

자율형 운항 알고리즘 설계 연구

Autonomous flight Algorithm Design

이대용*, 강자영**

Lee-Dae Yong*, Kang-Ja Young**

요 약

항공기 분리보증은 자유비행의 핵심요구사항이다. 본 논문에서는 위임권한 확대, 공역 효율성 문제 등 자유비행의 실증적 문제해결을 위해 자율형 운항 알고리즘을 제안하고, 제안된 알고리즘과 포텐셜 필드 알고리즘을 모델링하여 두 가지 조건의 시나리오 상황에서 항공기 성능 데이터를 활용, 알고리즘 성능 및 충돌해결과 운항 자율성 효과 등을 측정하였다. 실험결과 자유비행 공역 하에서 자율형 운항 알고리즘이 포텐셜 필드 알고리즘보다 알고리즘 성능, 충돌해결, 운항 자율성 효과 측면에서 우수하였다.

Abstract

Airborne separation assurance is a key requirement for Free Flight. This paper is to propose autonomous flight algorithm, such as extended authority of delegation, efficiency of airspace issue to deal with the empirical solution for free flight, and to measure flight efficiency and conflict detection and resolution (CD&R) by utilizing flight performance data under the two circumstances of scenario with the modeling of proposed algorithm and potential field algorithm.

The results show that the autonomous flight algorithm is superior to the potential field algorithm under the circumstances of free flight airspace in terms of algorithm performance, CD&R, and flight efficiency.

Key words : Free flight, CD&R, Autonomous flight algorithm, Delegation

I. 서 론

항공기 충돌탐지 및 회피분야는 자유비행의 중요한 연구 분야로 ADS-B 기반의 항공교통관제기관과 조종사간의 비행안전성 보장을 위한 다양한 충돌회피 알고리즘이 연구되고 있다. 하지만 자유비행 환경에서 분리보증을 위한 위임권한의 확대[1], 공역 효율성 문제[2]-[4]와 더불어 등 실제 비행환경에서의 요구되는 다양한 문제점들을 해결할 충돌회피 알고

리즘의 연구는 현재까지 미진한 것이 사실이다. 본 논문에서는 자유비행 공역 운항환경에서의 실증적인 문제해결을 위한 새로운 자율형 운항 충돌회피 알고리즘을 제안하고 제안된 알고리즘을 적용하여 충돌해결과 항공기 최적기동 측면에서 항공기 간의 위임(delegation) 수준(level)에 따른 최적 회피기동과 회피기동 시 소요되는 운항시간, 거리, 연료소모량 등의 상관관계를 규명하고자 한다.

* 한국항공대학교 항공운항관리학과 박사과정(수료)

** 한국항공대학교 항공체계시험인증연구센터/교수

· 제1저자 (First Author) : 이대용

· 투고일자 : 2012년 1월 20일

· 심사(수정)일자 : 2012년 1월 23일 (수정일자 : 2012년 2월 22일)

· 게재일자 : 2012년 2월 28일

II. 항공기 위치측정 및 충돌회피

2-1 항공기 위치측정

유클리디안 거리법(Euclidian Distance)으로 n차원 공간에서의 두 점간의 거리를 이용해 유사도를 계산할 수 있다. 이는 오차의 제곱의 합을 최소화 하는 모수 추정기법으로, 직교좌표계로 나타낸 점 $p = (p_1, p_2 \dots, p_n)$ 와 $q = (q_1, q_2 \dots, q_n)$ 이라고 가정하면 두 점 p, q 사이의 유클리드거리는 다음과 같다.

$$d(p,q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \cdot \quad (1)$$

또 벡터 p 의 유클리드 norm 값은 p 와 좌표계 원점 거리를 의미하며, 유클리드 norm을 이용하여 두점 p, q 의 거리는 식(2)(3)(4)(5)으로 나타낸다.

$$\| P \| = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2} = \sqrt{P \cdot P} \quad (2)$$

$$q - p = (q_1 - p_1, q_2 - p_2, \dots, q_n - p_n) \quad (3)$$

$$\| q - p \| = \sqrt{(q - p) \cdot (q - p)} \quad (4)$$

$$\| q - p \| = \sqrt{\| p \|^2 + \| q \|^2 - 2p \cdot q} \cdot \quad (5)$$

위 식에 따라 N차원 유클리드 거리법은

$$d(p,q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} \quad (6)$$

이다[5]. 또 두 벡터 사이의 공간적인 거리뿐만 아니라 각까지 고려하여 두 벡터사이의 거리를 구하는 방법은 vector-angular distance 방법으로 $\delta(p,q)$ 이면

$$1 - \left[1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{x \cdot y}{|x||y|} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{|x \cdot y|}{\sqrt{3.255^2}} \right) \right] \quad (7)$$

과 같이 나타낼 수 있다[6]. 위의 유클리디안 거리법과 최소자승법을 적용, 특정위치의 두 항공기의 위치를 추정할 수 있다.

2-2 항공기 충돌탐지

자유비행공역에서의 두 항공기의 충돌을 나타내는 것은, 두 비행체 사이의 거리가 보호거리(Protection Distance)보다 작을 경우 충돌로 정의하고 있다. 두 항공기의 거리는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

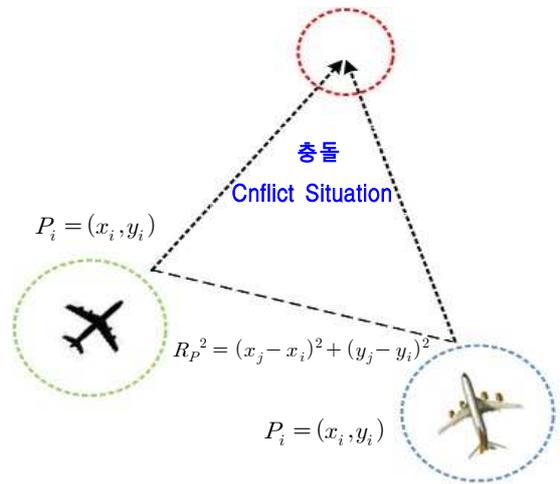


그림 1. 자유비행 충돌정의
Fig. 1. Definition of conflict for free flight.

그림 1에서 $R_p = \| P_j - P_i \|$ 이며 P 는 공간 좌표를 의미하며, (i, j) 는 각각의 항공기 위치를 나타낸다. 2차원 공간에서 두 항공기의 충돌유무는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\| P_j - P_i \| = R_p < Protection\ Distance \quad (8)$$

(충돌 상황)

$$\| P_j - P_i \| = R_p = Protection\ Distance \quad (9)$$

(경계면 운항)

$$\| P_j - P_i \| = R_p > Protection\ Distance \quad (10)$$

(안전거리 확보)

$P_i = \text{position of } i\text{-the plain} = (X_i, Y_j)$
 $P_j = \text{position of } j\text{-the plain} = (X_i, Y_j)$

$$R_P^2 = (X_i - X_j)^2 - (Y_i - Y_j)^2 < \text{Protection Distance}$$

(충돌 상황) (11)

$$R_P^2 = (X_i - X_j)^2 - (Y_i - Y_j)^2 = \text{Protection Distance}$$

(경계면 운항) (12)

$$R_P^2 = (X_i - X_j)^2 - (Y_i - Y_j)^2 > \text{Protection Distance}$$

(안전거리 확보) (13)

3차원 평면상에서 나타낸다면, 다음과 같다.

$P_i = \text{position of } i\text{-the plain} = (X_i, Y_j, Z_k)$
 $P_j = \text{position of } j\text{-the plain} = (X_i, Y_j, Z_k)$

유클리디안 거리법 및 최소자승법을 이용한 두 항공기 사이의 거리를 예측 시 다음과 같은 가정을 한다.

첫째 모든 항공기는 최종 목적지까지 직진 수평비행을 한다. 둘째 시뮬레이션 하에 항공기는 비행역학적 요소를 고려하지 않는다. 또 항로 예측 시 추가적으로 다음의 변수를 고려한다.

- 항공기 초기 좌표 = $P_o(P_{oi}, P_{oj})$
- 항공기 속도 = $V(V_i, V_j)$
- 항공기 방향 = $A(A_i, A_j)$
- 항공기 예측 시간대역(sec) = $T(0 < T < 1000)$

항공기의 좌표, 속도, 운항방향, 예측 시간대역을 바탕으로 공간상에서 비행경로 예측 및 충돌탐지가 가능하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$[P_{oxj} + \|A_j V_j\| \cos(a_j) T] - [P_{oxi} + \|A_i V_i\| \cos(a_i) T]^2 + [P_{oyj} + \|A_j V_j\| \sin(a_j) T] - [P_{oyi} + \|A_i V_i\| \sin(a_i) T]^2 = R_P^2$$

(14)

여기서 A_i, A_j 는 단위 벡터이므로 생략이 가능하다. T는 독립변수이므로, 위의 수식을 T의 함수로 변환하면

$$[P_{oxj} + \|V_j\| \cos(a_j) T] - [P_{oxi} + \|V_i\| \cos(a_i) T]^2 + [P_{oyj} + \|V_j\| \sin(a_j) T] - [P_{oyi} + \|V_i\| \sin(a_i) T]^2 = R_P^2$$

(15)

$$[P_{oxj} - P_{oxi} + \|V_j\| \cos(a_j) T - \|V_j\| \cos(a_j) T]^2 + [P_{oyj} - P_{oyi} + \|V_j\| \sin(a_j) T - \|V_j\| \sin(a_j) T]^2 = R_P^2$$

(16)

$$[\|V_j\| \cos(a_j) T - \|V_j\| \cos(a_j) T] = X$$

(17)

여기서 '($P_{oxj} - P_{oxi}$) = 초기의 두 비행체 사이의 거리'이므로 P_{oxij} 로 표현할 수 있으며, 또한 식(17)은 $[\|V_j\| \cos(a_j) - \|V_j\| \cos(a_j)] = X$ 축에 상대 속도이므로 V_{xij} 로 표현할 수 있다. 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[P_{oxij} + V_{xij} T]^2 + [P_{oyij} + V_{yij} T]^2 = R_P^2$$

(18)

위를 시간대역 T에 대해서 전개하면,

$$P_{oxij}^2 + P_{oyij}^2 + 2(P_{oyij} V_{yij} + P_{oxij} V_{xij}) + (V_{xij}^2 + V_{yij}^2) T^2 = R_P^2$$

(19)

으로 표현할 수 있다. T를 제외한 모든 변수가 상수이므로, 식(19)에 현재의 좌표와 속도를 입력하게 되면, 그림 2, 3, 4와 같은 시간에 따른 2차원 함수로 표현할 수 있다.

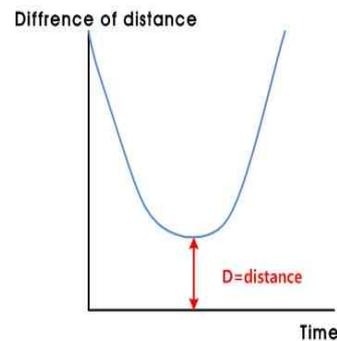


그림 2. 안전거리 확보
 Fig. 2. Secure of safety distance.

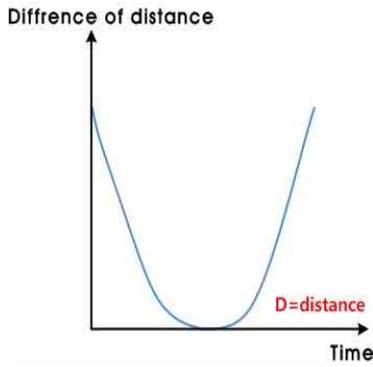


그림 3. 경계면 운항
Fig. 3. Boundary flight.

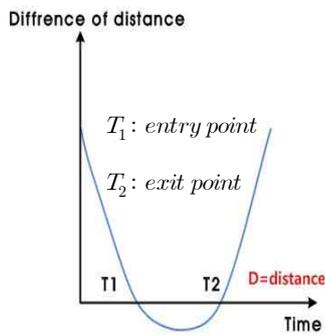


그림 4. 충돌상황
Fig. 4. Conflict situation.

기하학적 해석을 통해 ‘ d = 두 항공기간의 거리’ d 이며 (t_1, t_2) 는 충돌이 발생하는 시간대역을 나타낸다. 특히 t_1 는 침입기와 충돌까지 남은 거리를 의미한다. 이는, 두 항공기 사이의 거리를 시간 T 에 따라 최소 자승법(least square method)을 적용한 것이며, 이를 바탕으로 다음의 조건을 기술할 수 있다.

$$P_{oxij}^2 + P_{oyij}^2 + 2(P_{oyij} V_{yij} + P_{oxij} V_{xij}) + (V_{xij}^2 + V_{yij}^2) T^2 < R_P^2 \quad (20)$$

(충돌상황)

$$P_{oxij}^2 + P_{oyij}^2 + 2(P_{oyij} V_{yij} + P_{oxij} V_{xij}) + (V_{xij}^2 + V_{yij}^2) T^2 = R_P^2 \quad (21)$$

(경계면 운항)

$$P_{oxij}^2 + P_{oyij}^2 + 2(P_{oyij} V_{yij} + P_{oxij} V_{xij}) + (V_{xij}^2 + V_{yij}^2) T^2 > R_P^2 \quad (22)$$

(안전거리 확보)

본 연구에서는 ADS-B를 활용하여 상대 항공기(침입기)의 위치와 속도를 알 수 있다는 가정 하에, 다음

과 같이 나타낼 수 있다.

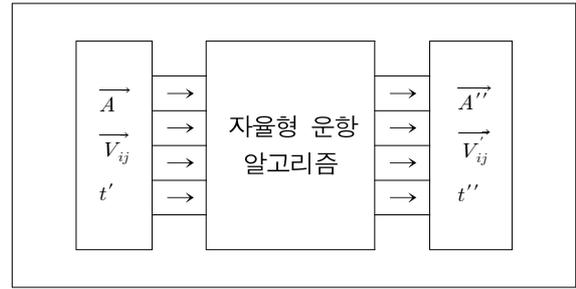


그림 5. 알고리즘 아키텍처
Fig. 5. Algorithm architecture.

- Ownership, Intruder 상대위치 : A
- Ownership 속도벡터 : V_i
- Intruder 속도벡터 : V_j
- 목적점 도착시간 : t''

위의 목적점 A'' 는 다음과 같이 정의되며, $A'' = S + t''(V_i - V_j)$ 이고 이를 통해 (t', V_i', V_j'') 를 얻을 수 있고, 충돌탐지 후 회피기동을 수행 할 수 있다. 위의 수식을 바탕으로 만약 침입 항공기의 향로를 예측할 수 있으며, 충돌상황과 비 충돌상황을 인지할 수 있다. 이는 특정구역 내에 유클리디안 거리법을 적용하여 충돌하지 않는 항공기에 대해서도 항상 충돌을 대비하는 단순한 방법에 비해서 더욱 효율적이라고 말할 수 있다.

2-3 항공기 상대추정

항공기 상태정보 추정방법에 따라 다양한 알고리즘 생성 및 결과가 파생될 수 있기 때문에 항공기 상태정보 추정기법은 충돌회피 알고리즘 설계 및 적용과 운항 최적화 측면에서 가장 중요한 고려요소라 할 수 있다.

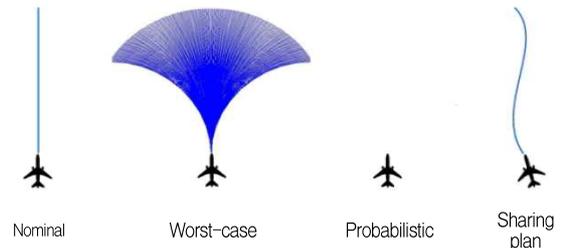


그림 6. 자유비행 환경에서의 충돌정의[7]

Fig. 6. State variable estimation

그림 6은 4가지의 항공기 상대정보 추정방법을 나타내고 있다. 첫째, Nominal 방법은 불확실성에 대한 직접적인 고려없이 짧은 시간에 하나의 궤도만을 예측하여 최적의 경로를 추정하는 방법이다. 두 번째, Worst-case 방법은 항공기 기동범위를 제한하고 항공기 상대정보 및 충돌상황을 예측하는 기법으로 가장 보수적인 추정기법이다. 세 번째, Probabilistic 방법은 확률적 기법을 통해 항공기의 추종궤적을 예측하는 것으로 위험평가를 위한 일부조건을 제한하고, 불확실성을 추가한다. 또 비행경로에 대한 일부 오차를 추가하는 방법과 모든 비행경로에 가중치를 두어 전체 경로의 집합을 구하는 방법을 포함한다. 넷째 Sharing plan 방법은 ADS-B 등의 수신된 경로계획을 항공기 상호간에 공유하고 모든 항공기의 상태추정 변수와 운항계획을 제공받아 충돌회피를 수행하는 방법으로 가장 진보된 상태정보 예측방법이라고 할 수 있다[7],[8].

2-4 항공기 충돌회피 방법

항공기의 충돌이 예측될 경우에 충돌회피를 위한 최적기동이 필요하다. 이 경우 기존의 논문에서는 특정 각도 등을 미리 지정해두고, 이 각도의 경우에 대해서만 회피 기동이 가능한 경우를 찾거나, 혹은 기하학적 모델링을 통해서 초기에 회피 기동 경로를 설정하는 방법이 적용되어 왔다. 그러나 전자의 경우, 단순한 경우의 수로 회피기동을 제한하므로, 회피기동의 다양성을 확보하기 어렵고, 후자의 경우는 갑작스럽게 발생하는 강등조건 시(제 3의 항공기의 침입, 제한구역, 금지공역의 설정(낙뢰, 태풍, 화산폭발 등 자연재해 포함)에 대응이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 본 방법에서는 상태추정 기법 중 Sharing plan 기법을 활용하여, 자율형 운항 알고리즘을 설계하고, 매트랩을 통한 시뮬레이션을 수행, 다양한 조건에서

의 충돌탐지 및 회피를 위한 최적기동 및 성능평가를 수행하고자 한다. 자율형 알고리즘은 새롭게 발생하는 상황에 유동적으로 대처가 가능하며 최적 회피기동을 위한 다양성을 확보와 충돌감지 및 회피기동 시점을 실제 항공기 운항환경과 동일하게 실험자가 자유롭게 설정할 수 있다는 장점이 있다.

2-5 선회각을 이용한 충돌회피

선회각을 이용한 회피기동 알고리즘은 최소 자승법을 이용한 예측 식을 이용하여, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{oxij}^2 + P_{oyij}^2 + 2(P_{oyij} \|V_j\| \sin(a_j) - \|V_i\| \sin(a_i)) + P_{oxij} + (\|V_j\| \cos(a_j) - \|V_i\| \cos(a_i))T + (\|V_j\| \cos(a_j) - (\|V_i\| \cos(a_i))^2 + \|V_i\| \sin(a_j) - (\|V_i\| \sin(a_i))^2)T^2 - R_p^2 = d \quad (22)$$

여기서 d는 두 비행체의 보호구역 사이의 거리를 나타내는 것으로, 0일 경우를 가정하면 두 항공기는 보호거리를 경계로 회피 기동이 이루어지게 된다. 또 (-) 음수일 경우에는 보호구역을 침범하게 된다. 그러므로 d를 cost-function으로 가정하여 최적의 선회각 a_i 값을 구하는 식을 다음과 같이 간단히 정의할 수 있다.

$$\{(all \Delta a_i), MIN\{d\}\} = cost\ function \\ \{If\ several\ d=0\ is\ \exists,\ MIN(a_i) = cost\ function\}$$

여기서 최적의 d값이 여러 개 나올 경우에는 선회각이 최소가 되는 값을 선택하도록 해야 한다. 또 다양한 cost-function을 다르게 적용할 수 있으며, 최적의 cost-function을 찾는 것 또한 최적기동을 위한 자율형 알고리즘의 중요한 내용이기도 하다.

표 1. 매트랩 프로그래밍 사례

Table 1. Example MATLAB programming.

```

회피 중 비행항로와 원래비행 항로사이의 각도
계산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.
Vi=Z(4:6)*Z(7);
F_path = norm(Z(11:13) - Z(1:3));
ag = acosd( sum(Vi.*F_path)/cal_len(Vi)*cal_len(F_path));
ag는 현재 비행기의 진행방향과, 원래의 항로
사이의 각도를 계산 하는 식이다.
Z = Path(특점 시점의)
Cal_len() : 벡터의 합의 크기를 구하는 함수.
function [v_length]= cal_len(X)
    v_length=abs(sqrt(sum(X.^2)));
end
    
```

2-6 선회각과 비행속도 결합을 통한 충돌회피

비행 속도와 선회각 회피기동을 결합한 알고리즘 또한 2-2~5의 예측 식을 활용하며, 두 가지 경우 모두 충족하는 최적의 선회각 a_i 와 비행속도 V_i 를 선택하면, 다음과 같이 간단히 정의할 수 있다.

$$\{(all \Delta a_i), MIN\{d\} (all \Delta V_i), MIN\{d\}\} = cost\ function$$

$$\{If\ several\ d = 0\ is\ \exists, MIN(a_i) = cost\ fuction\}$$

III. 자율형 운항 알고리즘 성능측정

3-1 항공기 성능 파라미터

표 2는 B-767 항공기의 성능지표[9]를 사용하여 자율형 운항 알고리즘의 최적기동 및 운항 효율성을 측정하였다.

표 2. B-767 항공기 성능지표

Table 1. B-767 Aircraft Performance index.

계수	정의	성능
W	Norminal weight(Klb)	331
V_o	Aircraft cruise Mach number(TAS(Kts)@FL310)	0.80 (469)
ρ	Air density@FL310(slugs/ ft^3)	0.857E-3



그림 7. B-767 항공기[10]
Fig. 7. B-767 Aircraft.

3-2 실험방법

직접적인 항공기 운용이 제한되는 현실을 고려하여 앞서 본 실험을 위해 제안한 자율형 운항 알고리즘과 포텐셜 필드 알고리즘[11]으로 MATLAB 시뮬레이션 모델을 개발하여 알고리즘 간 성능 비교측정을 수행하였으며, 충돌해결을 위한 최적회피기동 수행 시 항공기 간의 단독회피기동 또는 협력적 회피기동 방법을 규명하였으며 일련의 충돌회피 수행 시 소요되는 운항시간을 비교하였다. 3차원 공간의 1,000,000 NM^3 의 공역(X, Y, Z축 각 100NM)을 가정하고 충돌감지거리를 12NM로 설정, 2가지 경우의 조우상황 시나리오에 대한 충돌감지 및 회피기동 시뮬레이션을 수행하였다. 위의 컴퓨터 시뮬레이션을 위해서 항공기의 속도, 선회각, 회피기동 감지거리, 보호구역, 항로, 비행방향 등이 고려되었으며, 바람요소와 선회 시 발생하는 양력침하 현상과 추력증가 등의 비행 역학적 요소는 생략하였다.

3-3 실험결과

자율형 알고리즘과 기존의 충돌회피 알고리즘의 궁극적인 차별성은 알고리즘의 성능의 우수성뿐만 아니라 충돌회피의 일련의 과정 수행 시 위임권한 확대를 통해 항공기 성능(performance=cost function) 우수와 관련하여 조종사가 자율적으로 회피기동을 수행 할 수 있으며, 특히 단독회피기동, 협력적 회피기동 등을 선택할 수 있다는 것이다. 특히 동일한 항공기의 성능조건에서 단독회피기동을 통한 충돌해결이 공역사용에서 더욱 효율적이며, 비행안전성, 도미노

효과 발생 등 불확실성 억제측면에서 우수하다는 것이 일련의 선행연구결과에서 입증되었다[12][13].

(1) 알고리즘 성능측정

자율형 운항 알고리즘의 성능측정을 위해 포텐셜 필드 알고리즘을 대조군으로 설정, 일련의 충돌회피 과정에서 소요되는 운항시간과 비행거리 등을 비교하였다.[그림 8, 9, 10, 11] 운항시간 측면에서는 5%과 비행거리 측면에서는 12% 단축되는 것으로 나타났다. 이는 충돌회피 수행 시 운항 효율성 측면에서 자율형 운항 알고리즘이 포텐셜 알고리즘보다 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

(2) 충돌해결

자율형 운항 알고리즘은 90도 조우상황 시 선회각 1~2 상황에서 전체 2건의 충돌 미 해결이 발생하였으며, 45도 조우 시는 선회각 1 에서 전체 1건의 미 해결이 발생하였다. 포텐셜 필드 알고리즘은 90도 조우상황 시 선회각 1~13 상황에서 전체 13건의 충돌 미 해결이 발생하였으며, 45도 조우 시는 선회각 1~20 에서 전체 20건의 미 해결이 발생하였다. 이는 일련의 충돌해결을 위하여 자율형 운항 알고리즘 보다 포텐셜 필드 알고리즘이 좀 더 급격한 선회각 적용을 통한 충돌회피 과정을 수행하여야 하며 이는 자율형 운항 알고리즘이 비행안전성 및 효율성 측면에서 더 안전하다 것을 입증할 수 있는 것이다[표 3 참조].

(3) 운항 자율성

자유비행하의 위임권한 측면에서 운항 자율성은 항공기 성능, 최적기동을 위한 중요한 고려요소이다. 자율형 운항 알고리즘은 90도 조우상황 시 선회각 1~17, 45도 조우 시는 1~8 상황에서 두 항공기가 협력적 회피기동을 통해 충돌회피를 수행하며, 그 이상의 선회각 적용 시는 항공기 단독으로 회피기동을 수행하여 충돌을 해결하였다. 하지만 포텐셜 필드 알고리즘은 90도 조우 시는 1~30 전 영역에서협력적 회피기동, 45도 조우 시는 22 이상 선회각 적용 시에만 단독회피기동을 통해 충돌해결이 가능하였다.

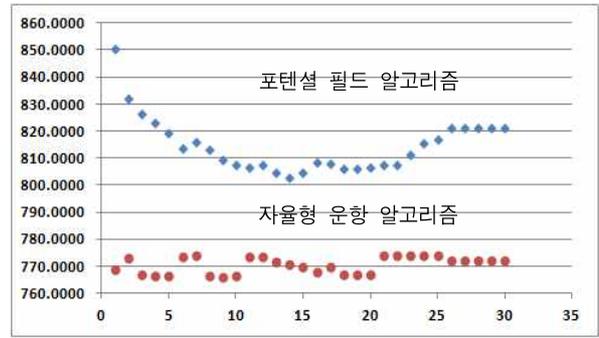


그림 8. 성능측정[운항시간/90도 조우]
Fig. 8. Perform evaluation[time/90deg encounter].

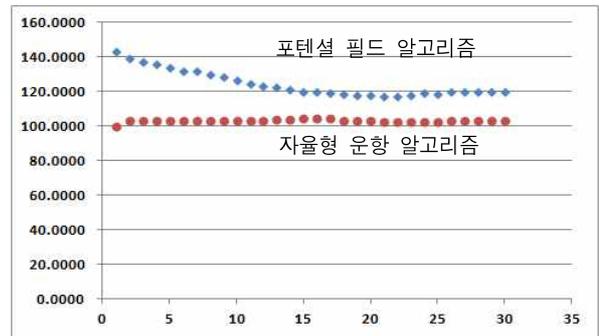


그림 9. 성능측정[운항거리/90도 조우]
Fig. 9. Perform evaluation[distance/90deg encounter].

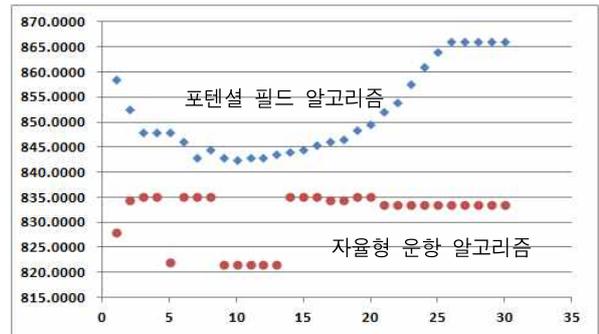


그림 10. 성능측정[운항시간/45도 조우]
Fig. 10. Perform evaluation[time/90deg encounter].

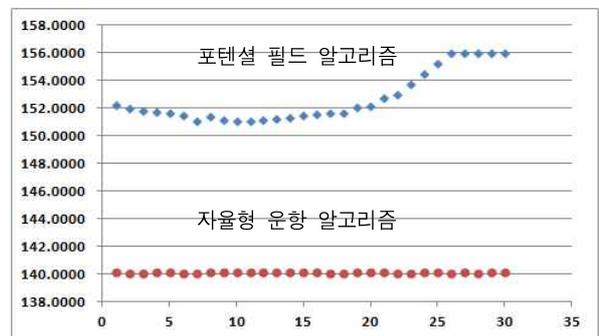


그림 11. 성능측정[운항거리/90도 조우]
Fig. 11. Perform evaluation[distance/90deg encounter].

표 3. 실험결과

Table 3. The result of simulation.

선회각	자율형 운항				포텐셜 필드			
	90도 조우		45도 조우		90도 조우		45도 조우	
1°	U	C	U	C	U	C	U	C
2°	U	C	R	C	U	C	U	C
3°	R	C	R	C	U	C	U	C
4°	R	C	R	C	U	C	U	C
5°	R	C	R	C	U	C	U	C
6°	R	C	R	C	U	C	U	C
7°	R	C	R	C	U	C	U	C
8°	R	C	R	C	U	C	U	C
9°	R	C	R	I	U	C	U	C
10°	R	C	R	I	U	C	U	C
11°	R	C	R	I	U	C	U	C
12°	R	C	R	I	U	C	U	C
13°	R	C	R	I	U	C	U	C
14°	R	C	R	I	R	C	U	C
15°	R	C	R	I	R	C	U	C
16°	R	C	R	I	R	C	U	C
17°	R	C	R	I	R	C	U	C
18°	R	I	R	I	R	C	U	C
19°	R	I	R	I	R	C	U	C
20°	R	I	R	I	R	C	U	C
21°	R	I	R	I	R	C	R	C
22°	R	I	R	I	R	C	R	I
23°	R	I	R	I	R	C	R	I
24°	R	I	R	I	R	C	R	I
25°	R	I	R	I	R	C	R	I
26°	R	I	R	I	R	C	R	I
27°	R	I	R	I	R	C	R	I
28°	R	I	R	I	R	C	R	I
29°	R	I	R	I	R	C	R	I
30°	R	I	R	I	R	C	R	I

○ R : Resolution(충돌해결) ○ C : Cooperation(협력회피기능)
 ○ U : Unsolved(충돌 미 해결) ○ I : Indipendence(단독회피기능)

IV. 결론 및 향후 연구과제

추후 연구에서는 자율형 운항 알고리즘을 이용하여 다중 충돌상황을 가정하여 충돌회피를 수행하고 경로점 복귀 과정에서의 시간제약 조건을 적용하여 실제 운항환경과 유사한 시나리오를 추가적으로 설

정하여 실험을 수행할 예정이다. 이는 추후 다수의 항공기가 특정 공역에서 충돌회피를 수행하고 이에 수반되는 운항결과를 바탕으로 공역 효율성을 측정하는 모델로 발전시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Delegation of separation assurance to aircraft: towards a framework for analyzing the different concepts and underlying principles, Karim Zeghal & Eric Hoffman, ICAS 2000 CONGRESS, 2002.

[2] 이대용, 강자영, “자유비행 공역 혼잡성 측정에 관한 연구” *한국항공학회 학술발표 논문집 Vol. 15*, No. 1 pp. 145-149. 2011. 10. 21

[3] 이대용, 강자영, “자유비행 분리보증 효율성 측정 모델연구” *한국항공학회 논문지 제 15 권 제 6 호* pp. 976-985. 2011. 12. 31

[4] Airspace company measurement an air traffic control simulation analysis Parimal Kopardekar, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, USA Albert Schwartz, Sherri Magyarits, and Jessica Rhodes, Federal Aviation Administration, *Atlantic City, NJ, USA*, pp. 1-6

[5] Elena Deza & Michel Marie Deza (2009) *Encyclopedia of Distances*, page 94, Springer.

[6] J.Matas, R. Marik, and J.Littler, "On representation and matching of multi-colored objects," *Proceeding of IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.726-732, 1995

[7] Survey of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods James K. Kuchar, Lee C. Yang, Department of Aeronautics and Astronautics Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA 02139, 1997

[8] Unmanned Aircraft Collision Detection and Resolution: Concept and Survey B. M. Albaker, N. A. Rahim UMPEAC Research Centre, Faculty of Engineering University of Malaya 50603 Kuala Lumpur, Malaysia

[9] Anon, "User Manual for the Base of Aircraft (BADA), Rev. 3.1," *Eurocontrol, EEC Note No. 25/98*, November 1998.

[10] www.aerospaceweb.org

- [11] iFly Deliverable D5.1 Comparative Study of Conflict Resolution Methods Version: Final (1.2), G. Chaloulos(ETHZ), J.Lygeros(ETHZ), I. Roussos(NTUA), K. Kyriakopoulos(NTUA), E. Siva(UCAM), A. Lecchini-Visintini (ULES), P. Casek (HNWL), pp. 6-10. 22 November 2007
- [12] Performance evaluation of airborne separation assurance for free flight, AIAA2000-4269, pp. 8. 14 - 17 August 2000
- [13] 이대용, 강자영, “자유비행 충돌회피 알고리즘 비교분석” *한국항공운항학회 논문지 제 19 권 제 4 호* pp. 83-90. 2011. 12. 31

이 대 용 (李大龍)



2008.3~2010. 3 : 한국 항공대학교
항공운항학과 박사과정(수료)
1999.3~2005.6 : 해군 조종사 근무
2002. 5 : 사업용 조종사
2006. 8 ~ 현재 : 방위사업청
공무원 재직
관심분야 : 충돌회피 알고리즘,

자유비행 분리보증, 운항 효율성, 최적기동 등

강 자 영 (姜自永)



2002.3.~현재 : 한국항공대학교
항공운항학과 교수
2009.3.~2010.2. : Univ of Illinois,
Urbana Champaign 연구 교수
2002.6.~2002.3. : ETRI 책임연구원/팀장
1996.2.~1997.3. : Northrop Grumman
파견 연구원
1993.7.~1993.8. : Lockheed Martin 파견 연구원
1979.3.~1984.8. : ADD/DTAQ 연구원
1992.6. : Auburn Univ, AE/Ph.D.
관심분야 : CNS/ATM, 비행안정성 및 조종성, 항공체계공학