

論文

자유비행 환경에서의 항공기 분리보장을 위한 충돌 탐지 및 해결 방법에 대한 고찰

김장환*, 강자영**

A Study on Conflict Detection and Resolution for Aircraft Separation Assurance in a Free Flight Environment

Chang-hwan Kim* and Ja-young Kang**

ABSTRACT

The goal for the CD&R system is to predict that a conflict is going to occur in the future, communicate the detected conflict to a human operator, and, in some cases, assist in the resolution of the conflict situation. To provide insight into different methods of conflict detection and resolution, a literature review of previous research models and current developmental and operational systems was performed.

This paper focuses only on the specific attributes of each model, not on the depth to which a model has been analyzed, validated, or accepted. Thus, care should be taken to remember that a model that seems to be simple according to our categorization scheme may be significantly more viable than an apparently sophisticated model.

Key Words: Conflict detection and resolution(충돌 탐지 및 해결), Air traffic control(항공교통 관제), Airborne separation assurance system(공중분리보장시스템) Traffic alert and collision avoidance systems(충돌경보회피시스템), Collision avoidance maneuver(충돌회피기동),

I. 서 론

현재의 공역시스템에서 항공기간 분리를 유지하기 위한 방법들은 기존에 구축된 항로와 향상된 공역운영절차를 기본으로 만들어져 있다. 사람이 비행을 하는 동안 각종 정보를 통합하고 판단하는 능력인 인적요인은 항공기간 분리를 하는 과정에서 가장 중요한 요소이다. 그러나 인적 오류와 운영적 오류가 발생할 수 있기 때문에 의사결정 지원도구를 제공하고 TCAS(Traffic alert and Collision Avoidance System)와 같이 도움을

주기 위한 자동화된 시스템들이 개발되어 운영되었다. 이러한 시스템은 항공기의 충돌을 예측하고 사람에게 충돌을 경고하는 센서를 사용하고 충돌 해결을 위한 명령이나 안내를 제공할 수도 있다.

최근에는 사라졌지만 불과 10여년 전만 해도 비교적 단순한 충돌위험성을 예측하는 운항사는 항공교통관제자동화의 일부분이었고, TCAS는 일찍이 1990년대에 미국의 운송용 항공기에 탑재되었다(Fig. 1). 항공교통환경의 안전망을 제공했던 상기 시스템으로는 교통량이 매우 많은 오늘날과 같은 공역환경에서의 항공기간 최소분리간격을 유지하기에도 한계를 넘을 것이며, 그 이상의 항공기간 분리는 불가능해질 것이다.

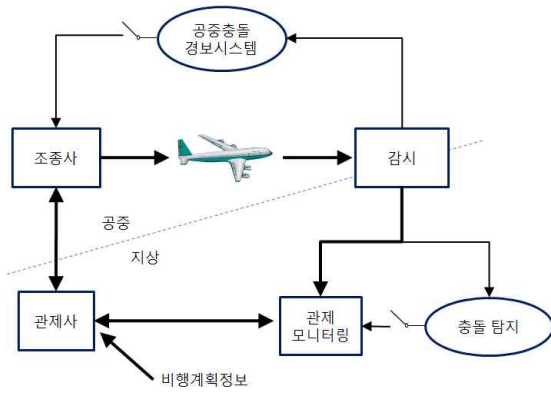
2010년 08월 10일 접수 ~ 2010년 09월 15심사완료

* 한국교통연구원

** 한국항공대학교 항공운항학과

연락처, E-mail : aviatorckh@koti.re.kr

경기도 고양시 일산서구 시민대로 1160번지



주) 굵은 선들은 계획된 통제 경로를 표시하고 가는 선들은 자동화된 모니터링을 표시

Fig. 1 CD&R의 탑재장비와 지상장비의 구성 요소

최근에 이에 따른 중요성이 부각되어 충돌 탐지와 해결을 지원하기 위하여 더욱 진보된 자동화 도구를 개발하려는 노력이 계속되고 있다. 이러한 CD&R 도구는 운항안전을 강화하고 항공교통흐름의 효율성을 높이기 위하여, 새로운 절차의 사용이 가능토록 해주는 데이터링크시스템과 같은 기술이 함께 사용되어질 수 있다. 예를 들면, 관제사를 지원하기 위한 자동화 시스템에 대한 몇몇 개념은 NASA[1]에 의해 개발된 Center/TRACON Automation System(CTAS)의 구성 요소들을 포함하는 분야에서 연구 및 개발되었고, MITRE[2]에 의해 개발된 User Request Evaluation Tool(URET)이 개발되었다. 기존의 충돌감시시스템보다 향상된 CD&R 시스템은 TCAS[3]의 전략적인 대안으로 연구가 진행되고 있다.

현재까지 CD&R에 대한 60여가지 이상의 다양한 방법들이 제안되어 있는데, 기본적인 충돌회피 알고리즘은 모든 운송방식에서 유사하기 때문에 이 방법들은 항공우주뿐만 아니라 육상교통, 해양교통, 로봇공학에도 함께 적용할 수 있도록 개발되었다. Zeghal[4]은 충돌 해결을 위하여 흔히 말하는 force-field 방법중 중요한 차이점들을 제공하고 Warren[5]은 3개의 충돌 탐지 방법 간의 비교평가를 실시하였다. Krozel[6]과 Kuchar&Yang[7]은 이미 본 연구와 같은 형태의 초기 연구를 실시한 바 있다.

본 연구에서는 최근까지의 CD&R 관련 문헌으로부터 주요한 모델링 방법들이 소개되고 논의된다. 그리고 본 연구는 어떤 특정한 CD&R 모델을 추천하기 위함이 아니라, 지금까지 고안된 CD&R 모델들의 분류법을 만들고 앞으로의 연구에서 고

려되어야 할 사항들에 대한 인식을 하고자 하며, 향후 새로운 CD&R 모델을 개발할 때 또는 모델간의 비교평가 시 도움이 될 수 있도록 하는 것이다.

II. 본 론

1. CD&R의 절차

본 연구에서 충돌의 명확한 정의는 최소한 2대 이상의 항공기가 규정된 최소분리간격기준을 위반하는 사건으로 정의한다. 최소분리간격기준의 한 예로, 항공기 사이의 수평거리는 최소한 5nm 이거나 수직 분리는 적어도 1000ft이다. 이는 또 다른 항공기가 침범해서는 안되는 각각의 항공기를 둘러싸고 있는 공역의 보호구역(PZ: protected zone) 또는 공역의 보호체적이다.

또한 PZ는 전술적 충돌경고시스템의 경우에 심지어 거리 이외의 매개변수들(예를 들면 시간)에 의하여 많은 작은 구역(예를 들면 구형 500ft 직경)으로 정의될 수 있다. 비록 특정한 모델들과 경보시기는 다를지라도 근본적인 CD&R 기능들은 유사하다.

CD&R 시스템의 목표는 앞으로 충돌이 발생하는 것을 예측하고, 조종사에게 충돌 탐지를 알리고, 어떤 경우에는 충돌 상황 해결을 지원하는 것이다. 이러한 3개의 기본적인 절차들은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 몇몇 단계나 요소로 조직화될 수 있다. 다른 항공기(침입 항공기) 이외에 또 다른 위험을 가진 충돌은 기본적으로 의사결정문제에서 추출될 수 있다.

Fig. 2에 나타난 것처럼, 공역환경이 첫 번째로 감시되어야 하고, 현재 상태에 대한 정확한 정보들이 감지장치와 통신시스템을 사용하여 수집되고 유포되어야 한다. 이러한 것들은 현재의 교통상황(예를 들면 항공기 위치나 속도)의 예상치를 제공한다.

사용되는 감지장치의 타입에 따라 이 상태들은 완전한 실제상황과 동일하지 않을 수도 있다. 예를 들면, 시스템은 항공기간 간격 범위 정보만 알고, 정확한 상대적인 위치를 알지 못할 수도 있다. 게다가 감지장치의 에러나 제한된 업데이트 속도 때문에 현재의 정확한 상태값은 일반적으로 약간의 불확실함이 존재한다.

동적인 항적 모델은 충돌 발생 여부와 관계없이 예측 순서에 따른 미래의 상태를 예측할 수 있어야 한다. 이 예측은 단지 현재의 상태정보

(예를 들면, 현재 속도벡터의 직선 연장)만을 갖고 예측하거나 비행계획서 같은 추가적인 정보를 포함하여 예측할 수도 있다. 현재의 상태정보를 포함하여 일반적으로 약간의 불확실성이 미래의 예상 항적에 포함되며 현재 상태정보와 예측된 상태정보는 앞으로의 교통관리를 어떻게 할지에 대한 기준을 제시할 수 있게 된다.

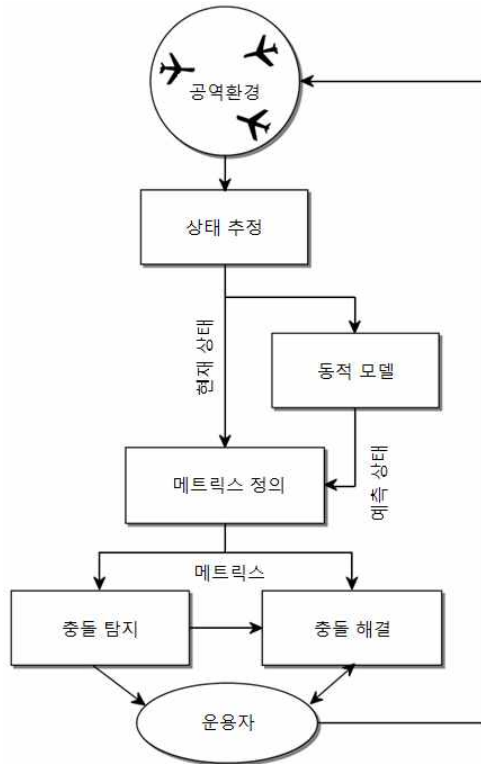


Fig. 2 CD&R 절차

주어진 충돌 매트릭스에서 이산 결정은 항공기 간 분리간격을 유지시키기 위해 사람에게 통보가 되고 그 후에 회피기동이 필요한지에 대한 여부를 판단하게 된다. 충돌의 통보는 CD&R 시스템에서 가장 중요한 요소이며, 조종사와 관제사는 충돌 통보를 확인한 후 안전하고 효율적인 충돌 해결 방법을 협력적인 방법으로 결정한다. 그러나 예측된 모든 충돌이 주의를 필요로 하거나 회피기동과 같은 행동을 필요로 하지 않는다는 것에 주의해야 한다. 예를 들어, 충돌 탐지는 되었는데 시간상으로는나 거리상으로는나 멀리 떨어져 있는 경우에는 불확실성 또한 커지기 때문에 현재 항공기의 상태정보나 그 주변 교통정보를 항상 예의주시할 필요가 있다. 충돌 탐지가 된 후 회피기동이 필요하다고 판단될 때 충돌 해결단계가

시작되며, 이 단계에서는 적절한 회피기동 방침을 결정하고 그 정보를 운영자에게 보내는 것까지 포함한다. 충돌 해결 단계는 Fig. 2에서 보면 단일 블록으로 나타나지만 충돌 탐지 단계에서 사용된 것과 다른 방식의 알고리즘과 회피기동경로 모델, 회피기동 이후의 예측 경로 등의 구성요소를 필요로 한다.

충돌 탐지와 해결 단계 중 한 가지만 혹은 모두 자동화하거나 절차를 통한 수동으로 선택할 수도 있다. 예를 들면, 시계비행규칙(Visual Flight Rules, VFR)은 조종사에게 충돌회피에 대한 책임을 부여하고 조종사는 충돌 탐지를 위해 시각적으로 검색을 해야 한다. 만일 위협이 감지되었다면 일련의 회피기동절차에 따라 적절한 행동을 취해야 한다. 계기비행규칙(Instrument Flight Rules, IFR) 하에서 관제사는 충돌 발생이 예측되었을 경우에 해당 항공기에 대해서 레이더와 항적벡터를 사용하여 항공기 간 분리를 감시한다.

만일 충돌이 운전자(관제사와 조종사)에 의해 해결되지 않을 경우 추가적인 해결 정보를 TCAS에 의해 자동적으로 제공된다. 이 수행체계에서 충돌 탐지는 언제, 어떻게, 무슨 행동을 취해야 하는지를 포함하는 충돌 해결의 과정으로 간주될 수 있다. 그러나 실제 상황에서 충돌 탐지에서 충돌 해결까지의 시간적 차이를 얼마나 주어야 하는지 항상 명확하지는 않다. 예를 들면, 결정적으로 언제 회피기동이 필요한지는 실행되어질 회피기동 방식에 의존할 수밖에 없다.

이와 유사하게 필요한 회피기동의 방식은 그 회피기동이 얼마만큼 조기에 시작하느냐에 따라 달라질 수 있다. 이러한 상호의존방식은 많은 해결 방법들이 있기 때문에 CD&R 시스템 발전을 보다 진보적이고 흥미롭게 만드는 요인 가운데 하나이다.

2. 모델링의 분류

충돌 탐지와 해결에 대한 각각 다른 방법들을 고찰하기 위해 이전에 연구된 모델들과 현재 개발중이고 운영할 수 있는 CD&R 시스템의 문헌 고찰을 수행하였다. 이러한 모델들을 총망라한 목록은 제시하지는 않겠지만 CD&R 문제들에 있어서 중요한 최근의 접근 방법들을 기술하였다. 최근까지의 문헌을 살펴보면 몇몇 저자는 1개 이상의 CD&R 모델링을 제시했다. 그리고 CD&R과 관련한 인적요인에 대한 연구가 진행중에 있다 [8,9]. 그러나 이 연구에서는 인적요인 중심의 이슈가 아닌 항공기를 대상으로 한 충돌 시나리오

를 평가하기 위한 수학적이며 분석적인 모델에 초점을 맞추었다. 검토한 모델 중 9개는 사용중이거나 이 분야에서 안전하다고 평가되어 현재 운영되고 있는 시스템이다.

AILS(Airborne Information for Lateral Spacing)[10], CTAS[1], GPWS(Ground Proximity Warning System)[11]과 GPWS의 최근 향상된 버전인 EGPWS[12], PRM(Precision Runway Monitor)[13], TCAS[14], TCAD(Traffic and Collision Alert Device) [15], URET[2], 그리고 항공화물협회를 위한 프로토타입의 충돌 시스템[3]이 그러한 경우이다. 나머지 모델들은 추상적인 개념에서 프로토타입의 충돌 경보시스템에 해당되며, 개별적인 연구기관이나 연구자에서 의해 학술적으로 사용되어 진다.

또 다른 모델 중 5개는 로봇공학, 지상교통, 항공교통에는 적용할 수 없는 해상교통을 위해 개발되었다[16-20]. Fig. 2의 CD&R 체계를 기반으로 한 60여 개의 모델은 CD&R 각 단계에서의 기본적인 접근방법에 따라 분류하였다. 모델은 Fig. 3과 같이 크게 3가지 형태의 상태정보 예측 방법별로 구분될 수 있고, 각각의 형태에 대해서 5가지 항목으로 구분 지을 수 있다(표 1-3 참조).

본 연구에서는 각 모델을 분석하거나 평가하거나 성능평가를 하는 것이 아닌 각 모델의 특정한 속성을 다루는데 중점을 두었다. 또한 외관상 복잡한 모델보다는 단순해 보이지만 실행 가능한 모델을 눈여겨보아야 한다. 본 연구에서 논의되는 모델 중 33개의 모델에 대한 상세한 사항은 Kuchar&Yang[7]의 논문을 참조하였다. CD&R은 미래 항적을 예측하는 모델의 능력에 따라 신뢰성이 좌우되기 때문에 각 모델링 간의 가장 큰 차이점은 현재 상태정보를 가지고 미래 상태정보를 예측하는 방법의 차이이다. 3가지 기본적인 예측방법들은 Nominal, Worst-case, Probabilistic 이다(Fig. 3).

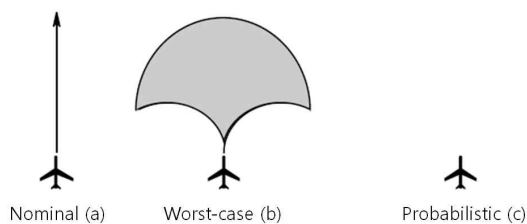


Fig. 3 상태정보의 예측 방법

Nominal 방법은 현재의 상태가 불확실성을 고려하지 않고 단일 항적을 따라 미래 항적을 예측한다. 예를 들어 현재 항공기의 속도벡터를 기반

으로 하여 미래의 항공기 위치를 추정하게 된다(Fig. 3a). Nominal 예측방법은 간단하고 현재 상태정보를 기반으로 하게 될 항공기의 최상의 예측치를 제공한다. 항공기 항적을 다양하게 예측할 수 있는 상황에서는 Nominal 모델의 항적 예측은 매우 정확할 수도 있다. 그렇지만 Nominal 예측방법은 항공기가 예상대로 기동하지 않을지도 모르는 가능성을 직접적으로 설명하지 않는 데 이러한 요인은 특히 장기(long term) 충돌 탐지에서는 매우 중요한 사항이다. 일반적으로 이러한 불확실성은 분리실패를 염두하여 충분한 시간을 안배한 안전버퍼라는 개념을 도입함으로써 해결될 수 있지만, Nominal 모델을 사용하여 만일에 사고를 대비하기 위해서는 Nominal 모델의 사용은 억제될 필요가 있을 것으로 사료된다.

동적인 모델링의 다른 방법은 Worst-case 예측 방법으로, 항공기가 어느 정도의 기동을 수행할 것인지 추정하는 방법이다. 다른 항공기와의 충돌을 탐지하여 기동할 수 있는 잠재적인 항적 구획이다. Worst-case 접근방법은 모델의 정의 내에서 충돌에 대한 조금의 가능성이라도 있을 경우 충돌 경보를 유발할 수 있다는 점에서 신중하다고 할 수 있다. 하지만 너무 신중해서 충돌이 일어날 확률이 적은 경우에도 경보가 울린다면 그러한 오경보 비율로 인하여 해당 공역의 수용량을 떨어뜨리는 결과를 얻게 될 수도 있다. 따라서 Worst-case 항적은 충분한 시간을 갖고 정확한 예측을 할 수 있도록 제한적으로 사용되어야 할 것이다.

Probabilistic 방법에서의 불확실성은 항공기의 미래 항적의 잠재적인 변화를 나타내기 위해 모델링되며(Fig. 3c), 보통 2개 중 1개의 항적을 택하게 된다. Probabilistic 접근 방법은 Nominal 모델과 Worst-case 모델 사이에서 균형적인 역할을 제공한다. Probabilistic 접근 방법은 가장 일반적이라고 할 수 있고 Nominal과 Worst-case 모델은 Probabilistic 항적의 부분적인 집합들로 이루어진다고 말할 수 있다.

Nominal 모델의 항적은 항공기가 한 개의 확률적 경로를 따를 경우에 해당되고, Worst-case 모델은 항공기가 동일한 가능성을 가진 경로 가운데 어떤 경로를 따를 것인가 하는 것이다. 그렇지만 확률기반 시스템의 논리는 운용자에게 전달하기 어려울 수도 있고 어쩌면 운용자에게 확신을 주지 못할 수도 있다[21].

그렇기 때문에 미래에 어떤 항적으로 가야 되는지에 대한 확률론적 모델링이 가장 복잡하다고 할 수 있다. 3가지의 주요 분류에 대해서 각각 5

가지 항목으로 구분한 사항은 지면 관계상 Table 1, 2, 3에 정리하여 나타내었다.

Table. 1 주요 모델링 방법: Nominal Propagation

모델	차원	탐지	해결	기동	다중
Andrews	H	—	O	T	P
Bilimoria	H	—	O	C(ST)	P&G
Chakravarthy	H	—	O	C(ST)	P
Frazzoli	H	—	O	C(ST)	G
Tomlin	H	—	O	T	G
Irvine	HV	—	O	C(STV)	P
Ota	HV	—	O	C(TV)	G
Kosecka	H	—	F	C(ST)	G
Zeghal	H	—	F	C(ST)	G
Eby	HV	—	F	C(STV)	G
Sridhar	H	√	—	—	P
EGPWS	HV	√	—	—	—
Havel	HV	√	—	—	P
Kelly	HV	√	—	—	P
TCAD	HV	√	—	—	P
GPWS	V	√	P	V	—
PRM	H	√	P	C(TV)	P
Bilimoria	HV	√	P	STV	P
Burgess	H	√	O	TV	P
Coenen	H	√	O	ST	P
Gazit	H	√	O	VT	P
Harper	H	√	O	C(ST)	G
Iijima	H	√	O	ST	P
Niedringhaus	H	√	O	C(ST)	G
Zhao	H	√	O	T	P
Burdun	HV	√	O	C(STV)	P
Durand	HV	√	O	T	G
Ford	HV	√	O	V	P
Krozel	HV	√	O	STV	P
Love	HV	√	O	TV	P
Menon	HV	√	O	C(STV)	G
Niedringhaus	HV	√	O	STV	G
Schild	HV	√	O	C(TV)	P
TCAS	HV	√	O	V	P
Hoekstra	HV	√	F	C(STV)	P
Zeghal	HV	√	F	C(STV)	G
Duong	HV	√	M/F	C(STV)	P

Table. 2 주요 모델링 방법: Worst-Case Propagation

모델	차원	탐지	해결	기동	다중
Lachner	H	—	O	C(ST)	P
Tomlin	H	—	O	S	G
Ford	H	—	—	—	P
Ratcliffe	HV	√	—	—	P
Shepard	HV	√	—	—	P
Shewchun	HV	√	—	—	P
AILS	HV	√	P	C(TV)	P
Gazit	H	√	O	VT	P
Vink	HV	√	M	C(STV)	P

Table. 3 주요 모델링 방법: Probabilistic Propagation

모델	차원	탐지	해결	기동	다중
Paielli	H	—	—	—	P
Taylor	H	—	—	—	P
Bakker	HV	—	—	—	P
Wangermann	HV	—	O	C(STV)	G
Innocenti	H	—	F	C(ST)	G
Rome	H	√	—	—	P
Warren	H	√	—	—	P
Williams	HV	√	—	—	P
Carpenter	H	√	P	C(TV)	P
Heuvelink	H	√	O	S	P
Prandini	H	√	O	T	P
Krozel	HV	√	O	STV	P
von Viebahn	HV	√	O	TV	P
CTAS	HV	√	M	C(STV)	P
URET	HV	√	M	C(STV)	P
Yang	HV	√	M	C(STV)	P

Table. 4 모델 분류표 약어 해설

약어	해설
차원	H = Horizontal plane only V = Vertical plane only HV = Horizontal and Vertical planes
탐지	√ = Explicit conflict detection threshold — = No explicit conflict detection threshold
해결	P = Prescribed O = Optimized F = Force Field M = Manual — = Resolution maneuvers not considered
기동	T = Turns V = Vertical maneuvers S = Speed changes C() = Combined / simultaneous maneuvers
다중	P = Pairwise G = Global

III. 결 론

본 연구는 CD&R 문제에 대하여 매우 다양하고 많은 모델들을 검토하는 데서 시작하였다. 향후 CD&R 관련 연구의 접근은 본 연구에서 논의가 되었던 다양한 CD&R 모델에 관심을 갖기 보다는 이와 관련된 수많은 이슈들을 해결하기 위한 연구가 더욱 중요할 것이다. 이러한 이슈는 불확실한 효과, 다중 충돌 상황을 해결하는 능력, 조화, 자동화 시스템 요구사항, 실행을 위한 많은 이슈, 조종사와 관제사의 동의, 날씨와 같은 다른 위험 정보와의 통합, 검증과 인증을 위한 요구사항 등을 포함하고 있다.

본 연구에서 논의된 CD&R 모델의 대부분은

이와 같은 이슈들에 대해서 언급하지 않았다. 또한, CD&R 모델을 분석하고 유용한 모델임을 판별하기 위한 일관된 기준이 필요하다. 이것은 CD&R 시스템을 사용할 수 있는 다양한 방식들과 CD&R 시스템이 상세히 노출될 수도 있는 상황 때문에 어렵겠지만 항공교통분야에서 CD&R 시스템의 완전한 실현을 하기 위해서는 가장 효과적인 시스템을 선택해야만 하므로 반드시 필요할 것으로 사료된다.

끝으로 본 연구에서 조사된 CD&R에 대한 대부분의 연구는 미국과 유럽에서 수행되었고, 이러한 연구결과를 바탕으로 자체적인 차세대 항행시스템과 항공관제시스템의 개발에 있어 큰 기여를 하였기 때문에 항행시스템 분야에서 독보적인 우위를 차지할 수 있었다고 생각된다. 물론 우리나라에서도 국방연구소와 관련기업에서 일부 다루어지고 있기는 하지만 다수의 연구자에 의한 공개적이며 활발한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각하는 바이다.

참고문헌

- 1) D. Isaacson and H. Erzberger, "Design of a Conflict Detection Algorithm for the Center/TRACON Automation System", in Proc. 16th Digital Avionics Systems Conf., Irvine, CA, October 26-30, 1997.
- 2) D. Brudnicki, K. Lindsay, and A. McFarland, "Assessment of Field Trials, Algorithmic Performance, and Benefits of the User Request Evaluation Tool (URET) Conflict Probe", in Proc. 16th Digital Avionics Systems Conf., Irvine, CA, October 26-30, 1997.
- 3) W. E. Kelly, "Conflict Detection and Alerting for Separation Assurance Systems", in Proc. 18th Digital Avionics Systems Conf., St. Louis, MO, October 27-29, 1999.
- 4) K. Zeghal, "A Review of Different Approaches Based on Force Fields for Airborne Conflict Resolution", AIAA-98-4240, in Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf., Boston, MA, August 10-12, 1998, pp. 818-827.
- 5) A. Warren, "Medium Term Conflict Detection for Free Routing: Operational Concepts and Requirements Analysis", in Proc. 16th Digital Avionics Systems Conf., Irvine, CA, October 26-30, 1997.
- 6) J. Krozel, M. Peters, and G. Hunter, "Conflict Detection and Resolution for Future Air Transportation Management", NASA CR-97-205944, April 1, 1997.
- 7) J. Kuchar and L. Yang, "Survey of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods", AIAA-97-3732, in Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf., New Orleans, LA, August 11-13, 1997.
- 8) W. Knecht, K. Smith, and P. Hancock, "A Dynamic Conflict Probe and Index of Collision Risk", in Proc. 40th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, Philadelphia, PA, September 2-6, 1996, pp. 106-110.
- 9) R. Barhydt and R. J. Hansman, "Experimental Studies of the Effect of Intent Information on Cockpit Traffic Displays", AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 22 no. 4, pp. 520-527, July-August, 1999.
- 10) M. Waller and C. Scanlon, eds., "Proceedings of the NASA Workshop on Flight Deck Centered Parallel Runway Approaches in Instrument Meteorological Conditions", NASA Conf. Publication 10191, Hampton, VA, December, 1996.
- 11) Radio Technical Committee on Aeronautics (RTCA), "Minimum Performance Standards-Airborne Ground Proximity Warning Equipment", Document No. RTCA/DO-161A, Washington, D.C., May 27, 1976.
- 12) D. Bateman, "The Introduction of Enhanced Ground-Proximity Warning Systems (EGPWS) into Civil Aviation Operations Around the World", in Proc. 11th Annual European Aviation Safety Seminar(EASS '99), Amsterdam, Netherlands, March 8-10, 1999.
- 13) Federal Aviation Administration, "Precision Runway Monitor Demonstration Report", Document DOT/FAA/RD-91/5, February, 1991.
- 14) Radio Technical Committee on Aeronautics (RTCA), "Minimum Performance Specifications for TCAS Airborne Equipment", Document No. RTCA/DO-185, Washington, D.C., September, 1983.
- 15) P. Ryan and W. Brodegard, "New Collision Avoidance Device is Based on Simple and Passive Design to Keep the Cost Low", ICAO Journal, vol. 52 no. 4, May, 1997.

- 16) F. P. Coenen, G. P. Smeaton, and A. G. Bole, "Knowledge-Based Collision Avoidance", *Journal of Navigation*, vol. 42 no. 1, 1989.
- 17) Y. Iijima, H. Hagiwara, and H. Kasai, "Results of Collision Avoidance Maneuver Experiments Using a Knowledge-Based Autonomous Piloting System", *Journal of Navigation*, vol. 44 no. 2, 1991.
- 18) D. H. Taylor, "Uncertainty in Collision Avoidance Maneuvering", *Journal of Navigation*, vol. 43 no. 2, 1990.
- 19) A. Chakravarthy and D. Ghose, "Obstacle Avoidance in a Dynamic Environment-A Collision Cone Approach", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 28 no. 5, pp. 562-574, September, 1998.
- 20) R. Lachner, "Collision Avoidance as a Differential Game Real-Time Approximation of Optimal Strategies Using Higher Derivatives of the Value Function", in *Proc. IEEE International Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, Orlando, FL, October 12-15, 1997, pp. 2308-2313.
- 21) A. R. Pritchett, "Pilot Non-Conformance to Alerting System Commands During Closely Spaced Parallel Approaches", Sc.D. Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, December, 1996.