항공교통관리 기술의 개발동향

김유단, 이금진
서울대학교 항공우주공학과

Trends on Air Traffic Management System Technology

Youdan Kim and Kum-Jin Lee

I. 서 론

미 연방교통국(FAA)에 따르면 미국 내의 항공교통 이용자 수는 급증하고 있는데 반해 항공교통 시스템의 개선은 이를 따라가지 못하고 있어서, 이러한 추세는 계속될 경우 2015년쯤에는 7~10일에 한번 꼴로 항공기 사고가 발생할 것이라고 예측하고 있다. 이에 따라 최근에 들어 항공교통 시스템의 개선을 위해 다양한 노력들이 진행 중이며, 몇몇 부분에 있어서는 가시적인 성과를 얻고 있다[1].

최근에 들어 기존의 항공교통 통제 시스템을 개선하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있는데, 기본적으로 현재 사용되고 있는 하드웨어와 소프트웨어를 개선하기 위한 노력이 진행 중이다. 또한, 더 나아가 항공기 사고율을 낮추고, 공항의 수용력을 높이기 위한 자동통제 지원시스템의 개발이 진행 중이다. 본 논문에서는 현재 진행되고 있는 항공교통관리 기술의 개발동향과 앞으로 진행될 연구방향에 대해서 살펴보고자 한다.

II. 본 론

2.1 기존시설의 개선

미국 항공교통 통제 시스템의 구성에 대해 살펴보면, 미국 항공교통 시스템이 책임지고 있는 비행공간 영역에 따라 공항 관제탑(Airport Tower), 터미널 레이더 진입 관제시설(Terminal Radar Approach CONTROL, TRACON), 항로 관제소(Enroute Center)로 나뉜다. 공항타워에서는 지상에 있는 항공기

들을 감시하고, 항공기 이착륙 허가를 주고, TRACON에서는 공항으로부터 40마일 정도의 비행공간의 항공기들을 통제함으로써 이착륙을 돕는다. 항로 관제소에서는 공항과 공항사이에서 높은 고도를 유지하며 비행하고 있는 항공기를 통제한다. 현재 미국에는 총 185개의 TRACON과 20여 개의 항로 관제소가 있으며, 수천여 명의 관제사들이 24시간 항공기들을 관리하고 있다.

기존 항공교통 시스템의 개선작업은 하드웨어, 특히 화면표시 장치와 레이더 시스템에 대한 개선과 이를 둘러싼 소프트웨어에 대한 개선이 중심을 이루고 있다[1-10]. 현재 TRACON에서는 항공기를 추적하는 레이더 시스템으로 ASR(Airport Surveillance Radar)를 사용하고 있으며, 여기서 수집된 정보를 ARTS(Automated Radar Terminal System)라는 시스템을 통해 처리한 후 DEDS(Data Entry and Display Subsystems)라는 화면표시 시스템을 통해 관제사들에게 제공된다. 한편, 항로관제소에서는 레이더 시스템으로 ARSR(Air Route Surveillance Radar)를 사용하고, 이를 PVD(Plan View Display)를 통해 관제사들에게 제공한다.

위와 같은 시스템들은 너무 오래되어 신뢰성에 대해 많은 문제가 제기되고 있다. 예를 들면 하드웨어적으로 기능과 용량의 한계가 문제되고 있으며, 소프트웨어들도 오랜 시간에 걸쳐 많은 사람들에 의해 변형되어 그 구조에 대한 이해가 어렵게 되었다. 화면표시 시스템은 너무 자주 다운이 되었으며, 레이더 시스템도 점점 복잡해지는 항공교통 상황을 다루는데 한계가 드러나게 되었다. 이러한 문제점들에 대한 개선을 위한 노력

으로 1984년 “The Advanced Automation System”이라는 방대한 계획이 시작되었다. 이 계획은 전 미국의 항공교통 시스템의 다양한 문제를 한꺼번에 해결하려는 시도였다. 그러나 이 계획은 엄청난 비용과 시간을 소비한 후 실패로 끝났는데, 그 이유는 보유하고 있는 능력 이상으로, 또 필요 이상으로 너무 많은 개선을 한꺼번에 이루려고 했으며, 다양한 인간공학적 요소(human factor)에 대한 고려가 부족했던 것이 실패의 주요 원인이었다[1].

이 계획이 실패한 후에 보다 실제적이고 체계적인 계획이 진행되었는데, 1994년부터 시작된 DSR(Display System Replacement)과 STARs (Standard Terminal Automation Replacement System) 개발이 그것이다. 이들은 각각 항로 관제소와 TRACON을 위한 화면표시 시스템을 개선하고자 하는 계획이며, STARs는 ARTS에 대한 개선까지 포함하고 있다. 이와 함께 각각의 시설에서 사용하는 레이더 시스템에 대한 개선, 데이터 통신에 대한 개선 등도 진행되고 있다.

2.2 자동 항공교통관제 지원시스템

기존 시설을 보완하여 시스템을 개선하고자 하는 노력은 시스템의 노화로 인한 안전성 감소를 해결해 줄 뿐, 항공기 사고율을 낮추고 공항의 수용력을 높이기 위한 보다 적극적인 해결책은 되지 못한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 최근에는 다양한 자동 관제 지원시스템의 개발이 추진되고 있다.

2.2.1 개발동향

1990년대 초반 TCAS(Traffic alert and Collision Avoidance System)라는 시스템이 개발되었으며, 현재 이 시스템은 많은 항공기에 의무적으로 장착하도록 되어 있다. 이 시스템은 조종석 화면(cockpit display)을 통해 5~40마일 떨어진 곳의 항공기들의 상황을 파악하고, 항공기간 간격 침범이나 충돌이 감지되면 경고를 주며, 이에 대한 해결책으로 상승 또는 하강형태의 명령을 제공한다. 이와 비슷한 개념으로 평행하게 착륙하는 두 항공기간의 충돌에 대한 경고와 회피기동을 제공하는 AILS(Airborne Information for Lateral Spacing)이 개발되었다. 그 밖에 PRM(Precision Runway Monitor system),

GPWS(Ground Proximity Warning System) 등의 시스템이 개발되었다. 이들은 각각 평행 활주로, 지형 방해물에 대한 비행 안전성 확보를 위한 시스템들이다.

이러한 시스템과 함께 개발된 항법시스템으로 ADS(Automatic Dependent Surveillance)가 있다. 이 시스템은 GPS를 통해 항법정보를 얻고, 이를 관제사나 다른 항공기(ADS-B)에 전해 준다. 그러나 이 시스템이 항공교통관제 시스템에 이용되기 위해서는 광역 위성항법시스템(WAAS)의 구축이 필수적이다. 이 시스템은 GPS에 기반을 두고 있기 때문에 일반적인 레이더 정보를 이용하기 힘든 해양상공에서 매우 유용하다. 참고로 현재 해양상공에서는 항공기들 사이의 안전거리를 필요 이상으로 길게 유지하고 있다. 또한, 현재 노화된 VOR 시스템의 개량을 위해 필요한 비용을 고려했을 때 위의 항법시스템은 가격 면에서 유리하다. 그러나 많은 전문가들은 안전성 문제로 인해 최종 영역 레이더 감시 시스템(Terminal Surveillance Radar)은 대체하지 못할 것으로 예상하고 있다[1]. 이외에도 TDWR(Terminal Doppler Weather Radar), ASOS(Automated Surface Observing System), ITWS(Integrated Terminal Weather System) 등이 개발되었다. 이들 중에서 가장 성공적인 시스템이라고 평가 받고 있는 CTAS(Cetner/Tracon Automation System)에 대해서 알아보자.

2.2.2 Center/Tracon Automation System

현재까지 개발된 자동 항공교통관제 지원 시스템 중 가장 성공적인 것으로 CTAS를 들 수 있다. 1980년대 중반 NASA Ames 연구소를 중심으로 개발된 CTAS는 터미널 영역에 있는 관제사들에게 현실적인 정보를 제공해 줌으로써 비행 안정성 증대, 공항 수용력 증가, 관제사의 부담 감소 등에서 매우 성공적인 결과를 보여주고 있다.

CTAS는 크게 3가지 부분으로 구성되어 있다. 비행경로 교통관제센터(ARTCC, Air Route Traffic Control Center)에서 이용되는 TMA(Traffic Management Advisor)와 DA(Descent Advisor), 터미널 영역에서 이용되는 FAST(Final Approach Spacing Tool)가 그것이다. TMA는 스케줄 알고리즘

을 통해 전체 항공기의 총 연착시간이 최소가 되도록 항공기의 착륙순서를 정한다. DA에서는 TMA에서 정해진 도착순서에 따라 하강속도 프로파일, 방향 전환 등의 정보를 제공함으로써 항공기가 안전하게 feeder gate(TRACON 영역으로 들어오는 입구)로 도달 할 수 있게 해 준다.

2.2.3 FAST

FAST는 항공기가 feeder gate에서 최종진 입지점까지 정해진 경로를 따라 진입할 수 있도록 도와준다. 이 시스템은 항공기의 착륙순서를 정해 주는 스케줄러, 항공기의 경로를 생성해 주는 4차원 경로 생성기, 그리고 그래픽 상황보고 인터페이스로 구성되어 있다. 스케줄러와 경로 생성기에 사용되는 알고리즘은 기본적으로는 TMA와 DA에서 사용하는 방식과 동일하다. 그러나 각각의 알고리즘이 사용되는 비행영역이 다르기 때문에 각 시스템에 적합하게 변형되어 사용되고 있다.

(1) 스케줄러

TMA와 DA영역에서 정해진 항공기 스케줄은 항공기가 feeder gate로 들어올 때 까지 많은 오차가 생기가 된다. 또한 예상치 못했던 항공기의 출현, 날씨 등 상태변화로 인해 각 항공기들은 TRACON에 들어오면 다시 FAST에 의해서 착륙순서가 통제되게 된다. 이때 터미널 영역에서는 높은 항공기 밀도로 인해 각 항공기들을 관제할 수 있는 자유도가 매우 떨어지게 된다. 따라서 TMA와 DA영역에서 얼마나 정확하게 항공기가 통제되었느냐에 따라 터미널 영역에서의 효율적인 착륙이 영향을 받게 된다. FAST 내의 스케줄러에 사용되는 알고리즘은 크게 다음과 같은 특징이 있다.

지식기반의 퍼지 알고리즘

비행순서를 정하는 목적은 기본적으로 항공기의 연착시간을 줄이는 것이다. 따라서 적절한 비용함수를 정하고 이를 최적화 하여 비행순서를 정하면 될 것이다. 그러나 이러한 방법은 실제로 관제사들에게 받아들이기 힘든 결과를 주게 되며, 또한 관제사들에게 이러한 과정을 따르도록 하는 것은 그들에게 많은 부담을 주게 된다. 따라서 기존의 전문 관제사들의 지식에 기반을 둔 항공관

제기법과 최대한 비슷한 결정을 하도록 하는 알고리즘이 개발되었는데, 이 방법은 관제사들의 항공관제기법에 기반을 둔 퍼지로직을 만들고, 이에 따라 비행순서를 정하도록 하는 것이다. 퍼지로직의 구성에 이용된 관제사들의 일반적인 항공관제기법 중 몇가지를 살펴보면 다음과 같다.

1. 터미널 영역에서의 항공기간의 추월은 최소화 한다. 즉, 충분한 여유가 있는 지역(터미널 영역 입구)에서 추월이 일어나거나 자연스럽게 추월이 이루어져 관제사에게 부담을 주지 않을 경우 등에 대해서만 허용된다. 실제로 비행순서를 단순히 최적화 하다 보면 많은 항공기간에 추월이 발생하게 되고, 이러한 상황은 관제사에게 많은 부담을 주게 된다.
2. 두 항공기가 in-trail 상태(같은 부분 경로를 비슷한 속도, 최소한의 간격을 유지하면서 비행하는 상태)일 경우에는 두 항공기 사이에 다른 항공기를 배치시키기 위해 두 항공기간의 간격을 늘이지 않는다.

부분경로별 착륙순서 결정

터미널 영역에서는 항공기가 움직일 수 있는 경로가 정해져 있으며, 이는 Fig. 1에서 보듯이 다시 여러 개의 부분경로로 나누어져 있다[7]. 이와 같이 부분경로를 도입함으로써 항공기가 교차할 수 있는 영역이 제한되고, 결국 비행 안전성 증대와 관제사의 부담 감소로 이어진다.

스케줄러에서는 우선 전체 항공기의 착륙순서 문제를 각 부분 경로별 착륙순서 문제로 나눈다. 각 부분 경로별로 현재 위치를 바탕으로 착륙 순서를 정한 후, 이를 전체의 착륙순서 문제로 합쳐나간다. 이와 같은 방

Fig. 1. Merging Trajectory Segments

법은 각각의 부분 경로별로 착륙순서를 정할 때, 각 부분경로별로 상황에 맞게 각각의 알고리즘을 만들 수 있다는 장점을 가지고 있다. 예를 들면 항공기 추월문제의 경우 각각의 부분 경로에 맞는 추월조건을 정할 수 있다. 또한, 각 부분 경로에서의 착륙순서는 현재의 위치 또는 아주 가까운 미래의 위치를 기반으로 정해지기 때문에 현재 항공기 위치에 대한 정보가 충분히 이용될 수 있다는 장점이 있다. Fig. 2에서 보듯이 높은 단계로 올라갈수록 상대적으로 먼 미래의 예상 데이터를 가지고 착륙순서가 정해지게 되므로, 더 많은 오차를 발생시킨다[7].

Fig. 2에서 합류점에서의 항공기 순서결정은 지식기반(Knowledge-based) 퍼지 알고리즘에 의해 이루어진다. 이때 합류점은 최종 합류점과 그 이전의 합류점으로 나눌 수 있다. 각각의 경우에 퍼지로그직에 들어가는 입력들은 다음과 같다.

비 최종 합류점(Non-Final Sequencing):

1. 항공기의 현재위치
2. 표준화된 항공기 사이 간격
3. 항공기간의 상대속도
4. 전 단계에서의 착륙순서

여기서 표준화된 항공기 사이 간격은 다음과 같이 계산된다.

$$NSD(normalized\ separation\ distance) = (Separation\ Distance)/(Required\ Separation)$$

이때 요구되는 항공기 간격(Required

Separation)은 FAA에 의해 Table 1과 같이 정해져 있다[5].

Table 1. Required Separation (Unit: NM)

Leading aircraft type	Tailing aircraft type		
	Heavy	Large	Light
Heavy	4	5	6
Large	3	3	4
Light	3	3	3

최종 합류점(Final Merge Sequencing):

1. 각각의 항공기로부터 유발되는 지연시간
2. 각 항공기가 감당할 수 있는 지연의 정도
3. 최종영역까지의 각 항공기의 거리
4. 전 단계에서의 상대적 착륙순서

여기서 첫 번째 입력변수인 지연시간은 다음과 같이 계산된다. 우선, A, B 두개의 항공기에 대해서 (A, B)의 순서로 착륙하는 경우와, (B, A) 순서로 착륙하는 경우에 대해 각각의 항공기에 발생하는 지연시간을 구한 후, 이를 더해서 두 경우에 대한 총 지연시간을 다음과 같이 구한다.

$$Delay=STA-ETA$$

여기서 ETA(Estimated Times of Arrival)은 비행경로 생성기에 의해서 구해지며, STA(Scheduled Times of Arrival)는 다음과 같이 구해진다.

$$STA=Max(STA\ of\ previous\ plane+ Required\ Separation,\ ETA)$$

지식기반 활주로 할당 알고리즘

단순히 각 활주로에서의 지연시간만을 최소화 하는 것으로는 전체 공항 차원에서의 총 지연시간 감소, 공항 수용능력 증가, 관제사 작업부담 감소라는 자동 항공관제시스템의 궁극적인 목표를 이루기가 어렵다. 따라서 각 항공기에 적절한 활주로를 할당하는 일이 필요하다. 대부분의 경우 항공기들이 특정 활주로에 몰리는 현상이 발생하게 되며, 이러한 상황은 착륙지연, 공항 수용능력 감소, 관제사들의 부담 증가로 이어진다. 이와 함께 때때로 각 항공사의 이해관계에 의해서 항공기가 착륙할 활주로를 변경해야 할 경우가 발생한다. 그러나 대부분의 관제사들은 항공기들의 스케줄링에 신경을 쓰고

Fig. 2. Trajectory Segment Tree

Fig. 3. FAST Scheduler

있기 때문에, 활주로 재할당에는 신경을 쓸 여유가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 FAST에는 활주로 재할당에 대한 부분이 포함되어 있다. 이 시스템에 사용되는 알고리즘 역시 현실적인 적용문제로 인해 최적화 알고리즘이 아닌, 관제사들의 지식을 기반으로 한 알고리즘이 사용된다. 현재의 날씨 등을 포함한 공항의 상태, 경로 생성기에 의해 예측된 각 항공기의 경로, 각 항공기의 경로변경에 대한 자유도, 항공기의 상대적인 착륙순서 등의 여러 정보들을 미리 설정해 놓은 다양한 기준에 의해 평가한 후, 활주로의 재할당 여부와 새롭게 할당될 활주로를 정하게 된다. 위의 내용들을 종합해서 FAST에서 사용되는 스케줄러에 대한 블록선도가 Fig. 3에 도시되어 있다[8].

(2) 4차원 경로 생성기

4차원 경로 생성기는 터미널 비행영역에 정해져 있는 기준 비행상태(비행경로, 비행 속도, 비행고도), 항공기 현재 위치와 속도, 항공기 종류, 바람 속도와 방향 등을 토대로 항공기의 경로를 생성한다. 이러한 경로는 5 초마다 갱신되는데, 만일 항공기 사이의 간격이 기준 이하로 줄어들어 조정이 필요할 경우에는 우선 항공기의 속도를 조절하고, 필요할 경우에는 항공기의 이동경로를 늘이는 방법을 통해 새로운 경로를 생성한다.

2.3 Free Flight

현재의 항공교통 시스템은 항공기들이 정해진 경로를 따라 이동하고, 지상의 관제사들에 의한 비행관제를 통해서 비행 안전성

이 확보되고 있다. 즉, 정해진 비행경로와 고도에 따라 비행함으로써 항공기간의 수평면 및 수직면상의 안전성이 보장된다. 또한, 항공기 속도를 적절하게 조절함으로써 동일 경로를 비행하는 항공기들 사이에서의 추방향 안정성을 보장한다. 그러나 최근에 제시된 자유비행(Free Flight) 개념은 미래의 항공교통 시스템이 나가야 할 방향을 제시해 주고 있다[2]. 항공산업을 위한 기준과 방향을 제시해 주는 비영리 단체인 RTCA(Radio Technical Commission for Aeronautics)에 의한 자유비행의 정의는 다음과 같다.

Safe and efficient flight operating capability under instrument flight rules in which pilots have the freedom to select their path and speed in real time. Air traffic restrictions are only imposed to ensure separation, to preclude exceeding airport capacity, to prevent unauthorized flight through special use airspace and otherwise to ensure safety in flight.

Fig. 4에 현재 사용되고 있는 항공관제 시스템과 자유비행 시스템에 대한 개념도를 보이고 있다[1]. 자유비행(Free flight)의 개념이 성공적으로 도입되면 각 항공기는 자신만의 필요에 의해 최적의 경로로 비행을 할 수 있게 되고, 결국 비행에 소요되는 시간과 연료를 절약, 더 나아가 공해 감소를 가능하게 할 것이다. 그러나 이러한 자유비행이 가능하기 위해서는 아직 해결해야 할 과제가 많이 남아 있다. 우선 앞 절에서 설명한 CTAS 등과 같이 터미널 영역에서의 지상기반 자동 항공관제 시스템의 구축이 필요하다. 한편, 많은 비행영역에서 자유비행이 가능해 진다고 해도 안전상의 이유로 인해 터미널 영역에서는 당분간은 기존의 방법에 의해서 항공기들이 관제될 것이다. 따라서 자동 항공관제 시스템의 완벽한 구축에 의한 터미널 영역에까지의 수용력 증가가 이루어졌을 때야 비로소 자유비행에 의한 효율성이 극대화 될 수 있을 것이다. 자유비행이 가능해 지면 비행 효율성 증가에 의해 많은 이득이 발생하지만, 이와 함께 안전성에 대한 문제가 심각하게 대두될 것이다. 결국, 자유비행이 성공하기 위해서는

Fig. 4. Today's Air Traffic Control System (Above) vs Free Flight System (Below)

충돌감지 및 회피 시스템 개발이 절실하게 요구되며, 이를 위해 최근에 들어서 이에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다[11-29].

2.3.1 충돌 감지 알고리즘

일반적으로 두 항공기 간 거리가 정해진 최소 허용거리 이하로 줄어들 경우 두 항공기가 충돌(conflict)하였다고 말한다.(본 논문에서는 일반적인 충돌의 개념인 collision을 의미하는 것이 아니다) 이때 항공기 간 최소 허용거리는 공항과 공항사이의 비행경로에서 수평면상에서는 5 Nmiles 이고, 수직면상에서는 고도 29000ft 이상일 경우 2000ft 그 이하의 고도에서는 1000ft 이다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다[11].

Fig. 5. Free Flight Protected and Alert Zones

충돌 감지는 단순히 충돌회피 기동을 시작한다는 의미뿐 아니라, 회피 알고리즘 자체에도 큰 영향을 미친다. 즉, 정확한 충돌 시간과 충돌확률의 예측은 충돌회피 기동 시작시간의 결정에 큰 영향을 끼치게 되며, 결국 알고리즘 성능에 영향을 준다. 따라서 충돌감지 알고리즘에 대한 연구는 충돌회피 알고리즘과 함께 연구되어야 한다.

충돌감지에 대한 접근방법은 항공기의 미래 경로예측 방법에 따라 크게 세 가지로 구분된다. 첫째 방법은 항공기의 위치와 속도 등 현재 상태, 바람 등의 기상상태, 항공기의 동역학 모델, 그리고 비행계획 등을 바탕으로 운동방정식의 적분을 통해 미래의 비행경로를 생성하여 항공기의 충돌을 감지하는 방법이 있다. 이 방법은 매우 명확한 방법으로 나중에 설명할 충돌회피 알고리즘에 적용하기 용이하다는 장점이 있다. 그러나 이 접근법은 여러 가지 오차요인을 배제하였기 때문에, 안전성 조건에 적당한 여유를 주는 방법을 통해 오차에 의한 부정확성을 상쇄해 줘야 한다.

이에 반해서 바람에 대한 모델링 오차, 경로 추정오차, 측정오차, 항공기 제어 오차 등을 확률적인 모형을 통해 고려한 후, 이를 바탕으로 충돌확률을 계산하는 접근법이 있다. 각 항공기의 위치, 속도, 제어반응 등에 대해 적절한 확률분포를 주고, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 충돌확률을 계산하는 것이다. Fig. 6에 이러한 방법의 적용 결과를 보이고 있다[14]. 한편, 보다 결정적인(deterministic) 방법으로 간단한 항공기의 위치 방정식을 통해 항공기 간 거리가 최소가 되는 지점을 기하학적으로 계산한 후, 위치와 속도의 측정오차에 대한 확률분포를 줌으로써 충돌확률을 계산하거나[11], 경로 추정 오차를 브라운 운동의 형태[16] 또는

Fig. 6. Horizontal Conflict Probability Contours

Fig. 7. Trajectory Prediction Error Ellipses

시간에 따라 점점 확대되는 오차 타원의 형태[12]로 모델링 후, 이를 이용해 충돌 확률을 계산하는 방법 등이 연구되어 왔다. 일반적으로 경로추정 오차는 측방향 오차와 가로방향 오차가 있는데, Fig. 7에서 보여주고 있듯이 가로방향 오차는 시간에 따라 거의 일정한 반면 측 방향 오차는 시간이 지남에 따라 증가하게 된다[12].

충돌감지에 대한 세 번째 접근방법으로 최악의 경우(worst case)를 고려하는 방법이 있다. 이 방식은 불필요한 회피기동을 야기하는 단점이 있으나, 상대방 항공기의 운동에 대한 다른 방법보다는 비교적 독립적인 상태로 충돌감지 및 회피 시스템을 구축할 수 있다는 장점이 있다.

2.3.2 충돌회피 알고리즘

충돌회피 알고리즘에 관한 연구는 자유비

행(Free Flight)의 실현을 위해 최근에 가장 활발히 연구되고 있는 분야이다. 회피기동을 생성하는 방법에 따라 미리 정해 놓은 회피기동을 이용하는 방법[15], 최적화를 이용한 방법[16-24], force field (또는 potential field) 개념을 이용하는 방법 등으로 나눌 수 있다[25-28]. 그 밖에 각종 기하학적인 방법을 통해 회피기동을 구하는 방법도 연구되었다[29].

우선, 미리 정해놓은 회피기동을 하는 경우를 살펴보자. 이 방식은 초기에 개발된 AILS, GPWS, PRM 등과 같이 매우 짧은 시간영역에서의 충돌방지 알고리즘에 많이 이용되었다. 미리 많은 시험을 통해 최적의 회피기동을 구해놓은 후, 실제로 충돌이 감지되었을 때 미리 정해놓은 회피기동을 실행하는 것이다. AILS는 항공기가 착륙하고 있을 때 이웃의 평행한 활주로를 통해 착륙하고 있는 다른 항공기의 경로에 교란이 발생해 충돌 가능성이 발생할 경우, 미리 정해놓은 상승-회전운동을 실행하여 충돌을 회피한다. GPWS는 지형지물과의 충돌이 감지되었을 경우 상승운동을 실행하게 된다. 이러한 개념의 충돌회피 알고리즘은 간단하기 때문에 조종사들이 쉽게 적용할 수 있고, 반응시간이 매우 빠르기 때문에 짧은 시간영역에서의 충돌방지 시스템에 적합하다. 그러나 평행착륙, 지형지물과의 충돌 등 매우 제한적인 상황에 대한 알고리즘에 적합하고, 기동의 효율성은 떨어진다는 단점이 있다.

Force field 개념을 이용한 충돌회피 기동은, 항공기들은 대전체로 가정한 후, 이들의 반발력에 의한 충돌회피를 항공기에 적용하는 것이다. 또는 적절한 포텐셜 함수를 목적함수로 선택해서 이를 최소화 하는 방향으로 운동하도록 한다[25-28]. 이 방법은 상대적으로 간단한 방법을 통해 효과적인 회피기동을 얻을 수 있다. 그러나 안전거리 확보가 수학적으로 보장되지 않으며, 때때로 실제 항공기의 기동에 적합하지 않은 기동을 생성하게 된다는 단점이 있다. 따라서 이러한 접근방법은 매우 높은 수준은 유도 알고리즘의 개발을 통해 생성된 회피기동을 항공기의 동역학에 적절한 기동으로 바꿔주는 연구가 병행되어야 한다.

최적화 개념을 이용하여 충돌회피 기동을

생성하는 방법은 가장 많은 연구가 이루어진 분야이다. 초기의 TCAS에서도 충돌회피기동을 생성하는데 최적화 개념을 이용하였다. 즉, 회피기동을 상승, 하강, 현재상태 유지의 세 가지로 나누고, 상승 또는 하강 비율도 몇 단계로 미리 나누어 놓은 후에, 간단한 운동방정식을 통해 미래의 충돌을 회피할 수 있는 최소한의 기동을 선택하는 것이다[16]. 이와 같이 몇 가지 패턴을 미리 정해 놓은 후에 상황에 따라 가장 적절한 기동을 선택하는 Rule-based 방법에 대한 연구가 초기에 많이 이루어져 왔다. 이 방법은 비교적 간단하고, 빠르게 회피기동을 제공할 수 있으며, 전문가 시스템(expert system), 인공지능 알고리즘 등을 이용하면 보다 현실적이고, 효율적인 충돌회피가 가능하다. 그러나 최근에는 보다 긴 시간영역에서 효율성을 최대화 하면서 충돌을 회피할 수 있는 방법에 대한 방향으로 연구가 진행되고 있어, 최적화 이론을 이용한 충돌회피 알고리즘이 관심을 받고 있다.

본 논문에서는 최적화 이론을 이용한 충돌회피 알고리즘과 force field 개념을 이용한 충돌회피 알고리즘에 대해서 좀 더 살펴보기로 하자.

(1) 최적화 이론을 이용한 충돌회피 알고리즘 최적화 문제의 구성

최적화 이론을 이용한 충돌회피 알고리즘은 적절한 목적함수를 잡아 이를 최소화 하면서 충돌을 회피함으로써 기동의 효율성을 최대로 하는데 그 목적이 있다. 우선, 적절한 목적함수를 선택해야 하는데 사용한 운동방정식이나 알고리즘에 따라 조금씩 차이가 있지만, 일반적으로 원래의 비행경로와 충돌회피 기동경로의 차이, 회피기동에 필요한 입력의 크기, 또는 이들의 적절한 조합을 목적함수를 잡아 최적화를 수행함으로써 충돌을 회피할 수 있는 기동경로를 산출하게 된다. 다음 식은 원래 비행경로와 충돌회피의 기동경로의 차이를 성능지수로 선택한 경우를 보여주고 있다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \int_{t_0}^{t_f} \|r - r_{nominal}\|^2 dt$$

여기서 N은 고려한 항공기 수이다.

그 다음으로 항공기간의 충돌을 막기 위해서 두 항공기 사이의 거리에 대한 제한조건을 고려해야 한다. 그런데 Fig. 5에서 살펴보면 알 수 있듯이 각 항공기의 안전영역은 부드러운 곡면체 형태를 띠지 않는다. 이와 같은 모서리의 존재는 최적화를 수행할 때 수치적으로 불안정한 영역을 만들게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 안전영역에 대해서 여러 가지 부드러운 3차원 곡면이 제안되었는데, 수직단면은 타원체이고 수평단면은 원형인 3차원 곡면(oblate spheroidal)이 대표적인 예이다[20]. 이때 타원체의 장축은 10 Nmile, 단축은 4000ft(또는 2000ft)로 주어진다. 이 곡면은 다음식으로 표현된다[20].

$$0 \leq r_{i,j} = \sqrt{\Delta x_{i,j}^2 + \Delta y_{i,j}^2 + \Delta h_{i,j}^2} - \sqrt{\frac{a^2 b^2 (\Delta x_{i,j}^2 + \Delta y_{i,j}^2 + \Delta h_{i,j}^2)}{a^2 \Delta h_{i,j}^2 + b^2 (\Delta x_{i,j}^2 + \Delta y_{i,j}^2)}}$$

여기서 a와 b는 각각 타원의 장반경과 단반경으로, 각각 5 Nmile, 2000ft 이다.

위와 같은 제한조건은 항공기의 상태변수만에 대한 2차 부등식 제한조건이므로 최적화 문제를 푸는데 있어서 많은 어려움을 준다. 그 밖에 제어입력의 크기에 대한 제한조건이 포함 될 수 있으며, 상태변수의 초기조건과 최종조건은 원래의 비행경로에 의해서 결정된다.

최적화 알고리즘

최적화 문제를 푸는 방법으로 크게 직접법과 간접법이 있다. 직접법으로 푸는데 있어서 가장 큰 문제는 nonconvex 형태의 충돌방지에 대한 부등식 제한조건을 어떻게 처리하는가에 있다. 이에 대한 방법으로 그냥 일반적인 SQP, LP 등의 방법을 이용하기도 하고[19, 20], 확률변수를 도입하여 convex 형태로 문제를 변환한 후에(semidefinite relaxation) 이를 convex 최적기법을 이용해 풀고, 확률적 방법을 통해 최종 솔루션을 찾아내는 방법이 제안되었다[22]. 그런데 이 방법도 결국 최적해를 찾아내는 과정에서 항공기의 회피기동 방향(2차원 문제의 경우 시계방향 또는 반시계 방향)을 정함으로써 충돌방지에 대한 제한조건을 선형화 시키게 된다는 점에서 SQP, LP 기법을 이용하는 방법과 비슷하다 하겠다. Fig. 8에 이러한 방법에 대한 항공기의

충돌회피 기동방향을 보여주고 있다[22].

또 다른 방법으로 회피기동을 경로점 (waypoint)에서 꺾이는 두 직선운동의 조합으로 가정하고, 경로점을 파라미터 최적화 기법을 통해서 준최적해를 구하는 방식이 있다[23]. 이 방법은 경로점에 대한 nonconvex 형태의 제한조건을 기하학적 방법을 통해 Fig. 9에서 보이고 있는 것과 같은 선형화된 부등식 제한조건의 형태로 바꾸어서 문제를 푸는 것이다. 결국 적용하는 알고리즘은 모두 다르지만 기본적으로 nonconvex 형태의 제한조건을 어떻게 convex 형태로 바꾸어서 문제를 푸는가에 따라 다양한 방법들이 연구되고 있다.

최적조건(optimality condition)을 통해 최적해를 구하는 간접법의 경우에는 문제가 매우 복잡해지기 때문에 항공기 충돌회피 문제에 많이 다루어지지는 않았다. 특히, 상태변수에 대한 부등식 제한조건은 간접법을 적용하는데 많은 어려움을 주고 있다. 즉, 충돌회피 제한조건에 의한 경계영역에서 최

적입력을 구해야 하기 때문에 더욱 어려운 문제가 된다[21, 23, 24]. 따라서 두 대의 항공기만을 고려한 단순한 2차원 문제들에 대한 연구가 간접법을 이용한 연구의 대부분을 차지하고 있다. 한편, 상태변수 부등식 제한조건을 처리하기 위해서 충돌시간을 경계로 시간영역을 나누어서 최적해를 구한 연구가 있다[20]. 이 연구에서는 충돌시간을 안다고 하고, 이 순간에 항공기가 최소한의 안전거리만을 확보하고 비행한다고 가정한다. 이 조건을 충돌시간까지의 시간영역에서의 최종조건으로 고려해서 문제를 풀고, 충돌시간 이후에 대한 최적화 문제를 풀어서 최적해를 구하는 것이다.

두 대의 항공기 경로에 특수한 기하학적인 조건을 가정하고, 두 항공기의 충돌회피 문제를 풀은 접근방법도 연구되었다[23]. 이 방법에서는 고정된 항공기는 원기둥 형태의 안전영역에 있고, 다른 항공기가 최소시간에 통과한다는 문제로 바꾼 후, 기존의 기하학적인 알고리즘을 통해 해를 구하고, 앞에서 가정한 조건을 통해 두 항공기의 운동으로 나누는 방법을 이용하여 최적해를 구하였다.

위에서 살펴 보았듯이 간접법에서는 상태변수만으로 이루어진 부등식 제한조건을 풀기 위한 알고리즘에 대한 연구와, 적절한 방법을 통해 문제를 변환시켜서 최적해를 구하는 방법 등이 연구되어 왔다. 대부분의 연구들이 문제를 단순화시키기 위해서 두 대의 항공기에 대한 경우, 2차원에 대한 문제, 그리고 항공기의 상대적인 운동만을 다룬 경우가 고려되었기 때문에, 기존에 연구된 제한된 문제에 대해 제안된 알고리즘을 보다 일반적인 경우에 대해 어떻게 확장할 것인가에 대해 많은 연구가 수행되어져야 할 것이다.

기타 최적 충돌회피 알고리즘

기타 최적 충돌회피 알고리즘으로 확률적 방법을 통해서 충돌확률을 구하는 알고리즘이 있는데, 이 방법은 대부분 복잡성으로 인해 회피 알고리즘을 적용하기가 매우 힘들다. 대부분의 경우 단순한 모형에 대한 충돌회피 방법이 연구되어 왔다. 그 한 예로 충돌확률을 최소화 하는 방향으로 기동하여 충돌을 회피하는 방법에 대한 연구가 있다. 이 방법은 충돌확률의 기울기를 구하고, 이

Fig. 8. Constraints on Aircraft Maneuvers

Fig. 9. Approximated Feasible Region

를 줄이는 방향으로 기동 명령을 주는 것이다. 그러나 이 방법은 충돌회피를 수학적으로 보장하지 못한다는 단점이 있다. 확률적 방법을 사용하는 경우 대부분의 연구는 한 항공기는 고정시키고, 다른 한 항공기의 상대적인 운동을 통한 충돌회피 알고리즘을 연구해 왔는데, 이러한 경우 최종적으로 구해진 회피기동을 어떻게 적절히 두 항공기에 배분하느냐가 문제가 된다.

그 밖의 최적 충돌회피 알고리즘으로 충돌회피를 위한 특정한 항공기의 운동을 만든 후, 항공기 운동모드의 적절한 전환을 통해, 항공기간 충돌을 막는 방법 등이 연구되었다[17, 18]. 이 방법에서는 상대 항공기의 입력 불확실성으로 인해 향후 충돌이 발생할 수 있는 영역을 미리 구한 후, 항공기가 이 영역에 들어가지 않도록 적절한 모드 변환을 수행하여 충돌을 회피하도록 한다. 이를 위해서 hybrid system 개념, 게임이론 방법 등이 이용되었다. 그밖에 유전자 알고리즘을 이용하는 방법도 연구되었다.

(2) Force Field (Potential Field) 이용한 방법

Force fields 개념을 이용한 충돌회피 알고리즘은 로보틱스 분야에서 먼저 연구되었다. 이 방법은 장애물에 대해서 가상의 발발(repulsive) 포텐셜을 만들고, 항공기의 원래 경로에 대해서는 유인(attractive) 포텐셜을 만들어 항공기로 하여금 원래의 경로에서 최소한으로 벗어나면서 충돌을 회피하도록 해 준다. 유인 포텐셜의 경우는 앞에서 언급한 최적화 방법들처럼 원래의 경로와 충돌회피 기동경로의 차이로 선택할 수 있으며, 반발 포텐셜은 일반적으로 항공기간 거리의 역수 형태로 선택할 수 있다. 따라서 다음과 같은 형태의 목적함수를 선택한 후에 일반적인 최적화를 수행하여 충돌회피 기동을 위한 해를 구할 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \|r - r_{nominal}\|^2 dt + \sum \eta \frac{1}{\Delta x_{i,j}^2 + \Delta y_{i,j}^2 + \Delta z_{i,j}^2} \quad (.)$$

여기서 N은 고려한 항공기의 수이고, 는 가중치이다.

위와 같이 목적함수를 사용해서 최적화를 수행하는 경우, 앞에서 언급한 경우와는 달

리 비행기간 거리에 대한 부등식 제한조건을 사용할 필요가 없게 되고, 상대적으로 쉽게 최적화를 수행할 수 있다.

한편, 항공기 사이의 반발력은 반발 포텐셜의 구배(gradient)에 비례한다. 그런데 항공기가 특별한 위치에 있을 때 문제가 발생하게 되는데, 예를 들어 한 대의 항공기가 두 대의 항공기에 대해서 대칭으로 둘러싸인 경우에는 반발력이 0이 된다는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 여러 가지 방법들(vortex, fluid dynamics, sliding analogies 등)을 이용해 항공기 운동을 미리 제한하는 방법들이 연구되어 왔다. 예를 들어 sliding force를 이용하는 방법을 살펴보면 Fig. 10과 같이 반발력 방향의 회피기동 대신에 sliding 방향으로 회피기동을 수행하도록 하여 준최적해를 구하였다[25].

포텐셜을 이용한 방법의 또 다른 약점은 필요 없는 회피기동을 야기하는 경우가 있다는 점이다. 예를 들어 두 항공기가 충분한 거리를 두고 운동하고 있음에도 불구하고, 반발력에 의해 회피기동을 생성하게 되는 것이다. 이에 대한 해결책으로 항공기의 경로를 예측한 후에 항공기 사이의 거리가 최소가 되는 지점을 구하고, 이에 대한 반발 포텐셜을 구한다. 이 때 항공기간의 최소 거리가 어떤 특정한 값 이상이 되면 반발 포텐셜을 0이 되도록 하여 불필요한 회피기동을 억제하도록 하였다. 또한, 항공기간 거리가 최소가 되는 시간을 예측해서, 현재로부터 아주 먼 미래에 항공기간 거리가 최소가 될 경우에는 과도한 기동을 제한해 줄 필요가 있다.

그 밖에 potential fields 방법을 이용하는 경우 p포텐셜 함수를 선택할 때 단순히 항공기간의 거리를 이용하는 대신, 접근 속도를 이용하는 방법 등이 연구되어 왔다.

Fig. 10. Repulsive Force vs. Sliding Force

(3) Hybrid 시스템 개념을 이용한 방법

Hybrid 시스템 개념을 이용한 방법에서는 우선 충돌을 회피하기 위한 적절한 기동을 만들어낸다 이러한 기동의 대표적인 경우로 Fig. 11에 보이는 것과 같이 다양한 형태의 기동을 고려할 수 있다[17, 18].

Fig. 11의 좌측 그림을 보면 항공기는 직선, 우회전, 좌회전과 같은 3가지 비행모드 (Straight, Right, Left) 중에서 적절한 모드를 선택함으로써 충돌을 회피할 수 있다. 이때 비행기의 운동은 연속시스템, 모드의 전환은 불연속 시스템이기 때문에 전체적으로 hybrid 시스템 형태가 되며, 모드변환이 매우 중요하게 된다. 이 방법에서는 상대 항공기의 입력 불확실성을 고려해주기 위해서 자신의 항공기는 최대한 충돌을 회피하는 방향, 상대 항공기는 충돌을 야기하는 방향으로 운동한다고 최악의 경우(worst case)를 가정할 수 있으며, 두 항공기의 관계에 대해 게임이론을 도입한 연구도 있다[17]. 이러한 가정 하에서 각각의 모드에 대해 미래에

Fig. 11. Conflict Resolution Maneuvers

Fig. 12. Alert Zone for Each Mode

충돌이 일어날 가능성이 있는 영역을 구할 수 있다. Fig. 12는 각 모드에 대해 안전하지 못한 영역에 대한 예를 보이고 있다[17]. 그 후 적절한 모드변환을 통해, 어떠한 모드변환을 통해서도 미래의 충돌가능성을 없앨 수 없는 지역으로 들어가지 못하게 함으로 충돌회피 목적을 달성한다. 이 방법은 우선 복잡하지 않은 현실적인 항공기 기동에 기반을 두고 있으며, 불확실성을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 안전하지 않은 영역 및 모드변환을 위한 기준 매개변수를 구할 때 체계적인 접근이 어렵다는 점, 비행기의 동역학에 대해 고려하지 않았다는 점 등이 단점이며, 향후 여러 가지 연구를 통해 보완이 요구된다.

(4) 기타 연구과제

그 밖의 연구과제로는 지금까지 개발된 다양한 알고리즘을 실제적이고 일반화된 상황에 적용시킬 수 있도록 하는 연구가 필요하다. 상당수의 알고리즘은 2차원 평면에 대해서 유도 되었으며, 가장 효율적이며 승객들에게 최소한의 불편함을 주고, 원래의 경로에서 덜 벗어난다는 점에서 유리한 수평기동, 수직기동, 속도제어 중 일부만을 통해 충돌회피를 수행하도록 하였다. 또한, 많은 연구들이 단지 두 대의 항공기에 대한 충돌회피를 다루고 있다. 그러나 항공기의 밀도가 높은 지역의 경우, 한 항공기와의 충돌을 회피하는 기동을 수행하다 보면 다른 항공기와의 새로운 충돌상황이 발생하는 경우가 있다[3]. 따라서 Fig. 13에서 보이는 것과 같이 모든 항공기를 한꺼번에 고려한 충돌회피 알고리즘에 관한 연구가 필요하다.

한편, 기존의 알고리즘을 보다 일반적인 상황으로 확장하는 연구도 필요하다. 기존의 충돌회피 알고리즘은 대부분 항공기의 경로에 대한 방정식만을 다루고 있다. 항공기의 동역학을 일부 고려한 연구도 있지만, 아직까지는 매우 단순화 된 질점 운동방정식이다[1]. 실제 상황에서는 항공기의 동역학에 의해서 항공기 운동에 많은 제약이 가해지므로 최적 비행경로를 생성하는데 있어서 반드시 고려되어야 할 것이다. 그러나 대부분의 알고리즘들이 항공기의 동역학을 적용하는 데 많은 한계를 가지고 있다. 실제로 포텐셜 Field 방법을 적용한 연구에서는 항

Fig. 13. Multiple Aircraft Conflict Resolution

공기의 충돌방지에 관한 제한조건을 목적함수에 포함하므로, 항공기의 동역학을 충실히 고려할 수 있게 하였다[28]. 그러나 이 경우는 항공기의 충돌방지를 수학적으로 보장할 수 없다는 약점이 있다. 이와 같이 기존의 여러 가지 최적경로 생성 알고리즘과 항공기의 동역학을 어떻게 함께 고려할 수 있는지에 대한 연구가 앞으로 수행되어야 할 것이다. 항공기의 동역학을 직접적으로 고려하지 않더라도, 이로 인한 비행경로의 제약조건을 구해 비행경로를 생성하는 알고리즘에 간접적으로 적용하는 방법 등에 대한 연구가 필요할 것이다.

2.3.3 Free Flight 관련 기타 연구분야

지금까지 연구된 다양한 충돌감지 및 회피 알고리즘들은 각각 장단점을 포함하고 있다. 따라서 각 기법들의 성능을 어떻게 평가하는가 하는 문제와 더 나아가 각각의 알고리즘들이 최적의 성능을 발휘하기 위해서 각종 파라미터들을 어떻게 설정하느냐의 문제에 대한 연구가 필요하다. 다양한 충돌상황, 항공기의 동역학적 특성, 각종 오차요인 등도 고려되어야 한다. 항공기의 안전영역의 크기, 잘못된 충돌경고를 판정할 확률, 전략적 충돌감지 및 회피 알고리즘에 소요되는 경제적 비용 등을 성능지수로 하여 해석을 수행하거나 최적화하는 연구도 필요할 것이다.

또한, 각 알고리즘은 실시간으로 적용되어야 하므로, 이에 필요한 계산시간 또한 중요한 요소가 된다. 이와 함께 각각의 알고리즘을 적용하는 데 있어서 인간공학적 측면에 대한 연구도 필요하다. 조종사가 쉽게 반응할 수 있도록 또는 조종사가 혼란스러워하지 않도록 정보를 어떠한 형태로 제공 하는가 등에 대한 연구가 필요하다. 지금까지의 알고리즘들은 주로 항공기간의 충돌에 대해서

만 다루었는데, 실제 상황에서는 날씨나 특수 목적을 위한 비행제한 구역 등에 대한 비행통제에 대한 고려도 필요하다. 전체적인 시스템 구성에 관한 문제들도 연구되어야 하는데, 새로운 충돌감지 및 회피 시스템을 적용하는데 기존의 시스템과 어떻게 조화롭게 사용될 수 있는지도 중요한 연구과제이다.

III. 결 론

본 논문에서는 기존의 관제 시스템과 이를 보완하기 위한 자동 비행관제 지원시스템, 그리고 자유비행을 위한 충돌감지 및 회피 시스템 개발에 대한 동향에 대해 살펴보았다. 미 연방교통국이 예견한 것처럼 현재의 비행관제 시스템은 조만간 한계를 맞이하게 될 것이고, 이에 따라 새로운 시스템의 개발에 대한 필요성이 절실한 상황이다. 특히, 항공 시스템은 사고가 발생하였을 때 수많은 인명피해가 발생한다는 점과, 약간의 효율성 증가로써 상당한 경제적 이득을 가져올 수 있다는 점에서 이에 대한 연구는 큰 가치가 있다고 하겠다. 우리나라의 경우 현재까지 항공교통관리 분야에 관한 연구가 매우 미미한 실정이지만, 앞으로는 보다 많은 관심을 가지고 연구를 수행해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업 (과제번호 M1-0318-00-0028)의 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] Perry, T.S., "In Search of the Future of Air Traffic Control," IEEE Spectrum, Vol.34, No.8 1997, pp.19-35.
- [2] Schultz, R.L., Shaner, D.A., and Zhao, Y., "Free-Flight Concept," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, New Orleans, LA, Aug. 1997.
- [3] Kuchar, J.K., and Yang, L.C., "A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Method," IEEE Transactions on Intelligent Transportation

System, Vol.1, No.4, 2000, pp.179-189.

[4] Davis, T.J., Erzberger, H., Green, S.M., and Nedell, W., "Design and Evaluation of an Air Traffic Control Final Approach Spacing Tool," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 14, No. 4, 1991, pp. 848-854

[5] Krzeczowski, K.J., Davis, T.J., Erzberger, H., Israel Lev-Ram, and Christopher, P.B., "Knowledge-Based Scheduling of Arrival Aircraft in the Terminal Area," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Baltimore, MD., Aug., 1995.

[6] Green, S.M., Vivona, R.A., and Sanford, B., "Descent Advisor Preliminary Field Test," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Baltimore, MD., Aug., 1995..

[7] Robinson III, J.E., Davis, T.J., and Isaacson, D.R., "Fuzzy Reasoning-Based Sequencing of Arrival Aircraft in the Terminal Area," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, New Orleans, LA, Aug., 1997.

[8] Isaacson, D.R., Davis, T.J., and Robinson III, J.E., "Knowledge-Based Runway Assignment for Arrival Aircraft in the Terminal Area," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, New Orleans, LA, Aug., 1997.

[9] Slattery, R., and Zhao, Y., "Trajectory Synthesis for Air Traffic Automation," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.20, No.2, 1997, pp.232-238.

[10] Hunter, C.G., and Weidner, T., "Performance and Benefits Modeling of Center Airspace ATM Improvements," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, New Orleans, LA, Aug., 1997.

[11] Krozel, J., and Peters, M., "Strategic Conflict Detection and Resolution for Free Flight," IEEE 36th Conference on Decision & Control, San Diego, California, USA, Dec., 1997, pp. 1822-1828.

[12] Paielli, R.A., and Erzberger, H.,

"Conflict Probability Estimation for Free Flight," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.20, No.3, 1997, pp.588-596.

[13] Hu, J., Lygeros, J., Prandini, M., and Sastry, S., "Aircraft Conflict Prediction and Resolution using Brownian Motion," IEEE 38th Conference on Decision & Control, Phoenix, Arizona, USA, Dec., 1999, pp. 2438-2443.

[14] Yang, L.C., and Kuchar, J.K., "A Prototype Conflict Alerting System for Free Flight," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.20, No.4, 1997, pp.768-773.

[15] Winder, L.F., and Kuchar, J.K., "Evaluation of Vertical Collision Avoidance Maneuvers for Parallel Approach," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Boston, MA, Aug., 1998.

[16] Lygeros, J., and Lynch, N., "On the Formal Verification of the TCAS Conflict Resolution Algorithms," IEEE Conference on Decision & Control, San Diego, California, USA, Dec., 1997, pp. 1829-1834.

[17] Tomlin, C., Pappas, G.J., and Sastry, S., "Conflict Resolution for Air Traffic Management: A Study in Multiagent Hybrid Systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.43, No.4, 1998, pp.509-521.

[18] Tomlin, C., Lygeros, J., and Sastry, S., "A Game Theoretic Approach to Controller Design for Hybrid System," Proceedings of the IEEE, Vol.88, No.7, 2000, pp.949-970.

[19] Zhao, Y., and Schultz, R.L., "Deterministic Resolution of Two Aircraft Conflict in Free Flight," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, New Orleans, LA, Aug., 1997.

[20] Menon, P.K., Sweriduk, G.D., and Sridhar, B., "Optimal Strategies for Free-Flight Air Traffic Conflict Resolution," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.22, No.2, 1999, pp.202-211.

[21] Bicchi, A., and Pallottino, L., "On Optimal Cooperative Conflict Resolution for Air Traffic Management Systems," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.1, No.4, 2000, pp.221-232.

[22] Frazzoli, E., Mao, Z. H., Oh, J.H., and Feron, E., "Resolution of Conflicts Involving Many Aircraft via semidefinite Programming," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.24, No.1, 2001, pp.79-86.

[23] Hu, J., Prandini, M., and Sastry, S., "Optimal Coordinated Maneuvers for Three-Dimensional Aircraft Conflict Resolution," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.25, No.5, 2002, pp.888-900.

[24] Clements, J.C., "Optimal Simultaneous Pairwise Conflict Resolution Maneuvers in Air Traffic Management," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.25, No.4, 2002, pp.815-818.

[25] Zeghal, K., "A Review of Different Approaches Based on Force Fields for Airborne Conflict Resolution," AIAA

Guidance, Navigation, and Control Conference, Boston, MA, Aug. 1998.

[26] Hoekstra, J.M., van Gent, R.N.H.W., and Ruigrok, R.C.J., "Conceptual Design of Free Flight with Airborne Separation Assurance," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Boston, MA, Aug., 1998.

[27] Eby, M., and Kelly, W., "Free Flight Separation Assurance Using Distributed Algorithms," IEEE Aerospace Conference, Snowmass, Co, Mar., 1999.

[28] Shim, D.H., and Sastry, S., "Decentralized Nonlinear Model Predictive Control of Multiple Flying Robots in Dynamic Environments," submitted to IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003.

[29] Chiang, Y.J., Klosowski, J.T., Lee, C., and Mitchell, J.S.B., "Geometric Algorithms for Conflict Detection/Resolution in Air Traffic Management," IEEE 36th Conference on Decision & Control, San Diego, California, USA, DEC., 1997, pp.1835-1840.