

무인항공기 운항의 배속 시뮬레이션을 위한 조종사 의사결정 모델 연구

Research on Pilot Decision Model for the Fast-Time Simulation of UAS Operation

박승현·이현웅·이학태*

인하대학교 항공우주공학과

Seung-Hyun Park · Hyeonwoong Lee · Hak-Tae Lee*

Department of Aerospace Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

[요 약]

무인항공기의 운항에 필수적인 탐지 회피 시스템은 침입기를 감지하여 위험을 벗어나는 데에 필요한 선회 또는 상승/하강 기동의 범위를 제시하여 준다. 본 연구에서는 탐지 회피 알고리즘으로 NASA에서 개발한 DAIDALUS (detect and avoid alerting logic for unmanned systems)를 활용하였다. DAIDALUS는 회피 기동의 범위만을 보여주기 때문에, 실제로 기동의 정도와 방향, 그리고 회피 후 원래 경로나 임무로 복귀하는 시점은 무인항공기 조종사의 결정 사항이다. 이는 실제로 조종사가 개입하는 실시간 HiTL (human-in-the loop) 시뮬레이션에서는 유용하나, 조종사의 개입 없이 시뮬레이션을 진행해야 하는 배속 시뮬레이션에서는 조종사의 의사결정 모델이 필요하다. 본 연구에서는 DAIDALUS 결과를 바탕으로 기동하는 조종사의 의사결정 모델을 제시하고 이를 RTCA (radio technical commission for aeronautics) MOPS (minimum operational performance standards)에서 제시하는 표준 조우 벡터를 이용하여 검증하였다. 조우 형상에 따라 최대 위험도가 달라지지만, loss of well clear 상황은 발생하지 않았다. 이러한 모델은 무인항공기가 포함된 대규모 교통량에 대한 배속 시뮬레이션에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

[Abstract]

Detect and avoid (DAA) system, which is essential for the operation of UAS, detects intruding aircraft and offers the ranges of turn and climb/descent maneuver that are required to avoid the intruder. This paper uses detect and avoid alerting logic for unmanned systems (DAIDALUS) developed at NASA as a DAA algorithm. Since DAIDALUS offers ranges of avoidance maneuvers, the actual avoidance maneuver must be decided by the UAS pilot as well as the timing and method of returning to the original route. It can be readily used in real-time human-in-the-loop (HiTL) simulations where a human pilot is making the decision, but a pilot decision model is required in fast-time simulations that proceed without human pilot intervention. This paper proposes a pilot decision model that maneuvers the aircraft based on the DAIDALUS avoidance maneuver range. A series of tests were conducted using test vectors from radio technical commission for aeronautics (RTCA) minimum operational performance standards (MOPS). The alert levels differed by the types of encounters, but loss of well clear (LoWC) was avoided. This model will be useful in fast-time simulation of high-volume traffic involving UAS.

Key word : Automatic detect and avoid system, Pilot decision model, DAIDALUS, UAS, UAV.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.1.1>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 12 January 2021; Revised 28 January 2021

Accepted (Publication) 26 February (28 February 2021)

*Corresponding Author; Hak-Tae Lee

Tel: 010-6765-0208

E-mail: parkseunghyun95@gmail.com

I. 서론

최근 무인기에 관한 관심이 커짐에 따라, 국내외에서 무인기를 유인기가 다니는 민간공역에 운용하는 방안에 관해서 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 무인기는 여러 요소 때문에 민간공역에서 운용되는 것에 어려움이 있는데, 그 중의 예로는 기체에 조종사가 없으므로 유인기처럼 see and avoid가 불가능하고, 신뢰할 수 있는 C2 (command and control) 기반이 아직 없어서 무인기와 연결이 끊기는 등의 위험 요소가 존재한다는 것이다. 또한 다양한 무인기의 크기와 성능 때문에 일반화가 어렵다는 점이 존재한다 [1].

최근 국내에서는 국토부의 지원으로 무인기를 민간공역에 운용하는 것과 관련 연구가 진행되고 있으며, 서울 TMA에서 무인기의 C2 링크 단절 때 비상절차에 관한 연구가 진행되고 있다. 인하대학교에서는 C2 링크 단절 비상절차를 따르는 무인기가 있을 때 관제사의 작업부하와 항공기 운용 안전성 평가를 진행함으로써 개발된 절차를 검증하는 연구를 하고 있다 [2].

해외의 경우 RTCA Special Committee 228에서는 DO-365의 MOPS와 같이 무인기 최소 운용요건을 수립하기 위하여 노력 중이다[3], NASA에서는 이 요건을 적용하여 DAA (detect and avoid)를 적용한 DAIDALUS (detect and avoid alerting logic for unmanned systems)를 개발하고, 해당 라이브러리를 JAVA와 C++언어로 공개적으로 배포하고 있다 [4]. 이 알고리즘을 통해, 무인기가 민간공역에서 운용될 수 있도록 한다는 것이 목적이다.

모기 (ownship)와 침입기 (intruder)에 대한 위치/속도정보를 DAIDALUS에 입력하면, 위험도, 추천 회피 방향, 회피 고도/회피 헤딩을 알려주게 된다. 이때 위험도는 DO-365 MOPS 문서에서 DWC (DAA well clear)로 정의되며 이는 수평속도와 수직속도만을 이용하여 위험도를 계산한다.

RTCA에서는 최소운용요건 이외에도 무인항공기의 DAA 시스템을 검증할 수 있는 다양한 테스트 벡터들을 제공한다 [5]. Head-on encounter, convergence at fix, convergence with fast-moving jet, overtake encounter, encounter with maneuvering target, designer cases, representative sample from LL data sets로 총 7개의 종류의 조우 상황과 305가지의 다양한 속도, 고도, 성능을 가진 항공기들에 대한 테스트 벡터들을 제공한다. 각각의 조우 상황에 대한 모기와 침입기의 위치와 속도를 알려주고, 해당 시나리오를 실행했을 때 나타나야 하는 DWC 위험도를 알려준다.

본 논문에서는 관제 시뮬레이션을 위하여 개발된 5 자유도 시뮬레이터를 사용하여 MOPS 테스트 시나리오 4개를 선정하여 실행해보면서 조종사 의사결정 모델을 개발하였다. 위험 상황에서 위험 요소가 해결되었는지 알아보면서 조종사 의사결정 모델을 사용하여 성공적으로 자동회피를 하는지 알아본다.

II. 조종사 의사결정 모델

2장에서는 침입기에 대한 탐지 및 자동 회피 시스템에 관해서 설명한다. 사용한 DAIDALUS에 대한 설명과, 이를 어떻게 활용하여 조종사 의사결정 모델을 개발하였는지에 대해서 다루게 된다. 그리고 MOPS Test Vector를 사용하여 검증한 결과를 보여준다.

2-1 DAIDALUS

DAIDALUS는 앞서 서론에 언급했다시피, NASA에서 만든 오픈소스 라이브러리이다 [4]. 본 연구에 사용된 DAIDALUS의 버전은 2020년에 릴리즈 된 2.0.2 버전이며, JAVA버전을 사용하였다.

DAIDALUS에 필요한 정보는 모기/침입기의 이름, 위도, 경도, 고도, 방위각, 수평속도, 수직속도이며, 이를 사용해서 주변 항공기와의 위험단계를 계산한다. DAIDALUS에서의 침입기와의 위험도는 RTCA DO-365 MOPS 문서에서 DWC의 기준으로 계산된다 [3]. 해당 문서에서 well clear의 정의는 두 대의 항공기가 적절한 거리와 적절한 시간 동안 떨어져 있어서 위험 요소가 없다는 것이다.

계산에 관련된 식은 다음 식(1)부터 (5)와 같고, 각 위험단계에 대한 기준은 아래의 표 1에서 확인할 수 있다.

$$\tau_{mod} = \frac{-(r^2 - DMOD^2)}{rr} = \frac{DMOD^2 - r^2}{d_x v_{rx} + d_y v_{ry}} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (2)$$

$$d_h = h_2 - h_1 \quad (3)$$

$$\dot{r} = \frac{d_x v_{rx} + d_y v_{ry}}{r} \quad (4)$$

$$HMD = \begin{cases} \sqrt{(d_x + v_{rx} t_{CPA})^2 + (d_y + v_{ry} t_{CPA})^2} & \text{for } t_{CPA} \geq 0 \\ -\infty & \text{for } t_{CPA} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$t_{CPA} = -\frac{d_x v_{rx} + d_y v_{ry}}{v_{rx}^2 + v_{ry}^2} \quad (6)$$

식 (1)부터 식(6)까지의 x와 y는 램버트 정각투영법 (lambert conic conformal projection)을 사용해서 지정된 기준으로부터의 거리를 계산한다. 식(1)의 τ_{mod} (modified tau)는 수평면상에서 분리 기준 위반으로부터 남은 시간을 뜻하며, DMOD (distance modification)는 τ_{mod} 를 계산하는 데에 사용되는 파라미터로 무인기 중심으로 최소 위험 범위를 의미한다. 식 (2)은 상대 수평 거리, 식(3)은 상대 수직거리를 계산하는 식이며, 식 (4)은 상대

표 1. DWC Phase 1 기준 값
Table 1. DWC Phase 1 Threshold Values.

Threshold	Preventive Alert	Corrective Alert	Warning Alert	Loss of Well Clear
τ_{mod}^*	35 sec	35 sec	35 sec	35 sec
HMD^*	4,000 ft	4,000 ft	4,000 ft	4,000 ft
d_h^*	700 ft	450 ft	450 ft	450 ft
Time of Alert	55 sec	55 sec	25 sec	0 sec

속도를 계산하는 식이다. 식 (5)의 HMD (horizontal miss distance)는 수평면상 분리 기준 위반으로부터 남은 거리, 식(6)의 t_{CPA} 는 항공기 두 대 사이로부터 최소 근접거리 (closest point of approach)까지의 남은 시간을 뜻한다. Time of alert는 모기와 침입기의 위치와 속도에 기반을 두어 해당 시간만큼 위치를 예측하는데 사용되고, 해당 값들은 MOPS에서 제시한 minimum average time of alert의 값을 사용하였다. 이 시간 내에 계산된 τ_{mod} , HMD, d_h 3개의 값이 식(7)과 같을 때, 표1의 threshold 기준, *로 표시된 값보다 작을 때 위험단계가 있다고 판단된다. 위험도는 preventive, corrective, warning, loss of well clear 순으로 높아지고, 무인기는 충돌을 의미하는 LoWC (loss of well clear)가 일어나지 않도록 회피해야 한다.

$$0 \leq \tau_{mod} \leq \tau_{mod}^*, HMD \leq HMD^*, |d_h| \leq d_h^* \quad (7)$$

본 논문에서 사용된 기준은 phase 1로, 일반 비행공역과 항공상 비행 중인 항공기를 대상으로 지정된 기준을 사용하였다. 2020년 3월에 발간된 DO-365A MOPS 개정판 문서에는 기준이 완화되어 접근 관제구역 (TMA)에 적용 가능한, phase 2 기준이 제정되었다 [6]. DAIDALUS 2.0.0버전부터 phase 1과 2를 선택해서 설정할 수 있지만, 본 논문에서는 결과에 대한 변수를 최대한 줄이고 조종사 결정모델의 경향성을 보는 게 목적이기 때문에 phase 1로 설정하고 개발 및 검증을 진행하였다.

DAIDALUS는 위험 상황이 발생했을 때, 수평과 수직 방향 중 어느 방향으로 기동해야 할지 방향을 추천해준다. 본 논문에서는 지시명령 (directive guidance) 결과 값을 사용하는데, 이것은 위험 상황을 벗어나게 해주는 고도와 헤딩을 알려준다. 이때의 고도와 헤딩을 회피제안 (resolution)이라고 한다. 이 resolution은 침입기가 회피 기동을 안 한다고 가정하고, 지정된 앞으로의 시간 (lookahead time)동안 충돌 위험을 해소시킬 수 있고, 기하적으로 가까운 헤딩과 고도를 알려준다 [7]. Resolution이 안 나올 경우도 있는데, 모기의 성능이 부족하거나 침입기와 거리가 너무 가까워서 충돌 위험을 벗어나지 못할 때 infinity 혹은 not a number의 결과가 나오게 된다. 이때 모기의 성능을 설정하기 위해서 configuration 파일로 DAIDALUS에 설정한다. 고도와 헤딩 resolution뿐만 아니라 수평/수직속도에 대한 resolution도 주어지는데, 본 논문에서는 사용하지 않았다.

2-2 Auto DAA

본 논문에서는 조종사 의사결정 모델을 Auto DAA (automatic detect and avoid)라고 명명하였다.

DAIDALUS를 적용하기 위하여 사용된 시스템은 항공교통 관제 시뮬레이션을 위해 개발된 BADA (base of aircraft data) 기반 5 자유도 항공기 운동 모델을 사용하였다 [8]. 해당 논문에서 개발된 시스템은 C++기반의 환경에서 개발이 되었고 검증을 했으나, 본 논문에서 사용된 시스템은 JAVA 기반으로 재개발한 시스템이다. 재개발 이후에 제어기 관련 수정사항을 거쳐서 본 논문에 사용하였다. 원래에는 제어기에서의 고도를 추종할 때, 고도 오차와 속도 오차를 결합해서 받음각 (angle of attack) 명령을 만들어냈다. 이 대신 수직속도 명령을 만들어, 수직속도에 추종하도록 하였다. 현재 모델링 되어있는 기체들은 Boeing B737-800과 Cessna C172이고, 해당 기체들의 BADA PTF Performance File을 참고하여 기준 수직속도를 정하였다. 또한 시뮬레이션의 조건에 따라 원하는 수직속도를 코드 혹은 UI상에서 설정할 수 있도록 개발하였다.

관제 시뮬레이터는 배속 시뮬레이션 모드와 일반모드로 설정할 수 있으며, 전반적인 구조는 전반적인 구조는 조종사 모듈, CWP (controller working position) 관제사 모듈, SDP (surveillance data processing system) 레이더 스테이션 모듈, 서버 모듈로 이루어져 있다 [9].

배속 시뮬레이션 모드에서는 조종사 모듈이 서버에서 시나리오를 받아 실행하게 되면, 설정한 배속만큼 빠른 속도로 5 자유도 시뮬레이션이 실행된다. 트래픽에 대한 데이터는 모듈 내의 상위 단에서 관리가 되고, 시뮬레이션 업데이트 주기의 1/10 주기로 각각의 항공기의 DAIDALUS에 트래픽으로 입력된다.

일반 모드는 서버에서 시나리오들을 조종사 모듈에 나눠 지정해서 보내면, 조종사 모듈에서는 해당 시나리오를 실행하게 된다. 조종사 모듈에서 항공기들은 5 자유도 시뮬레이션을 실행하게 되고, 주기는 10Hz이다. 이렇게 실행된 항공기들은 1초에 한번씩 비행 정보 데이터 (flight data)를 서버에 전달하게 되고, 서버는 이 데이터를 SDP모듈에 전달하게 된다. SDP는 전달 받은 비행 정보 데이터를 모아서 서버에 전달하게 된다. 서버는 이 데이터들을 surveillance 데이터로 연결된 모든 조종사 모듈에 전달하게 되고, 실행되고 있는 항공기는 데이터를 받아 DAIDALUS에 트래픽으로 입력하게 된다.

실제 항공기 레이더 범위를 묘사하기 위하여, 거리/상하각/좌우각 범위를 지정하고, 그 범위 안에 들어오는 트래픽만 DAIDALUS에 추가하는 기능을 적용하였다. 본 논문에는 수평 각도 $\pm 180^\circ$, 수직 각도 $\pm 15^\circ$, 거리 20 nmi로 트래픽 범위를 설정하였다.

DAIDALUS에 트래픽이 추가될 때, 현재 모기의 속도/위치와 더불어 일정 범위 내에 있는 트래픽을 DAIDALUS에 추가하고 위험 요소를 계산하게 된다. 이때 계산된 위험 요소가 corrective alert 이상일 때, Auto DAA가 실행된다. Auto DAA는 기본적으로 비행 모드를 autopilot 모드로 바꿔서 경로점

(waypoint) 비행모드 대신 속도/헤딩/고도 명령으로 기체를 제어한다. 속도 명령으로는 기존에 따르던 속도를 유지하고, DAIDALUS에서 나온 resolution을 사용하여 헤딩 명령과 고도 명령을 내려 회피하게 된다. 위험도가 발생했을 때 보통의 경우는 헤딩/고도에 대한 resolution과 추천하는 회피 방향까지 계산된다. 하지만 본 논문에서는 헤딩 명령으로 회피하는 것을 우선으로 하고, 특정한 조건을 만족할 때만 고도 명령을 인가하는 방식을 택하였다. 조건은 다음과 같다.

- (1) 헤딩 명령이 인가되는 경우
 - 모기와 침입기의 수평 방향 오차가 30도보다 클 때
 - 혹은 헤딩 resolution만 존재, 고도 resolution은 없을 때
- (2) 고도 명령이 인가되는 경우
 - 모기와 침입기의 수평 방향 오차가 30도 이하일 때
 - 혹은 고도 resolution만 존재, 헤딩 resolution은 없을 때
- (3) 현재 상태 유지 명령이 인가되는 경우
 - 위험도가 corrective alert 이상인데 고도/헤딩 resolution이 둘 다 없을 때

Corrective alert 이상의 경보가 발생하고, 헤딩과 고도 resolution이 모두 존재할 때, 수평 방향 오차 조건을 확인하게 된다. 만약 헤딩 혹은 고도 둘 중 하나의 resolution이 없을 때는 resolution이 존재하는 방향으로 회피하게 되며, 헤딩과 고도 둘 다 resolution이 없는 상황에서는 3번의 조건을 따라 현재 고도와 헤딩을 유지하는 명령을 5초간 유지하는 명령을 인가한다.

1번 조건을 만족하여 헤딩 명령이 인가된 경우, 논문 [10]을 참고하여 최대한 효과적이고 안전하게 계획대로 경로 복귀하기 위해 t_{CPA} , 최소 근접거리까지 시간 동안 헤딩 명령을 유지한다.

2번 조건을 만족했을 때 고도 명령이 인가된다. 이때 고도 명령은 500 ft씩 단계별로 주어진다. 위 방향으로 주어졌을 때는 500 ft씩 올림하고, 아래 방향으로 명령이 주어졌을 때 500 ft씩 내린다. 예를 들어, 만약 3,700 ft 위 방향으로 resolution이 주어지면 4,000 ft로 올림 하게 되고, 아래 방향으로 3,700 ft가 주어지면 3,500 ft 명령으로 주어지게 된다. 이렇게 하는 이유는 고도 명령이 resolution대로 주어지고 경로 복귀를 시도할 때, 고도 분리가 확실히 안 되어 경보가 발생하는 경우가 있었기 때문이다. 따라서 이 방법으로 확실히 고도 분리가 되도록 하였다.

고도 명령이 인가되었을 때 기체가 해당 고도 명령 조건에 도달하는 순간 경로 복귀를 한다. 하지만 이 경우 원래 비행계획상의 고도로 복귀하려는 순간 다시 경보가 일어날 수 있기 때문에 원래 가려고 했던 경로점까지 고도 명령이 유지하고, 그 다음 경로점부터는 비행계획의 고도를 따른다. 특정한 상황에서 헤딩과 고도 명령이 연달아 주어졌을 때는 t_{CPA} 혹은 고도 조건 둘 중 하나를 만족시키면 경로점 비행 모드로 전환이

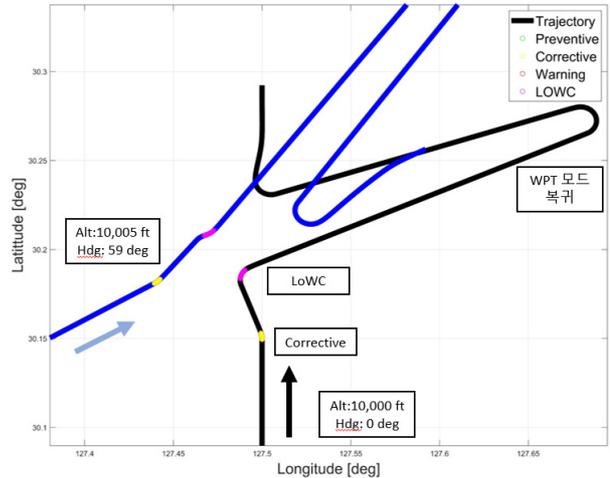


그림 1. Auto DAA 헤딩 명령만 주어진 결과
Fig. 1. Auto DAA Result With Heading Command.

되어 경로 복귀를 한다.

2번 조건에서 모기와 침입기의 수평 방향 오차가 30도보다 작을 때, 고도 명령을 인가하는 이유는 침입기도 DAIDALUS를 탑재한 무인기라고 가정했을 때 생길 수 있는 문제 때문이다. 비행 절차상 같은 고도에 같은 속도로 비행하고 있다면 헤딩 명령만으로는 여러 차례의 위험 경보와 자동회피를 반복하며 장시간 경보 해소가 안 될 수도 있다. 그림 1은 모기와 침입기 모두 Auto DAA를 활성화하고, 고도 명령 없이 헤딩 명령만 인가하게끔 실행해본 결과이다. 그 결과 쉽게 회피하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 조우 상황에서 corrective alert가 발생하고 자동회피를 하지만 두 번째 조우 때 LoWC가 발생한다. 그리고 최종 경로점까지 250초면 끝날 시나리오에서 900초 가까이 긴 시간 동안 선회하다가 끝나는 것을 확인할 수 있다.

2-3 MOPS Test Vector

Auto DAA의 검증은 RTCA 발간한 MOPS for DAA System 문서의 appendix P에 포함된 무인항공기의 충돌 회피를 검증하기 위한 충돌 조우 시나리오, test vector를 사용하였다 [5]. 관제 시뮬레이터에 현재 모델링 된 항공기는 B737-800과 C172로, 해당 항공기들의 성능으로 실행 가능하고, warning alert까지 나타나는 시나리오를 선택하여 검증을 진행하였다. 선택된 시나리오는 head-on H11, converge C6, overtake O11, maneuver M1로 총 4개이다. H11은 침입기가 모기와 마주 보는 방향으로 상승하면서 빠른 속도로 접근한다. C6는 침입기가 같은 고도/속도를 유지하고 60도의 교차각으로 접근한다. O11은 모기가 수평비행을 유지하고 있을 때 침입기가 후방 아래에서 빠른 속도로 상승해오면서 추월을 한다. M1은 모기와 침입기가 같은 고도/속도로 평행하게 비행하다가, 침입기가 좌측으로 침범해오는 시나리오이다. 해당 테스트에서 위험상황일 때 무인기만 회피기동을 하도록 설정하였다.

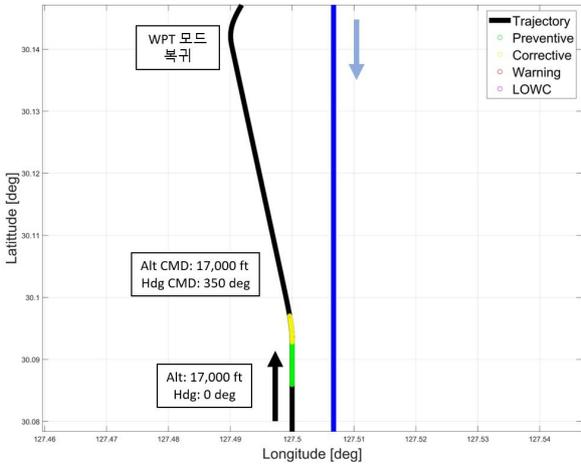


그림 2. MOPS Head-On, H11 Auto DAA 비행데이터
Fig. 2. MOPS Head-On, H11 Auto DAA Flight Data.

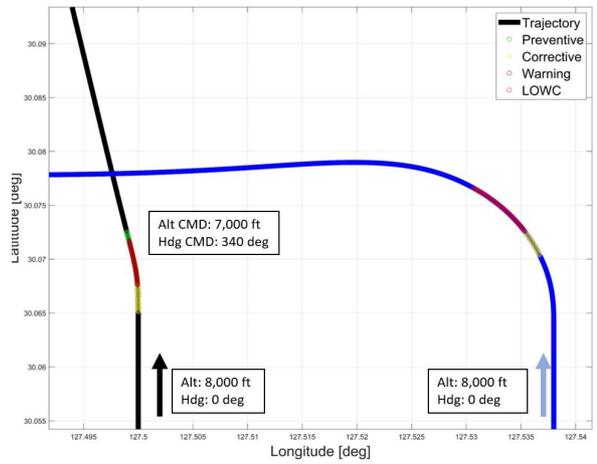


그림 5. MOPS Maneuver, M1 Auto DAA 비행데이터
Fig. 5. MOPS Maneuver, M1 Auto DAA Flight Data.

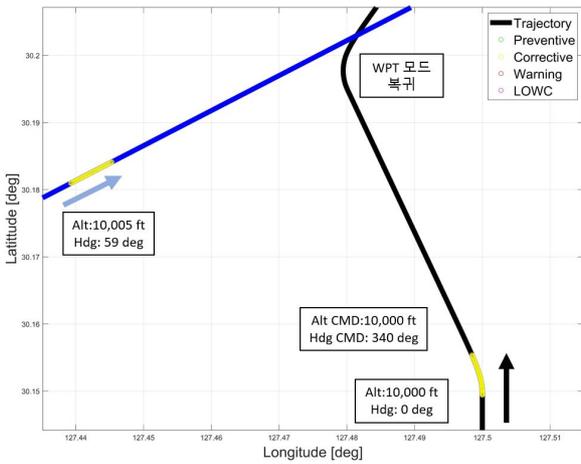


그림 3. MOPS Converge, C6 Auto DAA 비행데이터
Fig. 3. MOPS Converge, C6 Auto DAA Flight Data.

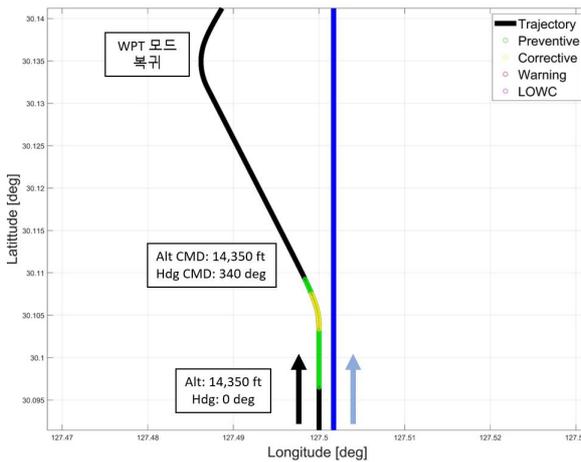


그림 4. MOPS Overtake, O11 Auto DAA 비행데이터
Fig. 4. MOPS Overtake, O11 Auto DAA Flight Data.

그림 2부터 그림 5는 선택된 MOPS 시나리오를 사용하여 Auto DAA를 검증해본 결과를 보여준다. 검은색으로 표시된 것이 무인기의 궤적이고, 파란색이 침입기의 궤적이다. 경고는 초록색이 preventive alert, 노란색이 corrective alert, 빨간색이 warning alert, 그리고 보라색이 LoWC 이다.

먼저 head-On 시나리오의 그림 2를 보면, 우측에서 마주면서 다가오는 침입기를 탐지하고 먼저 preventive alert가 발생한다. 그리고 corrective alert가 발생하자마자 왼쪽으로 피한다. heading 명령이 주어졌으므로 t_{CPA} 만큼 heading 명령을 유지하다가 경로 복귀를 한다. 이때 복귀를 시도할 때 아무런 경보가 뜨지 않음을 확인할 수 있다.

그림 3은 좌측에서 같은 고도와 같은 속도로 다가오는 항공기를 탐지하고 corrective alert가 바로 발생한다. 이때 DAIDALUS는 오른쪽 대신 왼쪽으로 회피하라고 추천한다. 이 상황에서는 왼쪽으로 회피하는 것이 알맞다고 볼 수 있다. 그 이유는 오른쪽을 회피할 경우 속도와 고도가 같으므로 위험 요소가 한 번에 사라지지 않고 경보, 회피를 반복하다가 더 위험한 상황을 초래할 수 있기 때문이다. 같은 시나리오로 일반인들에게 resolution과 위험단계를 보여주는 디스플레이 창을 보여주고 테스트해 본 결과, 거의 모든 사람이 오른쪽으로 회피를 했다. 따라서 일반인보다 DAIDALUS가 더 나은 판단을 했다고 볼 수 있다. 그리고 DAIDALUS의 버전 1로 같은 테스트를 진행하였을 때 오른쪽을 선택하는 경향이 있었는데, 버전 2로 업데이트되면서 해당 상황에 알맞게 알고리즘이 수정되어 왼쪽으로 추천해주는 것으로 추측된다. 해당 시나리오에서는 heading 명령이 주어졌기 때문에 t_{CPA} 만큼 autopilot 모드 명령이 유지되다가 경로 복귀를 한다. 이 상황에서도 복귀 시 경보가 발생하지 않고, 원활하고 안전하게 원래의 경로로 복귀하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 침입기가 후방/아래 그리고 살짝 오른쪽 오프셋을 두고 빠른 속도로 다가오고 있을 때의 시나리오이다. 먼저

preventive alert가 나타난다. 그 이후 corrective alert일 때 모기와 침입기의 heading 오차가 30도 이하이지만, 수직 방향으로 resolution이 나타나지 않게 된다. 따라서 heading 방향으로 기동하게 되어 왼쪽으로 회피하게 되고, heading을 t_{CPA} 만큼 유지하다가 복귀한다.

침입기가 모기 앞을 가로지르도록 갑자기 기동하였을 때의 시나리오 M1의 결과는 그림 5이다. 침입기가 방향을 틀었을 때, 먼저 corrective alert가 발생한다. heading 명령이 인가되고, 순간적으로 침입기와의 heading 오차가 30도 이하로 됨에 따라 고도 명령도 인가되는 것을 볼 수 있다. heading과 고도 명령이 둘 다 주어졌지만 빠르게 위험 상황 해소가 안 되는 것을 볼 수 있다. 이 경우에는 warning alert가 약 4초 동안 발생하고 위험도가 사라진다. 하지만, LoWC 상황이 아니기 때문에 잘 회피했다고 볼 수 있다. 그림에는 보이지 않지만, 고도 명령 조건을 만족하고 경로 복귀가 진행된다.

III. 결 론

본 연구에서는 무인기 배속 시뮬레이션을 위한 조종사 의사결정 모델을 제시했다. DWC 지표를 이용하여 계산된 위험도를 사용하였고, DAIDALUS에서 계산된 resolution에 특정한 조건을 정하여, 특정한 조건에 따라 heading 명령 혹은 고도 명령을 인가하도록 하였다. 원래의 경로로 복귀 이전에, heading 명령이 주어질 때는 t_{CPA} 만큼 명령을 유지하도록 하였고, 고도 명령이 주어질 때는 고도 명령 조건을 만족할 때까지 현재 속도와 heading을 유지하도록 하였다. MOPS test vector를 사용하여 검증해본 결과 효율적이고 안전하게 회피하고 원래 경로대로 복귀하는 것을 확인하였다. 모기 혹은 침입기가 갑자기 선회하여 조우하는 경우에는 위험도가 증가하는 경향을 보였으나, 충돌 직전의 LoWC 상황은 일어나지 않았음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 조종사 의사결정 모델을 활용해 추후에는 [12] 논문에서 제시한 센서 범위를 Auto DAA에 적용해보고, 대규모 교통량의 시나리오에서 항공기들이 본 논문의 조종사 모델을 통하여 탐지 및 회피를 할 수 있는지 알아보는 연구를 진행할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부의 ‘무인비행체 안전지원 기술개발사업 (21ATRP-C108186-07)’ 연구의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] M. Consiglio, J. Chamberlain, C. Mufioz and K. Hoffler, “Concept of integration for UAS operations in the NAS,” in *Proceedings of 28th International Congress of the Aeronautical Sciences ICAS 2012*, Brisbane: Australia, pp. 1-13, 2012.
- [2] H. Lee, S. H. Park, H. T. Lee, B. Park and J. H. Han, “Lost C2 link contingency procedures for Seoul TMA and assessment on safety and controller workload,” in *Proceeding of the 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, San Antonio: TX, pp. 1-6, 2020.
- [3] DO-365: Minimum operational performance standards (MOPS) for detect and avoid (DAA) systems, RTCA Special Committee 228, 2017.
- [4] NASA. DAIDALUS V2.0.2 [Internet]. Available: <https://github.com/nasa/daidalus>.
- [5] RTCA, Inc. (2017). DO-365: Minimum operational performance standards (MOPS) for detect and avoid (DAA) systems. RTCA Paper No. DO-317B. RTCA, Inc., Washington, DC
- [6] DO-365A: Minimum operational performance standards (MOPS) for detect and avoid (DAA) systems, RTCA Special Committee 228, 2020.
- [7] NASA. DAIDALUS Directive Guidance [Internet]. Available: <https://nasa.github.io/daidalus/#directive-guidance>
- [8] J. S. Kang, H. J. Oh, K. Y. Choi, and H. T. Lee, “Development and validation of an improved 5-DOF aircraft dynamic model for air traffic control simulation,” *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 20, No. 5, pp. 387–393, Oct. 2016.
- [9] H. J. Oh, K. Y. Choi, and H. T. Lee. “Design of air traffic control simulator for validation of next generation system and airspace management system of civil UAV,” in *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 2014 Autumn Conference*, JeJu: Korea, pp. 1637-1640, 2014.
- [10] H. G. Lyu. Separation management of unmanned aircraft using fast-time simulation, MA. dissertation, Inha University, Incheon, Korea, 2019.
- [11] B. S. Park, and H. T. Lee, “Simple model for aircraft trajectory generation using BADA,” in *Proceeding of 2016 The Korean Navigation Institute Conference*, Seoul: Korea, Vol. 20, pp. 190–193, 2016.
- [12] H. Lee, B. Park and H. Lee, “Analysis of alerting criteria and DAA sensor requirements in terminal area,” in *Proceeding of the 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, San Diego: CA, 2019, pp. 1-9.



박 승 현 (Seung-Hyun Park)

2019년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2021년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
※ 관심분야 : 항공교통관리, 무인항공기, M&S



이 현 웅 (Hyeonwoong Lee)

2016년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2018년 8월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
2018년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 박사과정
※ 관심분야 : 항공교통, M&S



이 학 태 (Hak-Tae Lee)

2006년 1월 : Dept. of Aeronautics and Astronautics, Stanford University 공학 박사
2006년 12월 ~ 2013년 8월 : 미국 NASA Ames 연구소 연구원
2013년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 교수
※ 관심분야 : 항공교통관리, 무인항공기, 항공기 설계