoEye-006A		<ul style="list-style-type: none"> ·최고속도 : 75km ·최대고도 : 3000m ·운용거리 : 15km ·체공시간 : 2H

3. 무인항공기 위협요소

무인항공기는 운항 중에 다양한 위협요소와 마주하게 된다. 무인항공기가 마주칠 수 있는 위협요소로는 크게 사람이 만들어낸 인공 지형지물과 자연적으로 존재하는 자연 지형지물로 나눌 수 있다. 이 중 인공 지형지물에는 SAM-Site, 건축물 등이 있으며 자연 지형지물에는 나무, 산 등이 있다. 본 논문에서는 새, 미사일 등과 같은 동적 위협요소는 배제하였으며 정적 위협요소만을 다룬다.

가. SAM-Site

SAM-Site(Surface-to-Air Missile Site)는 지대공 미사일을 장치해둔 지역을 일컬으며 지대공 미사일은 드론, 미사일 등을 탐지하여 요격하는 대공 시스템이다. 다양한 국가에서 외부의 침입으로부터 국가 및 지역을 보호하기 위해 SAM시스템의 수입 또는 연구 개발을 진행하고 있다.



그림 5 SA-2

나. 자연 지형지물

자연 지형지물의 경우 대표적으로 산악지형이 있다. 산악지형에는 산맥, 절벽, 골짜기, 분지 등이 있다. 산맥은 여러 산들이 이어져 있는 지형으로 지구에서 가장 높은 산인 에베레스트가 속한 산맥으로 유명한 히말라야 산맥이 있으며 우리나라에는 강원도 지역부터 부산광역시까지 이어지는 태백산맥이 있다. 절벽은 경사가 매우 급한 지형으로 흩이나 암석으로 구성되어 있다. 골짜기는 계곡이라고도 부르며 산과 산 사이, 절벽과 절벽 사이 등에 만들어진 움푹 파인 지형을 말한다. 분지는 주위가 산지로 둘러싸여 주변보다 낮은 지형을 말한다. 우리나라에는 분지로 유명한 지역인 대구와 울릉도의 나리분지가 있다.



그림 6 울릉도 나리분지[16]

제 2 절 무인항공기의 비행 방법

1. 항공 역학 용어 해설

운항중인 무인항공기에는 양력, 중력, 추력, 항력의 총 4가지 힘이 작용한다. 추력은 무인항공기가 앞으로 나아갈 수 있게 해주는 힘으로 무인항공기의 진행방향과 동일한 방향으로 작용한다. 기체의 엔진 출력이 강할수록 힘이 강하게 작용하게 되며 항공기의 운항 속도에 관여한다. 항력은 무인항공기가 나가려는 힘에 반발하는 힘으로 항공분야에서는 공기저항을 의미하며 무인항공기의 진행방향과 반대 방향으로 작용한다. 양력은 무인항공기가 공중에 뜰 수 있게 해주는 힘으로 날개의 수직 위 방향으로 작용한다. 중력은 지구상에 있는 모든 물체가 받는 힘으로 지구의 중심방향으로 작용한다. 기체의 무게와 동일한 크기를 갖게 되며 기체의 기울어진 정도와 방향에 상관없이 항상 지평선을 기준으로 수직 아래 방향의 힘이 작용한다.

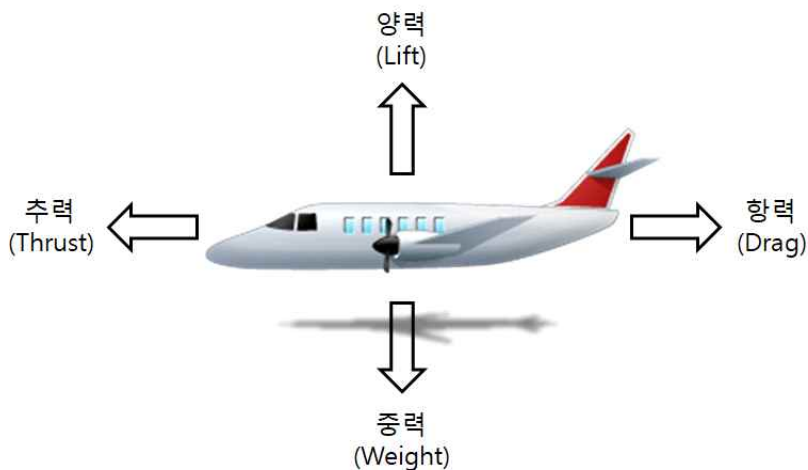


그림 7 무인항공기에 작용하는 힘

무인항공기가 지표면에 수평하게 일정한 고도를 유지하며 비행하는 것을 수평비행이라고 한다. 그림 7은 무인항공기가 수평 비행 할 때 무인항공기에 작용하는 힘을 나타내었다.

무인항공기가 속도 V 로 비행하기 위해 필요한 힘을 필요마력(Required Power)이라고 한다. 필요마력은 무인항공기가 V 의 속도로 수평비행을 할 경우 필요한 추력과 동일한 값으로 필요마력보다 큰 힘이 발생해야 앞으로 나아갈 수 있다. 무인항공기의 추진기관이 비행에 사용되어 방출하는 최대의 힘을 이용마력(Power Available)이라고 한다. 이용마력은 기체가 비행을 할 때에 동작하는 것에 따라 엔진이 낼 수 있는 힘의 값이다. 이용마력과 필요마력간의 차를 잉여마력(Excess Power) 또는 여유마력이라고 한다. 여유마력을 이용하여 항공기가 가속을 하거나 상승비행 또는 하강비행을 통해 비행고도를 변경할 수 있다.

본 논문에서는 필요마력은 기호로 P_r 로 표현하며 이용마력은 기호로 P_a , 잉여마력은 ΔP 로 표현한다. 무인항공기가 V 의 속도로 비행 할 때 $P_r = DV$, $P_a = TV$ 로 표현 할 수 있다.

2. 무인항공기의 비행 방법

무인항공기의 비행방법에는 선회 비행, 상승 비행, 하강 비행, 수평 비행 등이 있다. 무인항공기의 비행 상황에 따라서 조종사가 적절한 비행 방법을 선택하여 장애물을 회피한다. 장애물의 측면 또는 상단 방향으로 비행을 하는 선회 비행과 상승 비행을 이용하면 장애물의 회피가 가능하다.

가. 선회 비행

선회 비행은 무인항공기의 진행 방향을 지속적으로 변경하기 위한 비행 방법이다. 일정한 고도에서 선회 비행하는 것을 수평선회(Level Turn)라고 한다. 수평선회에서 옆으로 미끄러지지 않고 힘의 평형을 이루어 비행속도의 변화가 없는 상태를 정상선회(Coordinated Turn)라고 한다. 본 논문에서 표현하는 선회 비행은 정상선회를 의미한다. 정상선회는 등속 원운동을 하므로 $F=ma$ 의 가속도 법칙에 의해 작용하는 힘의 합은 0이 된다. 이때, 정상선회를 하는 무인항공기의 비행속도는 V_t 이다. 선회 비행은 무인항공기의 날개와 지평선이 수평일 때보다 θ 만큼 기울어져야하며 이때, 기울어진 각을 bank angle이라고 한다. 선회 비행을 하게 되면 R_t 의 선회 반지름으로 원의 호를 그리며 비행한다.

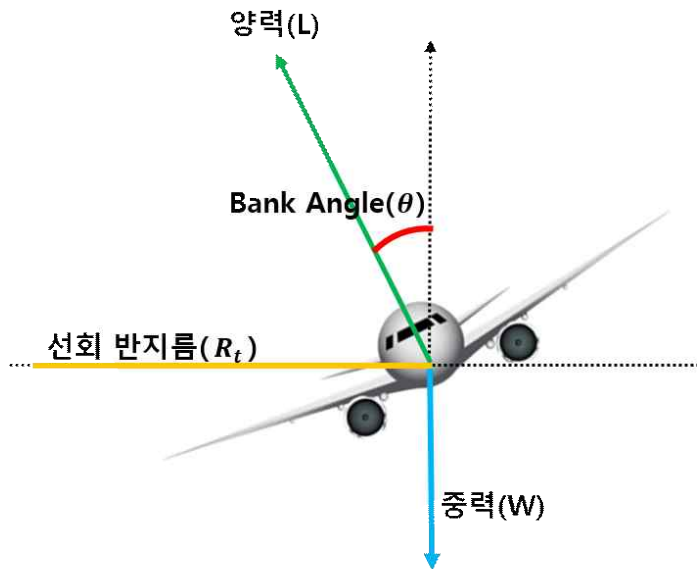


그림 8 정상선회 할 때 무인항공기 모식도

정상선회를 할 때 무인항공기에 작용하는 힘은 그림 8과 같으며 추력과 항력은 그림 7의 추력, 항력과 동일하게 작용한다.

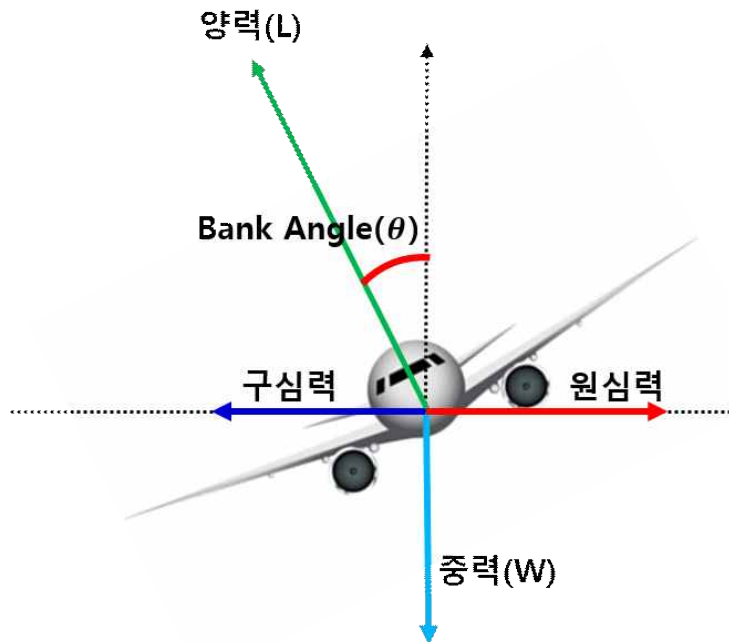


그림 9 정상선회 할 때 무인항공기에 작용하는 힘

원 운동을 하는 모든 물체는 구심력과 원심력이라는 물리 힘이 발생한다. 구심력은 원의 중심방향으로 작용하며 원심력은 구심력의 반대방향인 원의 중심에서 멀어지는 방향으로 작용한다. 그림 9에서 항공역학에 의하여 구심력은 $L\sin(\theta)$, 원심력은 WV_t^2/gR_t 으로 구할 수 있다. 정상선회에서는

작용하는 힘의 합이 0이므로 구심력과 원심력의 크기가 동일하게 되어 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L\sin(\theta) = \frac{W}{g} \cdot \frac{V_t^2}{R_t} \quad (1)$$

중력과 양력의 관계도 합력이 0인 것으로 식 (2)와 같이 도출 할 수 있다.

$$L\cos(\theta) = W \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)로 나누면 다음의 식 (3)과 같은 결과를 얻을 수 있다. 식 (3)을 이용하여 정상선회를 위한 bank angle을 구하는 것이 가능하다.

$$\tan(\theta) = \frac{V_t^2}{gR_t} \quad (3)$$

나. 상승 비행

상승 비행은 무인항공기의 고도를 높이기 위한 비행 방법이다. 상승 비행의 종류 중 일정한 속도로 상승하는 것을 등속상승비행이라고 한다. 본 논문에서 표현하는 상승 비행은 등속상승비행을 의미한다. 무인항공기가 수평 비행을 하는 상태에서 γ 만큼의 상승각이 발생하면 상승 비행을 한다. 상승 비행을 하는 무인항공기에는 그림 10과 같은 힘이 작용하게 되며 이때, 무인항공기의 속도는 V 이다.

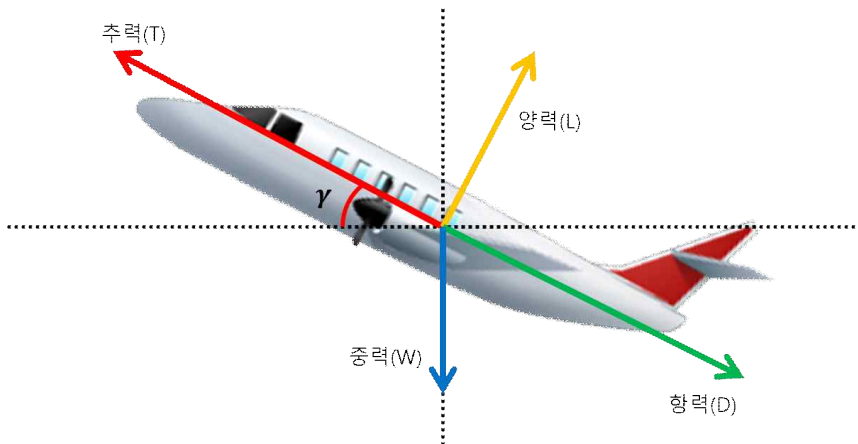


그림 10 상승 비행 할 때 무인항공기에 작용하는 힘

무인항공기가 상승 비행을 할 때 V 의 비행속도로 등속도 운동을 한다면 식 (4)와 같은 방정식이 성립된다.

$$T = D + W \sin(\gamma) \quad (4)$$

동력은 힘에 비행속도를 곱하여 구하므로 식 (4)에 무인항공기의 이동속도인 V 를 곱하면 식 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$TV = DV + WV\sin(\gamma) \quad (5)$$

이용마력, 필요마력의 정의에 의하여 식 (5)를 식 (6)으로 변경 할 수 있다.

$$P_a = P_r + \Delta P \quad (6)$$

식 (6)의 필요마력은 무인항공기가 등속도로 수평비행을 할 때의 필요마력과 동일한 값이다. 그러므로 상승 비행은 $P_a = P_r$ 인 수평 비행에서 잉여마력이 추가로 있으면 가능하다.

다. 하강 비행

하강 비행은 무인항공기의 고도를 낮추기 위한 비행 방법이다. 상승 비행의 종류 중 일정한 속도로 하강하는 것을 등속하강비행이라고 한다. 본 논문에서 표현하는 하강 비행은 등속하강비행을 의미한다. 수평 비행을 하는 상태에서 $-\gamma$ 만큼의 하강 각이 발생하면 하강 비행을 한다. 여기서 $-\gamma$ 는 상승각인 γ 와 방향이 반대이다. 하강 비행을 하는 무인항공기에는 그림 11과 같은 힘이

작용하게 되며 이때, 무인항공기의 속도는 V 이다.

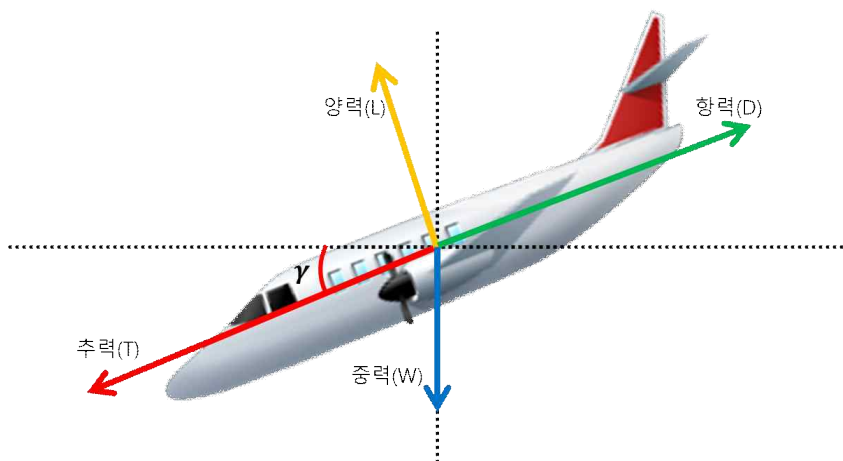


그림 11 하강 비행 할 때 무인항공기에 작용하는 힘

무인항공기가 하강 비행을 할 때 V 의 비행속도로 등속도 운동을 한다면 식 (7)과 같은 방정식이 성립된다.

$$T = D - W \sin(\gamma) \quad (7)$$

동력은 힘에 비행속도를 곱하여 구하므로 식 (7)의 무인항공기 이동속도인 V 를 곱하면 식 (8)과 같이 표현 할 수 있다.

$$TV = DV - WV \sin(\gamma) \quad (8)$$

이용마력, 필요마력의 정의에 의하여 식 (8)을 식 (9)로 변경 할 수 있다.

$$P_a = P_r - \Delta P \quad (9)$$

식 (9)의 필요마력은 무인항공기가 등속도로 수평비행을 할 때의 필요마력과 동일한 값이다. 그러므로 하강 비행은 $P_a = P_r$ 인 수평 비행에서 잉여마력이 추가로 있으면 가능하다.

제 3 절 무인항공기 경로 연구 기반 기술

1. 3차원 지형정보 획득을 위한 DTED

DTED(Digital Terrain Elevation Data)는 미국의 DMA(Defense Mapping Agency)에서 사용하는 용어로 넓은 의미로는 지형모델을 나타내며, 표고데이터 이외에도 최소·최대 표고데이터와 평균 표고 데이터를 제공한다. 수치 지형 표고데이터는 레벨에 따른 정밀도차를 가지고 있으며, 3개의 레벨로 이루어져 있다[17].

DTED는 3차원 지형정보를 디지털 데이터로 표현한 것으로 정밀도에 따라서 Level 0, Level 1, Level 2로 표현하며 각 수치는 표 5와 같다. Level 0부터 정밀도는 각각 30 arcsec, 3 arcsec, 1 arcsec로 Level 2에 가까울수록 정밀한 데이터로 본래 Level 5까지 존재한다. Level 3부터는 민간에 공개되지 않는 정보이다.

표 5 DTED 레벨[9]

구분	정밀도
DTED Level 0	30 (arcsec)
DTED Level 1	3 (arcsec)
DTED Level 2	1 (arcsec)

2. 보로노이 다이어그램

보로노이 다이어그램은 수학자 조지 보로노이(Georgy Feodosevich Voronoy)에 의해 정의된 공간 분할 방법의 한 방법으로 평면을 특정 점까지의 거리가 가까운 점들의 집합으로 분할한 그림이다. 지점들을 이은 선의 수직 이등분선으로 영역들을 분할하여 표현하기 때문에 다른 지점에 영향을 주지 않아 효율적인 공간 분할이 가능하다는 장점이 있다. 특히, 효율적인 공간 분할의 장점을 이용하여 무인항공기 경로 선정에 많이 이용된다[18][19].

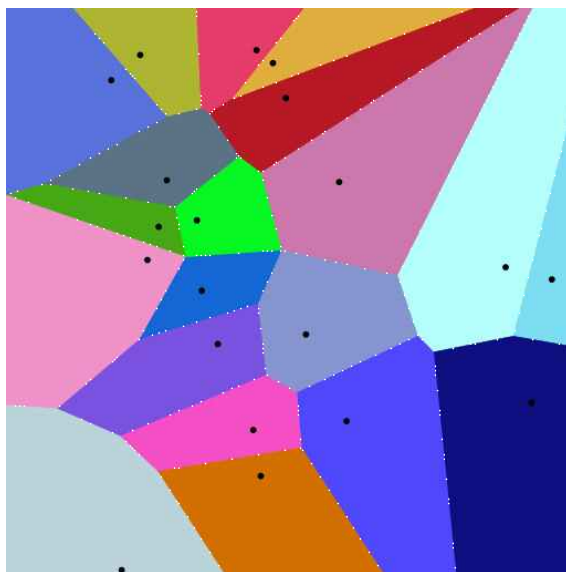


그림 12 보로노이 다이어그램

보로노이 다이어그램은 3개 이상의 점을 포함한 집합 p, q, r 등을 포함한 집합 S 가 동일한 평면 위에 있는 상태에서 σ 로 가정하였을 때 식 (10)과 같이 정의된다.

$$d(p, x) = \sqrt{(p_1 - x_1)^2 + (p_2 - x_2)^2} \quad (10)$$

이렇게 정의된 직선은 σ 로 나타내며 이렇게 정의된 직선들을 집합 σ 로 표기한다. 또한 보로노이 다이어그램을 생성하는 두 개의 p, q 점의 중심을 지나가는 수직이등분선은 식 (11)로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} For_{p,q} &\in S \\ B(p,q) &= \{x | d(p,x) = d(q,x)\} \end{aligned} \quad (11)$$

에 의해서 분리된 두 평면은 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$D(p, q) = \{x | d(p, x) < d(q, x)\} \quad (12)$$

또한 점들의 집합인 S 의 p 에 대한 보로노이 다이어그램은 식 (13)과 같이 표현된다.

$$VR(p, S) = \bigcap_{q \in S, q \neq p} D(p, q) \quad (13)$$

최종적으로 집합의 보로노이 다이어그램을 정의하면 식 (14)와 같다.

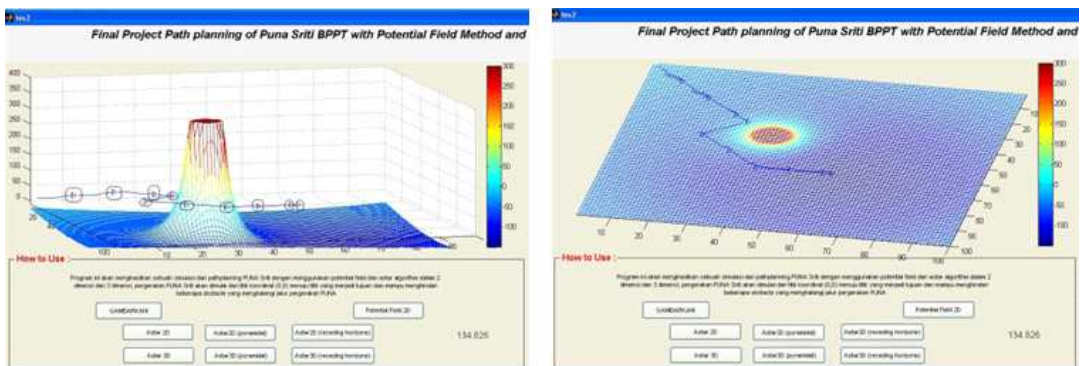
$$V(S) = \bigcup_{p, q \in S, q \neq p} \overline{VR(p, S)} \cap \overline{VR(q, S)} \quad (14)$$

보로노이 다이어그램은 고속으로 비행하는 무인항공기의 경로 산출이 가능하고 공간적 위협요소의 고려가 용이하여 단순하고 신뢰성 높은 운항경로 산출 알고리즘 구성에 적합하다[8].

제 4 절 기존 무인항공기 경로 선정 기법 조사

1. Potential Field와 A*를 이용한 3차원 경로 선정 기법

3차원 환경에서 진행된 연구로 Potential Field와 Receding Horizon에 A* 3D 알고리즘을 이용한 경로 선정 기법이다[5].



(a) 선정 경로 3D 이미지

(b) 선정 경로 위에서 본 이미지

그림 13 Receding Horizon에 A* 3D 알고리즘 이용하여 선정된 경로[5]

그림 13은 무인항공기가 운항하는 경로에 방해되는 장애물이 존재 할 경우 선회하여 회피하는 경로를 3차원으로 표현한 것이다[5].

Potential Field와 A*를 이용한 3차원 경로 선정 기법은 A* 3D알고리즘을 이용한 자율 비행경로를 선정한다. 하지만 장애물의 높이와는 상관없이 선회만을 이용하여 비행경로가 선정되어 넘어갈 수 있는 높이의 장애물이 나와도 돌아가는 경로가 되어 비효율적이다.

2. 이동구간제어 개념 기반의 지형추종 경로 선정 기법

보로노이 다이어그램을 이용한 경로 선정 이후 2차원 경로에서 DTED 정보를 통한 무인항공기의 수직 방향 경로를 선정하는 기법이다. 2차원 평면에서 보로노이 다이어그램을 이용하여 목적지까지의 최단 거리를 선정한다. 선정된 경로에서 DTED 정보를 통해 도출된 높이 정보를 이용하여 무인항공기의 예상 운항고도의 변화를 표현한다[6].

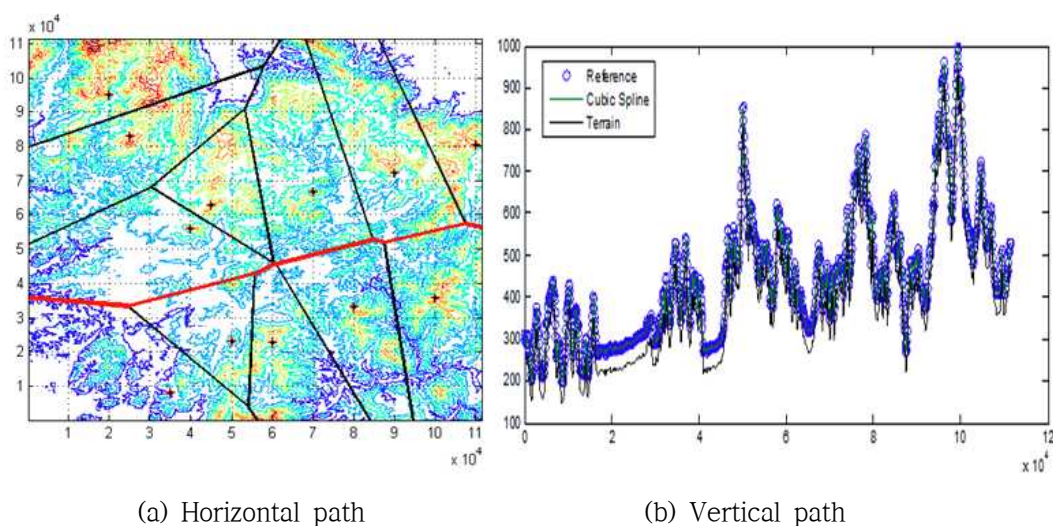


그림 14 지형추종 경로 선정[6]

그림 14의 (a)에 있는 붉은 색 실선은 보로노이 다이어그램을 이용한 2차원에서의 최단 경로이다. 그림 14의 (b)는 앞에서 구한 최단경로의 높이정보를 표현한 것이다[6].

이동구간제어 개념 기반의 지형추종 경로 선정 기법은 보로노이 다이어그램과 DTED 정보를 이용하여 지표면에 최대한 붙어가는 지형추종

경로를 선정한다. 그러나 수평성분과 수직성분을 동시에 고려하지 않고 수평성분인 2차원 평면에서의 경로 선정 이후 지형의 높이 정보를 추가하여 경로를 도출하였다. 만일 보로노이 다이어그램을 통해 선정된 경로에서 급경사가 나올 경우에 경사를 따라 올라가는 것은 비효율적이며 상황에 따라서는 무인항공기로 비행하는 것이 불가능 할 수 있다.

3. 다수의 위협과 복수의 목적지에서 생존성 최대화 경로 선정 기법

무인항공기가 운항 도중 위협요소로부터 적의 레이더에 탐지 되거나 격추 될 수 있다. 다수의 위협과 복수의 목적지에서 생존성 최대화 경로 선정 기법은 2차원 환경에서 다수의 위협지점과 복수의 목적지가 있는 임무에서 무인항공기의 생존성을 최대화하는 경로 선정 연구이다. 2대의 무인항공기로 임무를 수행하기 위해 각 경로에서 무인항공기 생존확률을 비용으로 환산한다. 환산한 생존확률에 대하여 Dijkstra 알고리즘을 적용하여 다중 지점에서의 최적 경로를 선정 한다[7].

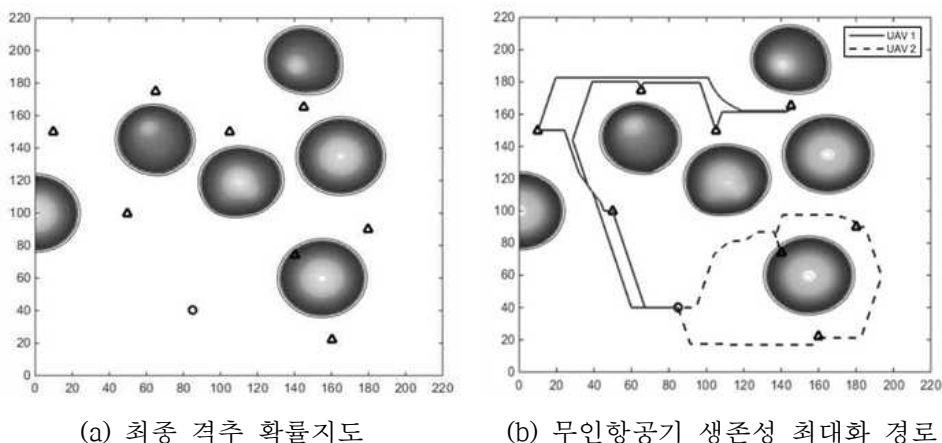


그림 15 다수의 위협과 복수의 목적지에서 생존성 최대화 경로 예시[7]

그림 15의 (a)에서 크기가 큰 원들은 다수의 위협지점에 대하여 확률 모델을 적용한 최종 격추 확률지도이다. 무인항공기가 임무를 수행해야할 목적지는 삼각형(Δ)으로 표현하고 무인항공기의 시작지점은 원(o)으로 표현한다. 그림 15의 (b)는 얻은 확률지도에서 2대의 무인항공기의 생존성을 최대로 하는 경로를 표현한 것으로 실선 경로는 1번 무인항공기 점선 경로는 2번 무인항공기의 예상 비행경로이다[7].

다수의 위협과 복수의 목적지에서 생존성 최대화 경로 선정 기법은 다수의 위협요소로부터 생존 할 확률을 비용으로 환산하여 경로 선정을 한다. 하지만 무인항공기가 실제 운항해야할 3차원 지형이 아닌 2차원 평면에서의 경로선정이 이루어지며 무인항공기의 운항 높이가 고려되지 않아 실제 환경에 적용하기 힘들다.

4. 무인항공기 생존성 최대화 경로 선정 기법

2차원 평면에서 무인기의 생존성을 최대화하기 위한 최단 경로를 선정하는 연구이다. 위협요소인 SAM-Site를 고려하여 보로노이 다이어그램과 TSP(Traveling Salesman Problem) 알고리즘을 이용한 경로 선정 알고리즘을 제안한다. 단일 임무지역을 설정하고 보로노이 다이어그램을 이용하여 시작지점과 도착지점에 대한 초기 운항경로를 선정한다. 선정된 경로의 점들을 최적화하여 SAM-Site에 대해 생존성을 최대화하는 경로를 선정한다[8].

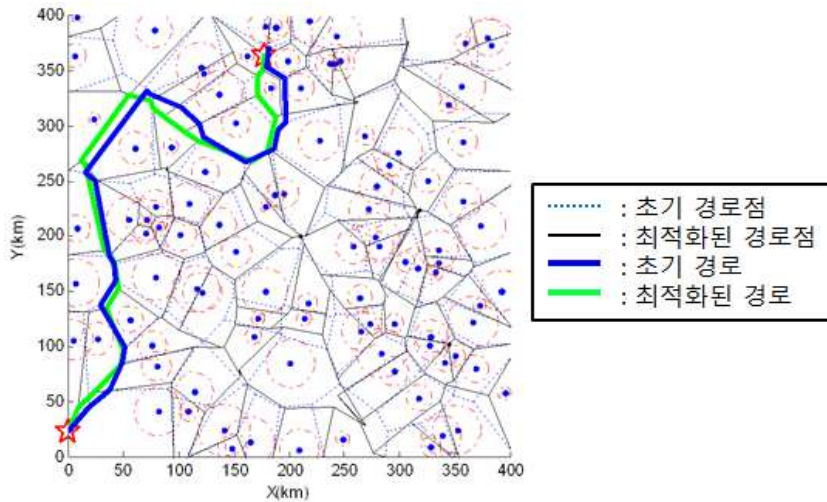


그림 16 무인항공기 생존성 최대화 경로선정 기법 비행경로 예시[8]

그림 16의 파란 점은 SAM-Site의 위치이며 붉은 점선으로 그 위력을 표현한다. 파란색 점선은 보로노이 다이어그램을 이용하여 초기 운항경로 선정을 위한 경로 점들을 도출한 것이다. 경로 점들을 이용하여 최단경로를 탐색한 결과 파란 실선이 도출된다. 이 경로에 대하여 최적화한 최종 경로가 초록색 실선이다[8].

무인항공기 생존성 경로 선정 기법은 SAM-Site의 위력을 고려한 경로 선정 기법으로 보로노이 다이어그램만을 이용한 경로 선정보다 생존율을 높일 수 있다. 그러나 무인항공기가 실제 운항해야할 3차원 지형이 아닌 2차원 평면에서의 경로선정이 이루어지며 무인항공기의 운항 높이가 고려되지 않아 실제 환경에 적용하기 어렵다.

5. 3차원 환경에서 운항시간을 고려한 Smoothing 경로 선정 기법

3차원 환경에서 다중 임무지역에 대하여 무인항공기의 운항시간을 고려한 경로 선정 연구이다. 2차원 평면지도에서 DTED를 통한 지형지물의 높이 정보를 이용하여 수직 성분을 고려한 3차원적인 경로 선정 기법이다. 설정한 무인항공기의 운항고도를 기준으로 하며 기준보다 높은 지점은 회피하는 경로를 선정한다. 기준보다 높은 지점은 보로노이에서 제외시키고 TSP 알고리즘을 이용하여 최단 경로를 도출한다[9].



(a) 전체 경로

(b) 무인항공기의 운항시간을 고려한 경로

그림 17 3차원 환경에서 운항시간을 고려한 Smoothing 경로 선정[9]

그림 17의 (a)의 검정색 실선은 지정한 임무지역에 대하여 보로노이 다이어그램을 기반으로 도출된 전체 경로이다. 붉은 색 원은 SAM-Site의 위험반경을 나타낸다. 전체 경로를 무인항공기에 정해진 운항시간을 초과하여 1대로 운항이 불가능 할 경우에 그림 17의 (b)와 같이 모든 임무지역을 정찰 가능하도록 무인항공기를 추가 배치하게 된다. 보라색 실선과 초록색 실선은

각각 무인항공기 1대가 운항하는 경로이다[9].

3차원 환경에서 운항시간을 고려한 Smoothing 경로 선정 기법은 기존 수평 정보에 의존하던 경로 선정에 운항고도라는 수직 정보를 추가하여 3차원적인 운항경로를 도출한다. 하지만 넘어갈 수 있는 높이의 낮은 장애물을 포함한 모든 장애물에 대하여 회피만을 이용하기 때문에 멀리 돌아가는 비효율적인 경로가 선정 될 수 있다. 운항고도를 지정하고 2차원 평면상에서 경로 선정을 진행하여 3차원에서의 경로 선정이라고 표현하기 힘들다.

제 5 절 경로 선정 기법 비교분석

앞에서 조사한 경로 선정 기법을 3차원 공간에서의 경로 선정, 수직 및 수평 동시 고려, 곡선 경로 선정, SAM-Site 반영 측면으로 나누어 총 4가지 항목에 대하여 비교 분석을 하였다. 비교분석 항목 중 3차원 공간에서의 경로 선정은 해당 연구가 실제 환경에 적용할 수 있을 것인가를 판별하기 위해 실제 환경과 동일한 3차원 공간에서 경로 선정을 하는 것인지를 판별한다. 수직 및 수평 성분 동시 고려는 2차원 평면에서 경로 선정과 운항고도 및 장애물의 높이 정보를 동시에 고려하여 도출된 경로인지를 판별한다. 곡선 경로 선정은 제안하는 경로가 직선적인 경로로 이루어진 경로 선정 결과가 아닌 실제 무인항공기의 운항을 고려한 곡선 경로인지를 판별한다. 마지막으로 SAM-Site 반영은 SAM-Site의 위치와 SAM-Site의 위력 범위가 경로 선정에 반영이 되었는지를 판별한다. 분석 결과는 표 7로 나타내었다.

표 7 경로 선정 기법 비교분석

구분	3차원 공간에서의 경로 선정	수직 및 수평 성분 동시에 고려	곡선 경로 선정	SAM-Site 반영
2.4.1	△	X	X	X
2.4.2	△	X	X	X
2.4.3	X	X	X	O
2.4.4	X	X	X	O
2.4.5	△	X	△	O
필요 사항	O	O	O	O

분석 결과 3차원 공간에서의 경로 선정 연구가 활발히 진행되고 있지만 현실적인 3차원 환경에서의 경로 선정이 아닌 특정 요소를 고정하여 부분적인 3차원에서의 경로 선정을 진행하였다. 특히 무인항공기의 수직 및 수평성분을 동시에 고려한 경로 선정 연구는 거의 이루어지지 못했음을 알 수 있다. 대부분의 연구에서 이론적인 경로 선정에만 치중하여 무인항공기가 실제 운항하기에 적합한 곡선 경로는 고려하지 않고 직선적인 경로를 선정하고 있는 실정이다. 또한 곡선 경로를 선정한 연구에서는 과도한 곡선 경로를 선정하는 등의 비효율적인 곡선 경로 결과가 나온다. 마지막으로 최근 연구에서는 인공적인 위협요소인 SAM-Site의 위치와 위력을 반영한 경로 선정 방식이 대두되고 있음을 알 수 있다.

앞서 언급한 기존 경로 선정 기법의 문제점을 분석한 결과로는 3차원 공간에서 무인항공기의 수직요소와 수평요소를 동시에 고려하며 실제 무인항공기 운항에 적용 가능한 곡선 경로를 선정하되 인공적인 위협요소인 SAM-Site를 고려한 경로 선정 알고리즘의 개발이 필요하다는 것으로 정리할 수 있다.

본 논문에서는 기존의 무인항공기 경로선정 관련 연구들을 통하여 문제점을 개선한 선회와 상승을 고려한 무인항공기의 3차원 복합 비행경로 알고리즘을 제안한다.

제 3 장 제안 알고리즘 설계

제 1 절 알고리즘 목표

무인항공기는 운항 중 다양한 인공 지형지물과 자연 지형지물들로 인한 위험상황에 이를 수 있다. 따라서 발생 가능한 위험상황을 사전에 파악하고 대처를 해야 무인항공기의 임무 성공률을 향상시킬 수 있다. 이를 위해서는 사전에 임무지역에 대한 지리정보를 토대로 경로선정이 이루어져야한다. 이를 위해 다양한 기관에서 연구가 진행되었지만 3차원 환경에서의 경로선정이 이루어지지 않고 부분적인 3차원 경로선정이 이루어지고 있는 경우, 수직, 수평 중 한 가지만을 이용한 경로 선정을 하는 경우, 무인항공기의 실제 운항을 고려하지 않은 곡선 경로 선정을 하는 경우 등 실제 무인항공기가 임무를 수행하기엔 미흡한 부분이 존재한다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위해 3차원 공간에서 수평 요소인 선회비행과 수직 요소인 상승 및 하강 비행을 동시에 고려한 곡선 경로 선정이 필요하다.

제 2 절 알고리즘 설계를 위한 고려 사항

1. 제안 알고리즘의 선행 조건

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 다음과 같은 선행 조건을 갖는다.

첫째, 제안하는 알고리즘에서 임무지역까지 가장 빠르게 도착하기 위해 선정하는 최단 경로의 기준은 무인항공기 속도가 동일하다는 가정 하에 이동거리가 가장 짧은 경로를 우선으로 선정한다.

둘째, 상승 비행과 하강 비행 간의 증가 및 감소되는 에너지는 동일 거리를 일정한 높이로 운항할 때 소모되는 에너지와 동일한 것으로 가정한다.

셋째, 경로는 무인항공기의 최대 상승 높이를 넘지 않는다.

넷째, 무인항공기는 기준 비행고도를 비행하는 것으로 하며 지형지물이 나타날 경우 상황에 따라 선회 혹은 상승 및 하강 비행방법을 선정한다.

마지막으로 SAM-Site의 높이는 무한대에 가까운 것으로 한다. SAM-Site 내부에 존재하는 미사일은 무인항공기의 고도를 상승시켜 회피하지 못할 정도로 높은 높이까지 탐지 및 격추가 가능하여 SAM-Site의 높이는 무한대에 가까운 것으로 가정한다.

2. 국내 지형에 적합한 알고리즘의 개발

우리나라는 국토 특성상 산간지형이 국토의 70%정도 차지하고 있어 지형이 험한 산간 지형에서의 운항이 많다. 따라서 우리 군의 무인항공기는 산간지형을 이동하기에 적합하게 개발 및 운영되어야 한다. 따라서 제안하는 알고리즘 역시 산간 지형에 적합하게 선회와 상승 비행을 통한 수평, 수직요소를 동시에 고려하여야 한다. 특히 국내의 산악지형은 대체적으로 노령기 산맥의 특성상 3000m 이상 높이의 산이 없고 고도가 낮은 저산성 산지로 이루어져있으며, 동북 지역의 지형은 더욱 험한 산악지대를 형성하고 있다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 산악지형으로 이루어져있는 한반도에 특히 유용하게 적용될 수 있도록 개발되어야 한다.

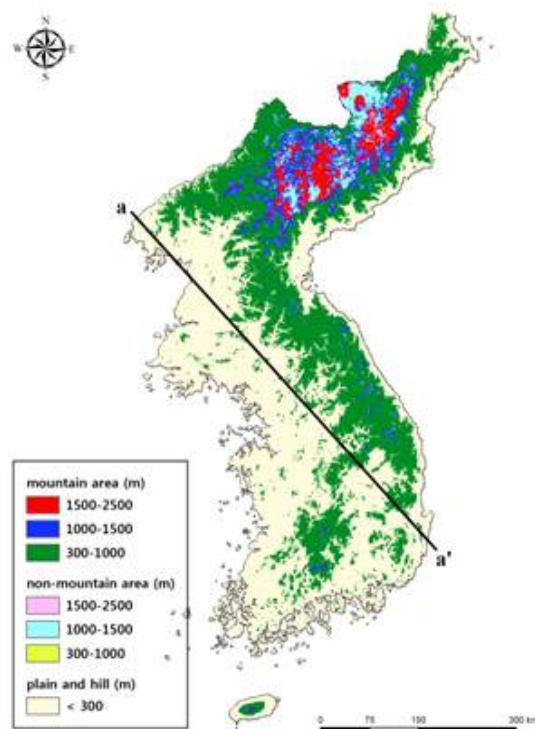


그림 18 한반도의 산악지대 높이

3. 지형지물의 유형

무인항공기 임무 수행 중 마주칠 수 있는 자연 지형지물의 유형은 크게 단일로 있는 단일 지형지물과 능선과 같이 복수의 지형지물이 이어져있는 복수 지형지물로 나눌 수 있다. 단일과 복수의 지형지물에 대하여 각각 형태에 따라서 다음과 같이 나눌 수 있다. 단일 지형지물의 경우에는 지형지물의 높이와 반경에 따라서 나눌 수 있으며 복수 지형지물의 경우에는 능선의 골짜기 위치에 따라서 나눌 수 있다.

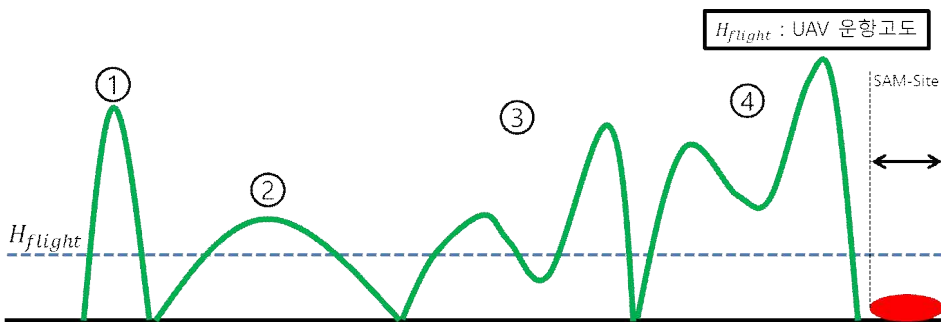


그림 19 지형지물의 유형

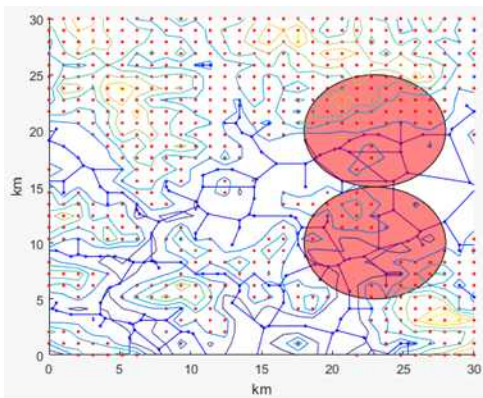
그림 19는 지형지물의 유형을 표현한 것으로 맨 왼쪽부터 붉은색 타원은 SAM-Site의 반경을 표현한 것이며 1번과 2번은 단일 지형지물, 3번과 4번은 복수 지형지물이다. 1번은 무인항공기의 운항고도를 기준으로 지형지물의 높이가 반경보다 작은 지형지물이며 2번은 무인항공기의 운항고도를 기준으로 지형지물의 높이가 반경보다 큰 지형지물이다. 3번은 골짜기의 위치가 무인항공기의 운항고도보다 낮은 경우이며 4번은 골짜기의 위치가 무인항공기의 운항고도보다 높은 경우이다. 이와 같은 지형지물의 유형에 따라 비행경로는 선회 비행 경로, 상승 및 하강 비행 경로, 복합 비행 경로로 표현 할 수 있다.

제 3 절 제 안 알고리즘

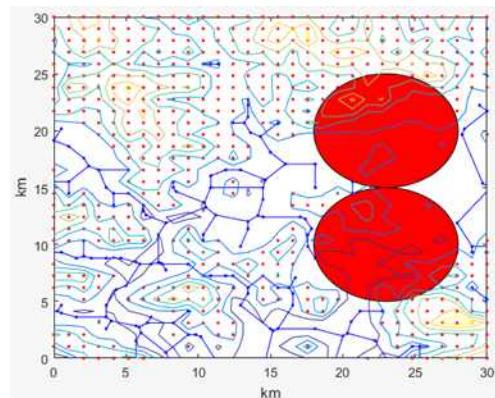
1. 선회 경로 알고리즘

가. 확장된 보로노이 다이어그램

앞서 2장 4절의 ‘무인항공기 생존성 최대화 경로 선정 기법’에서 경로 선정은 보로노이 다이어그램을 이용하였다. 보로노이 다이어그램을 이용한 경로 선정은 무인항공기의 운항고도를 기준으로 지형지물의 높이를 위험 점으로 표현하여 경로를 선정한다. 보로노이 다이어그램만을 이용한 경로 선정은 SAM-Site가 고려되지 않아 SAM-Site를 통과하는 경로가 선정될 수 있다. 이와 같은 경우에 무인항공기가 격추되므로 SAM-Site 정보를 반영하는 확장된 보로노이 다이어그램이 필요하다. 확장된 보로노이 다이어그램은 선정 경로 중 SAM-Site에 겹치는 경로는 제거하여 경로 선정한다[20].



(a) 기존 보로노이 다이어그램



(b) 확장된 보로노이 다이어그램

그림 20 기존 및 확장된 보로노이 다이어그램을 이용한 경로 선정[20]

그림 20은 각각 기존 보로노이 다이어그램과 확장된 보로노이 다이어그램을 이용한 경로 선정 결과이다. 그림 20의 (a)는 큰 붉은색 원으로 표현된 SAM-Site의 내부에 경로가 선정되어 있지만 그림 20의 (b)에는 SAM-Site 내부에 경로가 선정되지 않고 제거 된 것을 확인 할 수 있다[20].

나. 확장된 보로노이 다이어그램을 이용한 선회 경로 알고리즘

선회 비행은 지형지물 회피 방법 중 운항 고도의 변화 없이 회피하는 방법이다. 상승 및 하강 비행만을 이용한 경로 선정을 할 경우에 무리한 상승각이 발생 할 수 있다. 무리한 상승각으로 상승 비행을 진행하게 되면 무인항공기의 상승 혹은 하강시 비행이 불안정해 질 수 있다. 따라서 특정 상승각 이상의 비행이 요구될 경우에는 무리한 상승 비행을 배제하고 선회 비행을 하는 경로 선정이 필요하다.

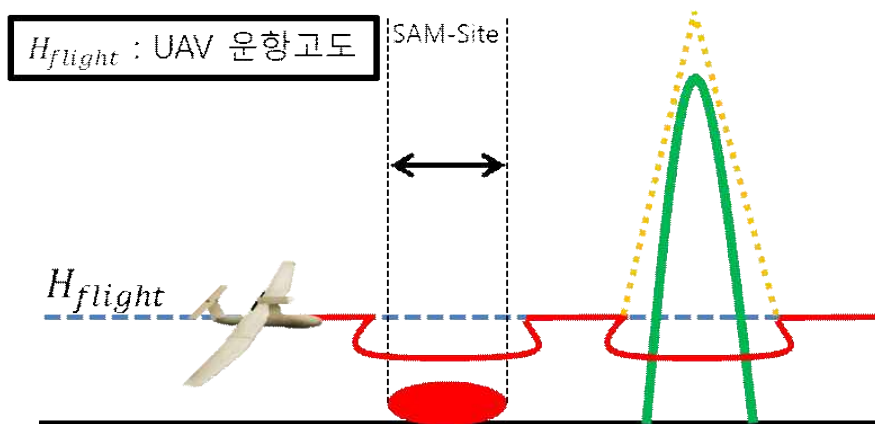


그림 21 선회 비행 경로 모식도

선회 비행은 다음과 같은 조건에서 진행한다.

첫째, 상승 비행을 위한 상승각이 기준 각도보다 큰 경우에는 무리한 상승각을 갖는 상승 비행으로 판단하여 선회 비행 경로를 선정한다. 앞서 설명한 알고리즘 선행 조건에서 SAM-Site의 높이를 무한대에 가까운 굉장히 높은 높이의 지형지물로 가정을 한다. 따라서 SAM-Site는 무인항공기의 고도 상승으로 회피하는 것은 불가능하므로 측면 방향으로 회피하는 선회 비행을 한다.

둘째, 그림 21의 오른쪽 지형지물과 같은 상황에서 주황색의 상승 및 하강 경로보다 붉은색의 선회 경로가 짧은 경로라면 선회 비행경로를 선정한다.

알고리즘 조건에서 설명한 것과 같이 무인항공기가 임무지역까지 가장 빠른 시간에 도달하기 위해서는 가장 짧은 경로를 이용하는 것이 중요하므로 선회 경로가 상대적으로 짧은 경로라면 선회 비행 경로를 선정한다. 선회 비행 조건의 특성상 그림 21과 같이 지형지물의 높이는 높으며 둘레는 작은 지형이 선회 비행에 적합하다. 선회 경로에 대한 알고리즘은 다음과 같다.

표 8 선회 경로 알고리즘

```
Flight_Rotation
{
    start_obstacle ← input starting obstacle
    end_obstacle ← input end obstacle

    terrain_coordinate ← [coordinate_x, coordinate_y]
    [voronoi_x, voronoi_y] ← voronoi(coordinate_x, coordinate_y)
    SAM_site ← [sam_site_x, sam_site_y, range]
    delete_SAM_site_location([voronoi_x, voronoi_y])

    rotation_path ← [voronoi_x, voronoi_y, flight_height]
}
```

선회 비행 경로 선정은 지형지물의 시작지점부터 마지막지점까지 확장된 보로노이 다이어그램을 이용하여 경로 선정을 한다. 보로노이 다이어그램을 이용하여 경로 생성을 하고 경로에 SAM_Site가 있다면 해당 경로는 제외하고 경로를 선정한다.

2. 상승 및 하강 경로 알고리즘

상승 및 하강 비행은 지형지물 회피 방법 중 운항 고도의 변화를 이용한 회피 방법이다. 정찰용 무인항공기의 특성상 운항 경로상의 촬영 정보가 중요하다. 선회 비행은 무조건 일정한 기준 운항고도로 비행을 하므로 운항고도 이하의 지역만 촬영이 가능하여 운항 고도 이상에 존재하는 중요한 정보의 촬영이 불가능하다. 반면에 상승 및 하강 비행을 복합적으로 이용하면 운항 경로상의 기준 운항고도보다 높은 지역의 촬영이 가능하여 단순한 선회비행보다 많은 양의 촬영 정보 획득이 가능한 장점이 있다. 상승 및 하강 비행은 그림 22와 같이 지형지물의 반경이 넓지만 운항고도 기준으로 지형지물의 가장 높은 지점까지의 높이가 낮으면 노란색 점선과 같이 우회하여 이동하는 선회 경로보다 붉은색 실선으로 표현된 것과 같이 지형지물을 넘어가는 경로가 더욱 효율적인 경로이다.

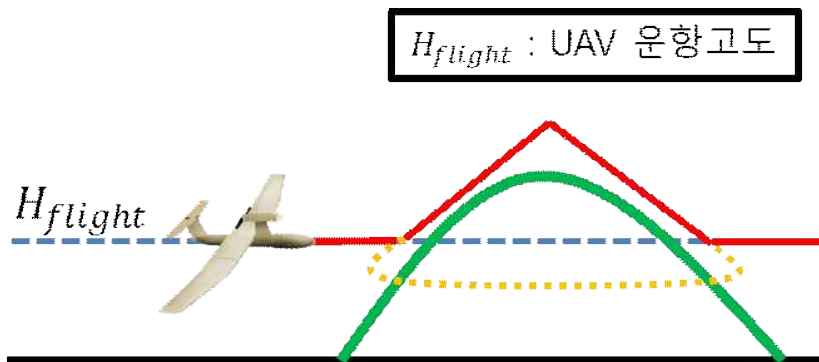


그림 22 상승 및 하강 비행 경로 모식도

상승 및 하강 비행을 할 경우에는 다음과 같은 조건을 전제로 한다.

첫째, 알고리즘 선행 조건에 의해 상승 및 하강 비행은 최대 상승각을 넘지 않으면서 상승 및 하강 비행을 진행한다.

둘째, 상승 비행의 운항 고도가 무인항공기의 최대 운항고도를 넘지 않도록 해야 하며 최대 운항고도를 넘을 경우에는 상승 비행은 불가능한 것으로 판단하고 선회 비행을 하는 것으로 한다.

이와 같은 전제 조건을 기준으로 상승 및 하강 경로 선정 알고리즘은 다음과 같다.

표 9 상승 및 하강 경로 선정 알고리즘

```
Flight_Lift
{
    start_obstacle ← input starting obstacle
    end_obstacle ← input end obstacle
    flight_height ← input UAV's height of flight
    max_flight_height ← input UAV's max height of flight

    [dted_x, dted_y, dted_z] ← DTED(level)
    [xy_data] ← LinearEquation(start_xy, end_xy)

    for i = length(xy_data)
        [x, y, z] ← FindHeight(dted_x, dted_y, dted_z, xy_data)
        if (z_data > max_flight_height)
            FlightRotation(start_obstacle, end_obstacle)
        end if
        lift_path ← [x, y, z]
    end for
}
```

3. 새로운 복합 경로 알고리즘

복합 경로 선정은 지형지물이 2개 이상 붙어있는 복수 지형지물에 대한 회피 알고리즘이다. 앞서 설명한 선회 경로 알고리즘과 상승 및 하강 경로 알고리즘을 이용하여 선회 비행과 상승 및 하강 비행 경로 중 보다 효율적인 경로를 선정한다. 여기서 효율적인 경로의 기준은 알고리즘 전제조건에 의하여 무인항공기가 모든 구간에서 동일한 속도로 운항하므로 이동거리가 짧은 경로를 효율적인 경로로 선정 한다.

앞서 설명한 지형지물의 유형에서와 같이 산과 산이 만나 생기게 되는 산맥에는 계곡이 생긴다. 계곡은 산맥을 단면으로 자르게 된다면 주변보다 높이가 낮은 지역으로 움푹 파인 지점을 말한다. 무인항공기의 운항고도를 기준으로 계곡의 높이가 높고 낮은 것으로 크게 나눌 수 있다.

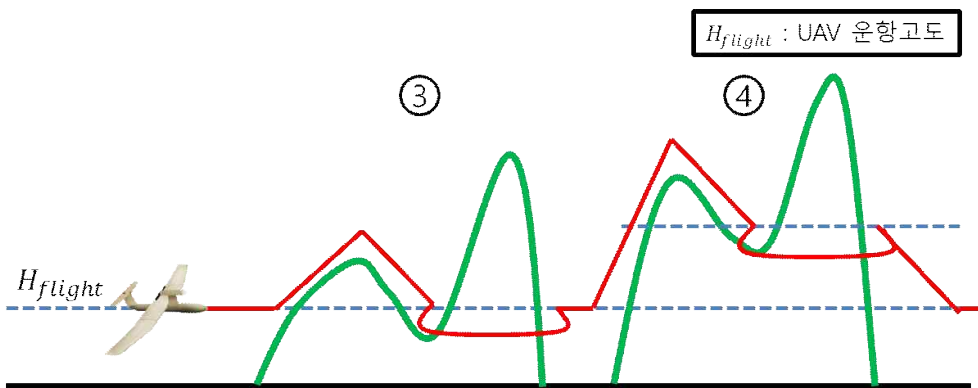


그림 23 복합 경로 모식도

그림 23은 지형지물의 유형 중 복수 지형지물의 형태를 표현한 것이다. 그림 23의 왼쪽에 있는 동그라미 3번은 계곡의 높이가 무인항공기의 운항고도보다

낮은 것으로 계곡의 위치를 기준으로 지형지물들이 개별로 일정거리이상 떨어져 있으므로 단일 지형지물로 볼 수 있다. 동그라미 3번과 같은 경우에는 각 지형지물마다 앞서 설명한 선회 알고리즘 또는 상승 및 하강 알고리즘 중 효율적인 경로를 선정 한다. 그림 23의 오른쪽에 있는 동그라미 4번은 계곡의 높이가 무인항공기의 운항고도보다 높은 것으로 하나의 큰 지형지물로 보고 선회와 상승 및 하강 비행을 판단하거나 계곡의 개수만큼 지형지물을 나누어 그림 23의 동그라미 3번과 같은 방식으로 경로를 판단 한다. 선회와 상승을 동시에 고려하는 복합 경로 선정 알고리즘은 다음과 같다.

표 10 비행경로 선정 프로세스 의사코드

```

Path Planning Processing with kind of Obstacle
{
    start_point ← input UAV start point
    end_point  ← input UAV destination point
    flight_height ← input UAV's height of flight
    [x, y] ← LinearEquation(start_point, end_point)

    while(length(x))
        obstacle_point ← FindObstacle(start_point, end_point)
        if(obstacle_point = SAM_Site)
            FlightRotation()
        else
            rotation_length ← FlightRotation()
            lift_length ← FlightLift()
            if(rotation_length < lift_length)
                FlightRotation()
            else
                FlightLift()
            end if
        end if
    end while
}

```

4. 곡선 경로 알고리즘

가. Smoothing 알고리즘을 이용한 경로 선정

경로선정 알고리즘만을 이용하여 경로를 선정하게 되면 급격하게 방향전환을 하는 구간이 발생함에 따라 실제 운항에 적합하지 않은 경로가 생성된다. 따라서 성공적인 무인항공기의 운항을 위해서는 추가적으로 실제 운항에 맞는 부드러운 곡선경로를 산출할 수 있는 방안, 즉 smoothing 알고리즘이 필요하다.

가장 최근에 발표된 smoothing 알고리즘에서는 무인항공기의 운항경로를 구간별로 시작점, 중간점, 끝점 3개의 지점을 이용한다. 그림 24와 같이 3점을 지나는 원의 방정식을 도출하여 원의 둘레를 곡선 경로로 선정하는 방식을 이용하고 있다[9].

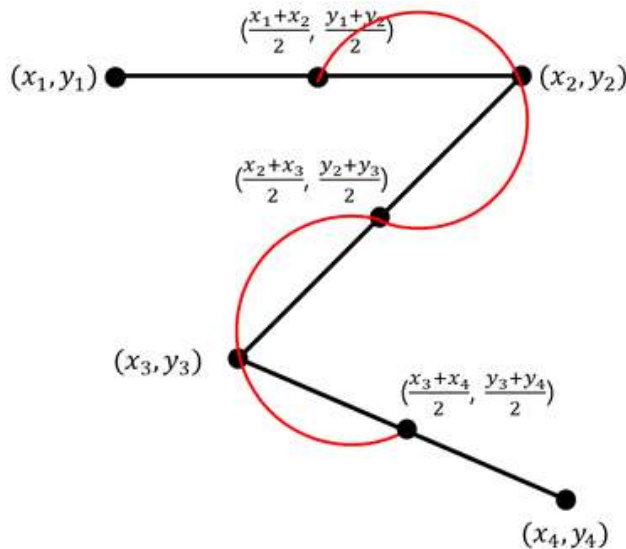


그림 24 Smoothing 알고리즘[9]

Smoothing 알고리즘을 이용하면 직선적인 경로에 대하여 곡선경로로 변경하는 것이 가능하다.

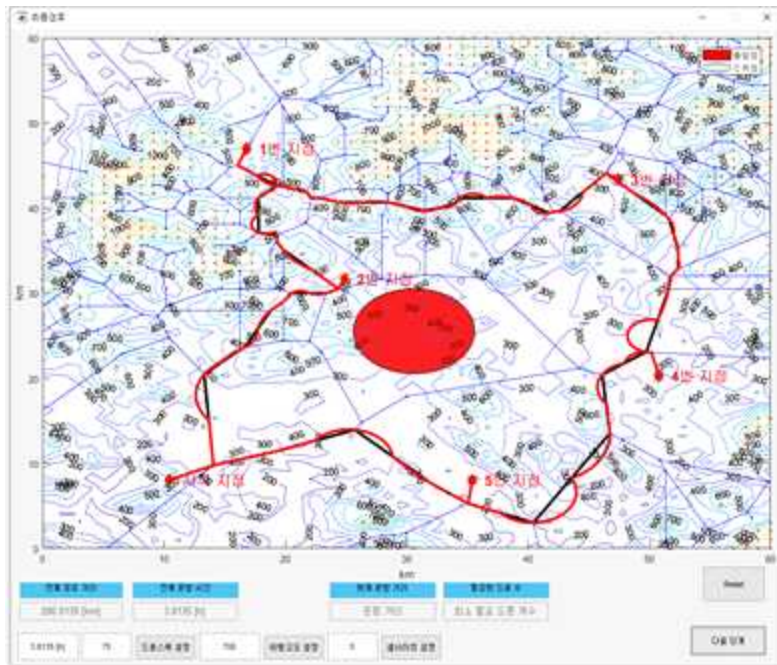


그림 25 Smoothing 알고리즘 결과[9]

그림 25는 smoothing 알고리즘을 적용한 결과이다. 그림 25에서 붉은 곡선 아래의 검정색 선은 smoothing 알고리즘을 적용하지 않은 직선 경로이며 붉은 곡선은 smoothing 알고리즘을 적용하여 곡선 경로를 선택한 결과이다[9].

하지만 곡선 경로로 변경하는 과정에서 부자연스러운 운항경로가 발생하거나 비효율적인 운항경로가 생성되는 것이 확인되었다.

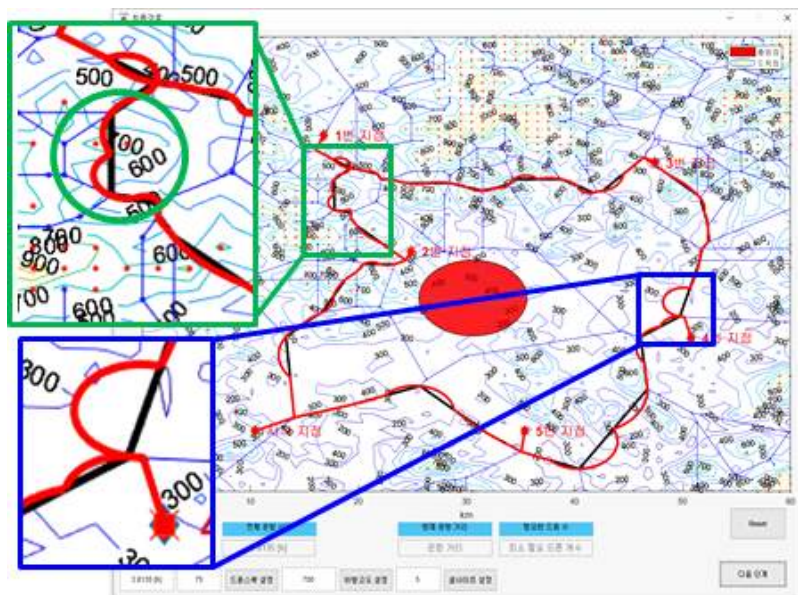


그림 26 Smoothing 알고리즘 결과 주요 지점 확대

그림 26은 그림 25에서 smoothing 알고리즘의 문제점을 표시하였다. 그림 26의 왼쪽에 있는 초록색 네모는 동일한 방향으로 진행해야하는 구간에서 급격하게 방향을 전환하는 지점이 발생한 것을 확인 할 수 있다. 직선으로 이루어진 경로의 단점인 급격한 방향전환 구간을 곡선 경로인데도 불구하고 급격한 방향전환으로 인하여 부자연스러운 경로가 생성되었다. 특정 구간에서 이와 같은 문제가 발생하여 무인항공기가 실제로 운항하기 힘든 부분이다. 또한 오른쪽의 파란색 네모는 과도한 선회반경으로 인하여 비효율적인 경로가 발생된다. Smoothing 알고리즘을 보완하며 무인항공기의 실제 운항을 고려한 곡선 경로 선정이 필요하다.

나. 부드러운 곡선을 위한 베지에 곡선

베지에 곡선은 n 개의 점으로부터 얻어지는 $n-1$ 차 곡선으로 기준 선분의 개수에 따라서 2차 베지에 곡선, 3차 베지에 곡선 등이 있다. 수치 해석 분야에서 많이 사용되며 부드러운 곡선을 생성하는 데에 이용되고 있어 자동차 몸체 디자인과 같이 곡선이 중요한 곳에 사용된다. 4차 베지에 곡선부터는 복잡하고 효율이 떨어지는 단점이 존재하여 실용적인 측면에서 2차 또는 3차 베지에 곡선을 주로 이용한다.

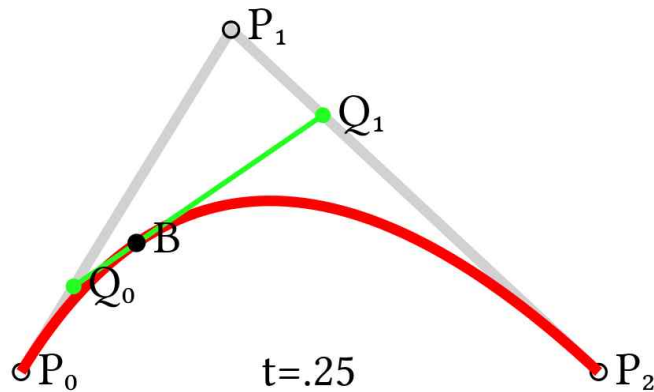


그림 27 2차 베지에 곡선

2차 베지에 곡선은 그림 27과 같이 점 P_0, P_1, P_2 를 잇는 회색 선분을 기준 선분으로 하며 기준 선분 위를 일정한 속도로 이동하는 점을 잇는 선분인 $\overline{Q_0Q_1}$ 이 지나가는 궤적에 생기는 곡선을 2차 베지에 곡선이라고 한다.

$$P(t) = (1-t)^2 A + 2t(1-t)B + t^2 C (\text{단}, 0 \leq t \leq 1) \quad (15)$$

2차 베지에 곡선은 식 (15)를 이용하여 구할 수 있다.

Smoothing 알고리즘과 베지에 곡선을 이용하면 기존에 매끄럽지 않은 곡선 경로에 대하여 무인항공기가 실제 운항이 가능한 곡선 경로 선정이 가능하다.

다. 베지에 곡선을 이용한 개선된 smoothing 알고리즘

본 논문에서 제안하는 경로 선정 알고리즘은 직선적인 경로로 이루어져 있어 실제 무인항공기가 운항하기에 적합하지 않다. 또한 기존 smoothing 알고리즘에서는 곡선으로 이루어져있는 부분에서 과도한 선회 반경이나 매끄럽지 못한 부분이 존재한다. 이러한 부분을 해결하기 위해 베지에 곡선을 적용하는 개선된 smoothing 알고리즘을 제안한다.

개선된 smoothing 알고리즘은 기존 smoothing 알고리즘과 동일하게 비행 경로의 각 구간별을 시작점, 중간점, 끝점으로 나눈다. 각 나눈 지점에 대하여 구간의 끝점을 기준으로 동일한 구간의 중간점부터 끝점을 이은 선을 제 1 기준선, 끝점에서 다음 구간의 중간점까지 이은 선을 제 2 기준선으로 하여 2개의 기준선을 갖는 2차 베지에 곡선을 구한다. 각 구간에 대한 지점은 첫 번째 구간의 시작점인 (x_1, y_1) 과 끝점인 (x_2, y_2) 의 중간점인 $(\frac{x_1+x_2}{2}, \frac{y_1+y_2}{2})$ 지점을 첫 번째 중간점, 두 번째 구간의 시작점인 (x_2, y_2) 과 끝점인 (x_3, y_3) 의 중간점인 $(\frac{x_2+x_3}{2}, \frac{y_2+y_3}{2})$ 지점을 두 번째 중간점, 세 번째 구간의 시작점인 (x_3, y_3) 과 끝점인 (x_4, y_4) 의 중간점인 $(\frac{x_3+x_4}{2}, \frac{y_3+y_4}{2})$ 지점을 세 번째 중간점으로 한다.

3개의 점들을 통해 2차 베지에 곡선식인 식 (15)를 이용한 개선된 smoothing 경로를 구한다. 이와 같은 과정을 반복하면 그림 28의 붉은색 곡선경로가 나오게 된다.

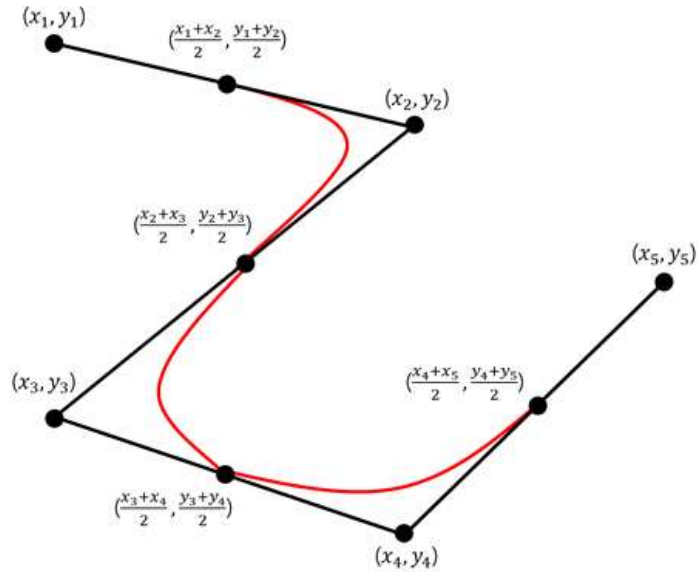


그림 28 베지에 곡선을 이용한 개선된 smoothing 알고리즘

그림 28의 개선된 smoothing 알고리즘 모식도는 그림 26의 smoothing 알고리즘 모식도와 비교하여 보다 경로 추종적이며 과도한 선회 반경을 갖는 기존 smoothing 알고리즘에 비해 상당히 효율적인 경로를 갖게 될 것으로 예상된다.

제 4 장 제안 알고리즘 검증 및 성능 분석

제 1 절 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션

1. 시뮬레이션을 위한 전제 조건

본 논문에서 제안하는 알고리즘을 검증하기 위하여 맵트랩을 이용한 선회와 상승을 동시에 고려하는 3차원 복합 비행경로 시뮬레이터를 구현하였다. 실제 운항과 동일한 환경에서의 시뮬레이션을 위해 북위 38.0042° , 동경 127.9958° 를 기준으로 $10,000\text{km}^2$ 크기의 산악지형에서 검증하였다.

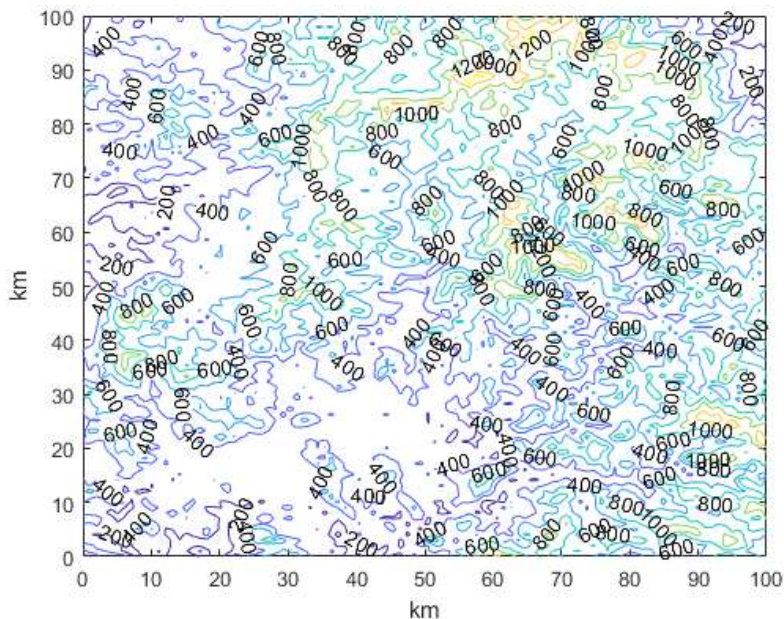


그림 29 DTED를 이용한 시뮬레이션 지역

앞서 언급하였던 우리 군에서 사용하는 많은 종류의 무인항공기 중 대대급으로 운용되는 유콘시스템社의 RemoEye-006A를 타겟 무인항공기로 한다. RemoEye-006A는 정찰용 무인항공기로 최대 75km/h의 속도를 갖으며 운용고도는 1km 내외이며 최대 상승고도는 3km이다. 제안하는 알고리즘의 검증은 RemoEye-006A의 성능을 기준으로 하는 임무 환경을 가정하여 검증한다.

표 11 RemoEye-006A 성능

	RemoEye-006A
기체크기	2.7m(전폭) / 1.7m(전장)
이륙중량	6.5kg
비행시간	2시간 이상
비행속도	75km/h(최대)
운용고도	1km 내외 (최대 3km)
운용거리	15km(통신가능거리)



그림 30 RemoEye-006A

2. 선회와 상승을 고려한 복합 경로선정 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 알고리즘들을 바탕으로 실제 운항지역에서 시뮬레이션을 하였다. 무인항공기의 운항고도는 700m, 최대 운항고도는 RemoEye-006A의 성능에 맞춘 1km로 설정하였다.

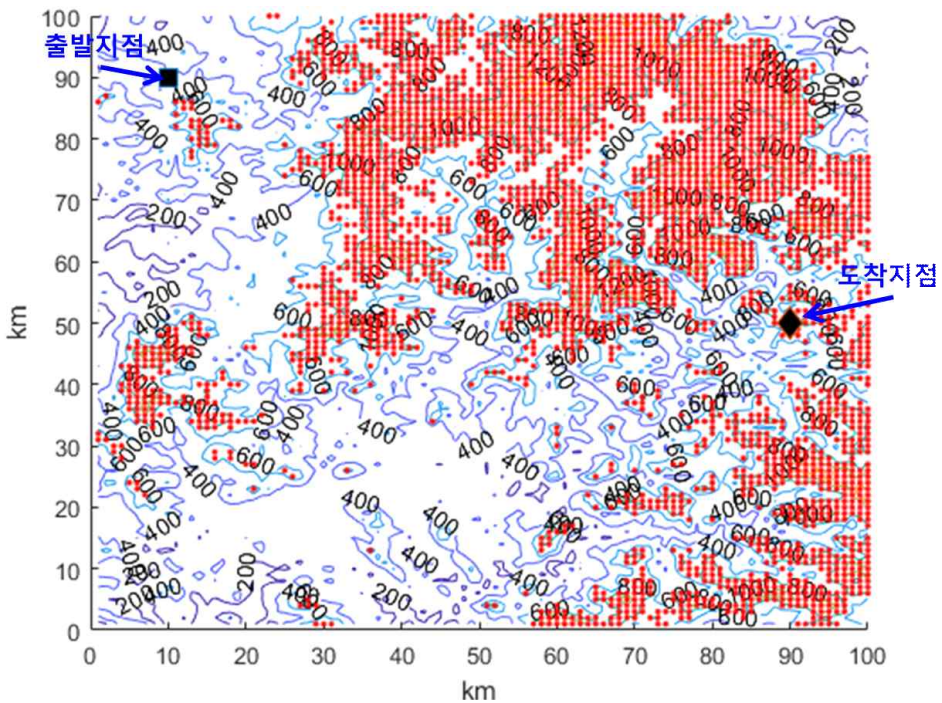


그림 31 출발 지점 및 도착 지점

그림 31은 시뮬레이션을 위한 무인항공기의 운항 출발 지점과 도착 지점을 지도에 표현한 그림이다. 위 지역에서 복합경로 알고리즘을 적용하면 다음과 같은 복합경로 결과가 나왔다.

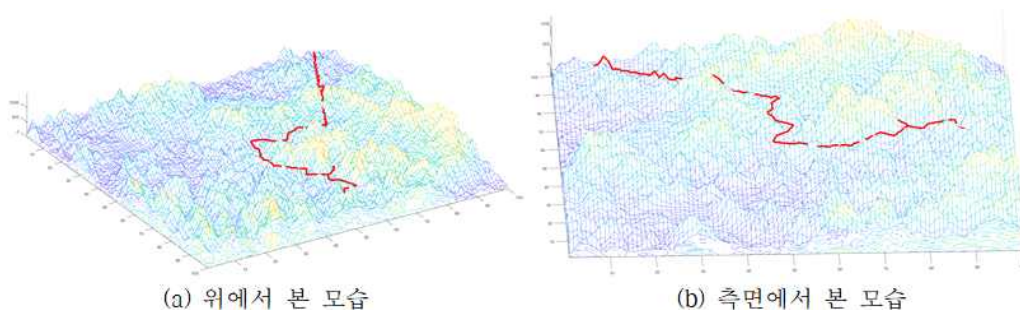


그림 32 복합경로 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과

그림 32는 복합경로 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과로 3차원 지도정보를 배경으로 하며 붉은색 선은 복합경로를 표현한다.

3. 개선된 smoothing 경로선정 시뮬레이션

우리 군에서 실제 운용되고 있는 많은 종류의 무인항공기는 표 4에서 알 수 있듯이 2개의 날개가 고정되어있는 고정익 형태의 무인항공기이다. 고정익 무인항공기의 특성상 급격한 방향전환이 불가능하다. 그림 32와 같이 직선으로만 이루어진 경로에서는 직선으로만 이루어진 경로로 인하여 급격한 방향전환을 이용해야한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방법으로 smoothing 알고리즘이 있지만 특정 구간에서 발생하는 급격한 방향전환과 과도한 선회 반경으로 도출된 경로는 현실적인 측면에서 해결하여야 할 문제이다. 본 논문에서는 보다 개선된 smoothing 알고리즘을 고안하여 실제 운항 환경에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

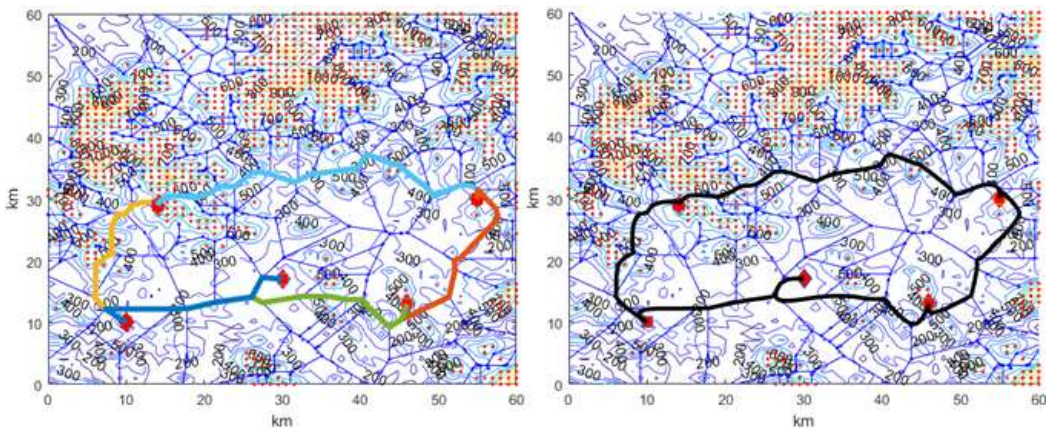


그림 33 운항고도 600m에서 직선경로(좌) 및 곡선경로(우)

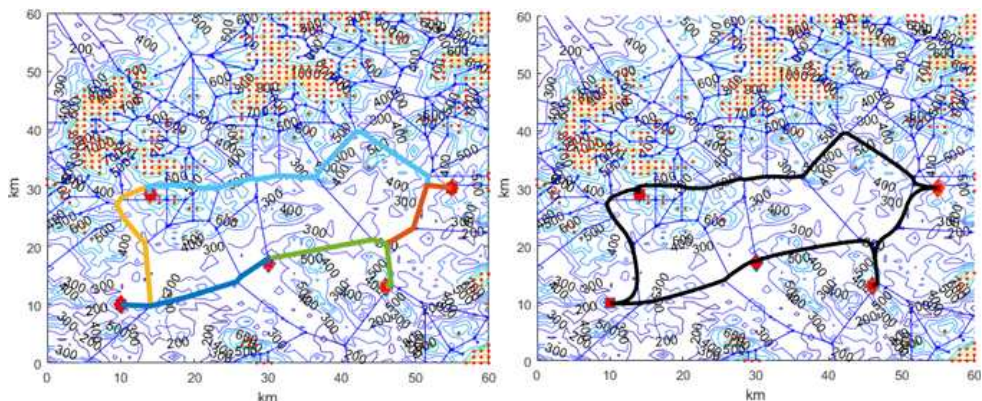


그림 34 운항고도 700m에서 직선경로(좌) 및 곡선경로(우)

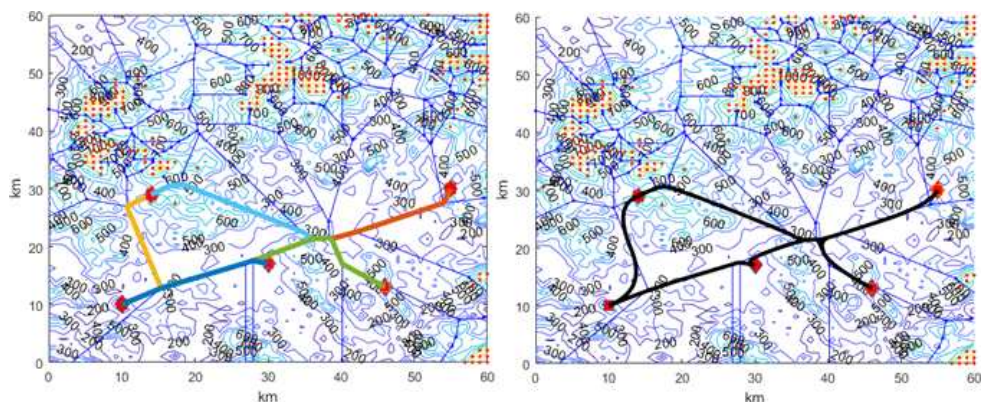


그림 35 운항고도 800m에서 직선경로(좌) 및 곡선경로(우)

그림 33~35는 개선된 smoothing 알고리즘을 적용하기 이전인 직선 경로와 알고리즘 적용 이후인 곡선 경로 비교 결과이다. 각각 운항고도 600m, 700m, 800m를 기준으로 적용하였다. 기존 직선으로 급격한 방향전환이 필요한 구간이 곡선으로 변경되었으며 특히, 그림 35의 왼쪽 아래의 파란색에서 노란색으로 가는 경로가 알고리즘 적용 후 S형태의 곡선경로가 나오는 것을 알 수 있다.

개선된 smoothing 알고리즘을 적용한 결과 곡선 알고리즘 적용 이전 직선 경로와의 거리 차는 다음과 같다.

표 12 직선경로 및 개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과 비교

고도	직선경로 (km)	개선된 smoothing 경로 (km)	거리 차 (km)
600m	169.0983	156.8226	-13.1708
700m	153.0253	144.3349	-8.6904
800m	155.3461	143.9280	-11.4181

개선된 smoothing 알고리즘을 적용한 결과 직선으로 이루어진 직선경로보다 곡선경로의 길이가 더 짧은 것으로 나타났다. 각 운항고도별 운항 거리 차는 최소 8km이상으로 나타났다. 이를 통해 개선된 smoothing 알고리즘을 적용하는 것이 효율적인 것을 확인 할 수 있다.

제 2 절 기존 연구와의 비교 분석

1. 경로 선정 알고리즘 비교

본 논문의 2장 3절의 기존 연구들의 경로 선정 방식은 다음과 같이 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫째, 수직 요소를 이용한 지형 추종 경로 선정 방식과 둘째, 수평 요소를 이용한 선회 알고리즘으로 나뉜다. 기존 연구와 제안알고리즘과의 비교를 하였다. 4장 1.2절 선회와 상승을 고려한 복합 경로선정 시뮬레이션과 동일한 환경에서 측정하였다.

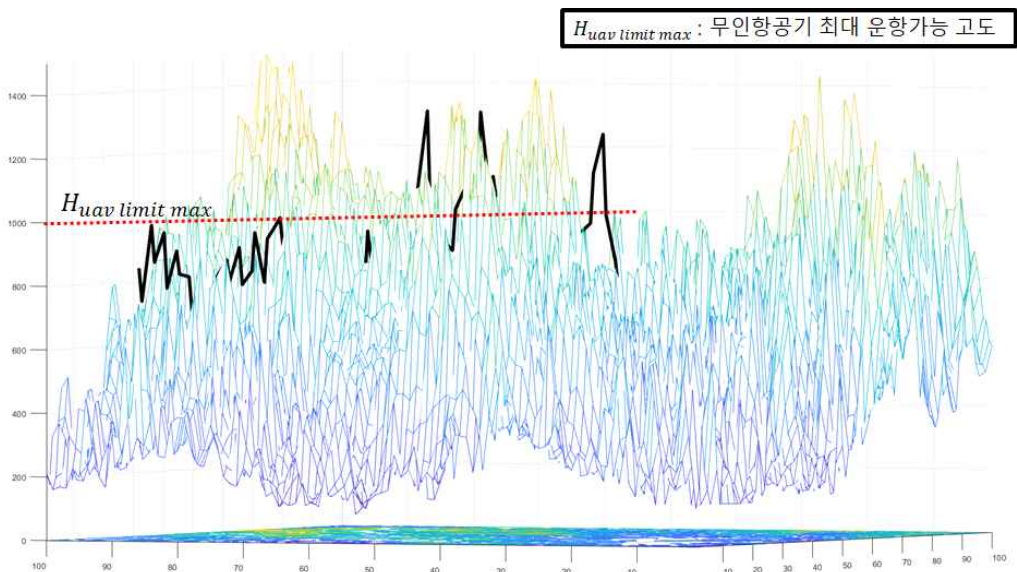


그림 36 지형추종 방식을 이용한 경로 선정 결과

그림 36의 검정색 선은 지형추종 방식을 이용한 경로 선정 결과이며 붉은색 점선은 무인항공기의 최대 운항가능 고도를 나타낸 것이다. 지형추종 방식의 특성상 수직성분인 지형의 높이 정보를 중점으로 수직 비행만을 이용한 경로를 선정하게 되어 무인항공기의 최대 운항가능 고도를 넘기게 되는 결과가 나올 수 있는 단점이 존재한다. 이와 같은 결과는 실제 무인항공기를 운항하기 어렵다.

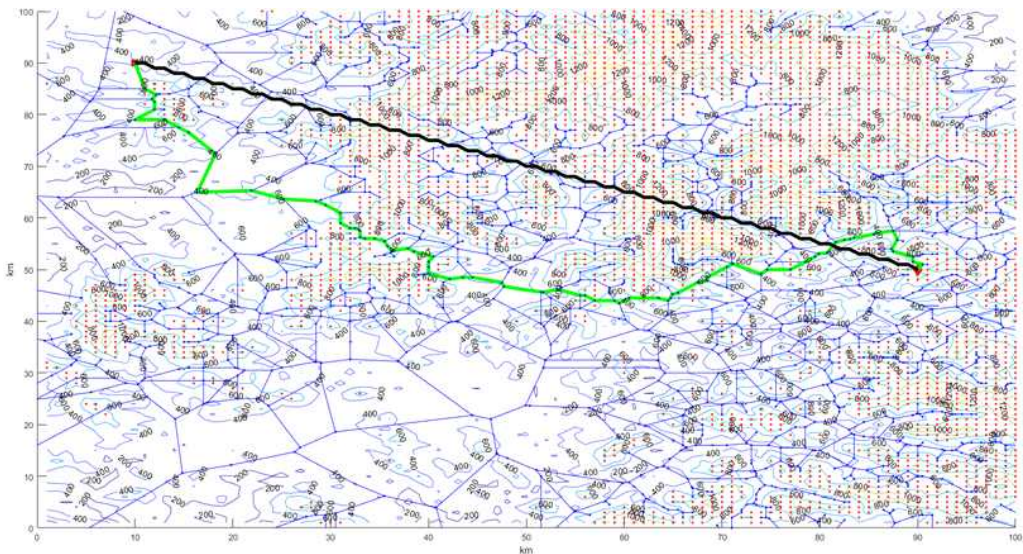


그림 37 2차원에서 선회와 복합 알고리즘 경로 비교

그림 37은 2차원 환경에서 기존 선회 알고리즘의 경로 선정 결과와 제안 알고리즘인 복합 알고리즘의 경로 선정 결과를 나타낸 그림이다. 선회 알고리즘은 보로노이 다이어그램의 결과를 이용한 경로 선정을 하며 복합 알고리즘은 시작점과 도착점을 직선으로 연결한 선을 기준으로 이루어진다. 이와 같은 결과를 3차원에 적용시켜 비교하면 다음과 같다.

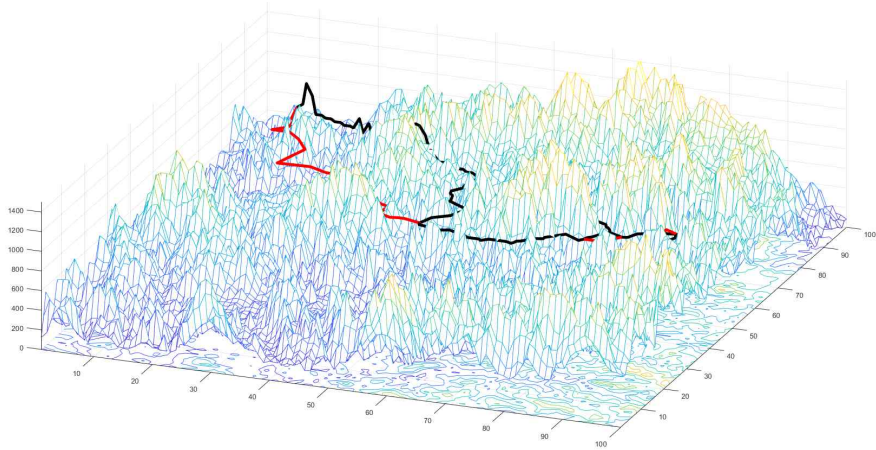


그림 38 3차원에서 선회와 복합 알고리즘 경로 비교

그림 38은 3차원 환경에서 선회 알고리즘과 복합 알고리즘의 경로 선정 결과를 비교한 것으로 붉은색 선은 선회 알고리즘 경로 선정 결과이며 검정색 선은 복합 알고리즘 경로 선정 결과이다. 선회 경로와 상승 경로를 비교하여 보다 경로의 길이가 짧은 경로를 선택하여 선회와 복합 알고리즘의 결과가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 지형추종 경로 선정 결과에서 무인항공기 최대 운항가능 고도를 넘기는 경로부분은 본 논문의 타겟 무인항공기인 RemoEye-006A의 실제 운항을 고려하여 상승 비행이 불가능한 것으로 판단하고 선회 경로를 선택하였다.

표 13 선회 알고리즘 및 복합 알고리즘 적용 결과 비교

고도	선회 알고리즘 적용 결과 (km)	복합 알고리즘 적용 결과 (km)	거리 차 (km)	기존 대비 감소율 (%)
700m	133.9009	116.7791	-17.1218	23.2122

표 13은 선회 알고리즘과 복합 알고리즘 적용 결과를 비교하였다. 선회 알고리즘은 약 134km, 복합 알고리즘은 약 117km로 약 17km의 거리 차이가 발생한다. 결과적으로 선회 알고리즘을 적용하는 것 보다 복합 알고리즘을 적용하면 약 23%의 경로 효율을 기대 할 수 있다.

2. 곡선 경로 알고리즘 비교

기존 smoothing 알고리즘을 이용한 경로는 특정 구간에서 발생하는 급격한 방향전환과 과도한 선회 반경의 단점이 존재한다. 이러한 단점을 개선한 알고리즘인 개선된 smoothing 알고리즘과 기존 smoothing 알고리즘을 비교하였다.

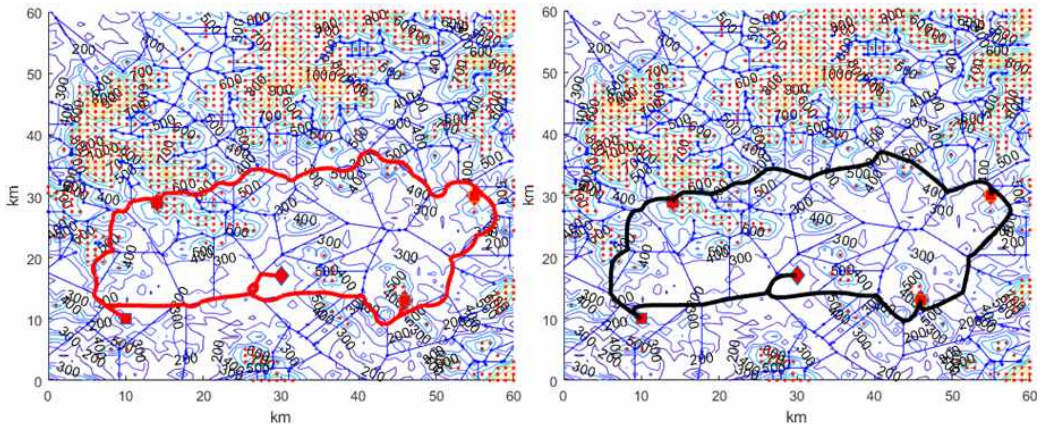


그림 39 운향고도 600m에서 기존 smoothing 알고리즘 적용 결과(좌),
개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과(우)

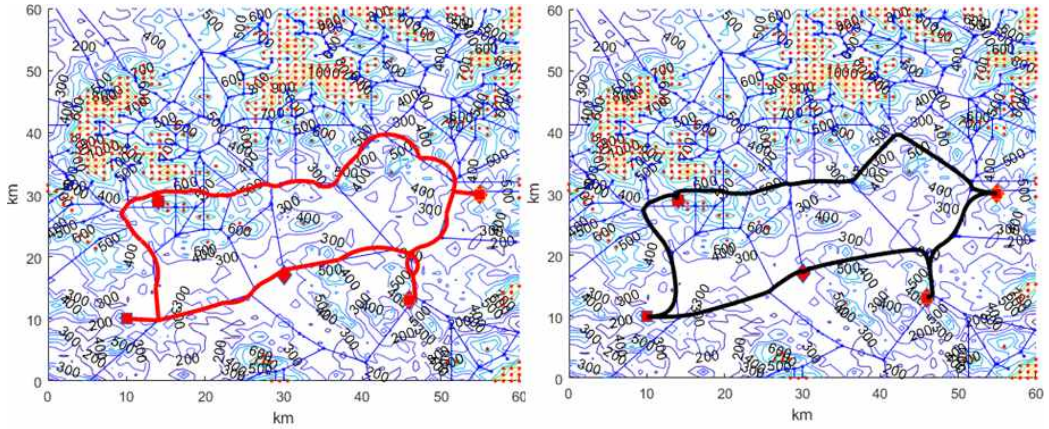


그림 40 운향고도 700m에서 기존 smoothing 알고리즘 적용 결과(좌),
개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과(우)

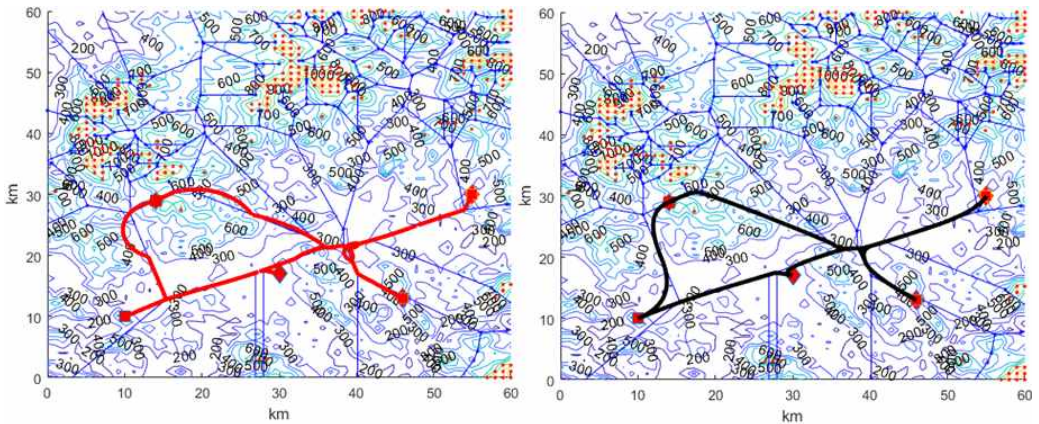


그림 41 운향고도 800m에서 기존 smoothing 알고리즘 적용 결과(좌),
개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과(우)

그림 39 ~ 41은 운향고도에 따른 기존 smoothing 알고리즘 적용 결과와 개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과를 비교한 사진이다. 각 운향지점은 그림 33~35의 곡선 알고리즘 적용 전인 직선경로와 동일한 지점에서 테스트하였다.

그림 39에서는 기존 smoothing 알고리즘을 적용한 결과 과도한 선회 반경을 갖는 경로가 다수 존재하지만 동일 구간에 대하여 개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과 실제 무인항공기 운항이 가능한 부드러운 곡선 경로가 나오는 것을 확인 할 수 있다. 그림 40과 41에서 기존 smoothing 알고리즘의 단점인 급격한 방향전환 구간이 존재하지만 동일 구간에 대하여 개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과 운항경로 추종적으로 곡선 경로가 형성되어 기존 부자연스러운 경로가 개선된 것을 확인 할 수 있다. 또한 기존 알고리즘에 대하여 개선된 알고리즘 적용 결과 각 운항 경로의 길이를 비교하였다. 결과 비교는 운항고도 600m, 700m, 800m에 대하여 기존 smoothing 알고리즘과 개선된 smoothing 알고리즘 적용결과 거리 차와 기존 대비 감소한 비율을 계산하여 표로 정리하였다.

표 14 기존 smoothing 알고리즘 및 개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과 비교

고도	기존 smoothing 알고리즘 (km)	개선된 smoothing 알고리즘 (km)	거리 차 (km)	기존 대비 감소율 (%)
600m	165.9741	156.8226	-9.1515	5.5138
700m	156.2165	144.3349	-11.8816	7.6059
800m	159.3222	143.9280	-15.3942	9.6623

개선된 smoothing 알고리즘 적용 결과 기존 고도가 높아질수록 기존 smoothing 알고리즘 적용 결과 대비 감소율이 증가하는 것을 확인 할 수 있

다. 기준 고도가 높아질수록 경로가 단순하게 되어 기존 smoothing 알고리즘의 단점인 과도한 선회 반경이 크고 자주 발생하게 된다. 이와 같은 구간에 개선된 smoothing 알고리즘을 적용하여 과도한 선회 반경이 제거되면서 기준 고도가 높아짐에 따라 기존 대비 감소율이 증가하는 결과가 나왔다. 또한 기존 smoothing 알고리즘보다 평균 약 11km의 경로가 감소하였으며 평균 약 7%의 감소율을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 기존 smoothing 알고리즘보다 본 논문에서 제안하는 개선된 smoothing 알고리즘을 적용하는 것이 기존 단점인 과도한 선회반경이 없으며 급격한 방향전환이 없는 부드러운 곡선 경로를 갖게 되어 경로 효율이 더 좋은 것을 알 수 있다.

제 5 장 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 3차원 환경에서 다양한 지형지물에 대하여 수평요소와 수직요소를 동시에 고려하는 복합 비행경로를 이용한 새로운 경로 선정 알고리즘을 제안하였다. 또한 무인항공기의 실제 운항을 고려한 개선된 곡선 경로 알고리즘을 제안하였다. 물론 무인항공기 운항 중 마주칠 수 있는 자연적인 지형지물뿐만 아니라 인공적인 지형지물인 SAM-Site도 함께 고려하였다.

이를 위하여 우선 무인항공기의 실제 비행방법인 선회 비행, 상승 비행, 하강 비행에 대하여 알아보고 기존에 연구된 경로 선정 기법과 관련 연구들을 분석하여 한계점을 파악하고 개선사항을 확인하였다.

무인항공기의 비행 방법과 다양한 지형지물에 대하여 경로 선정이 가능한 복합 경로 선정 알고리즘을 제안하여 기존 부분적 3차원 경로 선정에서 완전한 3차원 경로 선정이 가능하도록 하였다. 또한 실제 운항을 고려하여 기존 smoothing 알고리즘의 단점을 보완한 개선된 smoothing 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 선회와 상승 비행을 복합적으로 고려하는 3차원 공간에서의 경로 선정 알고리즘은 시뮬레이션을 통한 검증결과, 기존 다른 경로선정 기법보다 약 23%의 효율성을 가지는 경로 선정이 가능하다는 결과를 얻었다. 또한 추가로 제안한 곡선 경로 선정 알고리즘은 기존 부자연스러운 곡선경로에 대하여 실제 운항이 가능한 부드러운 곡선 경로로 변경하면서 기존보다 평균 7%의 효율성이 향상되었다. 결과적으로 수직 및 수평 요소를 동시에 고려한 3차원 공간에서의 실질적인 경로 선정이 이루어졌으며 개선된 곡선 경로 선정과 SAM-Site 반영을 만족하는 새로운 복합경로 선정 알고리즘을 제안하였다.

한편 본 논문에서는 모든 구간에서 무인항공기의 운항속도가 일정하도록

가정하였다. 하지만 실제 무인항공기 운항에서는 다양한 운항속도를 가질 수 있을 것이므로 무인항공기의 안정적인 상승 및 하강을 위한 적절한 상승각과 곡선 비행경로 또한 다양하게 변할 수가 있다. 향후 추가적으로 무인항공기의 자세한 특성 및 역학적인 측면의 연구를 진행하여 무인항공기의 실제 운항속도에 따른 비행 안정성과 곡선 비행경로를 세심하게 반영하는 경로선정 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Teal Group, "World Military Unmanned Aerial Systems Market Profile and Forecast 2017 Edition", 2018.04, pp1
- [2] 황남두, "입체적 지형을 고려한 무인항공기의 실시간 촬영지역 예측 알고리즘 연구", 한국산업기술대학교 대학원 석사학위논문, 2013. 06.
- [3] 정우정, "3차원 공간에서의 위협요소 및 촬영지역을 고려한 무인항공기의 경로선정 알고리즘", 한국산업기술대학교 대학원 석사학위논문, 2017. 06
- [4] 김종욱, 김도현, "국가공역체계에서 무인항공기 통합운영에 대한 동향", 항공우주산업기술동향, Vol. 8, No. 2, pp.136-144, 2010. 12.
- [5] Taufik Khuswendi, Hilwadi Hindersah, Widyawardana Adiprawita, "UAV Path Planning Using Potential Field and Modified Receding Horizon A* 3D Algorithm", International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 17-19 July 2011, Bandung, Indonesia
- [6] 서중보, 김형석, 오경택, 김유단, "이동구간제어 개념을 적용한 무인기 지형 추종 경로생성", 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, 2011. 11, pp157-162
- [7] 정성식, 장대성, 박현진, 성태현, 안재명, "다수의 위협과 복수의 목적지가 존재하는 임무에서 복수 무인기의 생존율 극대화를 위한 최적 경로 계획 및 분석", 한국항공우주학회지 제43호 제6권, 2015. 06, pp488-496
- [8] 박상혁, 홍주현, 하현종, 유창경, 신원영, "대공위협에 대한 무인기 생존성 최대화 경로점 결정기법", 한국항공우주학회지 제42호 제2권, 2014. 02, pp127-133
- [9] 최성근, "3차원 환경에서의 임무지역 및 운항시간을 고려한 무인항공기 Smoothing 경로선정 연구", 한국산업기술대학교 대학원 박사학위논문,

2018. 02

- [10] 이아름, “드론 시장 및 산업 동향”, 융합연구정책센터, 2017. 01.
- [11] 최영재, “무인항공기 안전관리제도 구축 연구”, 국토교통부, 2009. 12.
- [12] Deagel, ‘Euro Hawk Specifications’, <http://www.deagel.com>
- [13] Israel Aerospace Industries, “Searcher Mk 3 Brochure”, 2014. 06.
- [14] 박상현, “최고 해상도 영상레이더 개발”, 디지털타임스, 2008. 05. 08
- [15] 장두현, “미래항공우주산업의 총아 무인항공기”, 상상커뮤니케이션, 2006.
- [16] 경상북도문화콘텐츠진흥원, ‘[경상북도 숨은 명소 찾기] 26. 울릉군 나리분지’, <http://www.gcube.or.kr>
- [17] National Geospatial-Intelligence Agency, Digital Terrain Elevation Data, <https://www.nga.mil/ProductsServices/TopographicalTerrestrial/Pages/DigitalTerrainElevationData.aspx> (2017)
- [18] 소명뢰, 신동익, 신규식, “일반화된 보로노이 다이어그램을 이용한 논홀로노믹 모바일 로봇의 자율 주행”, 한국생산제조시스템학회지, Vol. 24, No. 1, pp. 98-102, 2015. 02.
- [19] 방문섭, 주영훈, “무계중심 보로노이 테셀레이션을 이용한 군집로봇의 협조탐색”, 전기학회논문지, Vol. 61, No. 1, pp. 130-134, 2012. 01.
- [20] S. G. Choi, W. J. Jung, J. H. Choi, “3D-Based UAV Path-Planning Algorithm Considering Altitude and Reconnaissance Areas”, International Journal of Transportation and Logistics Management, Vol. 1, No. 1, pp. 9-16, 2017. 03.

ABSTRACT

A Study on 3-Dimensional Combined Flight Path Algorithm for UAV Considering Turning and Elevation

by Yoon Seo-young

Advisor : Prof. Choi Jeong-hun, Ph.D.

Course for Department of Advanced

Convergence Technology

(Electronics Engineering)

Graduate School

Korea Polytechnic University

In this paper, The global market for unmanned aerial vehicles (UAV) is showing explosive growth. Moreover, UAVs are being actively used in various areas including the agriculture and service industries. For military purposes, UAVs perform diverse missions such as surveillance, reconnaissance and attacks. To successfully accomplish these missions, a UAV needs to travel to a designated point without being detected by opponents while keeping off the presence of high and obstructive geographic features and SAM sites. In these situations, the difficulty level of the mission drastically increases, which results in higher accident and failure rates.

Many research institutes have presented various algorithms and simulation results regarding the determination of the UAV's flight path in order to improve the success rate of missions.

However, most UAV flight path selection algorithms developed in existing studies selected a flight path in a two-dimensional space, which is hardly applicable to real UAV missions. Moreover, other studies on three-dimensional flight paths selected a path in a two-dimensional plane and then applied vertical information or examined either circling flight or ascending flight by applying paths at a constant flight altitude. Thus, these methods can hardly be regarded as selecting a flight path in a three-dimensional space. Consequently, a composite method to determine an efficient path for each flight mode (circling or ascending) is required.

This study proposes an algorithm that identifies optimal paths for a UAV's real flight modes of circling, descending, and ascending by comprehensively analyzing three-dimensional risk factors such as geographic features (mountains, valleys, etc.) and SAM sites. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is verified through simulation results.