

309

学位論文

レ一夕管制手法に関する研究

平成6年12月20日提出

指導教官 水町守志 教授

東京大学 大学院工学系研究科

電子工学専攻 27122

三浦 昭

目次

1	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の内容	2
2	航空の安全に関する設備	4
2.1	航空交通管理	4
2.1.1	航空交通管理	4
2.1.2	飛行方式	6
2.1.3	航空交通管制業務	6
2.1.4	航空路とターミナル空域	9
2.1.5	管制情報処理システム	15
2.2	管制警報システム	18
2.2.1	航空の安全に関する設備	18
2.2.2	管制警報システムの分類	19
2.2.3	エンルートにおける管制警報システム	21
2.2.4	ターミナル空域における管制警報システム	23
2.2.5	考察	26
2.3	衝突防止システム	27
2.3.1	機上主導型衝突防止システム: ACAS	27
2.3.2	地上主導型衝突防止システム: GCAS	32
2.3.3	考察	32
3	航空路概念を用いた異常接近検出手法	34
3.1	従来の管制警報システムの問題点	34
3.2	管制用データテーブル	35

3.2.1	管制用データテーブルの導入	35
3.2.2	データテーブルの構成	37
3.2.3	データテーブルの更新	40
3.3	航空機の将来位置の予測	53
3.3.1	航空機の旋回運動の円近似	53
3.3.2	航空機の将来位置の予測	53
3.4	異常接近候補となる航空機対の選定	57
3.5	異常接近の検出	59
3.5.1	検出基準	59
3.5.2	保護空域の合算	59
3.5.3	異常接近の検出	59
3.6	シミュレーションによる評価	64
3.6.1	シミュレーション系の構成	64
3.6.2	保護空域の設定	68
3.6.3	結果	71
4	ポテンシャルを用いた衝突回避手法	75
4.1	衝突回避とポテンシャル	75
4.1.1	衝突回避の概念	75
4.1.2	ポテンシャルの定義	77
4.2	ポテンシャル分布を用いた手法	88
4.2.1	回避パターンの作成	88
4.2.2	航空機の将来位置の計算	88
4.3	ポテンシャル勾配を用いた回避手法	89
4.3.1	回避パターンの作成	91
4.3.2	収束性の向上	94
4.4	水平面内の回避パターンの生成結果	98
4.4.1	ポテンシャル分布を用いた手法	99
4.4.2	ポテンシャル勾配を用いた手法	99
4.5	課題	104
4.5.1	ポテンシャル分布を用いた手法: 3次元回避への拡張	104
4.5.2	ポテンシャル勾配を用いた手法: 回避方向の選択	111
4.5.3	異常接近に関連する情報	119

5	知識処理を用いた管制手法	122
5.1	知識処理を用いた航空機の進路予測	122
5.1.1	ターミナル管制のモデル	122
5.1.2	データの構成	126
5.1.3	進路予測ルールの構成	126
5.1.4	推論系の構成	128
5.1.5	計算機上のシミュレーション	129
5.2	知識処理を用いた管制指示の生成	130
6	結論	141

目次

2.1	飛行情報区: FIR	5
2.2	セクタ区分図	7
2.3	航空交通管制業務	10
2.4	航空交通管制業務の分類	11
2.5	運航票	12
2.6	巡航高度の割り当て	14
2.7	RDP システムの処理内容	17
2.8	航空機の安全に関わる設備	20
2.9	管制警報システムの動作	22
2.10	異常接近検出の概念図	24
2.11	高度方向の進路予測	25
3.1	異常接近検出手順	36
3.2	管制用データテーブルを用いた管制警報システム	38
3.3	管制用データテーブルの構成	52
3.4	旋回開始・終了時のバンク角遷移に伴う予測誤差	54
3.5	円近似を用いた位置予測	55
3.6	異常接近の可能性のある航空機対	58
3.7	異常接近の判定基準	60
3.8	高度方向の距離テスト	62
3.9	水平方向の距離テスト	63
3.10	旋回運動中の航空機の距離テスト	65
3.11	シミュレーションソフトの構成	66
3.12	画面表示	67
3.13	予測誤差	70

3.14	位置予測誤差	73
3.15	異常接近検出処理量の削減	74
4.1	衝突回避と元の進路への復帰	76
4.2	航空機によるポテンシャル	79
4.3	航空機間隔に関するポテンシャルの計算例	81
4.4	進路に関するポテンシャルのパラメタ	82
4.5	進路に関するポテンシャル	83
4.6	進路に関するポテンシャルの計算例	85
4.7	急激な回避動作の抑制	86
4.8	複雑な回避動作の抑制	87
4.9	航空機の将来位置の計算	90
4.10	時空間中の標本点の配置	92
4.11	旋回時の標本点間の関係	95
4.12	処理の高速化のための平滑	96
4.13	回避指示生成に要する計算回数	102
4.14	望ましくない平衡状態	103
4.15	ポテンシャル分布を用いた回避:	105
4.16	ポテンシャル分布を用いた回避:	106
4.17	ポテンシャル分布を用いた回避:	107
4.18	ポテンシャル勾配を用いた回避:	108
4.19	ポテンシャル勾配を用いた回避:	109
4.20	ポテンシャル勾配を用いた回避:	110
4.21	3次元衝突回避: 水平方向の回避	112
4.22	3次元衝突回避: 高度方向の回避	113
4.23	3次元衝突回避: 3機の回避	114
4.24	衝突回避時の航空機間の最接近距離	115
4.25	回避方向の選択の指針	116
4.26	回避方向の選択基準	118
5.1	ターミナル空域のモデル	125
5.2	航空機データの分類	127
5.3	知識処理を用いた航空機の進路予測: 1/4	131
5.4	知識処理を用いた航空機の進路予測: 2/4	132

5.5	知識処理を用いた航空機の進路予測: 3/4	133
5.6	知識処理を用いた航空機の進路予測: 4/4	134
5.7	管制指示の生成例: 1/5	136
5.8	管制指示の生成例: 2/5	137
5.9	管制指示の生成例: 3/5	138
5.10	管制指示の生成例: 4/5	139
5.11	管制指示の生成例: 5/5	140

表 目 次

2.1	TCAS の性能	33
3.1	“flightLevel”: 航空路データテーブルの構成	41
3.2	“route”: 航空路の基本情報	42
3.3	“fix”: フィックスデータ	43
3.4	“maneuver”: 進路変更に関するデータ	44
3.5	“navaidType”: 電波施設の型	45
3.6	“navaid”, “radar”: 電波標識・レーダ情報	46
3.7	“target”: 航空機データテーブルの構成	47
3.8	“flight”: 飛行計画	48
3.9	“flightPath”: 飛行経路	49
3.10	“warning”: 警報	50
3.11	“encounter”: 異常接近	51
3.12	シミュレーションに用いた主要なパラメータ	69
4.1	回避パターン生成用パラメータの設定	101
4.2	異常接近に関する情報	120

内容梗概

航空交通量の増加にともない航空機同士の衝突の危険も増大してくる。航空交通の安全を守るためには、管制官等を支援し衝突の危険を予防するような施設を充実させることが有効な手段となる。地上主導型(地上施設により処理を行なう方式)で現在実用化されているシステムにおいても、航空機同士の衝突防止に関する機能は、まだ整備されているとは言い難い。航空機上に搭載する衝突防止システムとしては ACAS (Airborne Collision Avoidance System) が研究・実用化されているが、搭載されるレーダの精度も計算機の処理能力も地上施設のそれには及ばず、現在実用の域にある ACAS II でも高度方向の回避に機能が限定されている。本論文では、様々な管制情報や高精度のレーダが利用でき、なおかつ処理能力の高い計算機も利用できる地上主導型のシステムに着目し、航空路概念を用いた異常接近検出およびポテンシャルを用いた衝突回避指示の生成の各手法を示し、最後に知識処理を用いた管制の高度化について述べる。

一般に航空交通管制の対象となる航空機は、事前に提出された飛行計画に従い定められた航空路を承認された高度と速度で飛行しながら目的地に向かう。これらの飛行計画情報とレーダ情報とを参照すれば、管制下の航空機の予測進路や航空機間の位置関係を容易に把握できるようになる。しかしながら現在の管制情報処理システムは飛行計画情報とレーダ情報とが異なる処理系で処理されており、両者を統合して扱うには適していない。そこで本論文では、航空機および航空路の位置関係を的確に把握する手段として管制用データに航空路の概念を導入する。新たに導入される航空路データは航空路の構成に関する情報と、各航空路上の航空機との位置関係を示す情報とで構成される。これに従来の航空機データ(レーダ情報、飛行計画情報等)を組み合わせることで、航空機の将来位置の予測や航空機間の異常接近(衝突の危険)の検出が容易になる。

進路予測においては、航空路データを用いて航空路と航空機の位置関係を実時間で把握しておき、航空機の進むべき航空路の予測を行なう。予測時間内に航空

路を変更する航空機については、直線予測と円周旋回予測を併せて用いることにより位置予測精度を向上させる。実際の航空機の運動は必ずしも円周旋回運動とはならないが、円近似を用いることによる誤差は、レーダの測定誤差に起因する予測誤差の1割未満に収まっており、実用上問題のない範囲となっている。レーダの測定誤差等をもとにして適切に異常接近の判定基準を設定すれば、不要警報の発生率を十分低く抑えたまま衝突の危険のある航空機対の99%以上を検出することが可能となる。また異常接近検出に際しては、個々の航空機対の異常接近検出を行なう前に、異常接近候補となる航空機対の選定を行なう。すなわち航空路データを仲介として航空機間の相対関係を把握することにより、異常接近の検出を行なう必要のある航空機対を選び出すことが可能となる。例えば同一航空路上を飛行している航空機に関しては互いに相前後して飛行している航空機との異常接近を考慮すれば良いし、フィックス(航空路の分岐・合流点)近傍を飛行中の航空機であれば同様にフィックス近傍を飛行している他の航空機との異常接近を考慮すれば良い。このような選定基準を用いることにより、異常接近候補の数を航空機数の1乗のオーダーに絞り込むことができる。また選定に要する処理量は航空機密度の高い空域でも航空機数の1乗のオーダーに抑えることができる。結果として、従来航空機数の2乗のオーダーであった異常接近検出処理量を1乗のオーダーに抑えることが可能となる。

異常接近が検出された航空機対に対しては、適切な回避指示を与える必要がある。回避指示を生成するにあたっては衝突のない回避パターンを得るのみならず、回避終了後の本来の進路への復帰まで考慮することが望ましい。また回避中の速度変化や急激な回避、複雑な回避などは抑制すべきである。これらの条件をみたとような回避パターンを生成すると、従来用いられてきたような“if...then”形式のアルゴリズムでは柔軟性に欠ける繁雑なものとなり、矛盾も生じやすい。そこで本論文では、衝突回避条件を統一的に表現する手段として“ポテンシャル”の概念を導入する。ここで述べる“ポテンシャル”は回避経路の妥当性を表す指標として用いるものとする。例えば衝突の危険のない回避パターンを生成するためには航空機間に斥力を生じさせるようなポテンシャルを設定し、回避後にもとの進路に復帰させるためには本来の進路から航空路に対して引力を生じさせるようなポテンシャルを設定する。同様にして他の各条件に対応するポテンシャルも設定し、その総和を計算する。回避パターンの生成は、計算されたポテンシャルが最も低くなるような経路を各航空機に選択させることにより実現される。

ポテンシャル法による膨大な計算量を削減するために、ポテンシャル分布を

用いた回避パターンの生成手法とポテンシャル勾配を用いた手法を示す。いずれの手法も、前述の異常接近検出手法により衝突の危険があると判断された航空機の将来位置を、レーダ情報や飛行計画情報をもとに計算することから始まる。各将来位置は10秒程度の時間間隔で標本化され、時空間中に配置される。これを初期状態とする。そして配置された標本点を繰り返し移動させることにより、ポテンシャルの低い回避パターン、すなわち衝突の危険がなく、また他の回避条件をも満足するような解を得る。このような解の探索にあたって、ポテンシャル分布を用いた手法では、探索空間の限定のため、各時点における標本点を起点とした回避パターンの候補をいくつか生成し、それらの候補の中からポテンシャルの低くなるような経路を選択する。ただし一度選択された過去の時点の回避パターンは確定しているものとして、次の時点の回避パターンを選択する。また、ある航空機の回避パターンを選択する際には他の航空機の回避パターンは変更しないものとする。一方ポテンシャル勾配を用いた手法では、ポテンシャルそのものではなく、その微分、すなわち各標本点にかかる力を計算し、その力に応じて各々の時点の標本点の移動を繰り返す。標本点にかかる力が閾値以下になった時点で処理を終了し、その時点の標本点配置を回避パターンとする。

いずれの手法においても、2機の航空機の衝突のケースでは適切に衝突を回避できるような解が得られる。また各々の手法には、以下のような特徴がある。ポテンシャル分布を用いた手法は空間方向に広く解を探索することができ、高度方向と水平方向を考慮した3次元回避や3機以上の衝突回避が容易に実現できるが、反面回避パターンの候補を限定したことにより時間方向の見通しが悪くなる。結果として、回避後の復帰動作の選択が適切に行なわれない場合がある。ポテンシャル勾配を用いた手法では、時間方向の標本点間の位置関係が常に把握されているため、回避後の復帰動作まで含めた解が容易に得られるが、反面空間方向の解の探索が制限されるため、標本点の初期配置が最終的な回避パターンに大きく影響してくる。そのため、3次元回避や3機以上の回避では適切な解が得られない場合がある。ポテンシャル勾配を用いて適切な回避パターンを容易に生成するためには、初期状態において各航空機のおおまかな回避方向を選択し、適切に標本点を配置することが必要となる。その際の回避方向の選択基準としては最接近時の航空機間の相対的な位置関係を用いることができる。

エンルート空域における航空機の衝突防止に対しては、上記の異常接近検出手法や衝突回避手法がそのまま適用できるが、反面、ターミナル空域においては、航空機の進路は管制官の指示に任されており、飛行計画情報やレーダ情報のみを

用いていたのでは適切な航空機の進路予測や回避指示の生成は困難となる。本論文ではターミナル空域にも対応できる手法として、知識ベースを用いた航空機の進路予測・管制指示の生成手法を示す。すなわち管制官毎の管制手法を知識(規則)として蓄えることにより、各管制官の管制意図に沿った航空機の進路予測が可能となる。単純なターミナル空域のモデルであれば、予測時間を3分程度にとれば、ほぼ現実的な処理時間で航空機の進路予測が可能になる。用いる知識ベースは必要に応じて取捨選択できるため、管制官の交替にも、知識ベースの交換で対処できる。ただし現実のターミナル空域のような複雑なモデルに対応するためには、処理時間や記憶容量などの面で、改善の余地が残されている。

ターミナル空域においては、全ての到着航空機は滑走路に向かって収束するような進路を飛行することになり、航空機に対する管制指示には、暗黙のうちに航空機間の衝突を回避するような指示も含まれることになる。すなわちターミナル空域において航空機の着陸に至るまでの進路予測が可能であるということは、衝突の危険のない管制指示の自動生成も可能であることを示唆している。現実の場面での管制指示の自動生成のためには、知識の構成方法や安全性等の面で解決すべき問題は多いが、本論文では、単純なモデルにおける管制指示の生成手法と、現実の管制の自動化への展望について述べて、まとめとする。

Chapter 1

序論

1.1 研究の背景

航空交通量の増加にともない、航空機同士の衝突の危険も増大してくる。幸いにして、現在のところ国内では航空路上の航空機密度も比較的 low、近年は空中事故は生じていない。しかし一人の管制官が処理できる航空機数にも限界がある。人的な過ちや不測の事態により航空機が衝突の危険に晒されることもあり、異常接近(ニアミス)のニュースは、しばしば報じられているところである。航空交通の安全を守るためには、管制官の能力に応じた適正な管制セクターを設けると共に、管制官等を支援し衝突の危険を予防するような設備を充実させることも有効な手段である。

航空機の衝突防止装置としては ACAS が ICAO で採用され、実用の段階に至っている。しかしながら ACAS のような機上搭載用の衝突防止装置では、大規模な処理系は搭載できない。回避機能の面では水平回避を考慮した ACAS III の研究も進められているが、実用段階にある ACAS II は高度方向の回避に機能が限定されている。また航空機密度の高い空域では誤警報が多くなるなど、制約も多い。

これに対して地上主導型の衝突回避では、比較的大型の計算機や高精度のレーダ、飛行計画等の管制情報も利用できるなど、機上主導型に比べて自由度が高くなる。

地上主導型の設備を前提とした衝突回避の研究を歴史的に見ると、まず第一段階として管制間隔(安全間隔)の維持を主眼において比較的遠い将来までの進路予測を行う方式が開発された。次いで衝突回避の方法を得る事に主眼において

短時間後の進路予測を行う研究が行われている。

実用化されている地上主導型の設備としては、管制官を対象とした、いわゆる管制警報システム (Conflict Alert) がある。これは我国では航空路レーダ情報処理システムに取り入れられている。またターミナルを対象とした管制警報システムも、米国ではターミナルレーダ情報処理システムに現実に取り入れられている。

1.2 本研究の内容

本研究においては、航空交通管制を安全面から支援するための、管制情報処理システムの高度化を目的としている。すなわち、管制手法の改善および新たな管制情報処理の実現に向けて、以下のような内容の検討を行なう。

一般に、計器飛行方式に従う、すなわち航空交通管制下にある航空機は、提出された飛行計画通りに、定められた航空路を承認された高度と速度で飛行しながら目的地に向かう。このような航空機や航空路の関係を的確に把握できれば、航空機間の異常接近検出の処理効率を高めることができると考えられる。しかしながら従来のシステムにおいては、異常接近検出や衝突回避は航空機主体であり、航空路情報の活用には消極的である。そこでまず、航空路の概念を基準にして一連のデータを統一的に表現する手段として管制用データテーブルを導入し、当該データテーブルを用いた異常接近検出について検討する。

異常接近が検出されたということは、近い将来において航空機同士の衝突の危険があると判定されたことを意味する。そのような航空機に対しては、衝突を回避するような指示を与える必要がある。衝突回避の条件としては、十分な航空機間隔が得られるような回避パターンを生成することが必要であるが、その他にも様々な条件が挙げられる。これらの条件を統一的に表現する手段として、回避条件の“ポテンシャル”による数式化を行ない、ポテンシャルを用いた衝突回避について検討する。

ターミナル空域、すなわち空港の周辺空域においては、管制下の航空機の進路は管制官の指示によって定められる。到着する航空機を限られた滑走路に安全に誘導するために、ただでさえ管制指示は複雑になるが、その指示内容自体、管制官の管制意図の相違によって異なってくる。そのような状況に応じた進路予測を行なうとなると、従来用いられてきたような手続型の手法では、各管制官に柔軟に対応することは困難となる。そこで知識処理の手法を導入することにより各管制官に対応した航空機の進路予測を行なうことを検討し、さらに、将来的な管制

の自動化への展望について述べる。

以下、**2**では航空の安全に関する設備についての現状を述べる。**3**では航空路概念を用いた異常接近検出手法について述べる。**4**ではポテンシャルを用いた衝突回避手法について述べ、**5**では知識処理を用いた管制手法について述べ、**6**でまとめとする。

Chapter 2

航空の安全に関する設備

2.1 航空交通管理

2.1.1 航空交通管理

民間航空に関しては、国際連合の下部組織である国際民間航空機関 (ICAO) により、国際的な種々の取り決めがなされている。地球の上空は全て飛行情報区 (FIR) と呼ばれる空域に分割されており、世界の各国・地域 (ICAO に加盟していない国) は、自国またはその地域を含んだ FIR を担当している (図 2.1)。各 FIR においては、以下のような活動が行なわれている。

飛行情報の提供: 気象状況、航法援助施設の状況、空港状況など航空機の飛行に必要な種々の情報を提供する。

航空保安施設および飛行場の保安: 電波や灯火を用いて航空機の運航を援助する施設を航空保安施設と称する。

捜索救難: 遭難した航空機の捜索や援助のための連絡、または援助活動を行なう。

航空交通管理:

上記 4 種の活動のうち、前 3 者は基本的な義務であるが、航空交通管理は必ずしも飛行情報区の担当国に義務づけられたものではない。しかし航空交通の発達した今日、殆どの国が航空交通管理を行なっている。

わが国の政府では、民間航空は運輸省の所管に属しており、したがって運輸省が航空交通業務の一部として航空交通管理 (Air Traffic Management: ATM) を行なっている。航空交通管理は航空交通管制 (Air Traffic Control: ATC) と航空

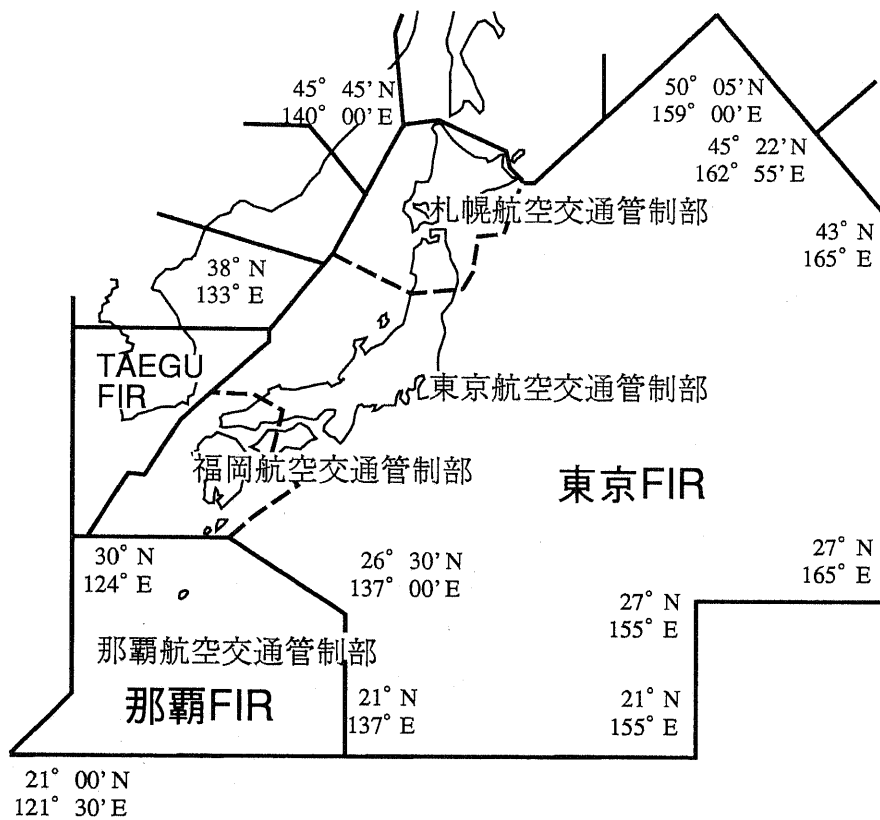


Figure 2.1: 飛行情報区: FIR

交通流管理 (Air Traffic Flow Management: ATFM) とに大別できる。歴史的には、航空交通管制が発達し、後に航空交通流管理が分派独立したとも言える。

2.1.2 飛行方式

航空機の飛行方式には2種類ある。常に管制官の指示 (clearance) に従って飛行する 計器飛行方式 (Instrument Flight Rules; **IFR**) と、それ以外の 有視界飛行方式 (Visual Flight Rules; **VFR**) である。VFR は気象条件が良好で、十分な視界が保たれる場合にのみ許される飛行方式である。VFR においても種々の航法援助施設を利用するのは自由であるが、原則として全て操縦士の責任で飛行し、地上の管制機関からの指示や助言は受けない。VFR と管制機関とが関わりを持つのは、極めて概略的な飛行計画を提出する事と離着陸時に承認を受ける事程度である。したがって、本研究においては、VFR 機は管制対象外とみなす。以下、特に記さない限り、“航空機” は IFR 機のみを指すものとする。

旅客運送に携わる航空機は殆どが IFR で飛行している。IFR においては、飛行経路、飛行高度、巡航速度、経路上の定点の予定通過時刻等を記した詳細な飛行計画を管制機関に提出し、承認を受ける必要がある。IFR に従う航空機 (IFR 機) は、管制機関の承認を受けた飛行計画に従って飛行する。飛行に際しては、経路上の定点を通過する都度、操縦士は管制官に通過の事実を無線電話で報告する。また、飛行中に飛行計画を変更する必要がある場合には、操縦士は管制官に報告した上で、管制承認を得て変更する。管制官は監視レーダや操縦士からの報告をもとにして、担当管制空域 (セクタ: 図 2.2) 内を通過する IFR 機の状況を常に把握している。IFR 機の安全に関しては管制官が責任を有しており、必要に応じて管制指示を発する。

2.1.3 航空交通管制業務

航空保安業務の中で、航空交通管制業務は、航空交通業務のひとつとして位置付けられており、図 2.3 のように細分されている。航空交通管制業務は、“航空交通の安全と秩序の維持を図るため離着陸の順序、時機、飛行経路等を指示し、気象状況、地上の状態等航空機の運航に必要な情報を提供する業務” であり、平たく言えば、航空機の衝突防止が第一の任務となる。

航空交通管制業務中の各業務は以下のような位置付けになる (図 2.4)。
飛行場管制業務 空港に設けられた管制塔において、飛行場における離着陸の順

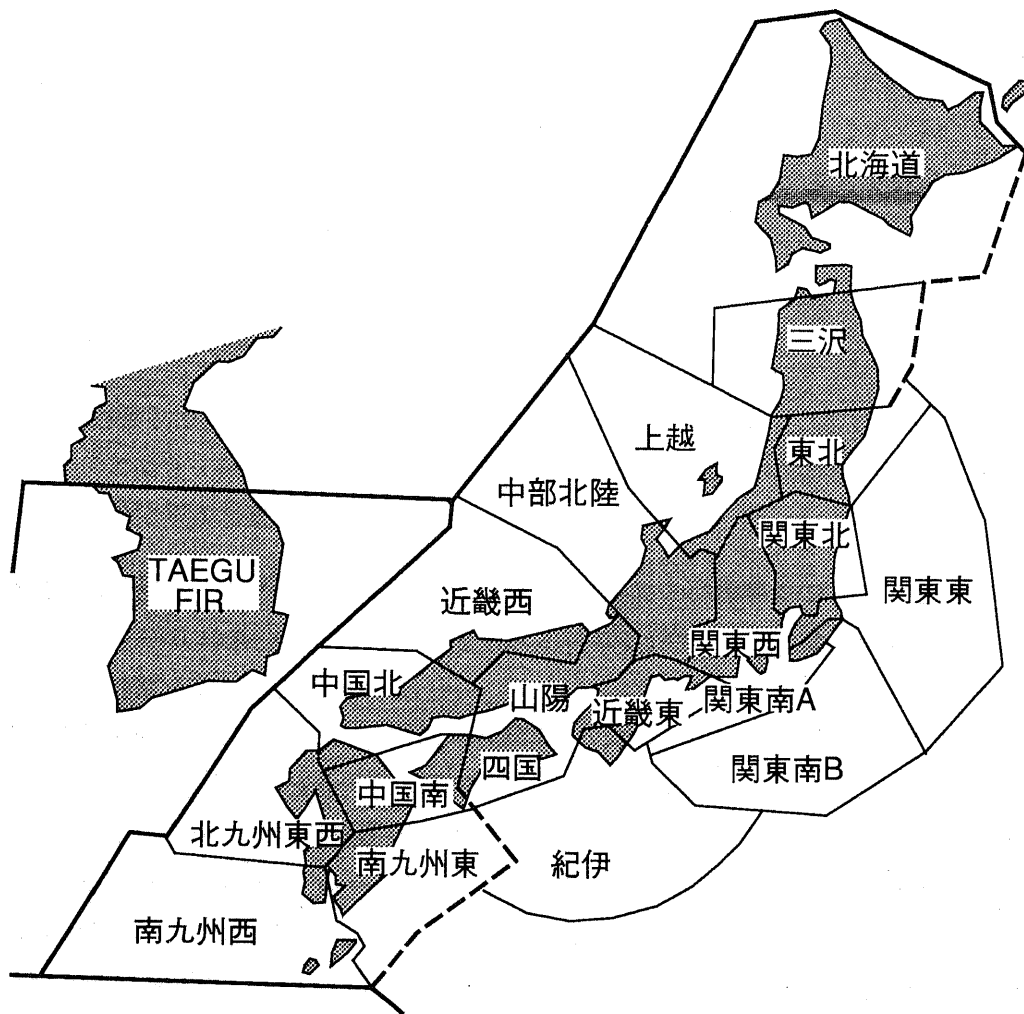


Figure 2.2: セクタ区分図

序, 時機, 方法等を指示する業務である。

進入管制業務 主として進入管制区 (管制圏の外側に階段状に広がった空域) 内の IFR の航空機に対し, 進入・出発の順序, 経路, 方式の指定や, 上昇・降下の指示, 進入のための待機の指示などを行なう。レーダを用いないで行なう管制業務である。

ターミナル・レーダ管制業務 空港監視レーダ (ASR) を用いて行なう管制業務であり, その他の点は進入管制業務と全く同様である。

着陸誘導管制業務 着陸する航空機に対し, PAR(精密進入レーダ) を用いて, コースと高さを指示して誘導を行なう管制業務である。通常は空港から 5NM 前後の位置から航空機の誘導を始める。

航空路管制業務 空港周辺の空域を除き, 東京 FIR および那覇 FIR を飛行する全ての IFR の航空機に対して行なわれる管制業務で, 全国 4 箇所の航空交通管制部において行なわれる。

これらの航空交通管制の対象は, 管制空域内の IFR 機の交通である。航空管制の基本的な考え方は安全で円滑な航空交通の維持にあり, 第一に安全, 続いて秩序だった, 迅速な管制処理が要求される。

管制官は数人の班 (クルー) をもって担当するセクタの航空管制を行なう。各クルーは各々のセクタ毎に独立して管制を行ない, 航空機が隣接するセクタに移動する際には, セクタ相互で連絡 (調整) の上, 管制の移管 (航空機の担当の委譲) が行なわれる。また, 航空機の出発空港から目的空港に至る全ての飛行経路に関係するセクタには, その航空機の運航票が予め配布されている図 2.5。運航票とは, 航空機の飛行計画の主要部分を一定の形式の表にしたものである。配布された運航票により, 管制官は取り扱うべき航空交通の展開を知ることができ, 他方で運航票は管制行為の記録としての役割も果たす。すなわち管制官は, 航空機からの通報や与えた管制指示などの主要情報を運航票に記入するのである。

管制官のクルーは, セクタ内に存在する全ての計器飛行方式の航空機の管制を行なうが, 同時に取り扱える機数, すなわち管制容量には限界がある。管制官の作業のうち, 頭脳による作業としては以下のものが挙げられる。

- 交通の進行の把握と安全の確認
- 将来の交通状態の予測と危険の発見

- 危険が予測される場合の処理 (承認または指示の作成)
- 飛行計画が変更される場合の処理 (指示の作成)

また身体的作業としては、以下のものが挙げられる。

- 操縦士との交信
- 他の管制機関との交信
- レーダ表示器による監視
- 運航票の記入や処理

これらの作業負荷は、取り扱い機数とともに増大する。

作業負荷が過大になると、管制処理に多大な遅延を生じ、實際上管制不能、すなわち管制容量を超えたこととなる。管制容量は交通状態や管制官の個人的資質に依存し、定義は必ずしも明確ではないが、通常、同時取り扱い機数をもって表示する。

2.1.4 航空路とターミナル空域

航空交通管制は、航空路を対象とした管制機関と空港を対象とした管制機関とに分けて行なわれる。航空路管制はエンルート管制とも呼ばれる。日本の担当する飛行情報区を、札幌管制部、東京管制部、福岡管制部、那覇管制部の4管制機関で分割し、各々の中に含まれる航空路について航空路管制が行なわれる。航空路は正式には管制区と呼ばれ、地図上の定点を結ぶ線分で形成されている。

空港およびその近傍の上空(管制圏)に、その外側の半径40NM程度の区域の上空を加えた空域をターミナル空域と称する。ターミナル管制は空港に置かれた空港管制所で行なわれる。ターミナル管制の任務は、空港において出発したり到着したりする航空機および当該空港の上空を通過する航空機の管制である。

航空路管制

航空路の管制は、ターミナル空域を除いた空域を、セクタと称する適当な広さの空域に分割し、クルーと呼ばれる管制官のチームが担当する。セクタは航空交通の最繁忙時においても管制容量を超えないように設定されている。

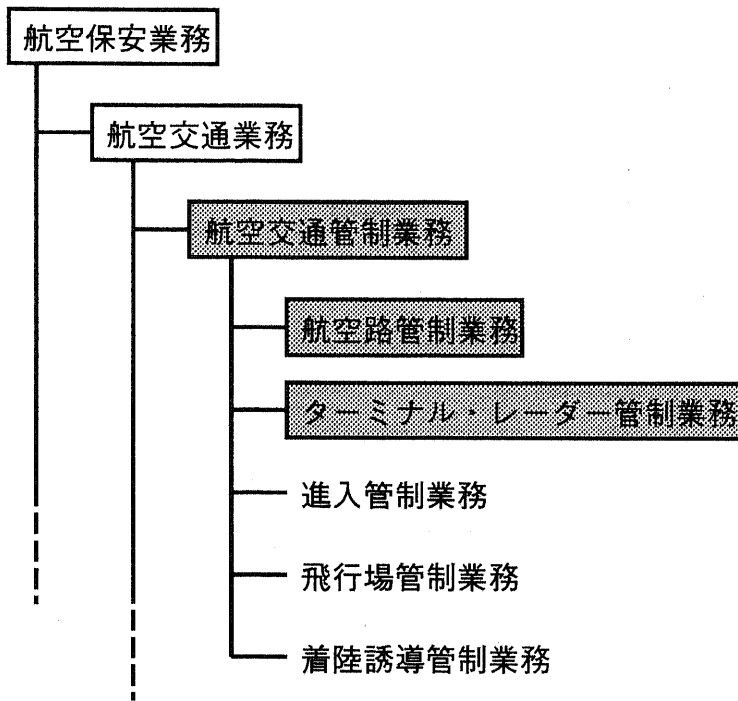


Figure 2.3: 航空交通管制業務

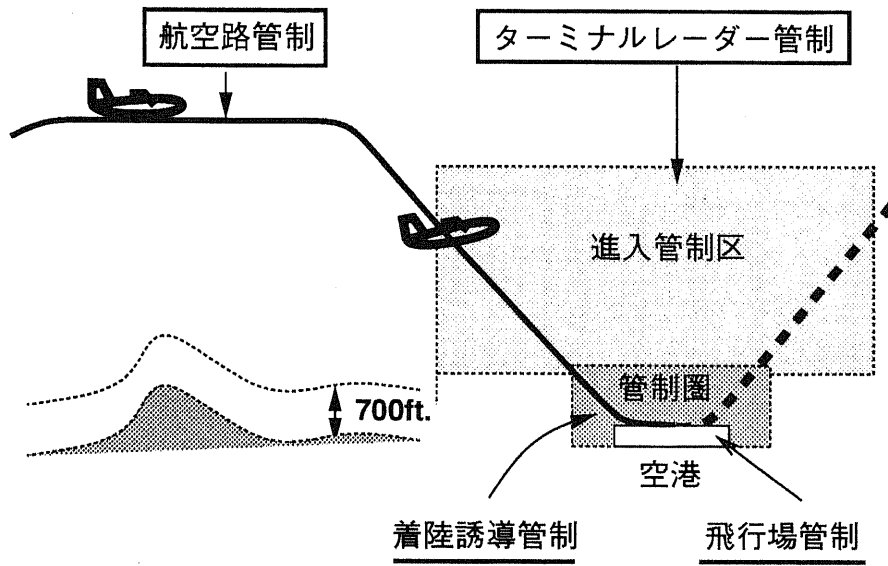


Figure 2.4: 航空交通管制業務の分類

便名	JL500	出発時刻	D0412	フィックス (函館)	HW	フィックス名	310	指示高度	RJCC HW J11L MX GOC	飛行ルート	TLE RJTT	0912-0420
	147	通過時刻		26								
	DC10		C 487	04								
	1524											

対気速度 ←

打出月日-時分 ←

Figure 2.5: 運航票

航空路は、VOR等の電波航行援助施設の設置地点や、洋上では緯度経度で表現された地点等、地図上の定点を結んで形成される。飛行計画では、このような定点を列挙することにより飛行経路を記述する。

航空路上では、東行・西行の飛行方向およびIFR・VFRの飛行方式の相違により生じる4種の組合せに対し、各々飛行高度と高度幅が割り当てられている(図2.6)。したがって、同一経路を飛行する航空機があっても、飛行高度が異なれば衝突する恐れはない。また管制下の航空機が飛行高度を変更する場合、すなわち上昇・降下する場合には、管制官が安全を確認した上での管制承認が必要となる。

航空管制の大原則は、航空機相互間に安全のため定められた値(管制間隔)以上の間隔を、3次元の少なくとも1軸方向に保つことにある。航空路上では、規定された飛行高度が上下間隔を意味している。また航空路には中心線からの許容幅が規定されており、これが横方向間隔を意味している。したがって航空路を同一高度で(すなわち同一方向に)巡航する航空機相互の前後間隔を管制間隔以上に保持することが、安全を維持する上での基本となる。ただし、高度の変更に際しては、横切る飛行高度に関しての前後間隔に対する配慮が必要となる。

ターミナル管制

空港を中心としたターミナル空域における管制の主たる対象は、出発機および到着機である。ターミナル管制は、いわゆる管制塔とIFRルームとによって行なわれる。管制塔では、目視によって滑走路とその近傍の空域内で離発着する航空機および空港面の航空機や車両を担当し管制する。IFRルームではレーダ監視により航空路から入域する航空機を滑走路へと導く入域管制、および離陸した航空機を滑走路へと導く出域管制とが行なわれる。交通が混雑した場合の入域管制は、セクタを空港への遠近による2空域に分割して行なうこともある。

ターミナル空域における航空機の航行は、航空路における航行とは著しく異なってくる。航空路においては一定高度かつ一定速度での直線的飛行が基本的な航行である。これに対してターミナル空域では、出発機も到着機も飛行高度と飛行速度の変化が著しいのが特徴である。また飛行経路も複雑になるのが普通である。航空機は風に向かう方向に離着陸するのが大原則であるので、交差した滑走路があれば、風向きにより用いる滑走路は異なってくる。単一滑走路の空港においては、風向きが変われば離着陸の方向が180度変わることになる。いずれの場合も航空路管制とターミナル管制との接点である管制移管点と滑走路への進入点を結ぶように、入域・出域の飛行経路が設定される。この経路は基本的に定式化

間 隔	巡航高度	進行方向	0° ~179°		180° ~359°	
	29,000以上の一例 29,000以下の一例		計 器 飛行方式	有視界 飛行方式	計 器 飛行方式	有視界 飛行方式
1,000 フィート 間隔	↑ 36,000	フィート	---	---	---	CA
	35,000	---	---	AD	---	---
	34,000	---	---	AD	---	---
	33,000	---	AD	---	---	---
	32,000	---	---	---	---	CA
	31,000	---	---	---	AD	---
	30,000	---	---	AD	---	---
500 フィート 間隔	29,000	---	AD	---	---	---
	28,500	---	---	---	---	CA
	28,000	---	---	---	AD	---
	27,500	---	---	AD	---	---
	27,000	---	AD	---	---	---
	26,500	---	---	---	---	CA
	26,000	---	---	---	AD	---
↓ 25,500	---	AD	---	---	---	

Figure 2.6: 巡航高度の割り当て

されていて、風向きに従って選択される。

ターミナル管制と航空路管制との決定的な相違は、滑走路の存在にある。滑走路に着陸機であれ離陸機であれ、同時に2機以上の存在は許されず、到着機が着陸したとすれば、その航空機が滑走路へ出るまでは、他の航空機は滑走路を使用することはできない。到着機が連続したとすれば、先行機が滑走路を離れる時点で後続機が滑走路に接地するのがもっとも効率の良い滑走路の使用となる。理想的には接地から誘導路に出るまでの時間が連続する着陸の最小時間間隔であるが、実際は安全のために余裕を持たせるので、滑走路の現実の最大使用可能な頻度が空港の最大容量となる。

航空交通で最も混雑するのがターミナル空域である。3次元運動をする航空機にとって航空路の設定の自由度はかなり大きいはずであるが、航空交通は空港と空港を結ぶ、すなわち点と点を結ぶ交通であり、始点と終点に交通が集中するのは当然のことである。交通が特に集中するようなターミナル空域においては計器飛行方式のみを認める措置もとられている。

到着機を着陸させる順番は、原則としてターミナル空域に入域した時刻順となる。着陸のための最終進入を開始するタイミングの調整が、ターミナル管制の重要な技術である。時間の調整には遅延をとるのが普通である。これにはホールディング、マルチパス、レーダベクタ等の方法がとられる。マルチパスは通過所要時間が異なる経路を用意しておき、適当な経路を選択することによる時間調整であり、レーダベクタは管制官がレーダ表示器を利用しながら、適宜に経路の変更を指示して行なう時間調整である。

2.1.5 管制情報処理システム

管制情報処理システムは、ターミナルにおけるターミナル・レーダ情報処理システム (ARTS) と、航空路における飛行計画情報処理 (FDP) システム、レーダ情報処理 (RDP) システムにより構成される。これらのシステムは、レーダ・サイトから入力されたレーダ情報とテレタイプ回線により入力された飛行計画情報とを照合し、航空機を自動識別するとともに、これらの情報を基礎にして、管制卓のレーダ表示装置上に航空機映像シンボルに航空機の便名、高度等の管制に必要な飛行情報を付加して表示する。

管制情報処理システムは、以下のように分類される。

飛行計画情報処理 (FDP) システム 札幌、東京、福岡、那覇の各管制部で管制する航空機の飛行計画が、各出発空港からテレタイプ回線網により入力され、

このシステムにより飛行計画入力時および出発時刻の入力時に、管制に必要な運航票を作成し、各管制卓設置してあるプリンタで自動的に印刷するものである。

レーダ情報処理 (RDP) システム レーダサイトからレーダ情報が入力され、2次レーダ情報の自動追尾を行ない、さらにFDPシステムから飛行情報が入力され2次レーダ情報と照合することにより、航空機の自動識別を行なう。さらにこれらの情報を基礎にして、管制卓のレーダ表示装置上に、航空機映像シンボルに付加して航空機の便名、高度等の管制に必要な飛行情報を表示する。

ターミナル情報処理システム (ARTS) RDPシステムと同様に、レーダ表示装置上の航空機映像シンボルに付加して便名、高度等を表示するものであり、自動識別を行なうための飛行計画情報は、FDPシステムから入力している。

RDPシステムの処理の流れを図2.7に示す。その内容は、機能別に、航空路監視レーダー ARSR(Air Route Surveillance Radar) および二次監視レーダー SSR(Second Surveillance Radar) からの入力をデジタル情報に変換するDIG(Digitizer)、トラッキング処理を行うTCU(Tracking Control Unit)、データ処理を行うCPU(Central Processing Unit)、異常接近検出を行うDCU(Display Control Unit)とに分けられる。DCUで検出された異常接近は、ディスプレイ PVD(Plan View Display) 上に警報表示される。

管制情報処理システムの特徴としては、以下のような点が挙げられる。

- 管制業務のうち、単純で処理量の多い事務的な作業を電子計算機に行なわせ、管制官を過重な労働から解放する。
- 管制資料を、より見やすい形式で管制官に提供することにより、交通状況の把握を容易にし、遅延を減少する。
- 管制相互間の定型的連絡業務を自動化する。
- 精度の高いデータを管制官に提供し、人間のエラーを減少し、安全性を高める。
- 画像表示により航空機の位置の連続的な監視が可能となる。
- 管制官の管制能力が増大し、より広範囲の交通状況の把握が可能となるので、管制官相互の連絡調整が減少する。

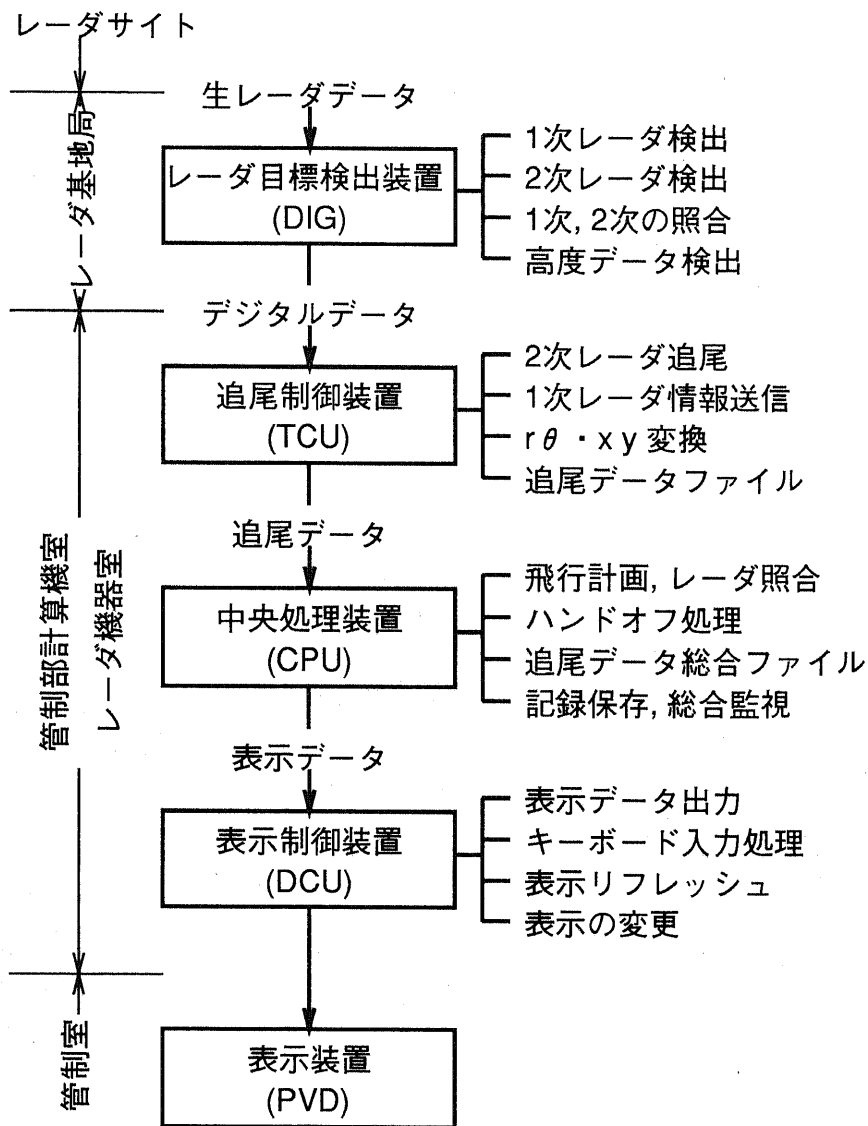


Figure 2.7: RDP システムの処理内容

- システムの動作状況の連続的監視により、システムの異常事態に対する警告が可能となる。
- 飛行経路について正確・迅速な予測が可能となり、空域の利用度が向上する。
- 交通の流れの制御（フローコントロール）に必要な予測を計算機に行なわせる。
- 計算機を使用し、より高度な交通実体等の分析が可能となり、システムに関するマネジメントが向上する。

2.2 管制警報システム

2.2.1 航空の安全に関する設備

航空交通管制においては、通常は管制官が管制下の航空機の衝突予防の責任を負っており、また同時にパイロットも、外部視認が可能な気象状態である限り、常に外部を目視により監視する義務を課せられている。しかしながら航空交通においては、航空機が高速で移動しているため、パイロット自身が他の航空機の接近を確認し、衝突の危険を予測してから回避動作を開始したのでは手遅れとなる場合が多い。また人的な過ちや不測の事態により、航空機が衝突の危険に晒されることもある。そのような事故を未然に防止するため、航空機の安全に関する様々な設備が研究され、また、実用化されている（図 2.8）。

これらのシステムは、それぞれ、航空機が安全に飛行するために必要な情報を管制官やパイロットに提供するためのものであり、大きく分けて以下の 3 種類になる。

地上主導型 地上施設（レーダー等）で検知を行う型である。この型はサービス対象によりさらに 2 つに分けられる。

- 管制官にサービスを行なう型。現在の地上管制システムと同様に管制官を対象とし、衝突の危険を知らせ、回避指示を出させるシステムとして開発が進められた。
- パイロットにサービスを行なう型。地上で監視を行いながら、機上に交通情報を伝送し、パイロットを助けることを目的とする。

機上主導型 機上装置で検知を行う型である。航空機上に搭載し、パイロットに危険を知らせるシステムであり、地上管制システムのバックアップとして働く事を目的とする。

これらの中で、機上主導型のシステムは、現在、ACAS(Airborne Collision Avoidance System. 米国では、TCAS: Traffic alert and Collision Avoidance System と呼ばれる) が国際標準として採用されており、すでに実用の段階に来ている。また、ACAS II では、警報のみでなく、上下方向の回避指示まで出せるシステムとなっており、現在、水平方向の回避指示も可能な ACAS III など、次世代のシステムについてもいくつか提案されている。

地上ベースシステムは、機上搭載システムに対して次のような点で有利となる。

- レーダーとして一次レーダーも使用でき、SSR 装置を搭載していない機も対象に出来る。
- 航空機密度が高い場合でも、監視能力は十分である。
- 設備の大きさに制限がないため、複雑な処理が可能である。

反面、航空機密度が高い空域で複雑な処理を行おうとすれば、高性能の計算機の設置が必要となる等の欠点もあるが、現在までに、このような地上ベースシステムとして、管制警報システム (conflict alert) が実用化されている。

2.2.2 管制警報システムの分類

管制警報システムの動作の概略は、図 2.9 に示すように、地上レーダで得られた航空機の位置情報をもとに航空機の将来位置 (3 分後) を予測し、一定時間内に 2 機の航空機が一定の距離範囲・一定の高度差内に接近すると予測される場合に管制官に警報表示するものである。このような接近状態は異常接近と呼ばれており、直観的にはニアミスと思っても構わない。検出された異常接近の警報は管制卓に備え付けられた PPI(Plan Position Indicator) 表示装置を経て管制官に伝えられる。

管制警報システムは、その対象空域によりエンルート管制 (航空路における管制) の管制警報システムと、ターミナル管制 (空港周辺の空域における管制) の管制警報システム とに分けられ、それぞれ以下のようなアルゴリズムの違いがある。
エンルート管制の管制警報システム 航空路はフィックス (航空路上にあらかじめ設けられた定点) を結んだ直線とみなして良く、航空機の高度・進路につい

サービス対象	地上主導型	機上主導型
パイロット	ATARS ATAS	BCAS ACAS II * ACAS III
管制官	Conflict Alert * RDP ARTS	

*: 既に実用化されているもの

Figure 2.8: 航空機の安全に関わる設備

ては、急激な変化は少ないと考えられる。したがって航空機の位置予測は直線予測が原則となる。

ターミナル管制の管制警報システム 航空機の高度・進路の変化が大きく、対象空港毎にその地理条件を考慮した特別な予測が必要となる。

エンルート管制の conflict alert は、わが国では RDP システムで採用されている。一方、ターミナル管制の conflict alert は日本では採用されていないが、米国ではヒューストンで実用化されている。

以下に、わが国で採用された conflict alert システムの異常接近警報機能の概要を説明する。

2.2.3 エンルートにおける管制警報システム

エンルートにおける管制警報システムにおいては、2機の航空機が一定時間内に一定の高度範囲かつ一定の距離範囲に接近し、管制間隔が保てないと予測された場合を異常接近状態とみなす。異常接近検出手順は、以下のようになる。

ラージフィルタ

航空機の性能上、定められた異常接近予測時間内に接近の可能性がないものは、対象外とする。すなわち、当該航空機を中心に、一定距離、一定高度差以内に位置する航空機のみを検出処理の対象機とする。この基準は、ラージフィルタ値と呼ばれる。

異常接近の検出

検出処理の対象機について2機の将来位置を直線予測し、異常接近予測時間以内の時刻において、航空機間の水平距離が異常接近距離以内に接近し、かつ、高度差が、異常接近高度以内に接近した場合、異常接近と判定する。具体的には、2機の航空機 A, B の x, y 座標、高度 z およびそれらの速度が $A(X_a, Y_a, Z_a), (V_{Xa}, V_{Ya}, V_{Za}), B(X_b, Y_b, Z_b), (V_{Xb}, V_{Yb}, V_{Zb})$ の時、時刻 t における $D(t)^2 = (\text{水平距離})^2$ および高度差 $H(t)$ は、

$$D(t)^2 = \{(X_a + V_{Xa}t) - (X_b + V_{Xb}t)\}^2 + \{(Y_a + V_{Ya}t) - (Y_b + V_{Yb}t)\}^2 \quad (2.1)$$

$$H(t) = |Z_a - Z_b + (V_{Za} - V_{Zb})t| \quad (2.2)$$

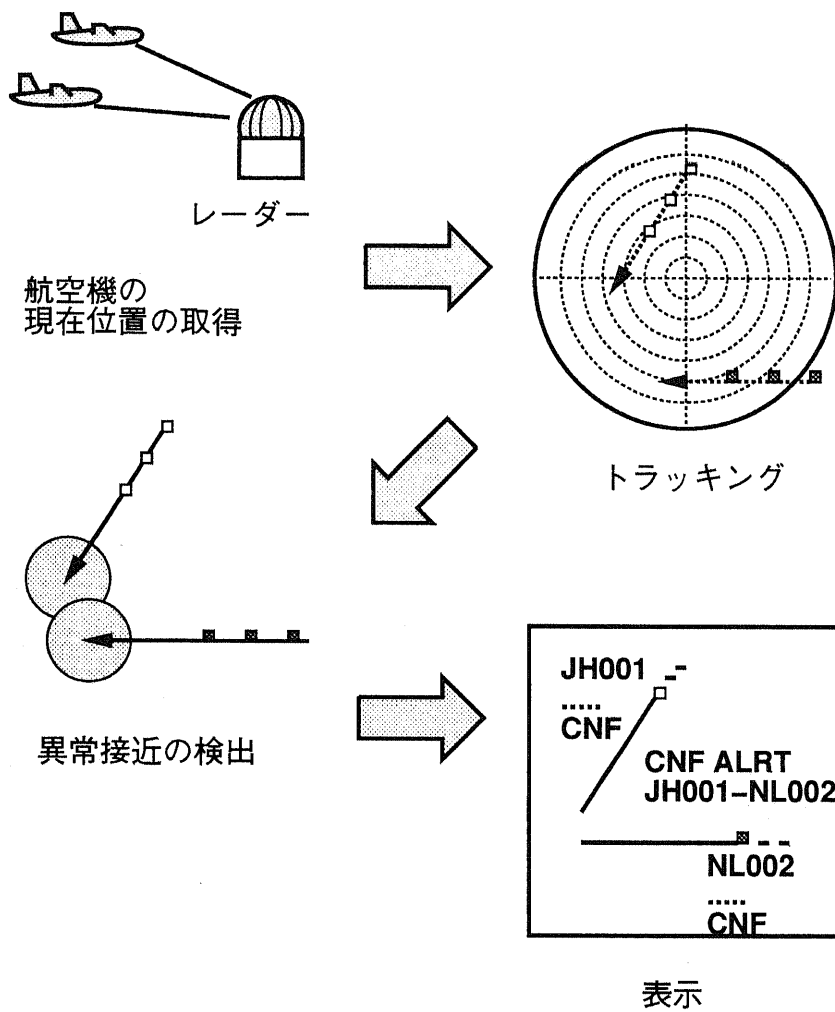


Figure 2.9: 管制警報システムの動作

と表される。この式を用いて、異常接近予測時間以内の時刻 t において、

$$D(t) < \text{異常接近距離} \quad H(t) < \text{異常接近高度} \quad (2.3)$$

を同時に満たす場合があるとき、異常接近と判断する。

異常接近検出の概念図を図 2.10 に示す。

プロファイル予測

高度方向の進路予測（プロファイル予測）は、基本的には現在の速度ベクトルの方向に将来位置を外挿して求める。しかし飛行計画情報、あるいは管制官による指示が与えられている場合は、その指示高度を考慮した上での予測を行っている。その概念図を図 2.11 に示す。

将来通過予定の定点 F の飛行計画データにおける予定通過高度を Z_f 、現在高度を z として、 Z_f に向けて降下中の場合 ($Z > Z_f$)、直線予測で定点 F の予定通過高度が Z'_f とすると、

- もし $Z_f < Z'_f$ ならば、直線予測を行なう (図 2.11, Z_{f1})。
- もし $z > Z_f \geq Z'_f$ ならば、定点 F 以前に Z_f を通過または Z_f に到達するならば、通過または到達以降は Z_f で水平飛行するとして予測する (図 2.11, Z_{f2})。
- もし $Z_f \geq z$ ならば、直線予測を行なう (図 2.11, Z_{f3})。
- 上昇中の場合は、逆に考える。

2.2.4 ターミナル空域における管制警報システム

エンルート管制の conflict alert が既に実用化されているのに対して、必然的に航空機密度も高くなり、警報システムの必要性はエンルート管制の場合よりも高くなると思われるターミナル管制の conflict alert は、日本ではいまだ採用されていない。米国では実用化された例があるが、必ずしも満足の行く成果は得られていない。この理由としては、航空機の進路予測の困難さがあげられる。

空港周辺では、エンルートのような単純な直線予測が通用する場合は少なく、多くの場合、航空機の進路として、複数の選択肢が考えられるようになる。これらの選択肢の中から、管制官は対象航空機の状態や、その他の航空機との関係、空域の状態などの様々な要素を条件に入れながら一つのパターン（進路予測）

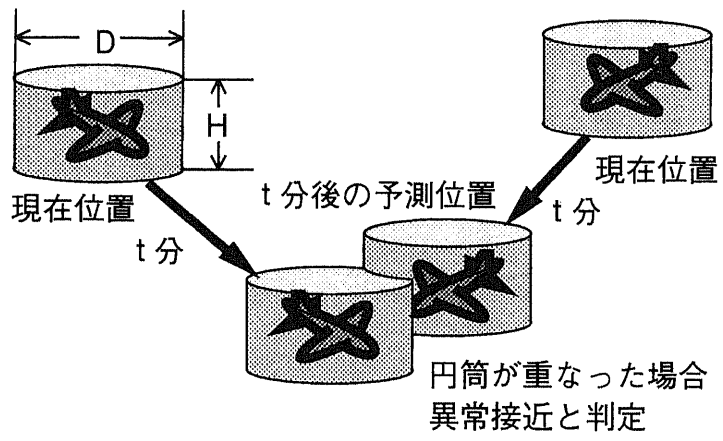


Figure 2.10: 異常接近検出の概念図

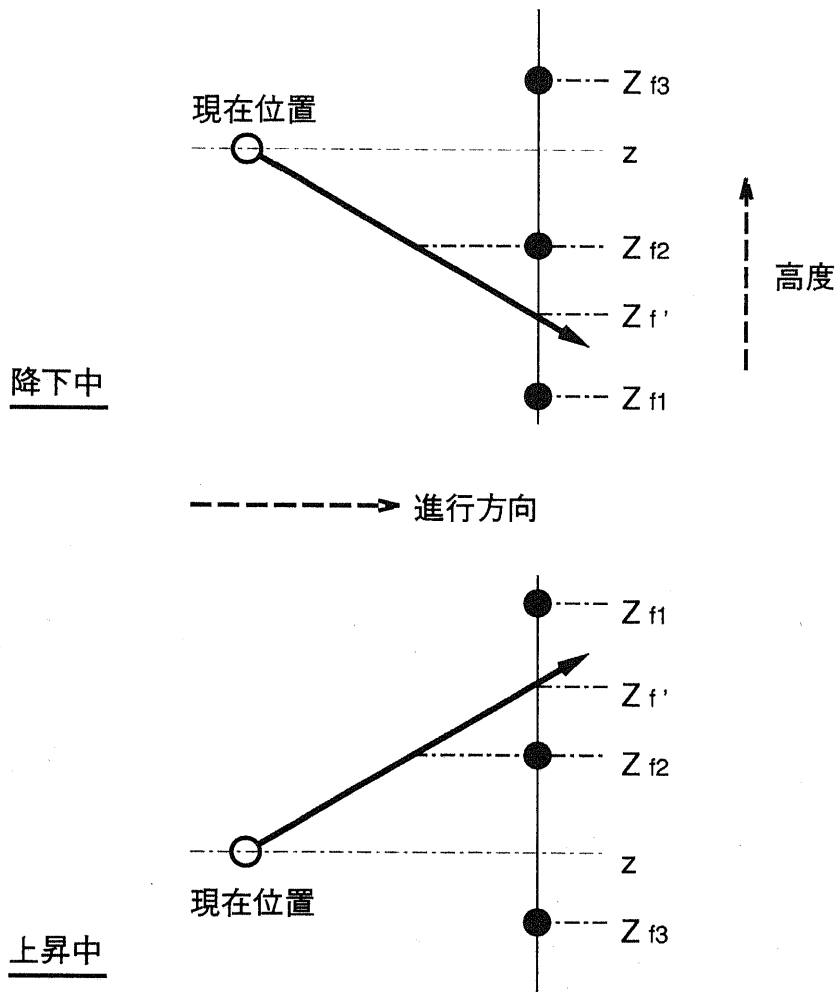


Figure 2.11: 高度方向の進路予測

を選択するのである。このため、空港周辺で誤りの少ない警報を発するためには、状況に応じたきめ細かい進路予測が不可欠となってくる。

2.2.5 考察

以下、従来の管制警報システムの特徴、あるいは改善の余地のある点について述べ、同時に各問題点に対する本研究の指針およびその意義について述べる。

航空機の進路予測

航空機の将来位置は、直線予測を原則として計算される。したがって、航空機の旋回時などは予測誤差が大きくなり、特にターミナル空域のように進路変更が頻繁におこるような空域では、何らかの工夫をしない限りは、実用的な警報を発することは不可能に近い。米国のターミナル管制では、ARTS(Automated Radar Terminal System)に、それなりに工夫された Conflict Alert が導入されており、現在、最新版の ARTS-III A の評価が行なわれているが、必ずしも十分な成果は得られていない。

異常接近の検出

従来のシステムでは、航空機同士の異常接近の検出は2段階程度のフィルタに分かれている。まず、各航空機の現在位置をもとにして、航空機の性能上、予測時間内に異常接近の可能性のない航空機対をふるい落とす。次に、2機の航空機が予測時間内に異常接近するかどうか詳しく調べる。

ここで、一次フィルタには原則として全ての航空機対のデータが通されるので、処理量は航空機数の2乗程度となる。

本研究の範囲と意義

本研究においては、航空路の概念を管制警報システムに積極的に採り入れることにより上記の問題に対処する [5, 9]。すなわち、

- 航空機と航空路の位置関係を把握することにより航空機の進路変更を予測し、旋回を円近似して航空機の将来位置を予測する。これにより予測精度の向上が期待でき、ひいては不要警報の率を低減できる。
- 航空路を仲介とした航空機相互の位置関係を把握することにより、異常接近の候補となる航空機対を選定する。これにより異常接近検出に要する処

理量は航空機数の1乗程度に低減できる。

またターミナル管制においては、複雑な進入パターンの中から適切な経路を選択する方法として、知識処理の手法を導入し、ルールベースの推論により航空機の進路を予測する。これにより、各管制官の管制意図に応じた進路予測が可能となる [3]。

2.3 衝突防止システム

航空機の場合、特に高速の旅客機では、危険を発見してから回避したのでは手遅れであり、航空機の衝突の危険を発見し、回避指示を発することにより衝突を防止するようなシステムが必要となる。この種のシステムは、大きく分けて機上主導型と地上主導型とに分けられる。

2.3.1 機上主導型衝突防止システム: ACAS

機上搭載システムの考え方

機上搭載システムは、原理的には、地上管制に依存しないで衝突防止の機能を発揮する形態をとっている。この機上搭載システムの開発にあたり考慮すべき点は、以下のようなになる。

- 商用輸送機だけでなく、全航空機に対して有効に衝突回避が出来ること。
- 地上の航空管制システムへの影響が少ないこと。すなわち、共存することによって互いに補い合う関係を保つこと。
- 高信頼性を有すること。すなわち、正しい警報を正確に与えること。

機上搭載システムの開発

機上搭載型の衝突防止システム (CAS: Collision Avoidance System) は、ICAS から、BCAS, TCAS(ACAS) へと発展してきた。

[ICAS(Independent CAS)] 全航空機が同一方式の装置を搭載しない限り、衝突防止の効果が発揮できない。

[BCAS(Beacon based CAS)] 既存の二次監視レーダ (SSR: Secondary surveillance Rader) の機上搭載トランスポンダを対向装置に使用。他航空機には

特別新しい装置は必要でなく、搭載した航空機は、直ちにその効果を発揮する。SSRについては、モード A/Cに加え、個別質問機能・データ伝送機能を持ったモード S方式が導入され、CASの相補回避・指示調整等のためのデータリンクとして用いることができる。しかし、無指向性アンテナを使用しているため、混雑空域での混信(同期ガブブル)を生じる難点があった。

[TCAS(Threat Alert and Collision Avoidance System)] BCASを基本にし、質問方式の工夫により、高密度空域における性能を十分なものにしていく。ICAOでの正式名称はACAS(Airborne Collision Avoidance System)となっている。

TCASとは

航空管制用の二次監視レーダー(SSR)の原理を応用。SSRは、モード A/Cに加え、モード Sも用いることを考えている。

MOPS(Minimum Operational Performance Standard)では、TCAS搭載機は、90%以上の成功率で、衝突25秒前までに危険を検出して回避指示を出すよう定められている。

TCASには次のようなものが挙げられる。

baseline TCAS : モード A/Cトラッキングの際に Whisper-Shout 質問方式を採用。

minimum TCAS II : baseline TCASの無指向性アンテナのかわりに、方位走査アンテナを採用(4方向の指向性を持ち、各々90度の搜索範囲を持つ)。

衝突防止の方法

[対向機がモード A/Cの場合] TCAS装置は現行のSSRインタロゲータと同様にエポック(1秒)間隔毎にモード C質問を行い、対向機からの応答が返って来るまでの時間および応答の中の高度情報から、対向機までの距離・高度差・速度・高度変化率を求め、トラッキングを行う。そこから異常接近・衝突の危険を検出する。モード C質問に対してモード Sトランスポンダが応答しないように、モード C質問は、MODE A/C ONLY ALL CALLの形式で発せられる。

[対向機がモード S機(含TCAS搭載機)の場合] まず、対向機のモード Sトランスポンダが一秒おきに発するスキッタをとらえて捕捉する。スキッタ中の高度

情報を解読し、高度差の小さい機に対しては、モード S 個別質問を行う。距離も短い機に対しては、モード S 個別質問を繰り返しトラッキングを行う。危険を検出したら、自機のパイロットに危険を知らせ、相手機に対してもモード S のデータリンクを用いて危険を知らせる。さらに、相手機が TCAS を搭載している場合には、互いに通信を行い、回避操作が相補的になるよう調整する。この場合、個別質問が可能であり、対向機の捕捉率はほぼ 100%、誤警報もほとんど発生しないと考えられる。

[対向機が上記の二つに該当しない場合] TCAS の危険検出の対象外であり、TCAS は無力である。

危険検出の条件

[目標機の捕捉条件] エポック間毎に返って来る一連の応答が 3 エポック連続して受信され、かつ、以下の条件が全て満たされた場合に目標として検知し、トラッキングを確立する。

- 他機の応答と重ならない。
- 検出された速度は 1200kt 以下である。
- 最初の応答に含まれる距離情報が後の二つの距離情報から外挿した値± 312.5 feet 内にある。
- 高度情報が正しい

[トラッキングの継続条件] トラッキングは、応答が解読され、かつ、次の条件が満たされたときに更新される。

- その距離が、以前の応答から予想された値の回りのある範囲内にある。
- その高度が、以前の応答より予想された値± 200feet にある。

また、更新されなかった場合でも推定によりトラッキングは継続し、6 回続けて更新されなかった場合に初めてトラッキングを打ち切る。

[脅威判定条件] トラッキングの結果、次の条件が共に満たされた場合、異常接近を起こすとみなして脅威と判定し、回避指示を出す。

- 25 秒以内に相対距離が 0 になる。
- 高度差が 750feet を切った。

トラッキングの際の障害と対策

[同期ガブール] モード A/C 機のトラッキングの際の障害で、TCAS 機からの距離がほとんど同じ位置に 2 機以上の航空機がいるときに生じる。TCAS の質問に対し、これらの航空機の応答がほとんど同時に返って来るため、応答が重なり、解読が困難になる。これを防ぐために、Whisper-Shout 質問方式が用いられる。これは、トランスポンダの受信感度が航空機毎に異なることを利用して、受信感度別に分割して応答信号を得る方式で、等価的に航空機密度を薄めることになり、モード C 応答信号の解読率を向上させる。さらに minimum TCAS II は、方位別質問を行うことにより等価的に航空機密度を薄め、ガブールを一層起こりにくくしている。

[Whisper-Shout 質問方式] これは、一つの質問エポックの中に質問パルス対と共に抑圧パルス対を配置し、サイドローブ抑圧の原理、すなわち、抑圧パルス対が受信されたトランスポンダは、引き続き質問パルス対を無視する特性を利用するもので、抑圧パルス対が受信されず、かつ質問パルス対が受信されたトランスポンダだけが応答して来る。抑圧パルス対と質問パルス対との電力差は 2dB のステップと 3dB のステップとが存在する。解読率は、2dB 差のステップの方が良い。Whisper-Shout のレベル数については、ほぼ 1dB おきに、baseline TCAS については全方向質問 30 レベルを、minimum TCAS II については前方向質問 24 レベル・左右方向質問それぞれ 20 レベル・後方向質問 15 レベル・全方向質問 4 レベルの合計 83 レベルで行う。

[応答の解読] 応答のパルスが重なった場合には次のように処置する (MOPS)。すなわち、パルスの立ち上がりが、想定された位置 $\pm 0.121\mu\text{S}$ 以内にある場合、そのパルスは応答パルスとみなす。想定された位置 $\pm 0.242\mu\text{S}$ 以外にある場合、そのパルスは応答パルスでないと見なす。また、長いパルスが来たときは、その長さからパルスを分離することとなっている。

[フルーツ] 他 TCAS 機や地上インタロゲータの質問への応答が混在してしまうことであり、実在しない機からの応答と誤認される他に、実在する航空機からの正しい応答に重なって受信を妨害する効果がある。この影響は、TCAS 機が多くなるに従い、深刻なものとなる。対策としては、自分の質問信号から返って来る応答の電力の見当をつけておき、それ以下の電力のものは切り捨ててしまう方式がとられている。また、TCAS 機の数が多い場合、フルーツの量があまり多くならないように質問電力・質問レートを調整するアルゴリズム (干渉制限アルゴリズム) が組み込まれている。これは、質問電力を減らすことにより検索半径を小さくして応答数を減らすことを目的としている。

[フルーツによる受信妨害] まず、応答に比べて電力の大きいフルーツが重なってしまった場合。この場合、フルーツのパルスはパルスとして検出されるが、応答のパルスはフルーツのパルス歪として無視される。次に、大電力のフルーツが受信されたために、その後の一定時間、受信機感度が鈍らされ、応答が受信できなくなる場合。本来、正しい応答信号に引続き入って来るマルチパス信号を除去するために設けられた機能が、フルーツにより不必要な感度低下をもたらしてしまう。

TCAS の誤警報

[誤警報の発生原因] 誤警報は、次に掲げる原因によって不正な応答が目標機として捕捉され、トラッキングされ、危険が検出された場合に発生する。

同期ガースル時の高度情報解読誤り

ファントムブラケットによる高度情報の誤り TCAS のブラケット検出器は、一つの応答から二つ以上のブラケットを生成しないようにする為、 $20.3\mu\text{S}$ 間隔のブラケットパルス対を検出したら、そのブラケットから $1.45\mu\text{S}$ の整数倍で最大 $20.3\mu\text{S}$ の位置でのブラケットの検出を禁止する機能を持っており、二機が同期ガースルをおこした状態ではファントムブラケット (実在しない機からの応答信号) を発生しない事が保証されるが、3 機以上の場合はこの限りでない。

フルーツの混入による距離情報の誤り 他 TCAS 機の質問に対する応答であるフルーツが受信されることにより、その機の実際の距離とは異なった距離に似るものとして解読される。

TCAS の性能

モード C 搭載機に対する危険検知成功率及び、誤トラック率・誤警報率は表 2.1 の通り。(MOPS で規定された成功率：90%以上)

2.3.2 地上主導型衝突防止システム: GCAS

地上主導型の衝突防止システムとして実用の域に至っているものは、現在のところ存在しない。過去に提案・検討されたシステムとしては、図 2.8 に挙げた ATARS がある。これは地上施設で航空機同士の衝突の危険を検知し、パイロットに対して回避指示を伝えるものである。これは回避指示の生成機能を持たない BCAS との共存を前提にして提案されたものであるが、回避機能を持つ ACAS II の登場に伴い、その役割を失っている。

2.3.3 考察

現在、回避指示が出せるシステムで実用段階に入っているのは、ACAS-II(Airborne Collision Avoidance System) 程度である。これはパイロットを対象としたシステムであり、管制官に無断で回避指示を出してしまうので、管制意図との整合性に欠ける問題がある。また、搭載装置の性能の限界もあり、回避方向も垂直方向に限られているのが現状である。

研究段階のものでは、古くは知識処理の手法を用いた GCAS (Ground-based Collision Avoidance System) や、水平回避も可能にする次世代の ACAS などのような新しい回避理論も提案されているが、未だ実用の域には至っていない。

本研究においては、衝突回避の条件を統一的に表現する手段としてポテンシャルの概念を導入する。すなわち回避経路の妥当性をポテンシャルとして記述し、妥当性の高い経路を選択することにより衝突回避を実現するものである。回避パターンの生成を高速化することにより、現実的な時間内に妥当な解が得られるようになる。

Table 2.1: TCAS の性能

種類	相対速度 (kt)	航空機密度 (機/NM ²)	成功率 (%以上)	誤トラック率 (回/100hour)	誤警報率 (回/20hour)
baseline	500	0.14	95.5	3500	1.36
TCAS	1200	0.03	99.9	61	1 以下
minimum	500	0.30	99.9	3500	1 以下
TCAS II	1200	0.06	100.0	40	1 以下

Chapter 3

航空路概念を用いた異常接近検出手法

本章では、従来の管制警報システムの問題点および、その問題点を解決する手法としての管制用データテーブルおよび当該データテーブルを用いた異常接近検出手法について述べる。

以下、3.1 で従来の管制警報システムの問題点について述べ、3.2 で管制用データテーブルの導入について述べる。3.3 では航空機の将来位置の予測手法、3.4 で異常接近検出候補となる航空機対の選定手法、3.5 で個々の航空機対の異常接近検出手法についてそれぞれ述べた後、3.6 でシミュレーション系の構成および当該シミュレーション系を用いた評価結果について述べる。

3.1 従来の管制警報システムの問題点

従来の異常接近検出手法の概念を図 3.1(a) に示す。ここではフィルタを用いて異常接近の検出候補となる航空機対を絞り込む手法がとられている。すなわち対象空域の各航空機の現在位置・高度・速度等を基準にして異常接近の可能性のない航空機対を除外するような処理を何段階か行った後に異常接近検出を行う。原則として全ての航空機対がフィルタ処理の対象となるので、処理量は航空機数の 2 乗のオーダーとなる。これに対して本研究で採用した手法の概念を図 3.1(b) に示す。航空路情報等を積極的に用いることにより航空機間の位置関係等の状態を実時間で把握しておけば、異常接近の検出候補となる航空機対を即座に選定できるようになる。また航空機と航空路の関係も明確になることから、航空機の進

路予測も容易になる。

上記の手法を実現させるために検討すべき処理は

- 航空機の現状(位置・高度・速度・飛行計画との整合等)の把握,
- 航空機の将来の三次元位置・速度の予測,
- 潜在的に異常接近の可能性を有する航空機対の選定,
- 候補となった航空機対の異常接近の有無の判定

のように分類できる。

これらの処理を効率良く行うためには、管制に関する情報を実時間で管理しやすいような形態にまとめる必要がある。また、管制警報システムの高度化を目指す立場としては、異常接近検出後の回避指示の生成の際にも利用しやすい構成にするのが望ましい。

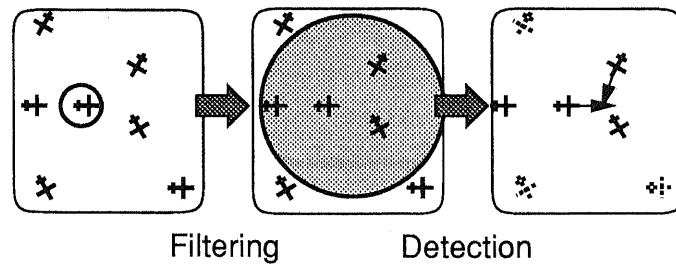
3.2 管制用データテーブル

3.2.1 管制用データテーブルの導入

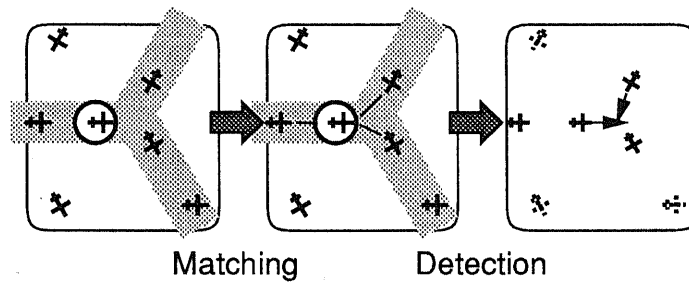
一般に航空交通管制の対象となる航空機(計器飛行方式, Instrument Flight Rules:IFR)は、事前に飛行計画を提出し、支障がなければその飛行計画に従い定められた航空路を承認された高度と速度で飛行しながら目的地に向かう。また支障が生じた場合には、飛行計画をリアルタイムに修正して承認を受け、修正した飛行計画に従って飛行を続ける。この飛行計画を参照すれば、管制下の航空機がどの航空路上を飛行するか容易に把握できる。また航空機と航空路との関係のみではなく、同一航空路上の航空機間の前後・上下関係や、航空路間の相対関係等を実時間で把握することにより、異常接近の検出や回避指示の生成が容易になると期待できる。

しかし現在の管制警報システムでは、航空機のレーダデータは主にRDP(Radar Data Processor)で処理され、一方飛行計画は主にFDP(Flight Data Processor)で処理されており、両者を統合して扱うのに適した構成とはなっていない。

以上の点に鑑み、航空機および航空路の位置関係を的確に把握する手段として、航空路概念を管制用データに導入する。レーダデータや飛行計画は航空機データとして一括処理することとし、新たに導入する航空路データは、単なる航空路の構成に関する情報のみでなく、現在その航空路上にある航空機との位置関係を示す情報をも含むものとする。



(a) Conventional Algorithm



(b) Proposed Algorithm

Figure 3.1: 異常接近検出手順

このデータテーブルを用いてレーダ情報や飛行計画等の情報を集約・加工することにより、異常接近検出処理の効率を高める事ができると考えられる。また変則状態の検出や回避指示の生成等の高度な処理の実現も容易になると期待できる(図3.2)。

3.2.2 データテーブルの構成

航空路データ

航空路情報は、飛行計画に示された航空路に対してフライトレベル(飛行高度)別にデータテーブルが作成されるものとする。以下、本研究ではフライトレベルが異なれば、管制上は同一航空路上を飛行していても、データテーブル中では異なる航空路にあるものとして扱う。すなわちデータテーブル作成の基準となったフライトレベルを、その航空路の高度とみなし、フライトレベルの異なる航空機は異なる航空路上にあるものとする。また各航空路はフィックス(航空路上に適宜定められた定点)によって区切られた線分を単位として扱うものとする。表3.1に示すように、航空路データテーブルには、フィックスによって区切られた各“航空路”の高度・方向(東向き、西向き)、起点・終点フィックス、当該航空路の上下にある航空路(表示装置上では重なって見えるような航空路)のIDなどの静的な情報が記録されると同時に、その航空路を飛行している航空機列の先頭航空機・末尾航空機のIDなどの動的な情報も記録される。また、管制上同一の航空路とみなされる航空路データに対しては、同一の基本情報が与えられる。各航空路の基本情報には、表3.2に示すように、その航空路が管制下にあるかどうかを示す管制状況、航空路名、そして当該航空路上に割り当てられた航空路データのリストが含まれる。

フィックスデータ

各フィックスのデータもテーブルとして表現される。フィックス・データ中には、その座標および当該フィックスを介した各航空路の接続状況等が記録されており、この接続状況を参照すれば、各航空路に接続する全航空路のデータが得られることになる。また、何らかの電波標識が存在するフィックスの座標は、当該フィックス上の電波標識の座標で代用するものとする。

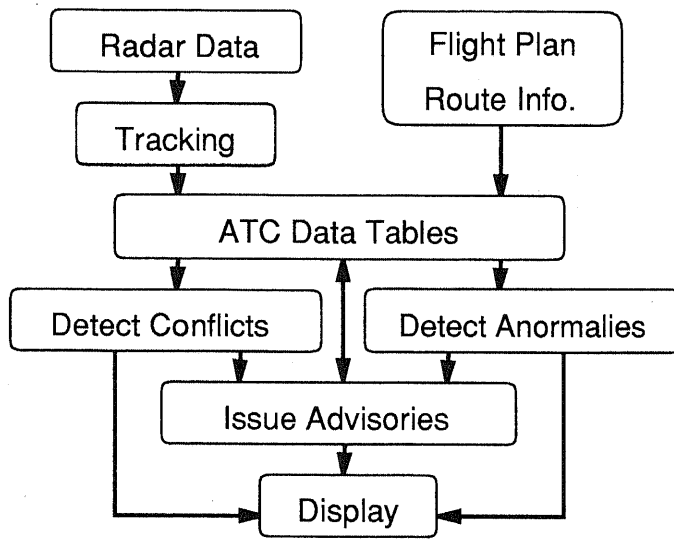


Figure 3.2: 管制用データテーブルを用いた管制警報システム

進路変更データ

進路変更に関するデータは、航空機の進路変更が予測された時に動的に各航空機データに割り当てられるものである。その構成を表 3.4 に示す。管制状態としては、特に管制指示もなく、自動的に飛行している状態と、管制官の指示により、何らかの進路変更をしている状態とに分けられる。旋回方向は右旋回と左旋回とに分けられ、その他、旋回・高度変更等、進路変更に伴って必要となる各種パラメータを含む。

電波施設の型

電波施設は、レーダ (SSR) および VOR/DME, NDB 等の電波標識に分類される。各型に対応するデータは、型名の他に実際の電波標識の測距・測角のシステム誤差の平均値および分散、および測角・測距のバイアス誤差の平均値により構成される。

電波標識・レーダデータ

個々の電波標識およびレーダのデータは、その名称および型の他に、施設の所在地の座標および測角・測距誤差 (平均・分散)、測角・測距状態 (使用可・不可) により構成される。

航空機データ

従来から用いられてきたレーダ情報や飛行計画は同一のテーブルで管理し、これを航空機データと称することとする。航空機データテーブルは各航空機に対してレーダ周期を単位とした時刻毎に作成される。表 3.7 に示すように、航空機データテーブルには、データを一意に識別するための ID や各航空機の位置・速度情報等の他に、飛行状態 (変則状態や旋回の有無等)、飛行中の航空路、飛行予定の航空路のリスト、同一航空路上の先行・後続航空機等が記録される。このように先行・後続航空機が鎖状に記録されていれば、各航空機は所属航空路の先頭航空機から末尾航空機に至る一連のリストの一部として把握できるようになる。

飛行計画データ

これから管制下に入る各便の飛行計画 (飛行経路・飛行高度, 等) を蓄えておく。

飛行経路データ

各航空機データに動的に割り当てられる。各航空機の飛行航空路および次に飛行予定の航空路を蓄えておく。

警報データ

何らかの警報が発生した時に、各航空機に動的に割り当てられる。警報の種類およびディスプレイに表示される文字列を蓄えておく。

異常接近データ

航空機同士の異常接近が検出された時に、各航空機対に動的に割り当てられる。例として図 3.3(a) のように航空機が飛行していたとする。このパターンより生成されるデータ間の主な関係を概念的に表せば、図 3.3(b) のようになる。

3.2.3 データテーブルの更新

データテーブルの更手順は以下のようになる。

- a) 管制移管された航空機には、各々専用のデータテーブルが割り当てられ、位置情報や飛行計画等の照合により、所属航空路が記録される。所属航空路が決まると、当該航空路中の航空機リストの末尾から先頭に向けて、当該航空機との前後関係が調べられ、当該航空機データの挿入位置が決定される。挿入位置が所属航空路の先頭（あるいは末尾）に相当する場合、当該航空路データテーブル中の先頭（末尾）航空機の ID は当該航空機の ID に書き替えられる。
- b) 航空路を変更したと判断された航空機のデータは、現在の所属航空路の航空機リスト中から削除され、新たな航空路の航空機リスト中に a) に準じて挿入される。なお、適切な航空路に属さない航空機があれば、その航空機は変則状態にあると判断し別途考慮する。

Table 3.1: “flightLevel”: 航空路データテーブルの構成

属性	型	備考
航空路高度	整数型	(feet)
航空路の方向	列挙型	Westbound, Eastbound
航空路の起点	fix*	
航空路の終点	fix*	
上の航空路	flightLevel*	
下の航空路	flightLevel*	
先頭航空機	target*	
末尾航空機	target*	
基本情報	route*	

Table 3.2: “route”: 航空路の基本情報

属性	型	備考
管制状況	論理	管制下の航空路であれば真
航空路名	文字列	
航空路データ	flightLevel*[]	各フライトレベルに対応した航空路データ

Table 3.3: “fix”: フィックスデータ

属性	型	備考
フィックス名	文字列	KEC etc.
座標	実数	緯度・経度/3次元ベクトル
航空路	flightLevel*	フィックスから分岐・合流する航空路のリスト
電波標識	navaid*	フィックス上の電波標識

Table 3.4: “maneuver”: 進路変更に関するデータ

属性	型	備考
管制状態	列挙型	Auto, Advisory, Manual...
旋回方向	列挙型	右旋回, 左旋回
他の maneuver データ	maneuver*	
旋回前の方位角	実数	(radian)
旋回後の方位角	実数	(radian)
交差角	実数	(radian)
旋回開始点	実数	端点と旋回開始点との距離
旋回開始時刻	実数	
現航空路の始点	ベクトル	
現航空路の終点	ベクトル	
次航空路の始点	ベクトル	
次航空路の終点	ベクトル	
旋回開始座標	ベクトル	
バンク角	実数	
旋回半径	実数	
飛行速度	実数	
高度変化率	実数	
電波標識	navaid*	目標とする電波標識
旋回開始時刻	実数	
旋回終了時刻	実数	
フライトレベル	実数	進路変更後のフライトレベル
遷移時間	実数	バンク角変更に要する時間
offset	実数	旋回開始時刻に対する実際のバンク角変更開始時刻 (相対時刻)

Table 3.5: “navaidType”: 電波施設の型

属性	型	備考
名称	文字列	VOR/DME, NDB, SSR etc.
測角誤差	平均・分散	
測距誤差	平均・分散	
測角バイアス	実数	実際の電波標識の測角バイアスの 平均値
測距バイアス	実数	実際の電波標識の測距バイアスの 平均値

Table 3.6: “navaid”, “radar”: 電波標識・レーダ情報

属性	型	備考
名称	文字列	
型	navaid*	SSR, VOR/DME, NDB, etc
位置座標	ベクトル	
測角誤差	平均・分散	
測距誤差	平均・分散	
測距状態	論理	active, inactive
測角状態	論理	active, inactive

Table 3.7: “target”: 航空機データテーブルの構成

属性	型	備考
航空機 ID	flight	
現在の追尾状態	列挙	
次の追尾状態	列挙	
異常接近の有無	列挙	
p_1	ベクトル	前回の予測による現在位置
r_1	ベクトル	レーダによる現在位置
h_1	ベクトル	平滑化された現在位置
p_2	ベクトル	予測位置
v_1	ベクトル	推定現在速度
v_2	ベクトル	予測速度
予測時間	実数	
タイムスロット	整数	
追尾時間	整数	追尾開始時からのスロット数
VFR 状態	列挙	
飛行高度	整数	flightLevel へのインデックス
飛行航空路	flightPath*	A1 ₁ W27...etc.
dist_s_fix	実数	現航空路の始点からの距離
dist_e_fix	実数	現航空路の終点までの距離
dist_c_route	実数	現航空路の中心線からの逸脱量
現在の旋回状態	列挙	
予測旋回状態	列挙	
maneuver 情報	maneuver*	
dist_s_turn	実数	旋回開始点からの距離
dist_c_circ	実数	旋回を中心点からの距離
連続旋回の回数	整数	
warnings	warning*	Warning の有無
encounters	encounter*	異常接近状態にある航空機のリスト
potential	encounter*	潜在的な異常接近状態にある航空機のリスト
flight_level	flightLevel*	対応する航空路データ
先行航空機	target*	...
後続航空機	target*	...

Table 3.8: “flight”: 飛行計画

属性	型	備考
データ ID	整数	
便名	文字列	
飛行経路	flightPath*	A1 W27... etc.
飛行高度	実数	

Table 3.9: “flightPath”: 飛行経路

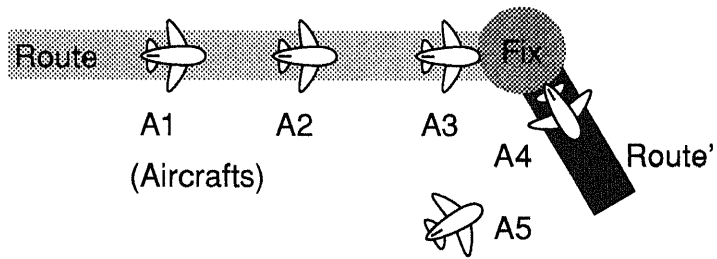
属性	型	備考
飛行航空路	route*	
過去の飛行経路	flightPath*	
将来の飛行経路	flightPath*	

Table 3.10: “warning”: 警報

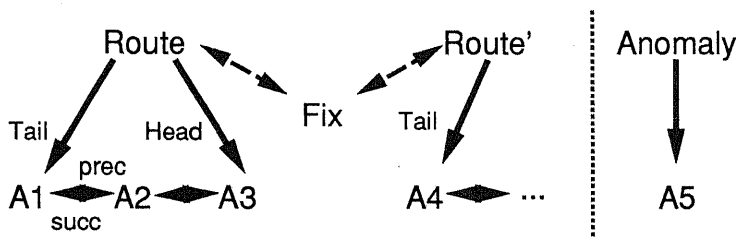
属性	型	備考
状態	列挙	警報あり:On, なし:Off
警報名	文字列	

Table 3.11: “encounter”: 異常接近

属性	型	備考
対象航空機	target*	
脅威機	target*	
接近状態	列挙	Conflict, PotentialConflict
時刻	整数	当該データが示す異常接近状態に至る時刻
水平距離	実数	
水平方位	実数	
垂直距離	実数	高度差の絶対値
垂直方位	整数	高度差の符号
相対位置	ベクトル	3次元位置
相対速度	ベクトル	3次元速度



(a) A Sample Pattern



(b) Relations between Data Tables

Figure 3.3: 管制用データテーブルの構成

3.3 航空機の将来位置の予測

3.3.1 航空機の旋回運動の円近似

現時点の航空機の飛行状態のみを基準にして将来位置を予測したのでは、航空路の分岐・合流点の近傍等で、航空機の進路変更に起因する予測精度の低下が見られる。しかし航空路管制においては、管制下の航空機 (IFR 機) の飛行パターンは飛行計画にしたがった等速運動と円周旋回運動で構成されるとみなして良い。実際には旋回の開始・終了時点の前後でバンク角が徐々に変化しており、単純な円周軌道とはならないが、バンク角が連続的に変化するモデルと円近似のモデルとの予測位置を比較したところ、バンク角の変化に要する時間を 10 秒 (旋回開始・終了時点の前後 5 秒) とした場合でも、両者の差異はレーダに起因する予測誤差の 1 割未満に収まっており、事実上無視しうる範囲にあると考えられる (図 3.4)。

3.2 に述べた管制用データテーブルを参照すれば、各航空機の所属航空路や飛行予定の航空路の把握は容易である。よって航空機の旋回の有無も自動的に判断できるようになり、予測精度の向上が期待できる。

3.3.2 航空機の将来位置の予測

エンルートにおいては、前述の管制用データテーブルをもとに各航空機の進路を予測することとする。その際、進路変更に伴う予測精度の劣化を低減するために、旋回を考慮した位置予測を行なう。以下に旋回を考慮した位置予測の式を示す。式中の各変数の表す所は 図 3.5 に示す。

データテーブルより得られる情報は、現在時刻における航空機の推定現在位置 $P(0)$ 、推定速度 V 、および、航空路の座標情報である。これに重力加速度 g 、バンク角 θ が与えられれば、航空機が水平に旋回する際の旋回半径 R_c は式 (3.1) で与えられる。

$$R_c = \frac{V^2}{g \tan \theta} \quad (3.1)$$

R_c が与えられれば、旋回開始位置 P_s 、旋回円の中心 P_c は、式 (3.2)、式 (3.3) で与えられる。

$$P_s = P - R_c \tan \frac{\alpha}{2} \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

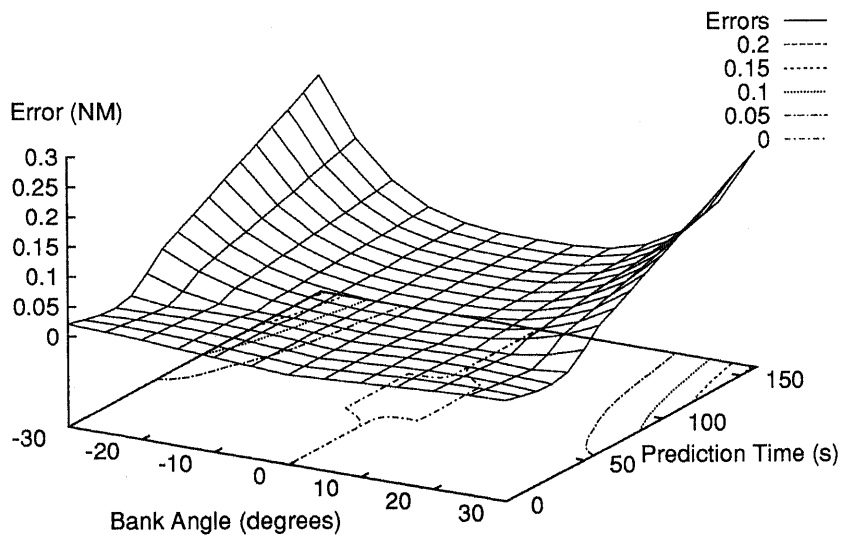


Figure 3.4: 旋回開始・終了時のバンク角遷移に伴う予測誤差

旋回時間: 30s, 遷移時間: $\pm 5s$

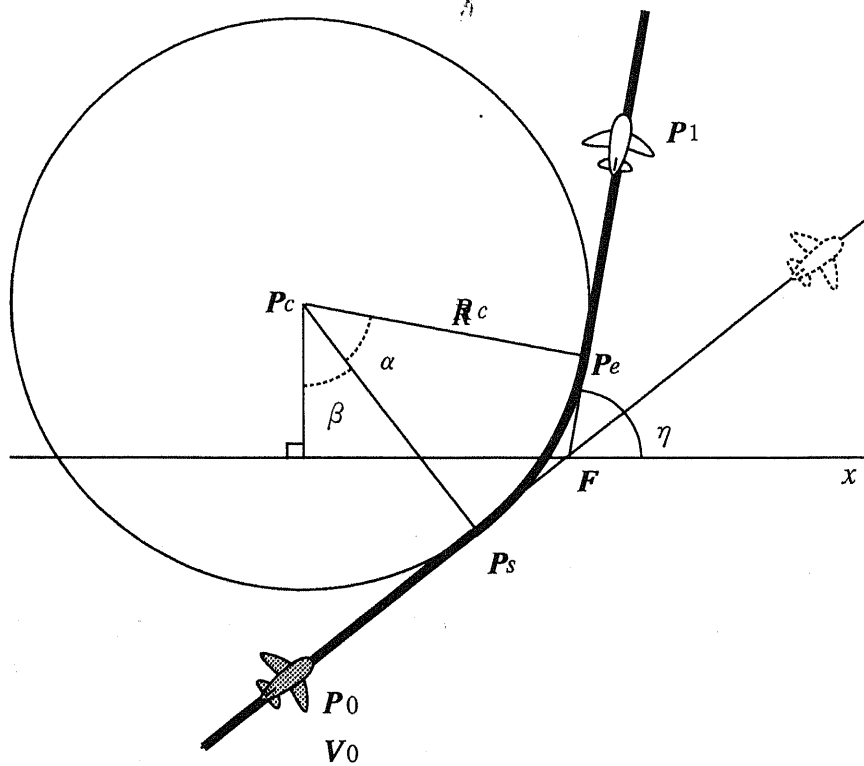


Figure 3.5: 円近似を用いた位置予測

$$P_c = P_s \pm R_c \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ここで,

α : 2つの航空路のなす角;

β : X軸と現航空路のなす角;

F: 2つの航空路の交点

である。航空機が交点 F に近付き、予測時刻 t に対して

$$V_t \geq \overrightarrow{P(0)P_s} \cdot \frac{\mathbf{V}}{V} \quad (3.4)$$

となった場合、航空機は予測時間内に旋回を開始するものと判断し、予測位置 $P(t)$ を求める。それ以外の場合は直線飛行を続けるものと判断する。旋回開始時刻 t_s は式 (3.4) の等号が成り立つときの t の値であり、旋回終了時刻 t_e は式 (3.5) で与えられる。

$$t_e = \frac{\alpha R_c}{V} + t_s \quad (3.5)$$

旋回の角速度 $\omega = \pm V/R_c$ を用いれば、予測位置 $P(t)$ は、式 (3.7)、式 (3.8) で与えられる。

$$P(t) = P_c \pm \begin{bmatrix} \sin \beta + \omega(t - t_s) \\ \cos \beta + \omega(t - t_s) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

($t \leq t_e$ のとき)

$$P(t) = P_c \pm \begin{bmatrix} \sin \beta + \omega(t_e - t_s) \\ \cos \beta + \omega(t_e - t_s) \end{bmatrix} + V(t - t_e) \begin{bmatrix} \cos \eta \\ \sin \eta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

($t > t_e$ のとき)

ここで、 η は X 軸と旋回後に飛行すると予測される航空路とのなす角である。

3.4 異常接近候補となる航空機対の選定

管制用データテーブルを用いれば、航空路を仲介とした航空機間の相対関係の把握が容易になる。これらの相対関係を参照すれば、異常接近の検出候補とすべき航空機対の迅速な選定が可能になる。以下に検出候補の選定の判断基準を示す。概念図を図 3.6 に示す。

- (a) 同一航空路上を飛行している航空機: 同一航空路上の航空機の巡航速度は、ほぼ一定と考えられる。よって、最も衝突の危険が高いのは相前後して飛行している航空機対と考えられる。前後する航空機対に衝突の危険がなければ、それより離れた航空機対に衝突の危険がないことは容易に推定できる。このような前後関係は航空機データテーブルより得られる。
- (b) フィックス近傍を飛行している航空機: フィックス近傍では複数の航空路が合流・分岐する場合がある。そのような空域に含まれる航空機に対する異常接近検出候補航空機として、隣接航空路のデータテーブルから当該フィックス近傍の航空機を選定する。
- (c) 高度の異なる航空路を飛行している航空機: IFR 機の航空路は、1000ft. または 2000ft. の高度間隔をとりながら、西行きの航空路と東行きの航空路とが交互に設定されている。このような互いに高度の異なる航空路に属している航空機対は、いずれかの航空機が高度方向の速度成分を持たない限り、衝突の危険は生じ得ない。高度方向の速度成分を持つ航空機や、与えられた高度を逸脱している航空機に対する異常接近検出候補航空機は、当該航空機が侵入する可能性のある航空路のデータテーブルから与えられる。
- (d) 変則状態にある航空機: 予定の航空路を逸脱して飛行している航空機に対する異常接近検出候補航空機は、当該航空機が侵入する可能性のある航空路のデータテーブルから与えられる。

以上の各条件の論理和をとって異常接近の検出候補とすべき航空機対を選定すれば、フィルタを用いて異常接近の可能性のない航空機対を除外する手法に比べて高速に処理できるようになり、処理効率の向上が見込まれよう。また、回避指示生成の過程でも、得られた回避操作に対して新たな脅威機となるような航空機の選定が容易に行えるようになると見込まれる。

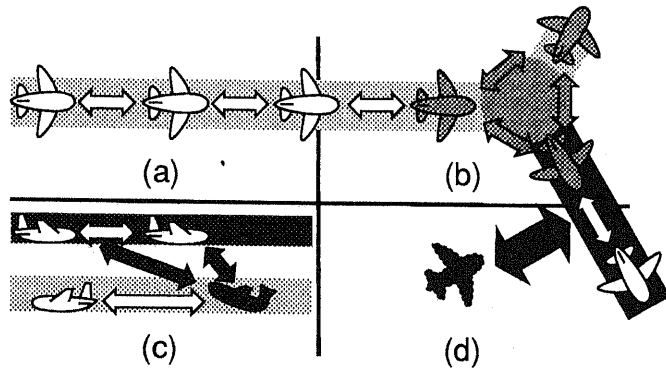


Figure 3.6: 異常接近の可能性のある航空機対

3.5 異常接近の検出

3.5.1 検出基準

異常接近の検出基準は、図 3.7 のように定める。まず、航空機の周囲に直径 D_0 、高さ H_0 の円筒を設定し、これを現在時刻における保護空域とする。将来時刻 t における保護空域のサイズ D_t 、 H_t は、航空機やレーダ、トラッキングの状態等による誤差の増分を考慮した t の一次関数として表す。そして現在時刻から予測時間 T 後までのある時点 t において両者の保護空域が重複する場合を異常接近とみなす。予測時間 T は、現在のところ 180 秒に設定している。すなわち、最大 180 秒後までの異常接近を検出するように設定しているということであるが、このパラメータは適宜変更することが可能である。

3.5.2 保護空域の合算

次に保護空域の合算について述べる。異常接近検出候補の航空機対を航空機 A、B とおき、各々の保護空域のサイズが D_A 、 H_A 、 D_B 、 H_B で表されるとする。両航空機間の水平距離が d 、高度差が h のときの異常接近の判定基準は、式 (3.8)、式 (3.9) のようになる。

$$h \leq 0.5H_A + 0.5H_B \quad (3.8)$$

$$d \leq 0.5D_A + 0.5D_B \quad (3.9)$$

これは、言い換えると、一方の航空機の周囲に直径 $D_A + D_B$ 、高さ $H_A + H_B$ の、合算された保護空域を設定し、他の航空機がその保護空域内に侵入した場合を異常接近とみなすに等しい。

3.5.3 異常接近の検出

図 3.7 のように定められた保護空域をもとにした異常接近の検出手法について、以下に述べる。

まず、高度方向の距離テストを行う。例として、2 機の航空機が図 3.8(a) のような高度変化をとると予測されたとする。図中、横軸は時間、縦軸は航空機の高度を表す。予測時間内における高度方向の保護空域の重複の有無を調べるために、一方の航空機を基準とした相対座標を設定し、他方の航空機（脅威機）の周囲に、合算された保護空域を設定する（図 3.8(b)）。設定された保護空域と時間軸

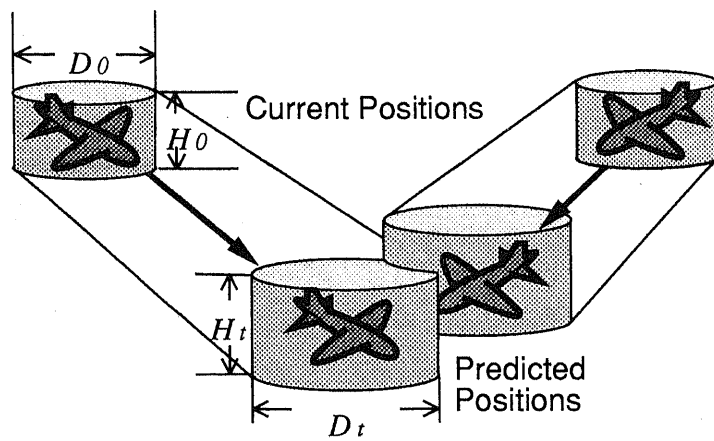


Figure 3.7: 異常接近の判定基準

(相対高度 = 0 の領域) とが予測時間内において重複すれば、その開始時刻 t_0 、終了時刻 t_1 を定め、水平方向の距離テストを行う。重複がなければ、異常接近はないと判断する。

水平方向の距離テストは以下のように行う。互いに飛行している航空機対の異常接近検出の対象となる空域の例を図 3.9(a) に図示する。図中、灰色で表された領域は各航空機の保護空域が通過すると予測される領域である。異常接近を検出するためには、これらの領域を時間の変化に沿って調べて行く必要がある。

ここで一方の航空機の位置を原点に置いた相対的な座標系を設定して他方の航空機(脅威機)の軌跡を計算すると、図 3.9(b) のようになる。図中 P_0 は t_0 における 2 機の相対位置、 P_1 は t_1 における相対位置を表している。相対座標を用いた異常接近判定は、以下の 2 つの場合に分けられる。

a) 双方の航空機が直線飛行を続けると予測される場合: 2 機分の保護空域を合算して脅威機の周囲に設定し、時刻 t_0 における保護空域の半径を r_0 、時刻 t_1 における保護空域の半径を r_1 とおくと、保護空域は時刻 t_0 から t_1 へ至る間、図中の灰色で示された領域を移動することになる。円 P_0 と円 P_1 に同じ側で接する直線 m (直線 n) と各円との接点を Q_{0m} , Q_{1m} (Q_{0n} , Q_{1n}) とおくと、この保護空域の包絡線は反時計回りに弧 $Q_{0m}Q_{0n}$ 、線分 $Q_{0n}Q_{1n}$ 、弧 $Q_{1n}Q_{1m}$ 、線分 $Q_{1m}Q_{0m}$ で表される。以上より、原点がこの保護空域内に含まれれば異常接近と判定できる。判定基準を式で表すと式 (3.10)、式 (3.11)、式 (3.12) の論理和となる。

$$r_0 \geq \overline{P_0O} \quad (3.10)$$

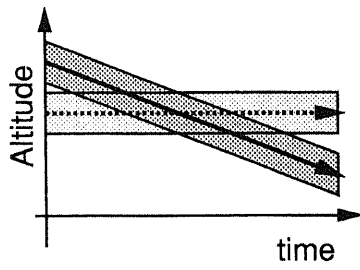
$$r_1 \geq \overline{P_1O} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{Q_{0m}O} \cdot \overrightarrow{Q_{0m}P_0} &\geq 0 \text{ かつ} \\ \overrightarrow{Q_{0n}O} \cdot \overrightarrow{Q_{0n}P_0} &\geq 0 \text{ かつ} \\ \overrightarrow{Q_0O} \cdot \overrightarrow{Q_0Q_1} &\geq 0 \text{ かつ} \\ \overrightarrow{Q_1O} \cdot \overrightarrow{Q_1Q_0} &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

ここで、 Q_0 は Q_{0m} , Q_{0n} の中点、 Q_1 は Q_{1m} , Q_{1n} の中点である。

なお、 $r_0 + \overline{P_0P_1} \leq r_1$ が成り立つ場合には、保護空域の包絡線は円 P_1 のみで表されるので、判定基準は式 (3.11) のみを用いる。

b) 航空機が旋回運動を行うと予測される場合: レーダ周期を単位として 3.3 の手法で予測位置を算出し、折れ線近似により将来の進路を予測する。そして折れ



Aircraft A:

—▶ : Predicted position

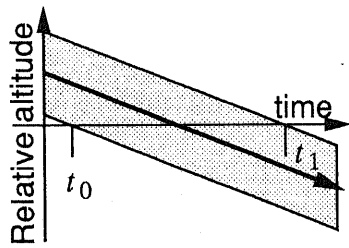
▨ : Protected volume

Aircraft B:

- -▶ : Predicted position

▨ : Protected volume

a) A sample pattern

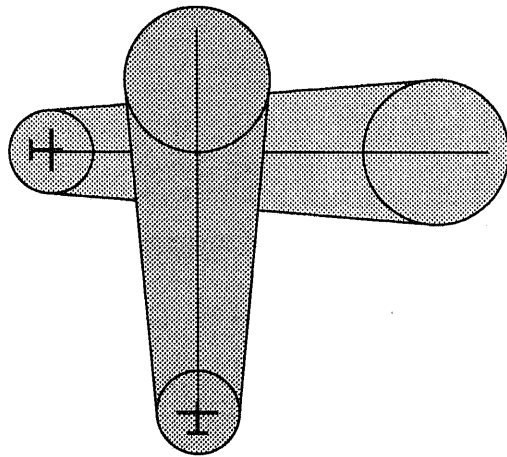


—▶ : Relative position

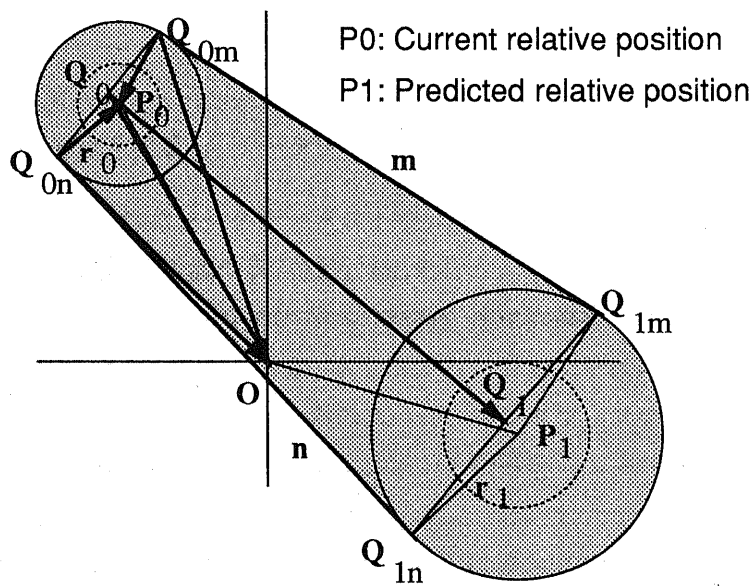
▨ : Combined
protected volume

b) Relative coordinates

Figure 3.8: 高度方向の距離テスト



a) A sample pattern



b) Relative coordinates

Figure 3.9: 水平方向の距離テスト

線の各セグメントごとに保護空域を計算し、a) に準じた異常接近検出を行う。概念図を図 3.10 に示す。

3.6 シミュレーションによる評価

3.6.1 シミュレーション系の構成

以上の手法を評価するために、計算機上にシミュレーション系を構成した(図 3.11)。図中の各システムの機能は、以下のようになる。

- a) 入出力系: 取り込まれたデータを他の系に伝える。管制用データテーブルを生成し、管制系に伝える。乱数を用いて飛行計画を生成し、航空交通流系に伝える。他の系で生成されたデータをファイルやグラフィックスに変換して出力する。
- b) 航空交通流系: 入出力系から伝えられた飛行計画や地理データ等に基づいて航空交通流を生成し、レーダデータの形で管制系に伝える。
- c) 管制系: 得られたレーダデータにトラッキングを施し、管制用データテーブルを用いた位置予測や異常接近検出を行う。

図中の管制系から航空交通流系への情報伝達は回避指示生成機能の評価のために設けられているものであるが、本シミュレーションでは用いていない。

図 3.12 に本シミュレーション系のユーザ・インタフェースの表示画面(主画面)を示す。パラメータ設定やシミュレーションの制御等のユーザからの指示は主画面から起動されるメニューを通じて与えられる。得られたシミュレーション結果は画面に表示されるとともに、詳細がファイルに書き出されるようになっている。

主画面は2つの窓に分割されている。上端の窓には、シミュレーションの制御やパラメータの設定、詳細なデータの出力等のためのメニューがまとめられている。その下の窓は、さらに小さな窓に分割されている。左上には管制下の航空機の現在位置や予測位置等を表す平面図(レーダ画面に相当)、左下には各航空機の飛行状態(トラッキング状態、航空路との関係、フライトレベル、速度、異常接近検出候補航空機、等)を表すテキストが表示される。右側には管制系の処理結果の概略が表示される。その内容は上から順に所要時間、進路変更の予測結果、異常接近の検出結果、変則状態の検出結果、そして異常接近が検出された航空機対に対して生成された回避指示(本シミュレーションでは未使用)のように分類されている。

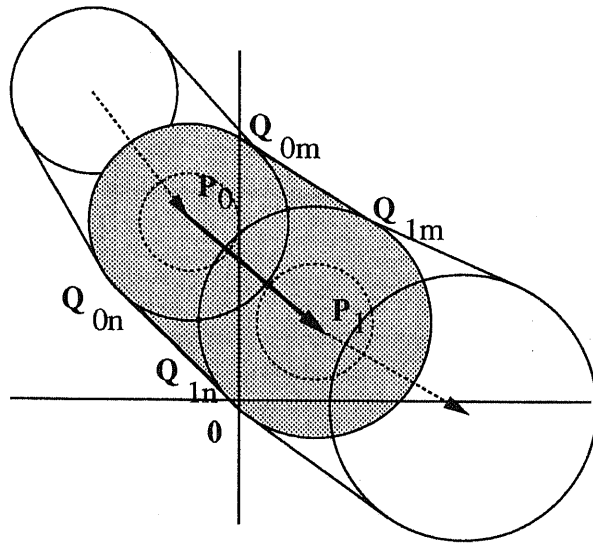


Figure 3.10: 旋回運動中の航空機の距離テスト

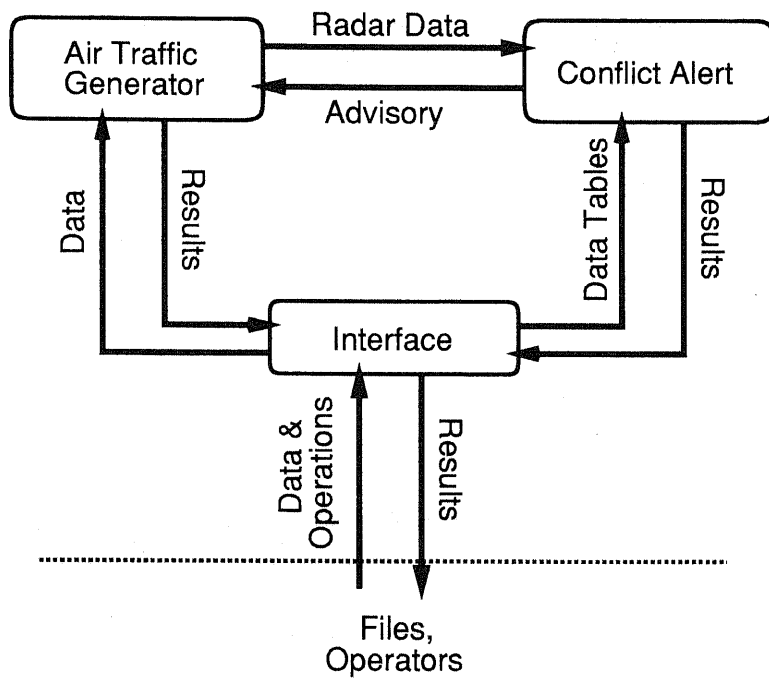


Figure 3.11: シミュレーションソフトの構成

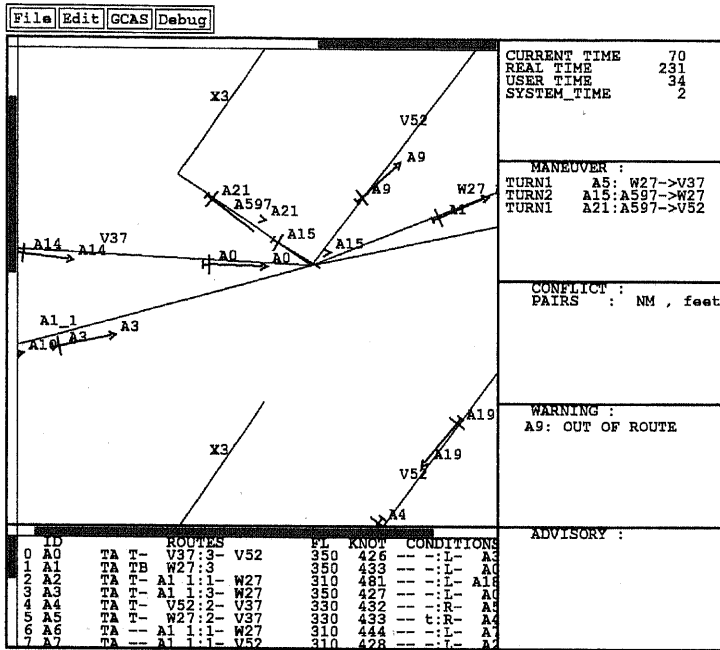


Figure 3.12: 画面表示

3.6.2 保護空域の設定

異常接近の検出基準となる保護空域は、本来ならば実際の運用状態等を考慮して定めるのが妥当であるが、ここでは一例を示しながらその決定方針を述べる。

まず、地上施設の特性や α - β トラッカの係数を表 3.12 のように仮定する。なお本研究では、大気乱流等の気象条件は、複雑なモデルを要するため考慮していない。これらの値をもとにして 3.6.1 に示したシミュレーションにより t 秒後の航空機の位置誤差および航空機間の距離誤差 (rms 値) を統計的に求めたのが、図 3.13 である。生成される交通流は直線飛行のみとし、位置予測も直線予測を採用している。旋回動作による誤差の増分は 3.3.2 に示した予測手法で相殺されるものと仮定する。図中、横軸は予測時間 (秒)、縦軸は予測誤差 (NM) を表し、位置誤差 (Position Error) は t 秒後の航空機の予測位置と真の位置との誤差、距離誤差 (Distance Error) は航空機間の距離の予測値と真の値との誤差を表している。

ここで D_t の値は、必要な異常接近を網羅しながら不要警報を極力抑える値にする必要がある。標準的な感度レベルの ACAS-II との共存を考慮すると、航空機の真の最接近距離が 1NM 以下となるケースに対する警報が必要になると考えられる。また管制間隔の維持の観点からすれば、最接近距離が 5NM 以上となる航空機対に対する警報は不要であると考えられる。

シミュレーション結果によると、 D_t の値が予測誤差の 2 倍のときは必要な警報の 97% を検出でき、2.5 倍のときは 99%、3 倍の時は 99.6% 程度を検出できる。また D_t の値が予測誤差の 4 倍未満であれば、60 秒後の不要警報の発生率は 1% 未満に抑えられる。したがって、60 秒後の D_t の値は予測誤差の 3 倍程度とするのが妥当と考えられる。一方、180 秒後の不要警報の発生率は、 D_t の値が予測誤差の 2 倍のときでも 14%、2.5 倍のときには 27% となる。不要警報の発生率を抑えるためには、 D_t の値は 2 倍以下に抑えるのが妥当と考えられるが、必要な警報を網羅するためには予測誤差の 2.5 倍は必要かとも考えられる。

このような結果に基づいて、 D_t の値を 60 秒後の予測誤差の 3 倍、180 秒後の予測誤差の 2 倍程度を目安として t の一次関数になるように設定する。

$$D_t = 1.5 + 0.025t + 0.25N_f \quad (3.13)$$

ここで、 N_f はトラッキングの状態を示すパラメータであり、レーダデータの欠落回数 (に換算される値) を念頭に置いている。たとえば、レーダデータが 1 回欠落したときには、1 時点前のデータを用いて将来位置を予測することになる。したがってレーダ周期 (ここではエンルートを前提として 10 秒としている) にして 1

Table 3.12: シミュレーションに用いた主要なパラメータ

予測時間		3 min.
α - β トラッカ	α	0.67
フィルタ係数	β	0.25
レーダ	角度誤差	0.112°
	距離誤差	0.063 NM
電波標識	角度誤差	3.5 ± 4.0°
	距離誤差	0.5 NM

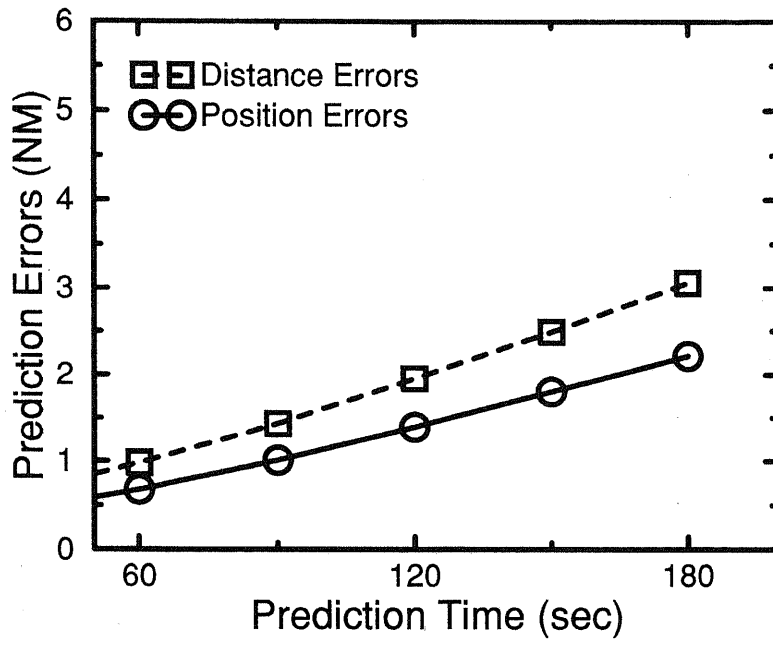


Figure 3.13: 予測誤差

周期分の誤差の増分を見込む必要があり、この場合には N_f は 1 となる。

60 秒後を一つの目安としたのは、回避指示の自動生成機能を取り込む事を前提として検討しているためである。生成された回避指示を管制官に提示してから管制官が判断し、パイロットに指示を伝達するまでの時間を 30 秒、実際に回避動作に要する時間を 30 秒と仮定し、異常接近の 60 秒前の時点において衝突の危険のない回避の判断ができるような設定としている。

また 3.5.3 に示した異常接近検出手法を実現するためには、 D_t は一次関数で表現する必要がある、 $t = 0$ の近傍では D_t が不必要に大きくなっている。この近傍の異常接近検出は衝突回避にとっては意味のないものであるが、前述の不要警報にも該当しないので、特に抑制する必要はないと考えられる。

本来ならば高度方向の予測誤差をもとにした H_t の設定例も示すべきであるが、本研究では、水平方向に重点を置いて述べる。 H_t については、気圧高度計によって比較的精度の良い値が得られる事や、航空機自身が一定高度を保ちながら飛行するように制御されていることなどを鑑み、予測時間に関わらない一定値とみなすことにする。ただし、航空機の高度変化を見込んだ予測に用いる H_t の設定については、なお一層の検討の価値がある。

3.6.3 結果

以上の構成で、計算機上のシミュレーションにより本手法の有効性を確認した。空域のモデルは、西日本の航空路をもとにして作成した。また、用いた主要パラメータは、表 3.12 に示した通りである。

航空機の位置予測精度

航空機の位置予測誤差の比較結果を図 3.14 に示す。横軸は予測時間を表す。縦軸は予測誤差であり、誤差の小さいものから順に (○) 進路変更のない航空機を直線予測した場合、(■) 進路変更のある航空機を 3.3 の手法で予測した場合、(□) 進路変更のある航空機を直線予測した場合である。本手法により相対的に予測精度を向上させることができ、結果として異常接近の判定基準となる保護空域を小さく設定できることになる。これは、検出すべき異常接近を網羅しながらも誤警報率を低く抑えられることを意味している。

また、120 秒以降、本手法による予測誤差の増加がなだらかになっているのは、航空路情報や、航空機の運動特性等を既知としているためである。予測誤差を低

く押さえるためには、これらの情報が適切に与えられる必要があるのは言うまでもない。

異常接近検出率

不要警報の発生率および異常接近の検出率を示す。約 600 万サンプル中、不要警報の発生率は 60 秒後の時点で 0.2%、180 秒後の時点で 26%となった。また警報を発する必要がある異常接近の検出率は 60 秒後の時点で 99.1%、180 秒後の時点で 97.7%となった。検出率が若干低下しているのは、進路変更にとまなう誤差の増分を完全には相殺できていないためであると考えられる。検出率を向上させるためには、進路変更に関する情報が適切に与えられる必要があるのは言うまでもない。

異常接近検出処理量

飛行計画にしたがって飛行している航空機に関して、異常接近検出処理に要する航空機対の数を比較した。結果を図 3.15 に示す。横軸は対象空域中の航空機数、縦軸は航空機対の数であり、実線が管制用データテーブルを用いた手法の場合、破線が従来の手法による場合である。本手法の効果は、空域の航空機密度が高くなればなるほど顕著になると考えられ、異常接近検出過程の処理量を航空機数の 1 乗のオーダーにまで低減させることが可能となる。

本手法では、従来の手法に比べ、航空機と航空路の対応付けのための処理が余計に付加されるが、この処理も各レーダ周期ごとに逐次的に行えば良いので、周期ごとの処理量は航空機数の 1 乗のオーダーにしかならない。また、管制用データテーブルを用いた手法では、全ての航空機対に対して異常接近検出処理を施した場合と比較して、異常接近の検出漏れが懸念される場所であるが、本シミュレーションにおいては、検出漏れは見受けられなかった。

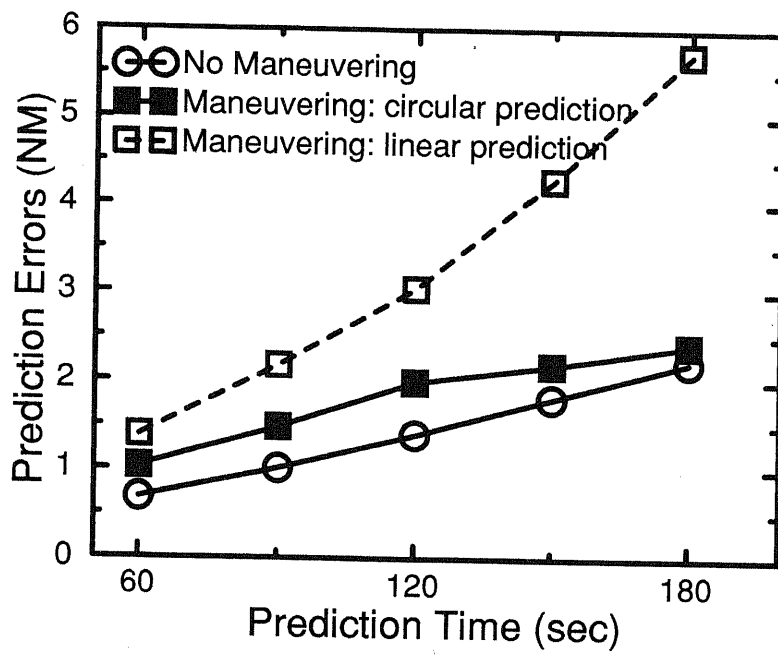


Figure 3.14: 位置予測誤差

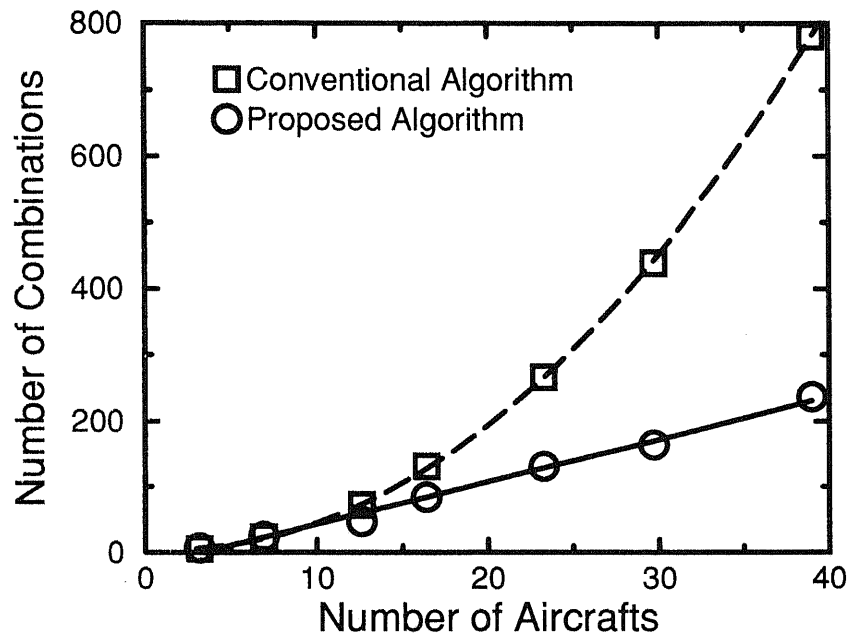


Figure 3.15: 異常接近検出処理量の削減

Chapter 4

ポテンシャルを用いた衝突回避 手法

本章では, 異常接近が検出された航空機に対する回避指示の生成について述べる [7][11].

以下, 4.1 で衝突回避の条件を統一的に表現する手段としてのポテンシャルの導入について述べた後, 4.2 でポテンシャルの分布を用いた回避手法, 4.3 でポテンシャルの勾配を用いた回避手法について, それぞれ述べる. 4.4 では各々の手法による回避結果を示し, 4.5 で今後の課題について述べる.

4.1 衝突回避とポテンシャル

4.1.1 衝突回避の概念

衝突回避の概念を図 4.1 に示す. すなわち,

- (a) 将来のある時点において航空機同士に衝突の危険があると判断された場合には,
- (b) 適切な回避操作をとった後,
- (c) 危険が去った時点で元の航路に復帰する.

このような衝突回避を考えるにあたっては, 単に衝突の危険のない回避経路の生成を目的とするのみならず, 回避後の運航についても考慮するのが望ましい. そこで衝突回避の目的を以下のように設定する.

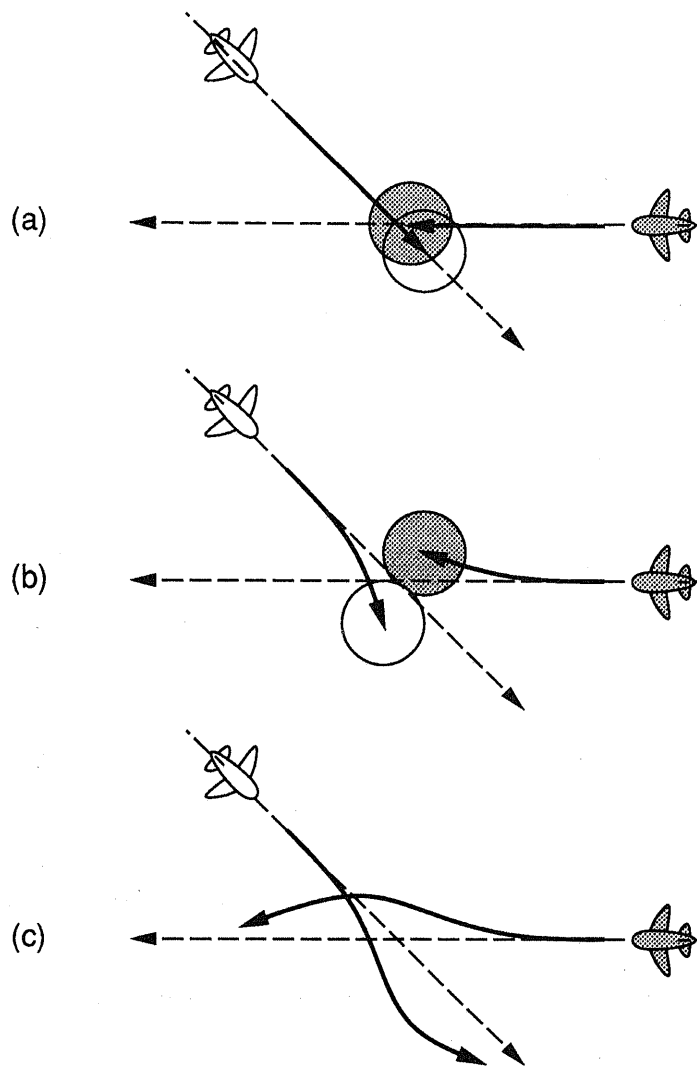


Figure 4.1: 衝突回避と元の進路への復帰

- (a) 航空機間隔の維持のため、航空機の最接近時の相対距離が予め定められた値以上になるようにする。
- (b) 回避終了後は速やかに本来の進路に復帰する。
- (c) 回避中の航空機の速度変化を抑制する。
- (d) 急激な回避動作を抑制する。
- (e) 複雑な回避動作、すなわち回避方向が頻繁に変わるような回避動作を抑制する。

実際に回避パターンを生成するとなると、このようなさまざまな目的に対応した回避条件を考慮して生成処理を行なう必要がある。一つの方法としては従来多用されてきたような“if ... then”形式の場合分けを行なう手法があげられる。しかしこの手法では上記の目的に対応した条件すべてを網羅した場合分けを行なう必要があり、必然的に“if ... then”の入子構造になってしまう。このような手法はアルゴリズム自体繁雑になりがちであり、また柔軟性に欠けるものになってしまう。

本研究では、衝突回避の条件を統一的に表現する手段として“ポテンシャル”の概念を導入する。ここで言う“ポテンシャル”は回避経路の妥当性を表わす指標のことであり、必ずしも物理の分野で用いられるような厳密な意味は持たない。ただ潜在的な衝突の脅威との意味合いもあって“ポテンシャル”の呼称を用いている。

続いて、回避指示作成に要する計算量を削減するために、ポテンシャルの分布を用いた手法、すなわち時間方向の見通しを犠牲にしながら空間方向の探索に重点を置いた手法と、ポテンシャルの勾配を用いた手法、すなわち空間方向は局所的にしか考慮しないかわりに時間方向の連携を重視した手法の2手法について検討する。いずれの手法も計算量は原則として回避時間の1乗のオーダーに収まると考えられる。

4.1.2 ポテンシャルの定義

4.1.1 に述べた条件を数式で表わすことを考える。4.1.1 の条件中、航空機とその環境(他の航空機や進路等)との相互作用に因る条件は a), b) である。条件 a) は航空機間に斥力がはたらくものとみなすことができ、斥力を生じさせるようなポテンシャル R で表現する。条件 b) は航空機・航空路間に引力がはたらくも

のとみなすことができ、引力を生じさせるようなポテンシャル A で表現する。上記の R および A をもとにすれば、ある航空機に対するポテンシャル P^0 は

$$P^0 = R + A \quad (4.1)$$

のように表現できる。

条件 c), d), e) は本来の意味でのポテンシャルでは表現できないが、本論文ではポテンシャルの概念を拡張し、これら 3 条件に相当する力を生じさせるような関数をもポテンシャルと称することにする。条件 c), d), e) から逸脱した場合に値を大きくとるような関数をそれぞれ V, S, B とおけば、ある航空機に対する拡張されたポテンシャル P は

$$P = R + A + V + S + B \quad (4.2)$$

のように表現できる。この値 P^0 もしくは P が小さければ、その航空機が望ましい回避経路上にあるとみなすことができ、値が大きければ望ましくない回避経路上にあるとみなすことができる。

以下に式 (4.2) 中の各項の詳細を述べる。表現を簡潔にし、かつ微分可能な式とするために、用いる関数は原則として一次式の冪乗もしくはその逆数を用いて表現するものとする。

航空機間隔の維持

衝突回避のために、航空機同士がある距離以下に接近した場合に値が大きくなるような項 R を設定する (図 4.2)。 R は各航空機毎に、航空機の位置 \mathbf{p} および時点 T の関数として表現できる。ただし T は整数値であり、実際の時刻 t は、サンプリング間隔 t_s および定数 t_0 を用いて $t = t_s T + t_0$ のような形で表わされるものとする。

ここで互いに衝突の危険のある航空機について考える。ひとつの航空機に注目した場合、他の航空機の進路がすべて予測できていれば、当該航空機がある回避動作をとる際の衝突の脅威量の計算が可能となる。時点 T における航空機 i の予測位置 $\mathbf{p}_i(T) = (x_i(T), y_i(T))$ に対して、ある航空機 j が時点 T に位置 $\mathbf{p} = (x, y)$ に至った際の衝突の脅威量 R_j を求める。

$$R_j(\mathbf{p}, T) = \sum_{i \neq j} R_{ij}(\mathbf{p}, T) \quad (4.3)$$

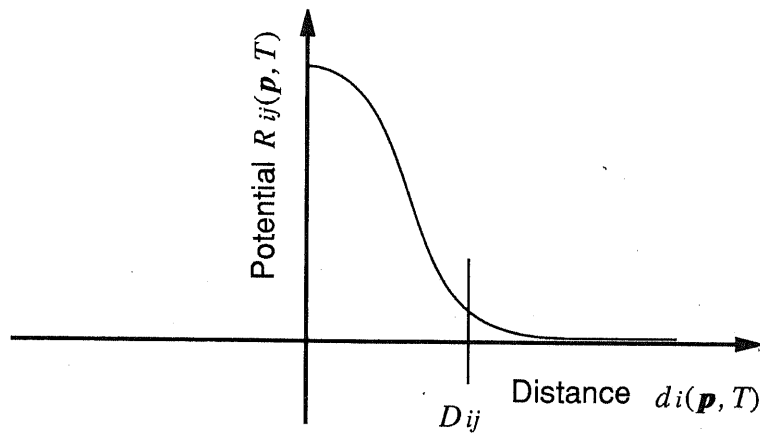


Figure 4.2: 航空機によるポテンシャル

$$= \sum_{i \neq j} \frac{c_r}{\left(\frac{d_i(\mathbf{p}, T)}{D_{ij}(T)}\right)^{2n_r} + c_d} \quad (4.4)$$

$$= \sum_{i \neq j} \frac{c_r D_{ij}(T)^{2n_r}}{d_i(\mathbf{p}, T)^{2n_r} + c_d D_{ij}(T)^{2n_r}} \quad (4.5)$$

$$d_i(\mathbf{p}, T) = \sqrt{(x - x_i(T))^2 + (y - y_i(T))^2} \quad (4.6)$$

ここで D_{ij} は、レーダ等による予測誤差や回避指示伝達・航空機の回避動作等の誤差要因を考慮して定められる関数であり、衝突の危険のないような航空機間隔となるように設定する。すなわち誤差が大きくなるような場合には D_{ij} を大きく設定し、誤差が小さくなるような場合には D_{ij} を小さく設定する。ポテンシャル R_j は、 D_{ij} を境として航空機間隔がそれより小さくなれば急激に値が大きくなるような関数として、一次式の冪乗の逆数を用いる。ただし航空機間隔が 0 に近付いた場合の発散を抑えるために、定数 c_d を付加する。また c_r はポテンシャルの大きさを定める定数であり、 n_r は航空機間隔が D_{ij} より小さくなった場合のポテンシャルの増加の程度を定める自然数である。 R_j の計算例を図 4.3 に示す。これはある航空機が一定時間回避動作をとった後に直線飛行を続けた場合のポテンシャル分布の例を鳥瞰図で表わしたものである。図中、目盛の付いた長方形が対応する水平面の XY 座標 (NM) を表わし、扇の要に相当する部分が航空機 j の現在位置を表わす。航空機 i の進路は点線で示す。

本来の進路への復帰

時点 T における航空機 j の本来の進路からの横方向の逸脱量 $w_j(\mathbf{p}, T)$ 、および予測位置の本来の進路上への射影から現在位置への道のり $l_j(\mathbf{p}, T)$ (図 4.4) より、本来の進路に復帰するための項 A_j を設定する (図 4.5)。

$$A_j(\mathbf{p}, T) = -c_l l_j(\mathbf{p}, T) + c_a \left(\frac{w_j(\mathbf{p}, T)}{a_w}\right)^{n_a} \quad (4.7)$$

この関数は、値が大きくなるほど本来の進路からの逸脱が大きいことを表わす。航空機が本来の進路と逆方向に飛行しないように、 l_j に対しては負の係数 ($-c_l$) を用いる。また横方向の逸脱 w_j に対しては、航空路幅程度の逸脱は許容するものとし、分母に航空路幅に相当する定数 a_w をおく。また、 c_a は正の実数、 n_a は偶数の自然数である。実際のポテンシャル A_j の計算例を図 4.6 に示す。これは、ある航空機が一定時間回避動作をとった後に直線飛行を続けた場合のポテンシャル分布の例を鳥瞰図で表わしたものである。図中、目盛の付いた長方形が対応する水平

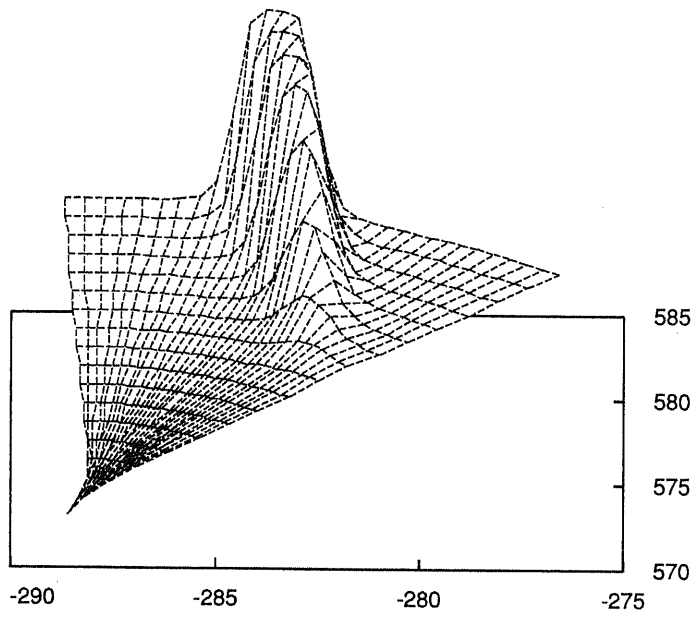


Figure 4.3: 航空機間隔に関するポテンシャルの計算例

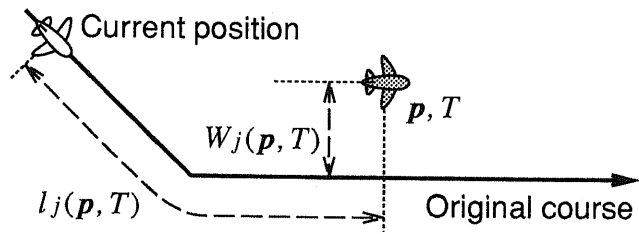
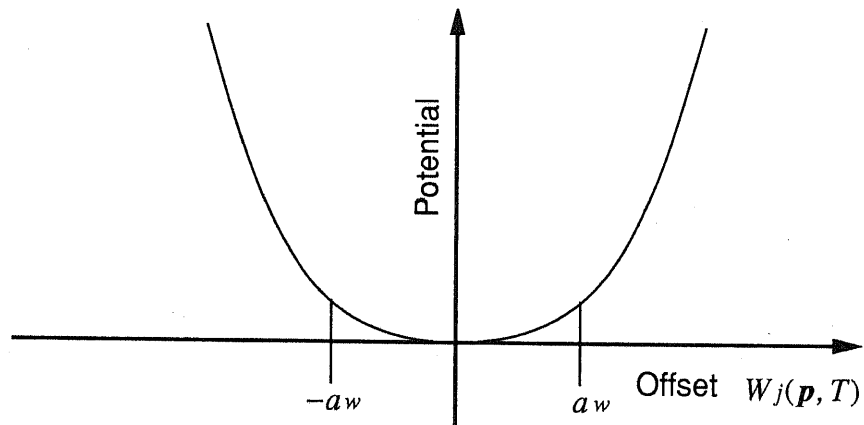
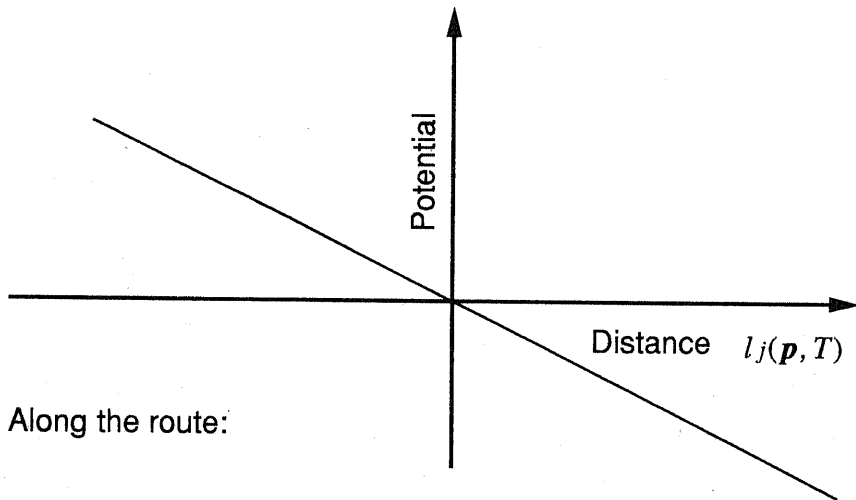


Figure 4.4: 進路に関するポテンシャルのパラメタ



Across the route:



Along the route:

Figure 4.5: 進路に関するポテンシャル

面の XY 座標 (km) を表わし、扇の要に相当する部分が航空機 j の現在位置を表わす。航空機 j の本来の進路は点線で示す。

速度変化の抑制

航空機が速度を一定に保ちながら飛行するということは、各サンプリング区間の移動量が一定であると言い替えることができる。航空機 j の移動量は、現在位置 \mathbf{p} と一時点前の位置 $\mathbf{p}_j(T-1)$ の差で求められるので、この移動量をサンプリング間隔 t_s で割ったものが初期速度 v_j から離れれば値が大きくなるような関数 V_j を設定し、速度変化の抑制に用いる。

$$V_j(\mathbf{p}, T) = c_v \left(\frac{\frac{|\mathbf{p} - \mathbf{p}_j(T-1)|}{t_s} - v_j}{L_0} \right)^{n_v} \quad (4.8)$$

ここで c_v は正の実数、 n_v は偶数の自然数、 L_0 は速度変化の許容範囲である。サンプリング間隔 t_s を短くとれば、旋回等も直線で近似できる。

急激な回避動作の抑制

航空機の回避動作にも限界があり、極端に大きな回避をとることはできない。よって、航空機の旋回の限界を定めるような項 S_j を導入し、回避動作が大きくなりすぎないようにする。回避強度の指標としてはバンク角 θ を用い、 θ がある許容値 θ_0 を超えると値が大きくなるように S_j を設定する (図 4.7)。

$$S_j(\theta, T) = c_s \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{n_s} \quad (4.9)$$

ここで、 c_s は正の実数、 n_s は偶数の自然数である。

複雑な回避動作の抑制

航空機の回避方向が頻繁に変わらないようにするために、複雑な回避動作を抑えるような項 B_j を導入する。一時点前の回避強度 $\theta_j(T-1)$ から大きく回避強度 θ が変わると値が大きくなるように B_j を設定する (図 4.8)。

$$B_j(\theta, T) = c_b \left(\frac{\theta - \theta_j(T-1)}{\theta_0} \right)^{n_b} \quad (4.10)$$

ここで c_b は正の実数、 n_b は偶数の自然数である。

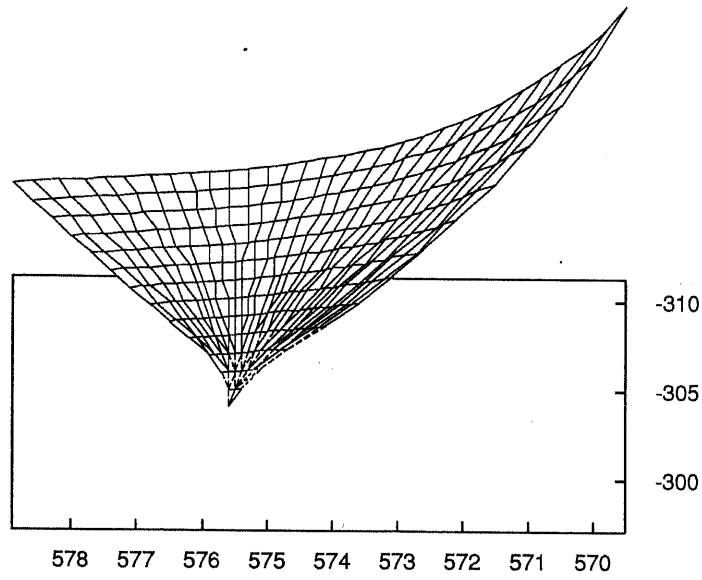


Figure 4.6: 進路に関するポテンシャルの計算例

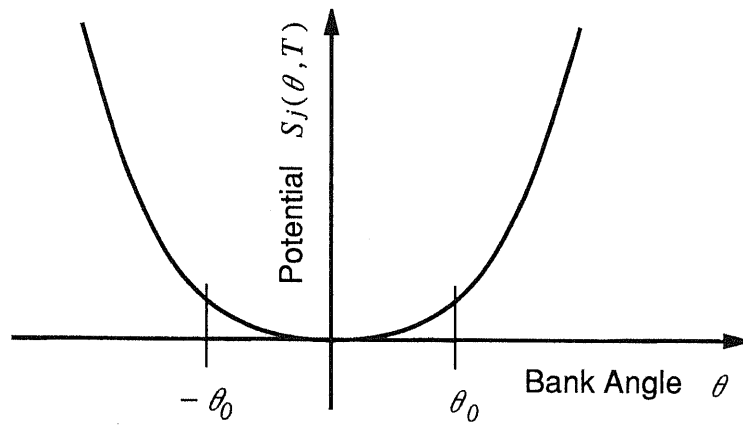


Figure 4.7: 急激な回避動作の抑制

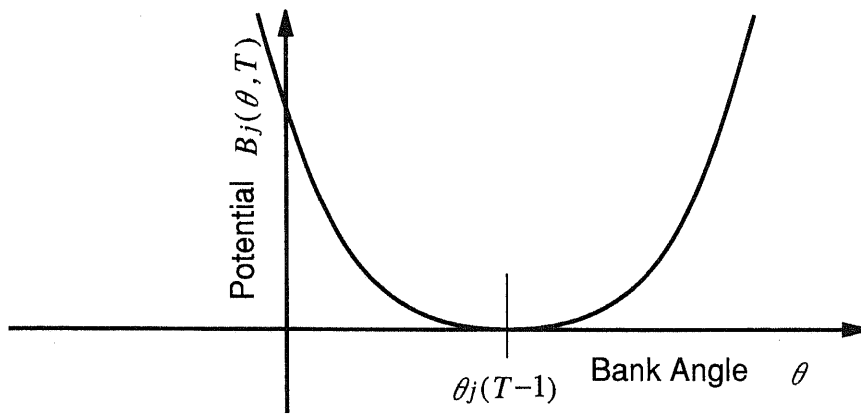


Figure 4.8: 複雑な回避動作の抑制

4.2 ポテンシャル分布を用いた手法

各航空機に対する空間方向のポテンシャル分布を考慮に入れ、逐次的に回避パターンを生成する手法について述べる。この手法では、過去の時点の回避パターンは確定しているものとして、次の時点の回避パターンを決定して行く。このときの時間間隔 t_s は、現在のところ 10 秒としている。

4.2.1 回避パターンの作成

回避パターンは以下のように作成する。ここで述べる“航空機”には、前述の管制用データテーブルの航空機データにポテンシャル関連のデータを追加して衝突回避用に拡張したものが用いられる。

1. 互いに衝突の危険のある航空機の組を選定し、各航空機の将来位置を、現在位置および飛行計画に基づいて計算する。ここまでの処理は、管制用データテーブルを用いて行なわれる。回避の起点となる時点は、衝突が予想される時刻の τ 秒前とする。ここで、 τ は回避に要する時間であり、原則として $\tau = 30(\text{s})$ とする。
2. その時点で回避動作未定の航空機を選択し、続く τ 秒間回避を行なう場合の航空機の将来位置に対する P_j の分布を計算する。このときの回避範囲は、バンク角 θ にして $-30^\circ < \theta < 30^\circ$ とする。また、時間方向には 3τ 秒程度先まで P_j の分布を計算する。
3. 計算された中で、 P_j がもっとも低くなるような経路を選択し、これを当該航空機の当該時点における回避動作とする。
4. 回避動作未定の航空機があれば、2.へ戻る。
5. 時点を 1 つ ($= t_s$) 進めて、2.へ戻る。

4.2.2 航空機の将来位置の計算

4.2.1 で用いる航空機の将来位置の計算方法を示す。

時点 T における航空機 j の位置 $p_j(T)$ および速度 $v_j(T)$ をもとにして、時点 $T' = T + m$ における位置を計算する (図 4.9)。ここでは、左旋回の場合の式を示す。右旋回の場合も同様の式により求まる。

$mt_s \leq \tau$ のとき:

$$\mathbf{p}_{j,T}(\theta, T') = \mathbf{p}_j^{(c)}(\theta, T) + \frac{|\mathbf{v}_j(T)|^2}{g \tan \theta} \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\gamma = \beta_j(T) - \frac{\pi}{2} + \frac{g \tan \theta}{|\mathbf{v}_j(T)|} mt_s \quad (4.12)$$

$mt_s > \tau$ のとき:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{j,T}(\theta, T') &= \mathbf{p}_j^{(c)}(\theta, T) + \frac{|\mathbf{v}_j(T)|^2}{g \tan \theta} \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{bmatrix} \\ &+ (mt_s - \tau) |\mathbf{v}_j(T)| \begin{bmatrix} \sin \gamma' \\ \cos \gamma' \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\gamma = \beta_j(T) - \frac{\pi}{2} + \frac{g \tan \theta}{|\mathbf{v}_j(T)|} \tau \quad (4.14)$$

$$\gamma' = \beta_j(T) + \frac{g \tan \theta}{|\mathbf{v}_j(T)|} \tau \quad (4.15)$$

ただし,

$$\mathbf{p}_j^{(c)}(\theta, T) = \mathbf{p}_j(T) + \frac{|\mathbf{v}_j(T)|^2}{g \tan \theta} \begin{bmatrix} \cos \beta' \\ \sin \beta' \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\beta' = \beta_j(T) + \frac{\pi}{2} \quad (4.17)$$

式中, $\beta_j(T)$ は時点 T における航空機の進行方向, g は重力加速度を表す.

4.3 ポテンシャル勾配を用いた回避手法

あらゆるポテンシャル分布を計算して, その中から妥当な回避パターンを得るとなると, ポテンシャル分布を求める計算も回避パターンの選定も処理量は膨大なものとなる. 即ち現実的な時間内に計算を終了させることは困難である. そこで本節ではポテンシャル勾配を参照しながら回避パターンを生成する手法について述べる. ポテンシャル勾配とは, 物理の分野で言う所の“力”に相当するものである. 具体的には, 式(4.3)を微分して得られるような航空機間の斥力, または式(4.7)を微分して得られるような航空路の引力等に相当する.

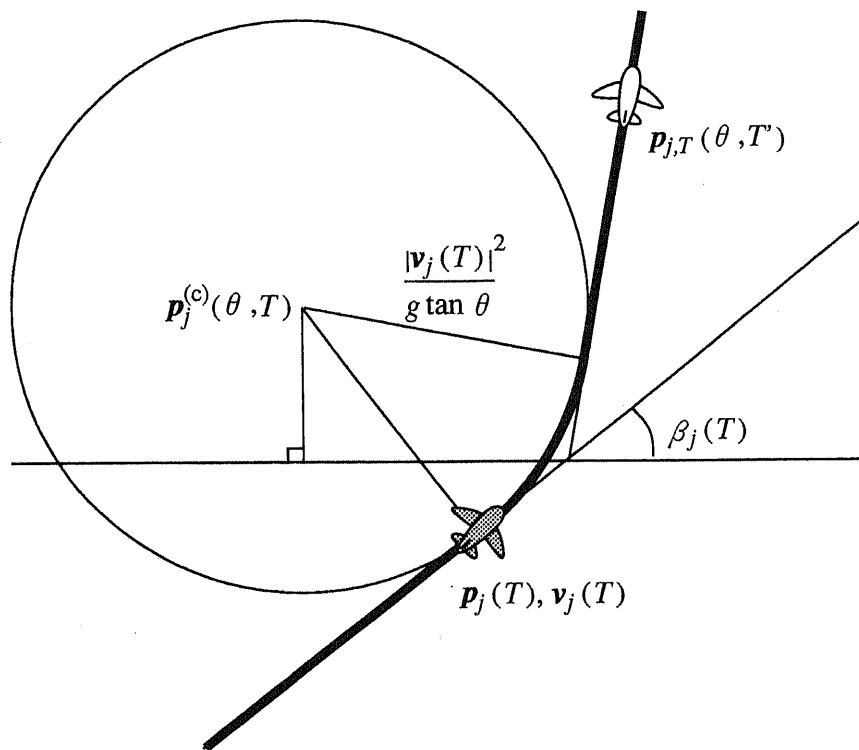


Figure 4.9: 航空機の将来位置の計算

4.3.1 回避パターンの作成

回避パターンは、以下のようにして作成される。

- 1) 互いに衝突の危険のある航空機の現在・将来位置を飛行計画をもとに計算し、時間間隔 t_s で標本化して時空間中に配置する (図 4.10)。これを初期状態とする。
- 2) 配置された各標本点のポテンシャル勾配を計算する。
- 3) 全標本点内でのポテンシャル勾配の最大値が閾値以下であれば処理を終了する。
- 4) 計算されたポテンシャル勾配に応じて標本点を移動させ、2) に戻る。

以下の各節でその詳細を述べる。

ポテンシャル勾配の計算

航空機間隔の維持 式 (4.3) を \mathbf{p} で微分すると、標本点間の斥力 (航空機間隔を保とうとする力) が得られる。

$$\begin{aligned}
 -\mathbf{R}'_j(\mathbf{p}, T) &= - \left[\begin{array}{c} \frac{\partial R_j}{\partial \mathbf{x}} \\ \frac{\partial R_j}{\partial y} \end{array} \right] & (4.18) \\
 &= \sum_{i \neq j} \frac{2c_r D_{ij}(T)^{2n_r} n_r d_i(\mathbf{p}, T)^{2(n_r-1)}}{[d_i(\mathbf{p}, T)^{2n_r} + c_d D_{ij}(T)^{2n_r}]^2} \\
 &\quad \cdot \left[\begin{array}{c} x - x_i(T) \\ y - y_i(T) \end{array} \right] & (4.19)
 \end{aligned}$$

本来の進路への復帰 式 (4.7) を \mathbf{p} で微分すると、本来の進路の引力に相当する式が得られる。

$$\begin{aligned}
 -\mathbf{A}'_j(\mathbf{p}, t) &= c_l \left[\begin{array}{c} \frac{\partial l_j}{\partial \mathbf{x}} \\ \frac{\partial l_j}{\partial y} \end{array} \right] \\
 &\quad - c_a \frac{n_a}{a_w} w_j(\mathbf{p}, t)^{n_a-1} \left[\begin{array}{c} \frac{\partial w_j}{\partial \mathbf{x}} \\ \frac{\partial w_j}{\partial y} \end{array} \right] & (4.20)
 \end{aligned}$$

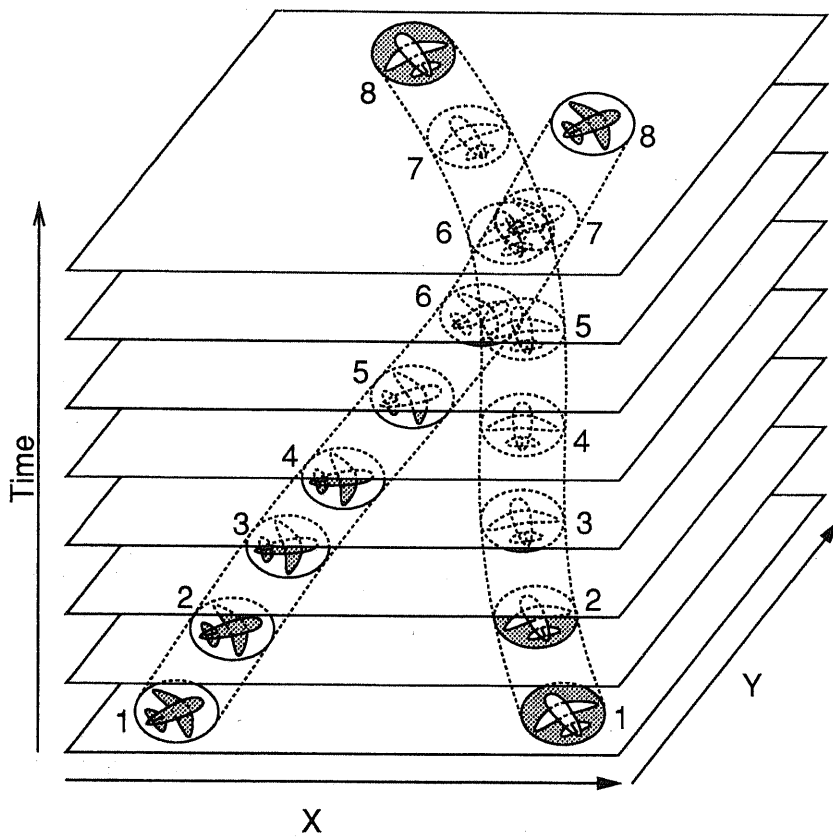


Figure 4.10: 時空間中の標本点の配置

速度変化の抑制 式(4.8)を \mathbf{p} で微分すると、速度を一定に保つ力に相当する式が得られる。

$$-V'_j(\mathbf{p}, t) = -\frac{c_v n_v}{L_0^{n_v}} \left(\frac{|\mathbf{p} - \mathbf{p}_j(T-1)|}{t_s} - v_j \right)^{n_v-1} \frac{1}{t_s |\mathbf{p} - \mathbf{p}_j(T-1)|} \begin{bmatrix} x - x_j(T-1) \\ y - y_j(T-1) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

急激な回避動作の抑制 式(4.9)を θ で微分すると、急激な回避動作を抑制する力が得られる。

$$-S'_j(\theta, T) = -c_s n_s \frac{\theta^{n_s-1}}{\theta_0^{n_s}} \quad (4.22)$$

複雑な回避動作の抑制 式(4.10)を θ で微分すると、複雑な回避動作を抑制する力が得られる。

$$-B'_j(\theta, T) = -c_b n_b \frac{(\theta - \theta_j(T-1))^{n_b-1}}{\theta_0^{n_b}} \quad (4.23)$$

標本点位置の更新

各標本点にかかる力を計算する。4.1.1の条件a)からe)に相当する力は、それぞれ式(4.18)、式(4.20)、式(4.21)、式(4.22)、式(4.23)により与えられる。ここで、式(4.22)、式(4.23)を時空間中で扱うためには、 θ で微分していた式を \mathbf{p} で微分した式に書き改める必要がある。

航空機 j の時点 T におけるバンク角で与えられる θ と実際の航空機の位置 \mathbf{p} の関係は次式のように表わされる。

$$\theta(\mathbf{p}, T) = \frac{|\Delta \mathbf{p}_j(\mathbf{p}, T)| \phi_j(\mathbf{p}, T)}{gt_s^2} \quad (4.24)$$

$$\Delta \mathbf{p}_j(\mathbf{p}, T) = \mathbf{p} - \mathbf{p}_j(T-1) \quad (4.25)$$

ここで $\phi_j(\mathbf{p}, T)$ は、 $\Delta \mathbf{p}_j(\mathbf{p}, T)$ と $\Delta \mathbf{p}_j(\mathbf{p}_j(T-1), T-1)$ のなす角である(図4.11)。ここで、 $\phi \ll 1$ として、 $\sin \phi \approx \phi$ と仮定すれば、式(4.24)は

$$\theta(\mathbf{p}, T) \approx \frac{(\Delta y \Delta u - \Delta x \Delta v)}{|\Delta \mathbf{p}_j(\mathbf{p}_j(T-1), T-1)| gt_s^2} \quad (4.26)$$

$$\Delta x = x - x_j(T-1),$$

$$\Delta y = y - y_j(T-1),$$

$$\Delta u = x_j(T-1) - x_j(T-2),$$

$$\Delta v = y_j(T-1) - y_j(T-2)$$

のように近似できる。これより、時空間中で標本点 j にかかる力を以下のように近似する。

$$-S'_j(\mathbf{p}, T) = -S'_j(\theta, T) \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$\approx \frac{S'_j(\theta, T)}{|\Delta \mathbf{p}_j(\mathbf{p}_j(T-1), T-1)| g t_s^2} \begin{bmatrix} \Delta v \\ -\Delta u \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$-B'_j(\mathbf{p}, T) = -B'_j(\theta, T) \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\approx \frac{B'_j(\theta, T)}{|\Delta \mathbf{p}_j(\mathbf{p}_j(T-1), T-1)| g t_s^2} \begin{bmatrix} \Delta v \\ -\Delta u \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

以上より、時点 T における各標本点にかかる力が計算できる。これを $\mathbf{F}_j(\mathbf{p}, T)$ とおく。

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_j(\mathbf{p}, T) = & -\mathbf{R}'_j(\mathbf{p}, T) - \mathbf{A}'_j(\mathbf{p}, T) - \mathbf{S}'_j(\mathbf{p}, T) \\ & -\mathbf{B}'_j(\mathbf{p}, T) - \mathbf{V}'_j(\mathbf{p}, T) \end{aligned} \quad (4.31)$$

次に、得られた \mathbf{F}_j を用いて、各標本点の位置を更新する。

$$\mathbf{p}_{j(next)}(T) = \mathbf{p}_j(T) + \lambda \mathbf{F}_j(\mathbf{p}_j(T), T) \quad (4.32)$$

ここで、 λ は小さな正の定数である。

4.3.2 収束性の向上

以上で基本的な更新手順は整った。しかし、4.3.1 で述べた手順では、衝突の形態によっては収束に数千回程度の繰り返し計算が必要となったり、解が発散したりする例が見受けられる。そこで比較的少ない繰り返し回数で回避パターンを得るために、以下のような変更を加える。これらの意味する所は、原則として一つの標本点にかかる力を時間方向に平滑化することにより現実的な回避パターンを

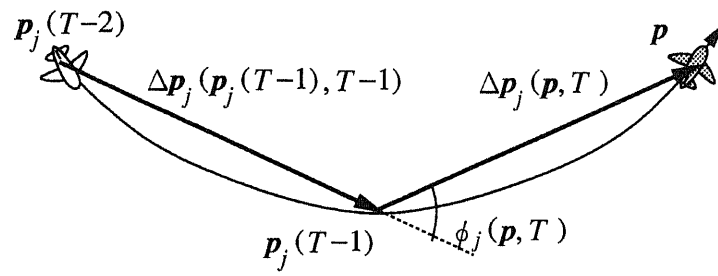
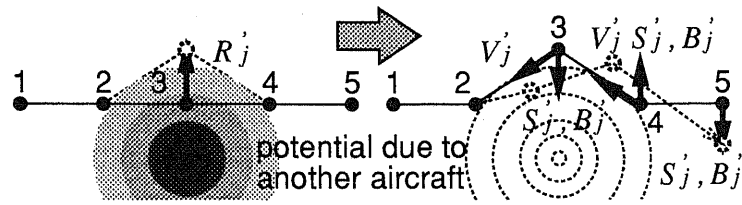
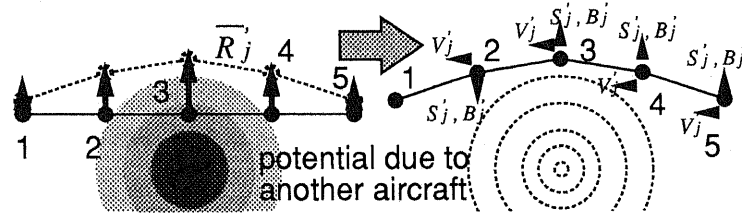


Figure 4.11: 旋回時の標本点間の関係



(a) movement without smoothing



(b) smoothed movement

Figure 4.12: 処理の高速化のための平滑

模倣することにある。例として標本点間の斥力に対する変更の概念図を図 4.12 に示す。

例えば斥力 R'_j は互いに接近した標本点間に局所的に作用する力である。直線飛行中の航空機の標本点に斥力 R'_j がかったとする (図 4.12(a) 中の標本点 3)。標本点位置が R'_j に比例して更新されるとすると、その変化分は次の繰り返し計算において速度成分 ($|p - p_j(T-1)|/t_s$) や回避強度 (θ) の変化として現れる。 V'_j や S'_j , B'_j も時間方向に相前後する標本点との局所的な位置関係により表現される関数であり、上記の変化分を相殺する方向に働く。結果として繰り返し計算 1 回当たりの標本点の移動量は小さく抑えられてしまう。また現実の回避においても図 4.12(a) のように短時間に回避方向が変化することはありえない。

現実の航空機の回避パターンは図 4.12(b) のように緩やかな進路変更を伴って現れる。現実の回避パターンに見合うように斥力 R'_j を前後の標本点に平滑化してかけるようにすると、各標本点における速度成分や回避強度の変化も小さくなり、図 4.12(a) に見られたような、変化分の相殺も起こりにくくなる。

時点 T における航空機 j に対する平滑化された力を各項ごとに $-\bar{R}'_j(T)$, $-\bar{A}'_j(T)$, $-\bar{S}'_j(T)$, $-\bar{B}'_j(T)$, $-\bar{V}'_j(T)$ で表わせれば、各標本点 $p_j(T)$ の更新は次式で表わされる。

$$p_{j(next)}(T) = p_j(T) + \lambda \left[-\bar{R}'_j(T) - \bar{A}'_j(T) - \bar{S}'_j(T) - \bar{B}'_j(T) - \bar{V}'_j(T) \right] \quad (4.33)$$

まず、主に収束の高速化に寄与する項から述べる。

航空機間隔の維持 標本点間の斥力 ($-R'_j$) を時間方向に平滑化したものを $-\bar{R}'_j$ とおく。

$$-\bar{R}'_j(T) = - \sum_{m=-2}^2 c_m R'_j(p_j(T+m), T+m) \quad (4.34)$$

式中の係数 c_m は、 $c_{\pm 2} = 0.25$, $c_{\pm 1} = 0.75$, $c_0 = 1$ の配分とする。

本来の進路への復帰 本来の進路からの引力 ($-\bar{A}'_j$) は、標本点間の位置関係に関わらず広範囲の標本点に比較的均等にかかる力であり、特に平滑化の必要はないと考えられる。よって ($-\bar{A}'_j$) は $-A'_j$ をそのまま用いる。

$$-\bar{A}'_j(T) = -A'_j(p_j(T), T) \quad (4.35)$$

速度変化の抑制 速度変化を抑制する力 $(-V'_j)$ の平滑化は、1時点先の力が速度を速める方向に働く時にのみ行なう。

$p_j(T+1) - p_j(T) \geq v_j t_s$ のとき:

$$-\bar{V}'_j(T) = -V'_j(p_j(T), T) \quad (4.36)$$

$p_j(T+1) - p_j(T) < v_j t_s$ のとき:

$$\begin{aligned} -\bar{V}'_j(T) &= -V'_j(p_j(T), T) \\ &+ V'_j(p_j(T+1), T+1) \end{aligned} \quad (4.37)$$

以下は、主に発散の抑制に寄与する項である。

急激な回避動作の抑制 回避強度は、式(4.24)や図4.11に示したように、時間的に相前後する3標本点の位置関係から求まる。したがって、急激な回避動作を抑制する力 $-\bar{S}'_j$ は、関係する3標本点にかかる力を平滑化して扱う。

$$\begin{aligned} -\bar{S}'_j(T) &= -S'_j(p_j(T), T) \max\left(0, 1 - \frac{t_s T}{\tau}\right) \\ &+ S'_j(p_j(T+1), T+1) \\ &- S'_j(p_j(T+2), T+2) \min\left(1, \frac{t_s T}{\tau}\right) \end{aligned} \quad (4.38)$$

ここで、 τ は回避に要する時間、 \min は最小値を与える関数、 \max は最大値を与える関数である。

複雑な回避動作の抑制 複雑な回避を抑制する力 $-\bar{B}'_j$ も、関係する3標本点にかかる力を平滑化して扱う。

$$\begin{aligned} -\bar{B}'_j(T) &= -B'_j(p_j(T), T) \max\left(0, 1 - \frac{t_s T}{\tau}\right) \\ &+ B'_j(p_j(T+1), T+1) \\ &- B'_j(p_j(T+2), T+2) \min\left(1, \frac{t_s T}{\tau}\right) \end{aligned} \quad (4.39)$$

4.4 水平面内の回避パターンの生成結果

以上の2手法を3.6.1に示したシミュレーション系に組み込み、回避パターンを生成した例を示す。

4.4.1 ポテンシャル分布を用いた手法

ポテンシャル分布を用いた回避パターンの作成結果について、典型的な例を示す。図 4.15, 図 4.16 のような 2 機の衝突のケースでは、航空機間隔は基準値以上に保たれているものの、鋭角に交差する場合には元の進路に復帰できないような結果が目立つ。また、図 4.17 のような 3 機の衝突のケースでは、生成される回避パターンは選択する航空機の順序に依存して大きく変化し、必ずしも航空機間隔が維持された結果が得られるとは限らない。しかしこれらの問題は、後に述べる高度方向も含めた 3 次元回避により解決しうる問題である。

4.4.2 ポテンシャル勾配を用いた手法

航空機の各標本点にかかる力の最大値が 1 未満となった時点を収束とみなした時の収束に必要な繰り返し計算回数を図 4.13 に示す。図中、角度 (Angle) は衝突時の各航空機の進路のなす角 (度) を表し、正面衝突を 0 度としている。遅延 (Delay) は各航空機が両進路の交点に至るまでの時間差 (秒) を表わす。空白部分は衝突の危険が検出されなかったことを表わす。計算回数 1000 回以上の中には解が発散した場合も含まれる。

各式中のべき乗の指数部は定数として扱い、 $n_r = 3$, $n_a = n_v = n_s = n_b = 2$ とした。他の各パラメータは表 4.1 のように設定した。表中、 D_{ij} は、レーダの測定誤差等による予測誤差にもとづき安全間隔を保てるような値に定める。現在のところ直線予測を前提として予測誤差を算出しているため、 D_{ij} は t の 1 次関数となっているが、実際には、現実の測定誤差や回避指示の伝達中に生じる誤差、航空機・パイロット系の応答特性等を考慮して定めるべきものである。

この結果によると収束までの計算回数は、角度が 90 度未満では 300 回以内、90 度以上でも多くは 1000 回以内に収まっていることがわかる。本論文で用いた計算機は 30MIPS 程度の性能であり、100 回の繰り返し計算に 1 秒程度要する。したがって本結果によると大半の衝突パターンでは 10 秒以内に解が得られることになる。しかし最接近距離 0 のときには解が得られない例が半数程度見受けられる。このような場合、図 4.14 に示すような局所的な安定点に陥っていることが多い。図中航空機 i, j 各々の同一時点の標本点には同一の番号が付してある。この時、標本点は互いに線対称の配置となる。各標本点にかかる斥力 R' は速度成分を増す方向に働き、 V' は航空機間隔を小さくする方向に働く。ここで S' , B' はバンク角を小さくする方向に働き、衝突の危険がありながら各標本点にかかる力

のバランスがとれてしまう場合がある。

このような望ましくない平衡状態は、2機の衝突の場合には繰り返し計算による誤差の蓄積により避けられる場合もあるが、3機以上の衝突では対称性の如何に関わらず局所的な安定点に陥る恐れが大きい。

得られた解の中で最接近時の航空機間隔の予測値と D_{ij} とを比較すると、角度が160度となる辺りでは D_{ij} の0.9倍程度の結果も見受けられるが、他は1倍から1.1倍に収まっている。 c_r を5以上に設定すれば航空機間隔を常に D_{ij} 以上に保てるようになるが、収束にはやや時間を要する。

収束時間は、ほぼ λ の減少に反比例して遅くなるが、 λ を大きくしても収束が高速化されるとは限らず、むしろ発散することが多い。この原因は速度変化の抑制の項 (V_j) にある。 V_j の係数を変更しながら収束回数を調べたところ、 $\lambda c_n / L_0^{n_0}$ の値が1を超える辺りから収束性が極めて悪化することが判った。したがって、 λc_n の積一定の条件下であれば λ 、 c_n を変更することで収束の高速化も可能となる。ただし収束の高速化にともなって速度変化による誤差も増加するので、実際には誤差の増分だけ D_{ij} の値も大きく設定する必要がある。

サンプリング間隔 t_s を小さくすれば標本化に起因する誤差を小さくできる。そこで $t_s = 5$ の場合についても検討した。 $t_s = 5$ の場合も最接近時の航空機間隔は D_{ij} の1から1.2倍に収まっており問題ないが、収束時間はほぼ $t_s = 10$ の場合の2倍となることが判った。

その他のパラメータについては、係数を変更すればその項に関する効果(回避動作の程度、本来の進路への復帰の程度等)が現れるような結果となり、特に収束性を悪化させる要因とはならないことが判った。また特に必要がない限りは、 c_a, c_v, c_s, c_b の各係数の値は1のままで良い。 c_d は十分小さな値であれば良い。

最後に、本論文で述べた手法を用いて生成した回避パターンの典型的な例を図4.18、図4.19、図4.20に示す。各々、左が衝突回避の平面図、右は上から回避中(時点0から時点12まで)の速度変化、バンク角変化を表している。回避開始点の傍らに“start”の文字を付し、各航空機毎に同じ時点の標本点には同じ番号を付してある。他の航空機との衝突の危険のある区間は太線で示してある。最接近時点の標本点には“*”を付し、当該時点の標本点間の距離を実線で結んである。

図4.18、図4.19のような2機の衝突のケースでは、航空機間隔を基準値以上に保ちながら元の進路に復帰するような結果が得られた。衝突回避後のバンク角がやや大きくなっているものもあるが、速度変化は抑えられており、ほぼ現実的な範囲の解となっている。また、図4.20のような3機の衝突のケースでも回避パ

Table 4.1: 回避パターン生成用パラメータの設定

c_r	2.5	c_d	0.0001	$D_{ij}(t)$	$1.5 + 0.025t$
c_l	1	c_a	1	a_w	3
c_v	1			L_0	0.045
c_s	1			θ_0	30°
c_b	1				
λ	0.0016	t_s	10		

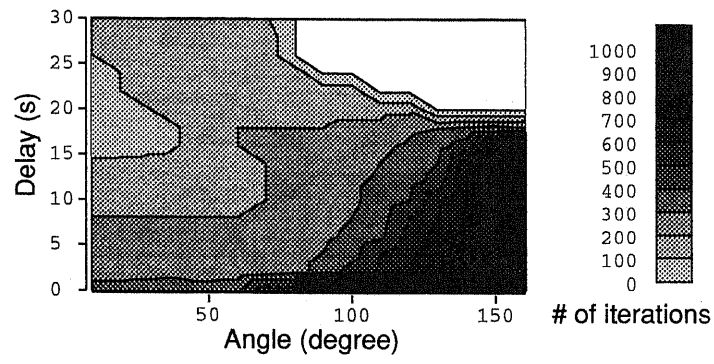


Figure 4.13: 回避指示生成に要する計算回数

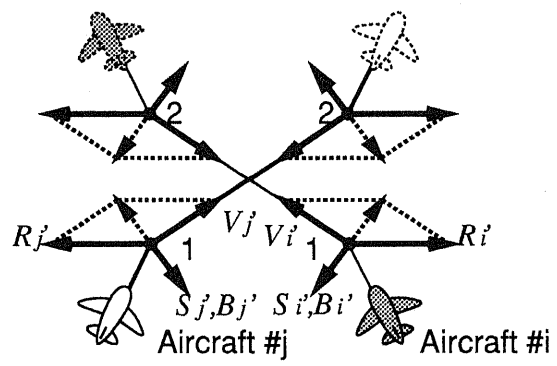


Figure 4.14: 望ましくない平衡状態

ターンは生成できるが、同図に示したようにバンク角が大きくなりすぎる場合もあり、必ずしも良好な結果が得られるとは限らない。これは、一つには与えられた条件下では水平回避が困難なケースも含まれるが、初期状態の如何によっては現実的な回避パターンが得られるようなケースも含まれている。

4.5 課題

4.5.1 ポテンシャル分布を用いた手法: 3次元回避への拡張

ポテンシャル分布を用いた手法では必ずしも元の進路に復帰できる結果は得られていない。しかし現実の衝突回避では高度方向も含めた3次元回避が可能であり、高度方向への回避も考えれば、容易に元の進路に復帰できるようなパターンを生成できる。

高度方向も含めた回避パターンを生成するためには、本手法で用いたポテンシャルの定義も3次元に拡張する必要がある。航空機*i*の3次元予測位置 $\mathbf{p}_i(T) = (x_i(T), y_i(T), z_i(T))$ に対して、ある航空機*j*が時点*T*に位置 $\mathbf{p} = (x, y, z)$ に至った場合の衝突の脅威量 R_j は、

$$R_j(\mathbf{p}, T) = \sum_{i \neq j} \frac{c_r}{r_{ij}(\mathbf{p}, T)^{n_r} + c_d} \quad (4.40)$$

$$r_{ij}(\mathbf{p}, T) = \max \left[\frac{(x - x_i(T))^2 + (y - y_i(T))^2}{D_{ij}(t)^2}, \frac{(z - z_i(T))^2}{H_{ij}(t)^2} \right] \quad (4.41)$$

と再定義できる。式中 H_{ij} は高度方向の衝突の判定基準である。

また、進路に関しても、時刻*t*における航空機*j*の本来の進路からの水平方向の逸脱量 $w_j(\mathbf{p}, T)$ および、高度方向の逸脱量 $h_j(\mathbf{p}, T)$ を考慮して、

$$A_j(\mathbf{p}, T) = -c_{il_j}(\mathbf{p}, T) + c_a \left[\left(\frac{w_j(\mathbf{p}, T)}{a_w} \right)^{n_a} + \left(\frac{h_j(\mathbf{p}, T)}{a_h} \right)^{n_a} \right] \quad (4.42)$$

と再定義できる。式中、 a_h は航空路の高度方向の幅を表すものとする。

ポテンシャル分布を用いた手法では、再定義された式を用いて分布を計算するだけなので、容易に3次元回避にも拡張できる。ポテンシャル分布を用いた手法を3次元回避に拡張した例を図4.21、図4.22、図4.23に示す。2機の航空機の衝突回避に関しては、図4.21は水平方向の回避結果が得られた例である。若干垂直

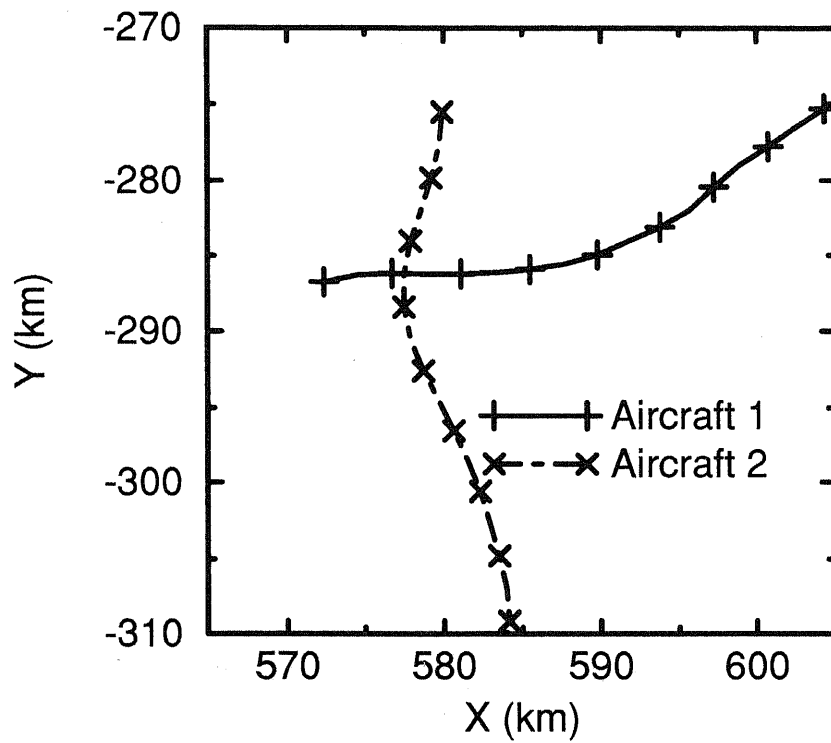


Figure 4.15: ポテンシャル分布を用いた回避:

鈍角 2 機

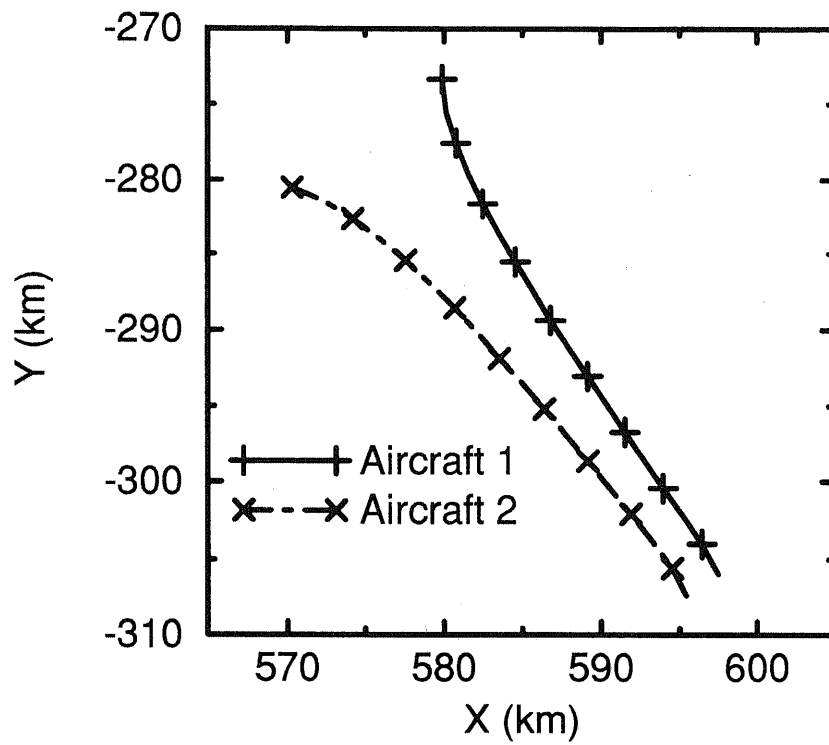


Figure 4.16: ポテンシャル分布を用いた回避:

鋭角 2 機

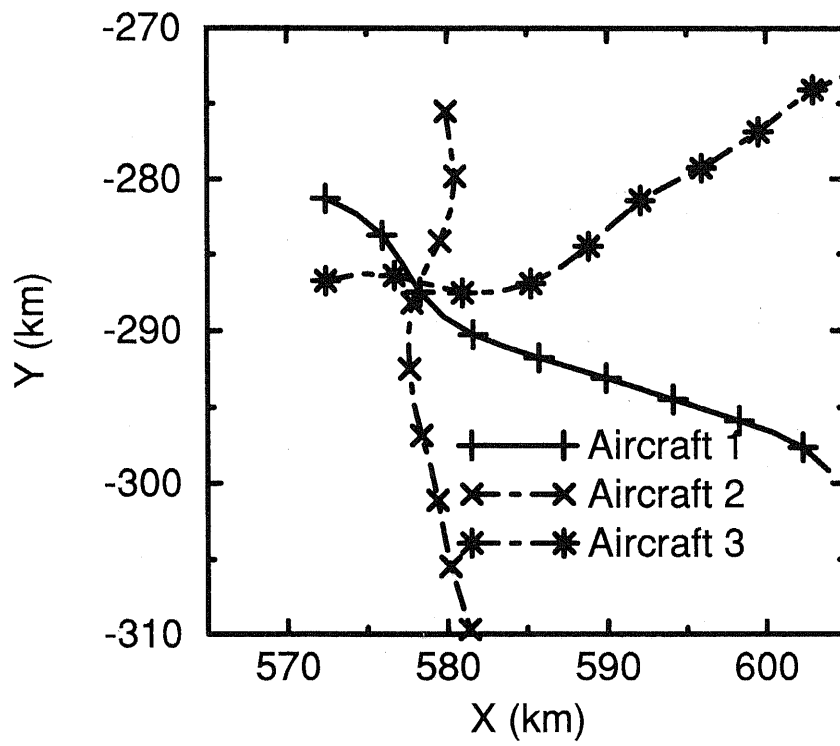


Figure 4.17: ポテンシャル分布を用いた回避:

3機

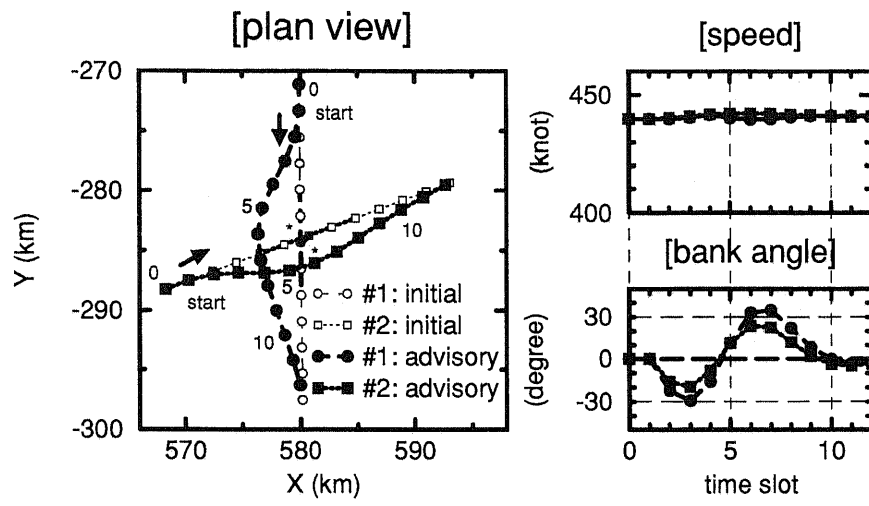


Figure 4.18: ポテンシャル勾配を用いた回避:

鈍角 2 機

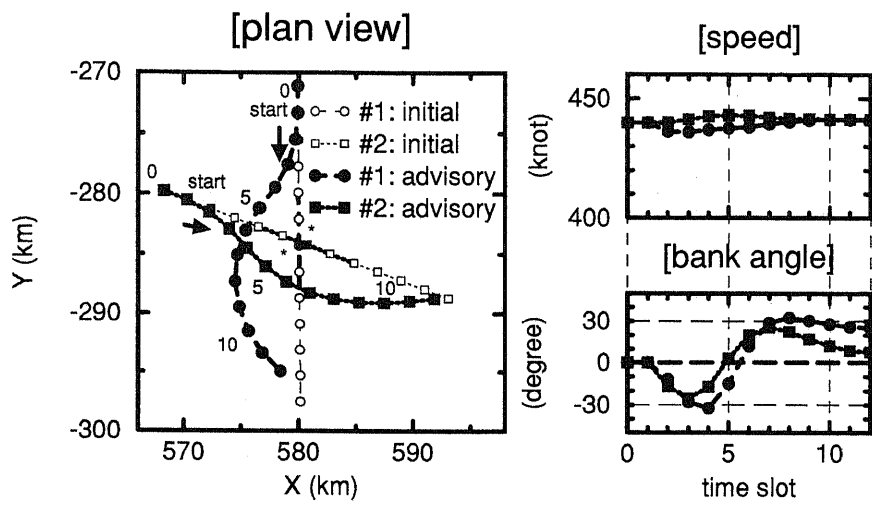


Figure 4.19: ポテンシャル勾配を用いた回避:

鋭角 2 機

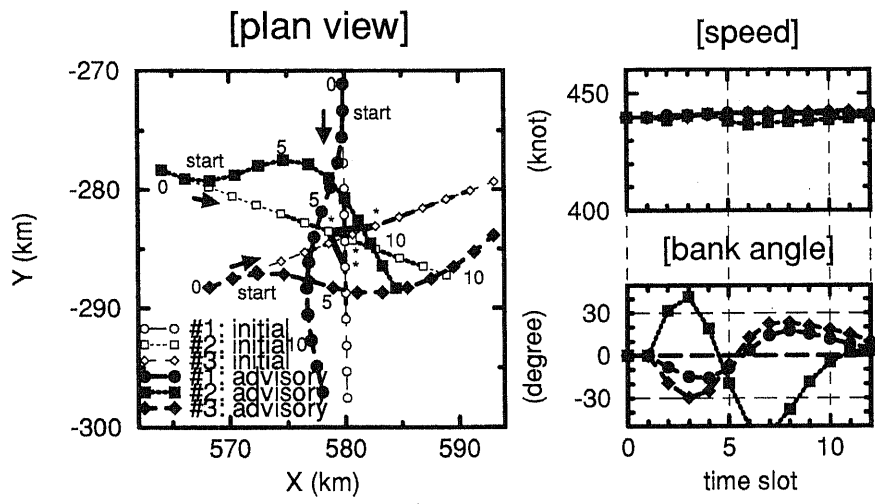


Figure 4.20: ポテンシャル勾配を用いた回避:

3機

方向にも回避しているが、概ね水平方向の回避にまともまっている。同様に図 4.22 は高度方向の回避結果が得られた例である。また図 4.23 は 3 機の航空機の衝突回避の例である。水平方向と高度方向の回避を組み合わせることにより、衝突の危険のない回避パターンが得られている。ただし 2 機の衝突回避に比べると、解の妥当性にはまだ検討の余地が残るところである。

2 機の航空機の衝突回避パターンについて、最接近時の航空機間隔と D_{ij} との比 (正規化距離) を図 4.24 に示す。図中、横軸が航空機の交差角を表しており、正面衝突を 0 度としている。縦軸は最接近点に至るまでの時間差 (秒) を表している。殆どのケースでは正規化距離が 1 を越えており、安全な解が得られていることがわかる。しかし航空機が殆ど並行に交わるケースでは安全間隔が保たれないような結果となっており、今後に課題を残している。

4.5.2 ポテンシャル勾配を用いた手法: 回避方向の選択

ポテンシャル勾配を用いた手法では、空間方向の広いポテンシャル分布を考慮していないため、初期状態における標本点の配置が後の回避パターンの生成に大きく影響してくる。例えば 2 機の衝突の例では、初期状態における航空機の最接近時の相対位置が回避パターンを決める最大の要素になっている。同様に、3 機以上の衝突を考える場合にも、回避を行わない場合の航空機間の最接近時の相対的な位置関係をもとにして初期状態における各航空機のおおまかな回避経路を選択することにより、良好な回避パターンを得ることができ、また繰り返し計算の回数も軽減されるものと考えられる。

水平方向の衝突回避の例として、図 4.25 の (1) のような異常接近を考えてみる。図中の (白丸で表されている) 航空機 A, B から見た相対的な異常接近の形態は、それぞれ、同図の (2), (3) のようになる。回避指示作成の第一段階として、おおまかな回避方向を選択する必要があるが、この図の例では、(2), (3) のような情報を参照することにより、航空機 A, B 共に左旋回すれば、効率良く衝突を回避できることが推測できる。このような、回避方向の選択に必要なパラメータを念頭において異常接近の情報を生成することを考える。

このとき垂直方向の回避強度と回避後の航空機位置とは、1 次式の関係として容易に把握できる。水平方向の回避についても、以下のように近似することで、回避強度 (バンク角) と回避後の航空機位置との関係を単純化することができる。

前述の 3.3.2 と同様の式により、航空機のバンク角を θ 、速度を v とすると、例えば $\theta > 0$ (左旋回) の場合、旋回時の航空機の現在位置に対する相対的な将来位

Horizontal Maneuver PLAN VIEW

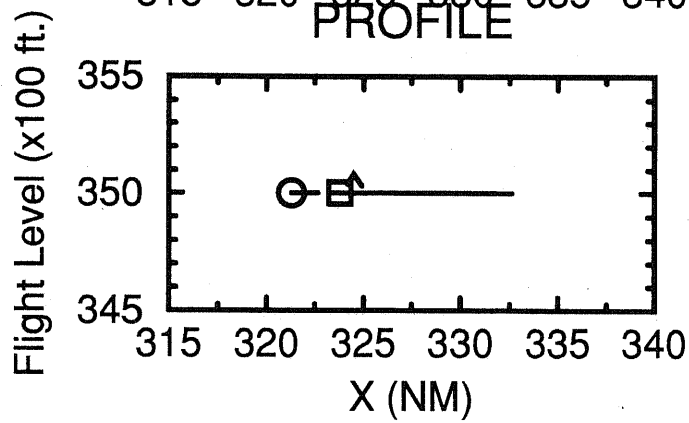
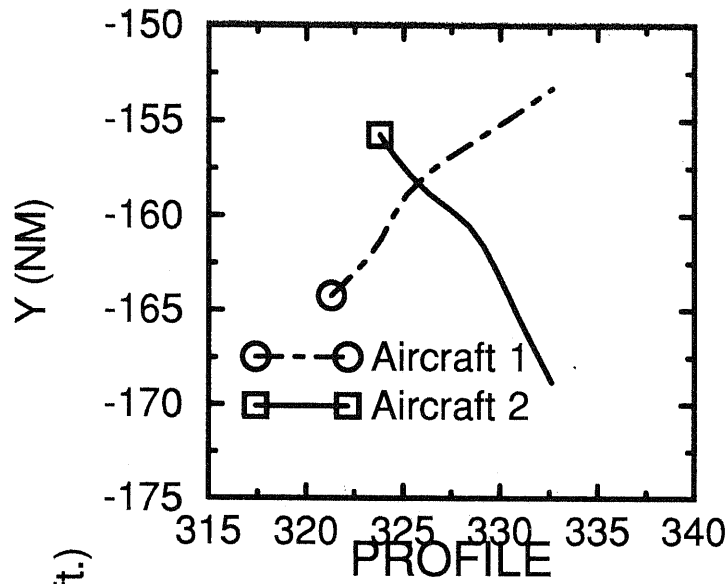


Figure 4.21: 3次元衝突回避: 水平方向の回避

Vertical Maneuver PLAN VIEW

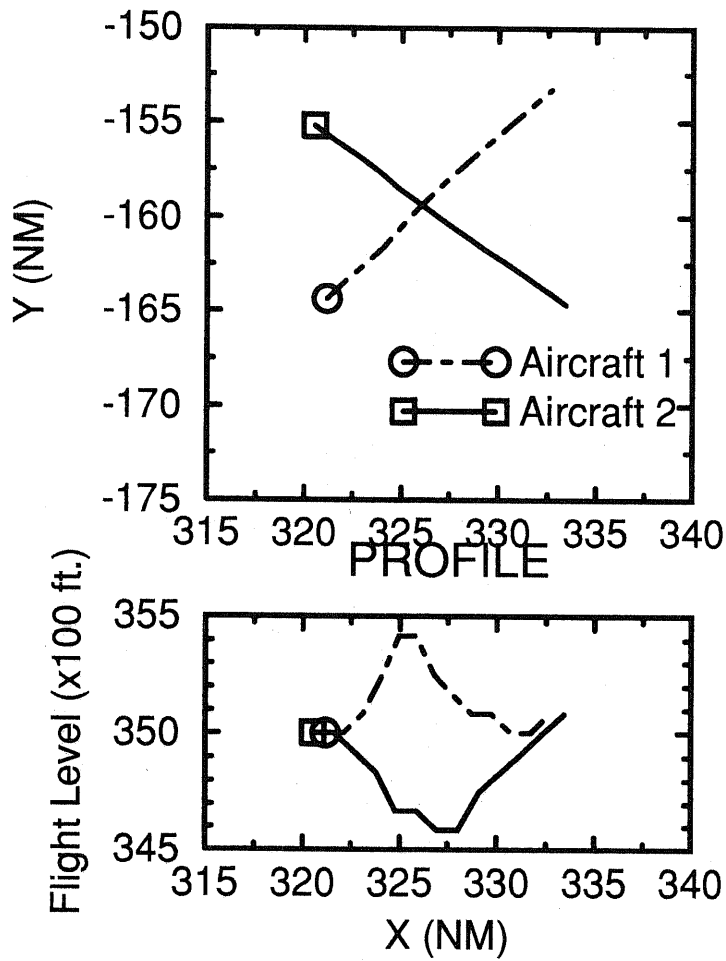


Figure 4.22: 3次元衝突回避: 高度方向の回避

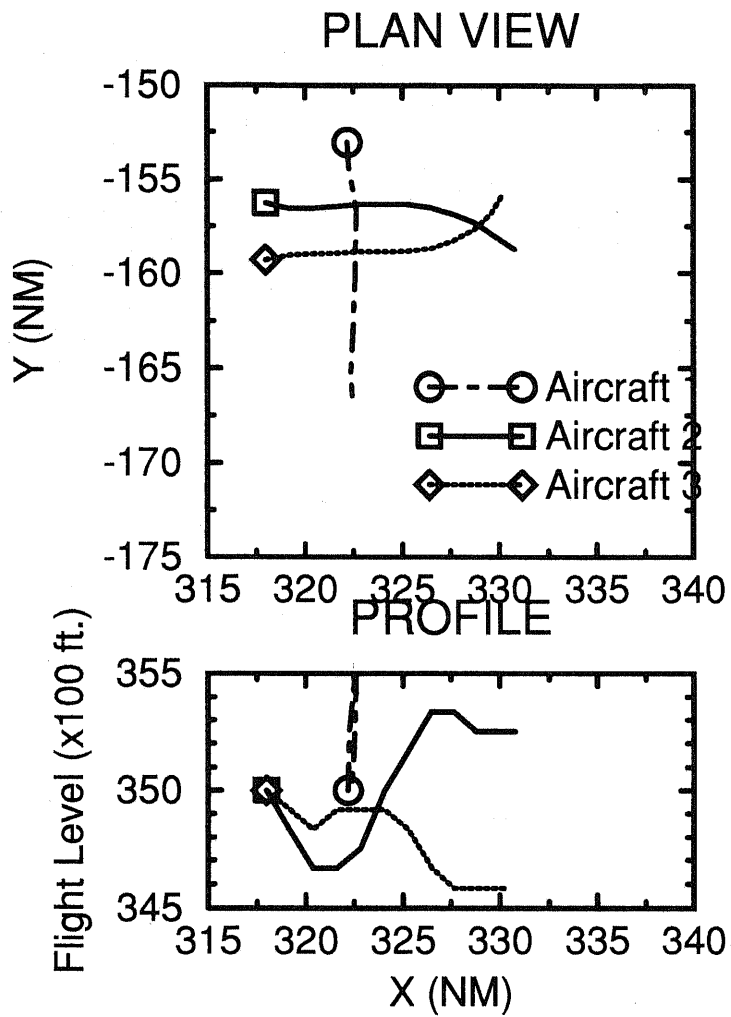


Figure 4.23: 3次元衝突回避: 3機の回避

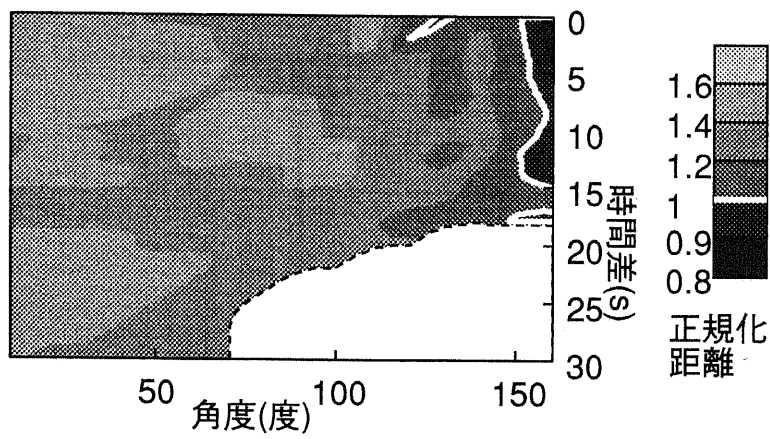


Figure 4.24: 衝突回避時の航空機間の最接近距離

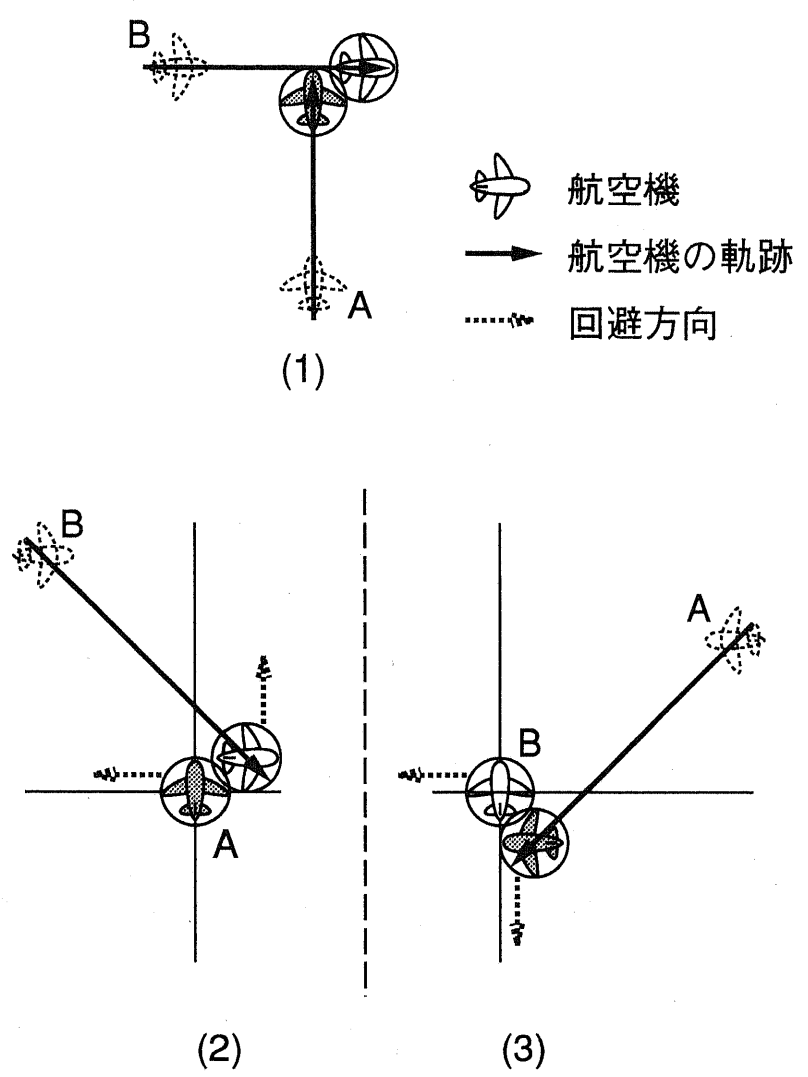


Figure 4.25: 回避方向の選択の指針

置 $r(t)$ は、式(4.43)のように与えられる。

$$r(t) = \frac{V_0^2}{g \tan \theta} \begin{bmatrix} \cos \frac{g \tan \theta t}{V_0} - 1 \\ \sin \frac{g \tan \theta t}{V_0} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

航空機の一般の進路予測にはこの式を用いれば良いが、回避の最低強度の選択に用いるのであれば、もう少し単純化された式の方が扱いやすい。

式(4.43)の \sin , \cos を展開し、2次の項まで近似すると、式(4.44)のようになる。

$$\begin{aligned} r(t) &\simeq \frac{V_0^2}{g \tan \theta} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \left(\frac{g \tan \theta}{V_0} \right)^2 t^2 \\ \frac{g \tan \theta t}{V_0} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} g \tan \theta t^2 \\ V_0 t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.44)$$

また、

$$r(t) \simeq \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} g \theta t^2 \\ V_0 t \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

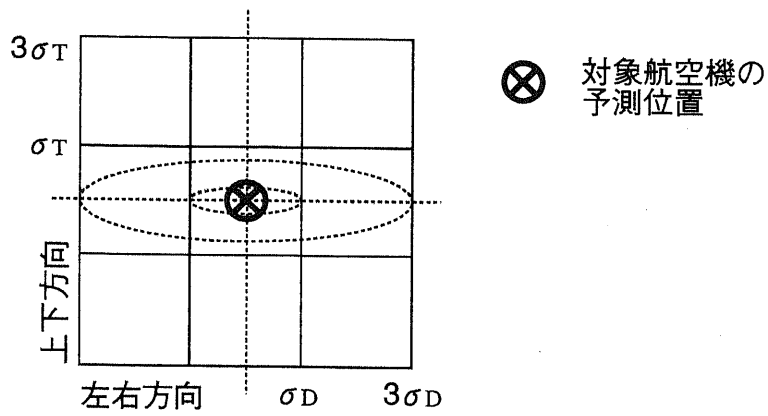
と近似しても、回避強度の選択に用いるには十分と思われる。こうしておけば、航空機の本来の予測位置に対する回避時の相対的な位置の概算 r_{rel} は、

$$r_{rel}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} g \theta t^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

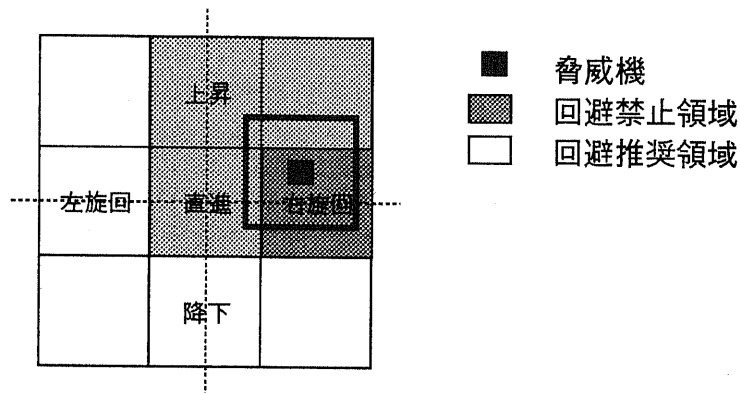
のように簡略化できる。

回避方向選択の判断は、図4.26のように行なうことが考えられる。まず象航空機の予測位置を基準とした相対的な座標軸上に、予測時間後の航空機の予測誤差 (σ_D, σ_H) の2倍に相当する距離を単位とした格子状の領域を設定する。そして、最接近時の脅威機の予測位置が、対象航空機に対して、どの領域に含まれるかにより、各回避方向の重み付を定める。回避方向は、(左旋回, 直進, 右旋回) \times (上昇, 水平, 降下) の9通りに分割しているが、これは計算上の便宜のためであり、必ずしもこれら全てのパターンが回避指示の候補として検討される必要はない。

この中で、最接近時の脅威機の相対座標が含まれる領域に相当する方向への回避を禁止し、また、その相対座標を中心とした $\pm\sigma$ の範囲と重複する領域に相当する方向への回避の優先順位を下げるようにすればよいと考えられる。



(a) 領域の分割



(b) 回避方向の優先度

Figure 4.26: 回避方向の選択基準

4.5.3 異常接近に関連する情報

前節に示した最接近時の位置関係以外にも、異常接近前後の航空機間の位置関係を広く参照して衝突回避の判断基準とすることもできる。異常接近前後の航空機間の情報としては、表 4.2 のようなものが考えられる。

以下に、各情報について補足する。

時刻

異常接近が予測された航空機対に関しては、異常接近前後の航空機対の状態が計算される。各々の計算結果には、それが何秒後の予測内容であることを示す時刻情報が付加される。本研究では、この、異常接近の情報生成の基準となる時刻は、レーダ周期を単位とした離散値を用いる。

異常接近の状態

異常接近に関する情報は、次のような状態に分類して取り扱う。

異常接近 該当時刻において、航空機対が異常接近と判断されるもの。

異常接近の前後 該当時刻においては異常接近となっていないが、その前後の何らかの時刻に異常接近状態となると予測されるもの。

潜在的な異常接近 現段階では異常接近は予測されていないが、今後の回避動作の如何により異常接近状態となりうるもの。

最接近 該当時刻において、航空機対が最も接近すると予測されるもの。

ここで、前3者は、互いに排他的な状態であるが、最接近の状態は他の状態と同時に現れるものであるので、前3者とは独立して扱う。

脅威機

異常接近の有無を通知するだけであれば、異常接近が検出された航空機対を区別する必要はないが、回避指示の生成まで考慮した場合、航空機毎に区別して情報を保存しておく必要がある。ここでは、どちらを脅威機とみなすと言った絶対的な判断基準がある訳ではなく、異常接近が検出された航空機対に関しては、各々の航空機が、それぞれ他方の航空機にとっての相対的な脅威機とみなされて処理されるからである。

Table 4.2: 異常接近に関する情報

各航空機対の状態	時刻
	異常接近の形態
	対象航空機
	脅威機
	脅威機の相対的な水平位置
	同, 水平距離
	同, 水平方位
	脅威機の相対的な垂直位置
	同, 垂直距離
	同, 垂直方位
各航空機の状態	回避方向の優先順位
	最初の異常接近から見た相対時刻

相対位置

脅威機の相対位置は, 水平方向の相対位置と, 垂直方向の相対位置とに分けて表現できる.

Chapter 5

知識処理を用いた管制手法

5.1 知識処理を用いた航空機の進路予測

ターミナル空域においても航空機の進入経路はある程度限定されている, しかし飛行計画中にターミナル中の細かい飛行経路は記されておらず, 進入してきた航空機は管制官の指示により適切な経路に誘導されることになる.

またターミナル空域における管制手法には管制官ごとの“くせ”があり, 一概にどの手法が最適であるとも決め難いものがある. したがって, ターミナル空域で実用的な警報システムを運用するとなると, この, 管制官の“くせ”をいかに取り込み, 適切な警報を発するかが問題となってくる. そこで, 管制官による到着航空機間の調整に関する知識をルールとして蓄えておき, 航空機の進路予測に適用する事を検討する. 適切に管制指示が設定できるようになり, 管制官の信頼を得るところとなれば, いずれは, 管制指示の自動生成にもつながるものと考えられる [1][3][8].

5.1.1 ターミナル管制のモデル

前述の通り, 飛行計画のみでは航空機の進路を決定できないため, ターミナル空域における進入経路をモデル化する必要がある. 単純な例を図 5.1 に示す. このモデルにおける進入経路の形状と大きさは羽田空港を原型にしているが, 各種の設定は大幅に簡略化されている. 図中, R/W は滑走路, FAF は最終進入フィックスを表す.

モデルの設定に際しての条件は以下のようなになる.

- 対象空域は, 空港を中心とした半径 50NM 程度の空域とする.

- 進入経路は折線近似で考え、個々の経路はフィックス (図中 FP) とフィックスを結んだ線分を単位として表現ものとする。到着航空機は、ほぼこの経路上を飛行しながら空港に進入するものとみなす。実際の管制においては、フィックス近傍での航空機の運動は曲線近似するのが妥当かと思われるが、簡単のため、原則として航空機は各フィックス上で針路を変更するものと仮定する。迂回路があれば、各迂回路に対応したフィックスを設定する。
- 進入経路の各セグメントに付加される情報としては、以下のようなものが挙げられる。
 - 始点となるフィックス,
 - 終点となるフィックス,
 - 迂回路,
 - 代替路 (割り込み経路等),
 - 標準的な管制情報,
 - 経路長 (各セグメントの長さ),
 - その経路を飛行するのに要する標準的な時間.
- 各フィックスには、その幾何情報の他に飛行プロファイルや当該フィックスから分岐する経路等の情報を付加する。飛行プロファイルとは、航空機がそのフィックスを通過する際にとるべき高度や速度の上下限を定めたものであり、航空機の型により2・3通り用意される。本研究では、H(heavy) と L(light) の2種類を用意する。これらは、各航空機の現在位置・速度の監視や予測の際に用いられる。
- 滑走路 (図中 R/W) は南北方向に2本平行に設置されているものとする。航空機の進入方向は南側から北方向に行なわれるものとし、同様に、離陸も北方向に行なわれるものとする。各々の滑走路に対応した最終進入フィックス (図中 FAF) は2点設定され、この最終進入フィックスを通過した航空機の管制は、空港の管制塔に移管される。
- 入域フィックス、すなわち管制移管が行なわれるフィックスは空港の北東および南西方向に2点設定し、各々のフィックスから滑走路に向けて発する標準的な到着経路を2本設定する (図中 AR)。これらの到着経路に従って、原

則として南西方向から進入した航空機は西側の滑走路 (R/W1) に着陸し、北東方向から進入した航空機は東側の滑走路 (R/W2) に着陸するものとする。

- 各標準到着経路に対して、調整用に短絡経路 (SR) や割り込み経路 (IR) を設定する。航空機は原則として標準到着経路に沿って進入するが、管制間隔を保つ (管制上の危険がないように進入航空機間の間隔を保つ) ことを前提として、短絡経路や割り込み経路を選択できる。
- 各標準到着経路に対してホールディング可能なフィックス (H) を設定する。ホールディングとは先行航空機との間隔調整や空港の悪条件などが原因ですぐに航空機が滑走路に進入できない場合に、その航空機を空中待機させることである。通常は定められたフィックス付近で旋回しながら待機する。複数の航空機が待機する場合には、互いに高度間隔を保ちながら待機する。

また、エンルート管制とターミナル管制では用いられるレーダの周期が10秒と4秒のように異なっている。

現在のところターミナル予測の対象航空機は到着航空機のみとしている。これは、到着航空機が滑走路に対して収束するような針路をとらなければならないのに対して出発航空機は到着航空機のすき間を縫って離陸すればよく、また進路の自由度も極めて大きいからである。

推論系に与えられる情報は以下の通りとする。

必須情報 推論系内で生成しえない情報である。

- 航空機 ID (便名)
- 航空機の現在位置 (水平位置および高度)
- 航空機の速度および高度変化率

付加情報 推論系内で生成可能な情報であるが、あらかじめ定義しておくことにより処理を用意にできる。

- 航空機の通過フィックス
- 入力データに先行するデータ ID

入力データが欠落した場合は、過去の入力データと内部の予測結果より現在位置等を推定するものとする。

到着航空機に対するターミナル管制の位相は、以下の3つに分けられる。

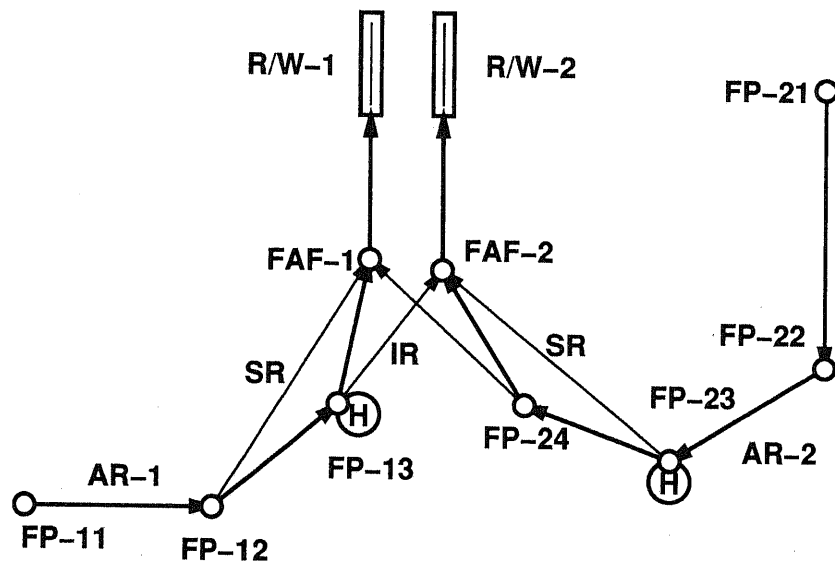


Figure 5.1: ターミナル空域のモデル

搜索 航空機の着陸順の決定等, 大まかな調整を行なう。航空機は入域フィックスを通過して初めて予測の対象となると考え, この時点までの進路予測はエンルート管制の範疇と考える。また, 一度決定された優先順位は着陸の時点まで変更されないものとする。

入域 順序付けされた航空機の細かな間隔調整を行なう。

最終進入 着陸誘導等の位相であるが, 最終進入の段階に入った航空機は, 本研究では予測の対象外としている。

5.1.2 データの構成

予測に用いられるデータは 3.2 に準じた設定とするが, 内部表現は知識処理に適した構成となるよう変更を加える。ただし, 標準的な到着経路等, 管制官により内容の異なるデータも存在するため, これらは管制官(チーム)毎に用意することとなる。

また航空機データは図 5.2 のように, 型式・便名ごとに分類して管理し, 実際の予測過程では, 入力データ・予測データの別の管理も行なう。

5.1.3 進路予測ルールの構成

既に述べたように, ターミナル空域で航空機の位置予測が困難になる理由としては, 空域の複雑さもさることながら, 管制官の管制意図が人(管制チーム)によって異なることが挙げられる。すなわち, 同一の条件で航空機が進入してきても, 航空機に与えられる管制指示は異なる可能性があるのである。このような管制意図の相違に対処すべく, 進路予測に関する知識を警報システム本体から切り離し, 知識ベースの形で蓄えることとする。知識ベースを切替えることにより, 複数の管制官に対応した進路予測ができると考えられる。

ルールは, 実際の管制サイクルに従い, 入力データの処理, 評価, 管制指示の設定, 航空機の進路予測, のような構成とする。

入力データの処理 新たに発生した航空機の処理と, データの更新を行なう。

- 新たに発生した航空機に関しては, 既に管制下にある航空機と比較し, どの航空機の後に着陸させるかを決定する。
- 既に管制下にある航空機のデータの更新に際しては, 過去に入力されたデータと新たな入力データとの対応をとり, 古いデータは破棄する。

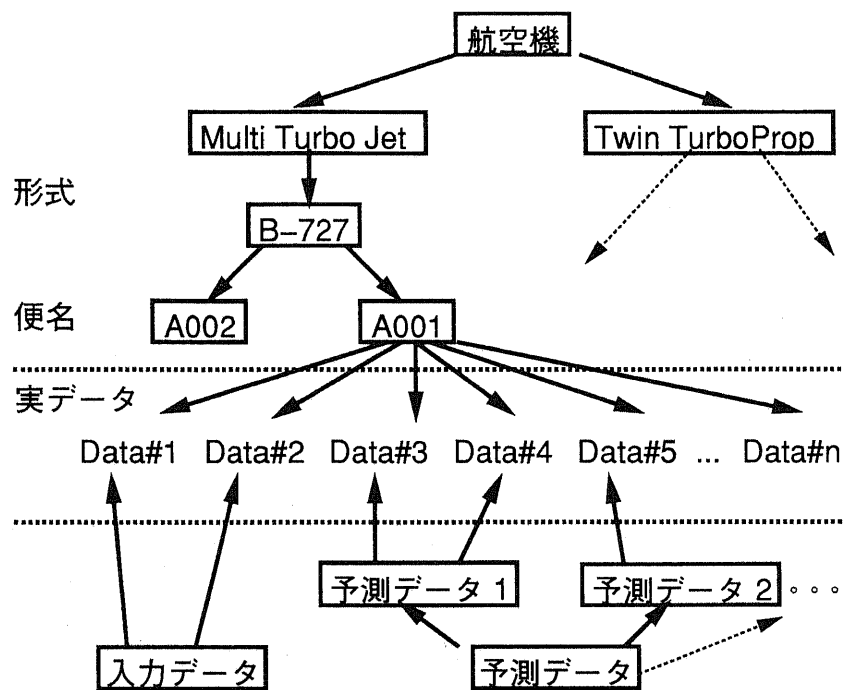


Figure 5.2: 航空機データの分類

評価 入力データと予測データの整合および、航空機の変則状態や航空機間隔の評価を行なう。

- 過去のデータから求めた予測(推定)結果と入力データとの間に大きな差異がある(位置が大きく異なる等)場合には警報を発生し、該当する予測データを破棄する。それ以外の場合には、該当する予測データの修正を行ない、入力データとの整合をとる。
- 入力データと飛行プロファイルとの比較を行ない、飛行プロファイルの範囲内に収まっていない場合には警報を発生する。
- 予測データに従って各航空機の将来位置を予測し、航空機間の異常接近の有無を判断する。

管制指示の設定 航空機の状態や航空機周辺の状況をもとにした、妥当な管制指示の設定を行なう。

- 航空機の進入経路が未定義の場合、航空機の現在位置や飛行計画をもとにして、その航空機の進入経路を仮定する。評価の段階で予測データが破棄された場合も、これに相当する。
- 航空機の進入経路が仮定されている場合、仮定された経路に沿った到着時刻および先行する航空機との時間間隔を計算する。先行する航空機との時間間隔が十分にあり、短絡経路をとっても管制間隔を維持できると判断される場合には短絡経路を選択する。また先行する航空機との時間間隔が不十分な場合には、迂回経路もしくはホールディングを選択し、管制間隔を得る。
- 以上の処理の中で複数の選択肢が得られた場合には、その中からもっとも妥当な選択肢を予測データとして残す。

航空機の進路予測 得られた管制指示をもとにした、予測時間後までの航空機の将来の進路の計算を行なう。

5.1.4 推論系の構成

推論系を大きく分けると、管理機構、推論機構、インタフェース、作業記憶に分けられる。

管理機構

管理機構は推論系全体を管理する部分で、他の構成要素間の調整や推論機構、インタフェース、知識・データ等の制御を行なう。

推論ネットワークの生成 推論機構が規則を生成できるようにするために、管理機構は入力された規則を推論ネットワークの形に変換し、作業記憶中に蓄える。

フレームの生成 与えられたシンボルにフレーム属性を与え、スロット定義のための枠組を作成する。

フレームの消去 与えられたフレームについての関係を全て解除した後、当該シンボルのフレーム属性を解除する。

規則間の衝突の処理 推論結果として、定義済みの属性スロットに異なる値を定義しようとした場合、新たな仮説を生成する。仮説の取捨選択の基準は規則として与える必要がある。

推論機構

推論機構は、推論および関連する手続きの処理を行なう。推論方法は規則にもとづいた前向き推論である。

作業記憶

作業記憶は、大きく分けると推論ネットワークと仮説(予測結果)とで構成される。推論ネットワークは推論機構によって利用され、推論結果に従って作業記憶中の仮説が書き換えられて行く。

インタフェース

インタフェースは入力データや推論状況等の他の系との受渡しを行なう部分である。

5.1.5 計算機上のシミュレーション

以上の構成により計算機上でシミュレーションを行なった。実行例を図5.3～図5.6に示す。各図において、上方の大きな窓が航空機の現在位置および将来の

予測位置を示している。各位置は空港を原点とした座標で示されており、原点に収束する形で描かれた連続した線分が到着経路を表している。経路上の三角形が個々の航空機を表しており、傍らに便名が表示してある。左上隅の窓には管制用のパラメータが表示されている。その下段に並んだ各窓は各航空機の到着経路を示す。選択肢が複数ある場合には、最大4つまで表示される。その下の窓は入力データおよび予測データの概略、異常接近情報、入力データ・予測データのID、各航空機の到着予想時刻等を示す。

図5.3には、到着航空機A002の現在位置(灰色)および180秒後の予測位置が表示されている。先行航空機がなく、最短経路での進入が予測されている。図5.4においては新たに到着した航空機A001の進入経路について2通りの選択肢が示されているところである。続く図5.5においては最短経路を選択しても管制間隔を保てるとして、A001の経路が選択されている。

図5.6には、警報の例が表示されている。このままでは“CONF”と表示された部分で航空機A003とA005が管制間隔を保てなくなることを表している。

5.2 知識処理を用いた管制指示の生成

従来の警報システムで航空機の進路予測を行なう場合、大抵は3分なり5分なりの短時間の将来位置を予測できれば事足りる。しかし、知識ベースが管制官の意図を十分に反映したものとなり、十分な精度で予測できるようになれば、これは、警報システムの枠組を越え、管制の自動化への第一歩となると考えられる。そのような観点から、航空機の管制移管の時点のデータをもとに、最終進入の段階に至るまでの飛行経路の予測について検討した。ここでは、予測時間に関係なく、最終進入の段階まで予測できるよう、知識ベースを手直した[3]。5.1.3に示した予測ルールとの相違は、

入力データの処理 入力データは、航空機の発生時点で1回のみ与える。したがって、一旦入力されたデータの更新は行なわない。

評価 入力データと予測データとの比較は行なわない。異常接近警報が発せられた場合には、管制指示の生成に失敗したものとみなされる。

管制指示の設定および航空機の進路予測 予測時間は無限大とし、滑走路に到着するまでの進路予測を行なう

実行例(予測位置)を図5.7～図5.11に示す。航空機の到着順序はA002, A003,

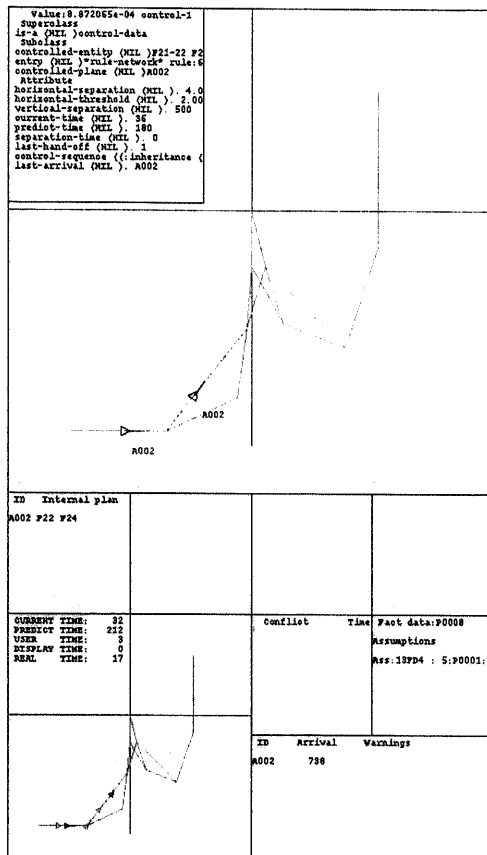


Figure 5.3: 知識処理を用いた航空機の進路予測: 1/4

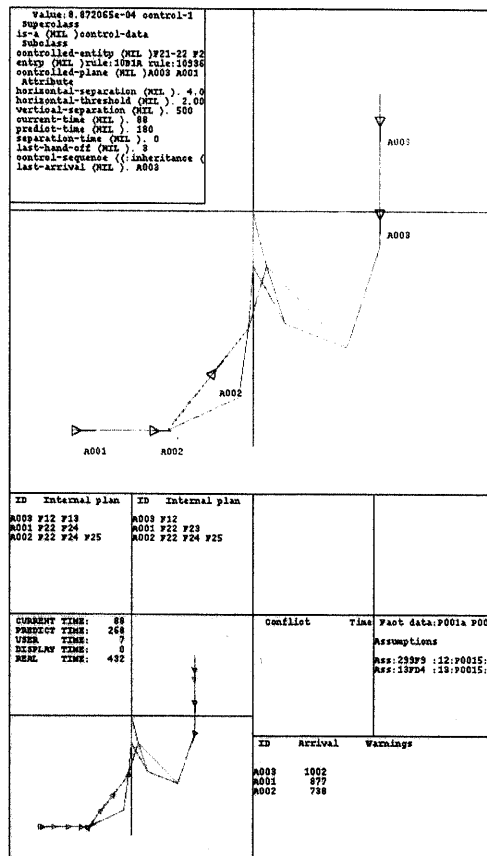


Figure 5.4: 知識処理を用いた航空機の進路予測: 2/4

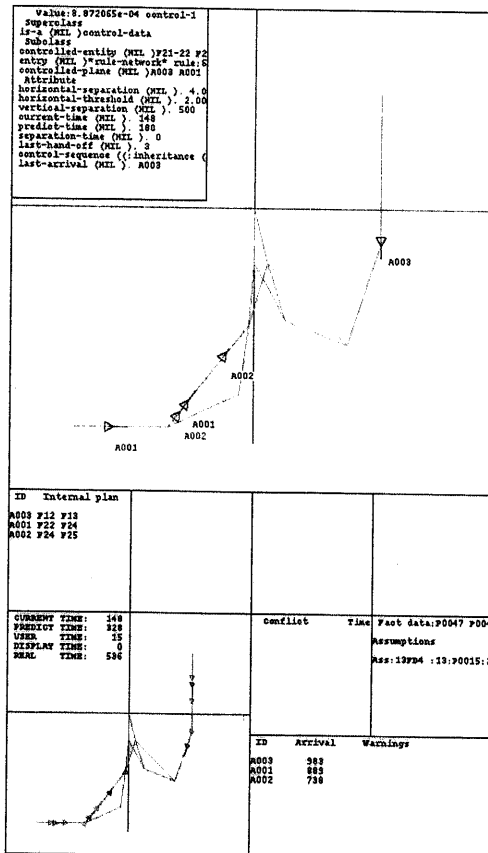


Figure 5.5: 知識処理を用いた航空機の進路予測: 3/4

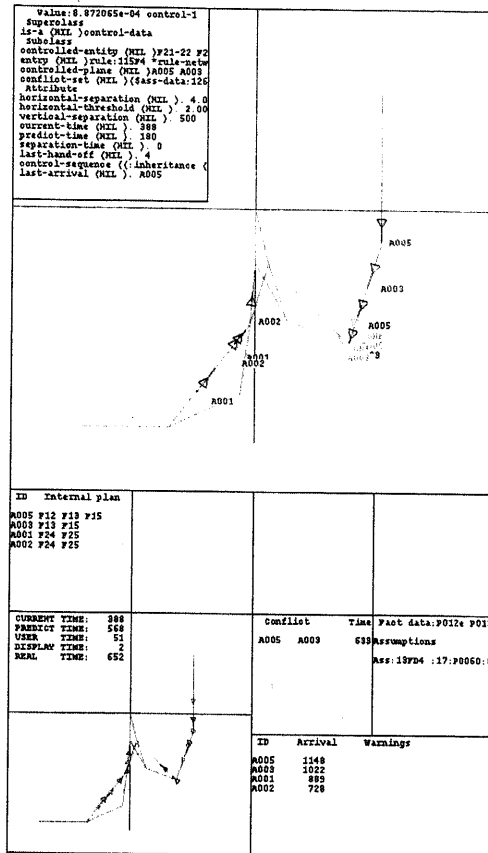


Figure 5.6: 知識処理を用いた航空機の進路予測: 4/4

A004, A005, A001 の順となっている。

図 5.7 においては、航空機 A002 は最短経路を通過して滑走路へ向かっている。図 5.8, 図 5.9 においては、後続の航空機 A004 は先行航空機との間隔をとるために大きく迂回経路を選択している。図 5.10 は A002 が着陸した後の各航空機の進入経路を示している。A005, A001 は各々選択しうる最も長い経路を経て進入することになるが、それでも先行航空機との間隔が保てず、図 5.11 に示すように、途中のフィックスでホールディングする結果となっている。図中の A005, A001 の傍らに付した“H”はホールディング状態にあることを示す。

このように、単純な空域のモデル上で、適切な間隔を保ちながら発生する航空機については、ほぼ問題なく着陸までの予測進路が生成できることが確かめられた。しかしながら、現実に則した複雑な空域のモデルを前提とすると、可能な進路の選択肢が急激に増加し、現在の計算機の性能では、処理速度・作業記憶の量などの制限に直面してしまうことも事実である。

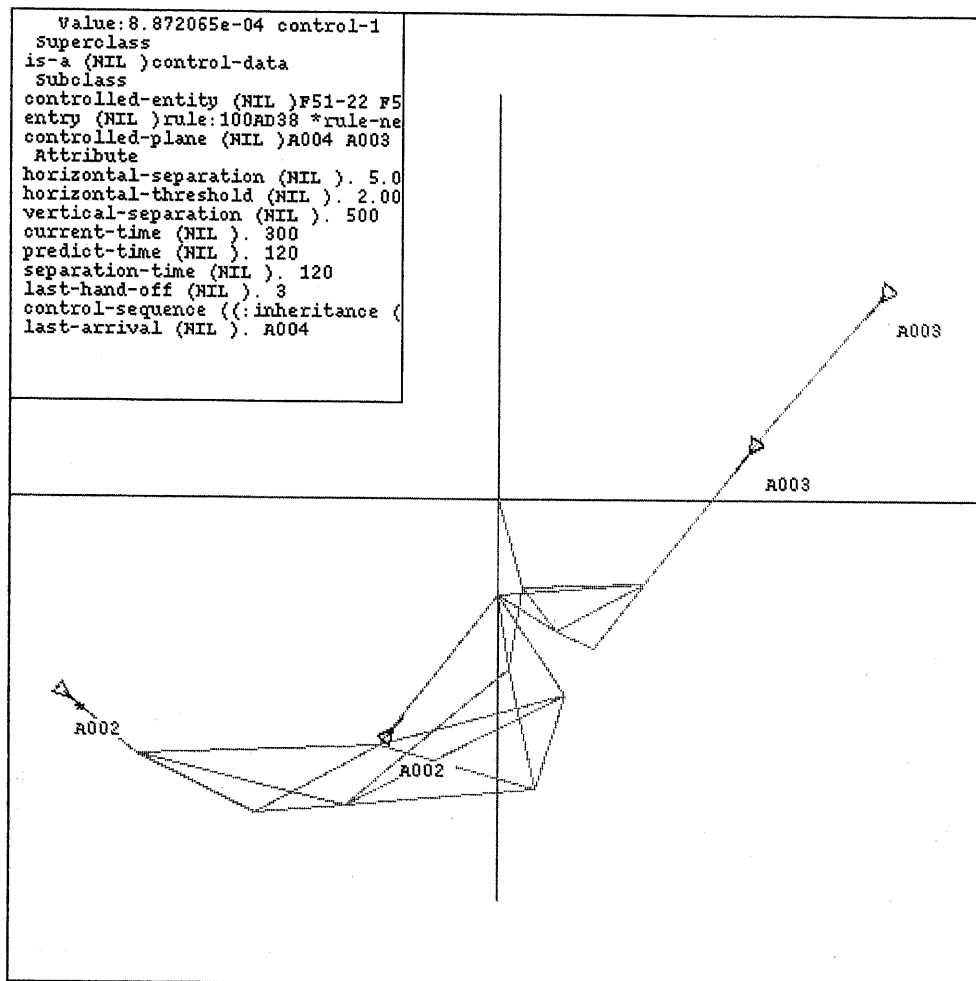


Figure 5.7: 管制指示の生成例: 1/5

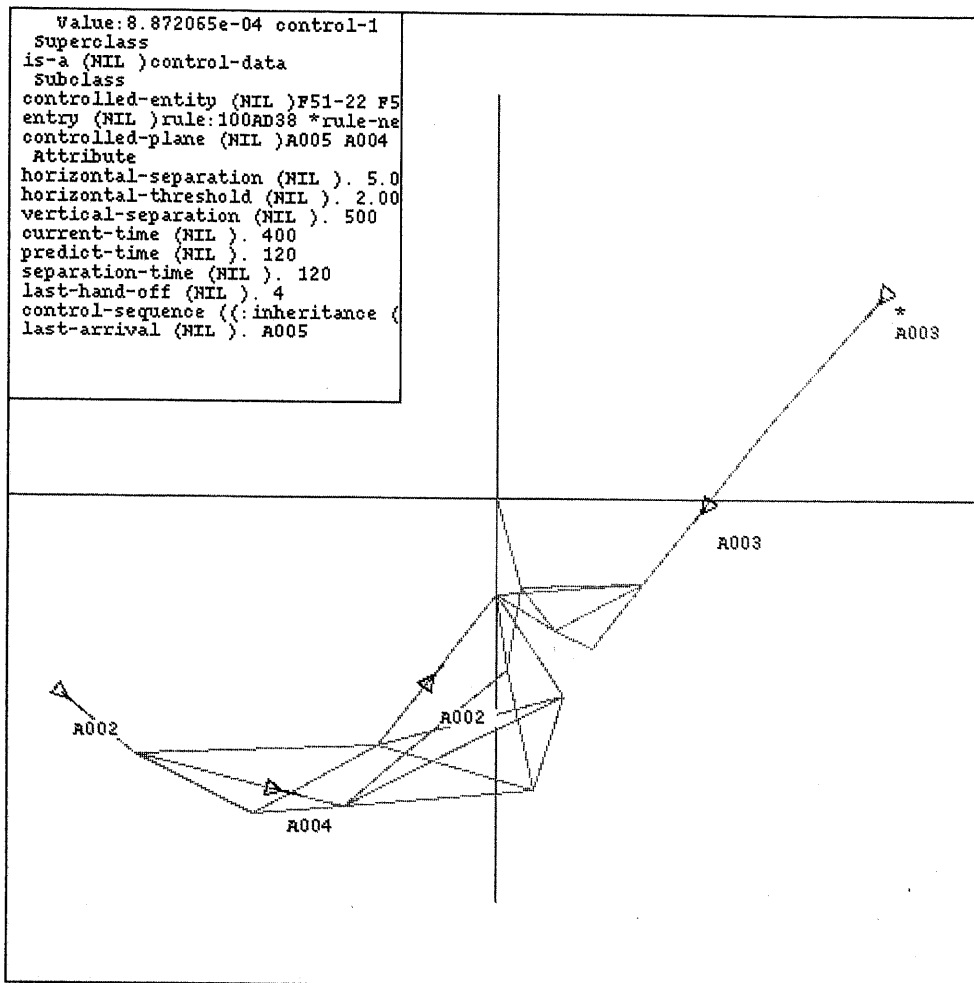


Figure 5.8: 管制指示の生成例: 2/5

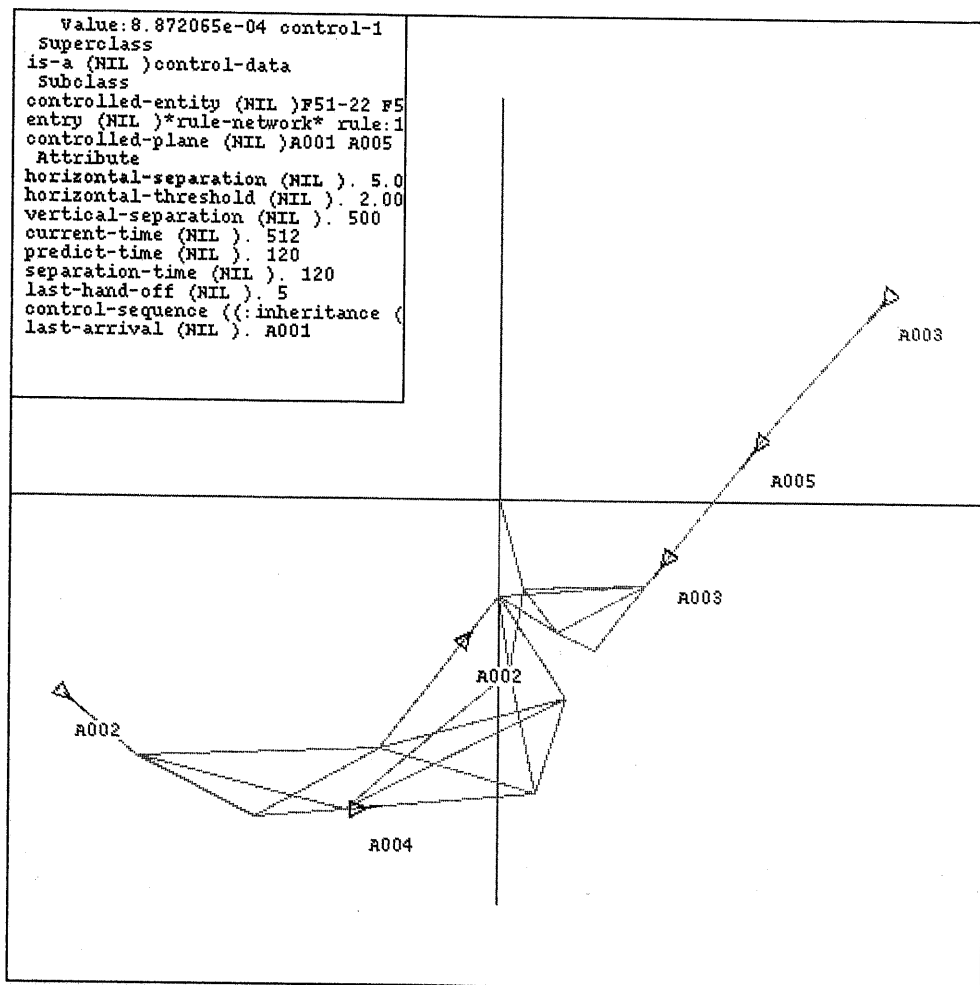


Figure 5.9: 管制指示の生成例: 3/5

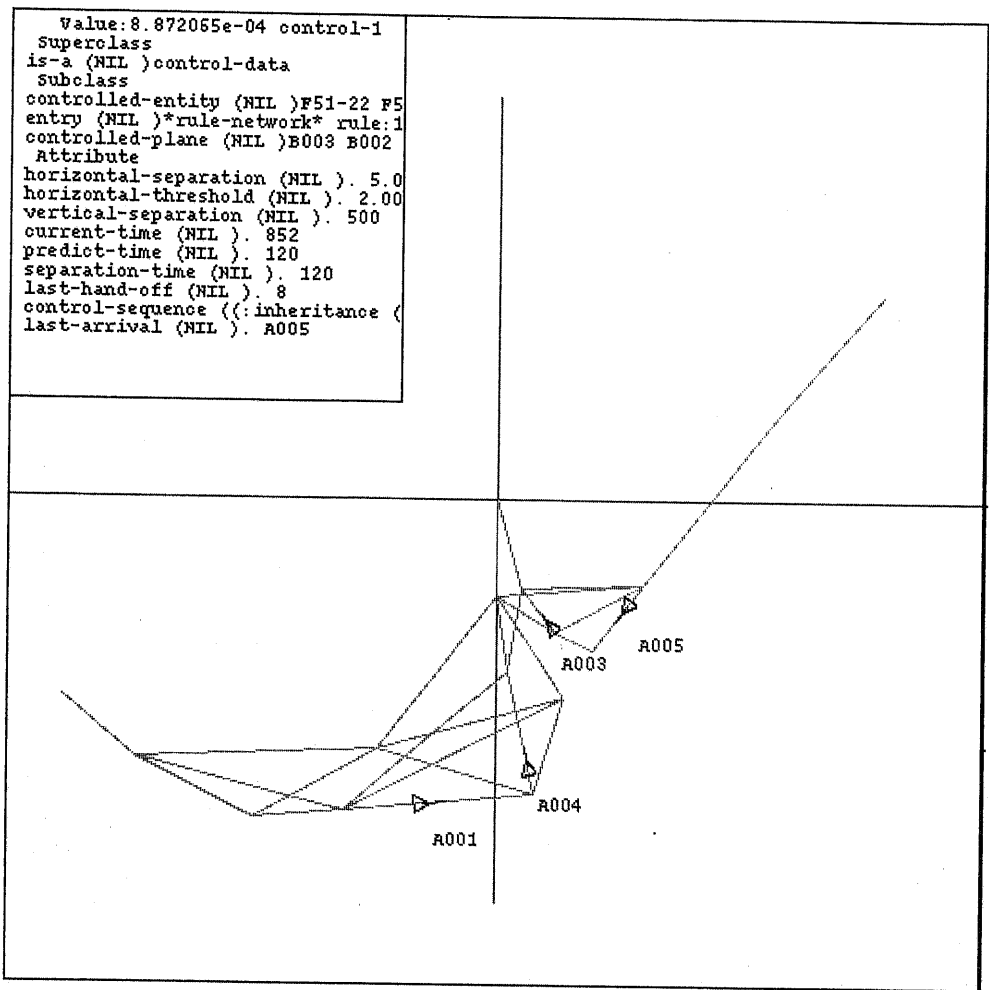


Figure 5.10: 管制指示の生成例: 4/5

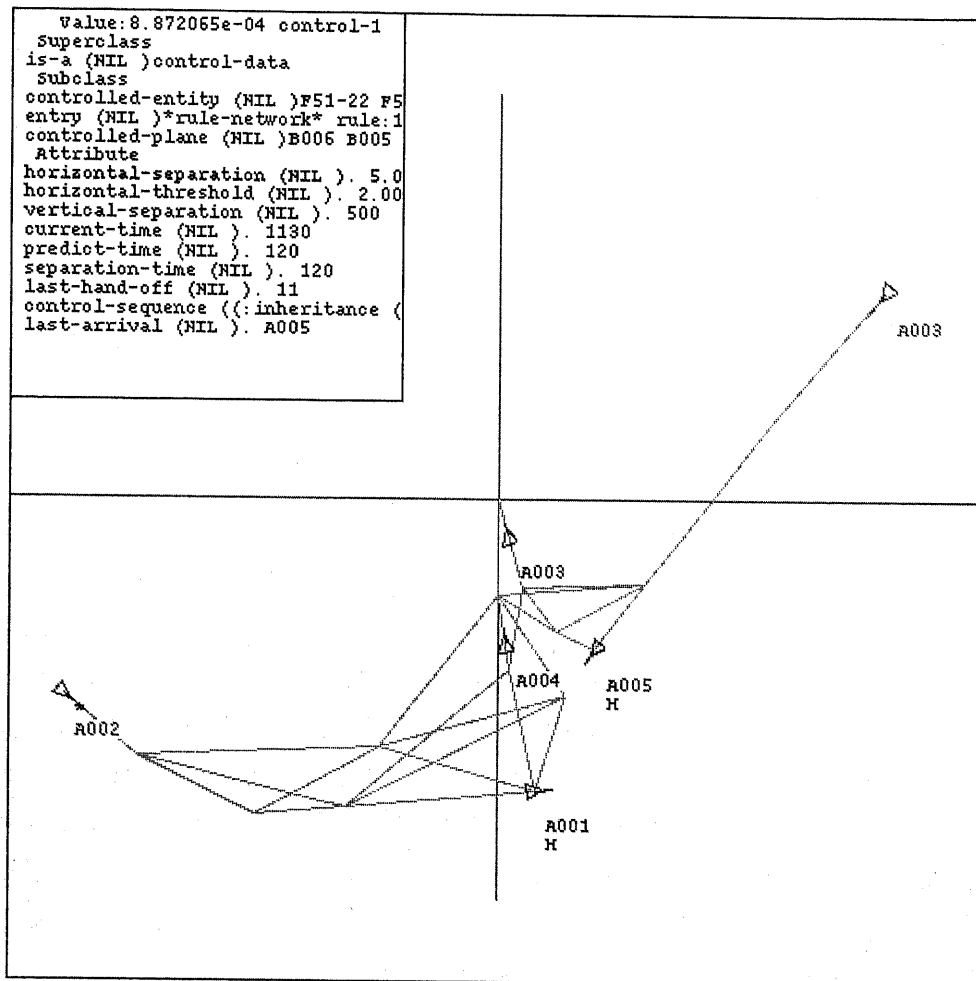


Figure 5.11: 管制指示の生成例: 5/5

Chapter 6

結論

管制情報処理システムの高度化に関して、航空路概念を用いた異常接近検出手法と、ポテンシャルを用いた衝突回避手法、知識処理を用いた管制手法について述べた。

航空路の概念を用いて航空機間の関係を把握することにより、異常接近の恐れの高い航空機から優先的に異常接近検出できるようになる。結果として、異常接近検出に要する処理量を低減できることが確認された。また、同データテーブルをもとにして航空機の進路変更を含めた位置予測を行うことにより、航空機の位置予測精度の向上を見込む事ができ、特に航空路の合流・分岐点などにおける不要警報の低減に効果があると考えられる。

航空機の衝突回避の条件を統一的に表現する手段としてポテンシャルの概念を導入し、ポテンシャル分布を用いた回避手法とポテンシャル勾配を用いた回避手法について述べた。いずれの手法においても、2機の航空機の回避パターンであれば現実的な時間内に解を得ることが可能となっている。現状では、水平面回避に限ればポテンシャル勾配を用いた手法が有効に機能しているが、高度方向への回避を含めると、ポテンシャル分布を用いた手法の方が有効に機能していると考えられる。また、ポテンシャル勾配を用いた手法では、初期状態における回避方向の選択を考慮に入れることにより、一層良好な回避パターンが得られるようになると考えられる。その他の課題としては、ドミノ現象、すなわち本来衝突の危険のなかった航空機が、他の航空機の回避動作の結果として衝突の危険に晒されるような現象の抑止等についても検討する必要があると考えられる。

ターミナル空域の航空機の進路予測に知識処理の手法を導入し、管制官の管制意図を考慮した航空機の進路予測について述べた。管制官の管制手法を規則と

して蓄えて用いることにより、単純なモデルにおいては、ほぼ実時間の航空機の進路予測が可能となる。また管制官の交替にも知識ベースの交換で対処することが可能となる。しかしながら、現実的なモデルに対応するためには、処理時間や記憶容量の面で改善の余地が残されている。またこの手法は、航空機の着陸時点までの安全な進路予測ができれば、将来的な管制指示の自動生成にも応用できるものである。

論文リスト

全国大会

- [1] 三浦, 渡邊, 水町: “ターミナル空域の管制警報システムについて,” 1991 信学春大, B-149, Mar. 1991.
- [2] 西村, 三浦, 森川, 渡邊, 水町: “飛行計画・航空路概念を用いた衝突危険警報システム,” 1992 信学秋大, B-118, Sep. 1992.
- [3] 三浦, 西村, 渡邊, 水町: “管制警報システムに関する検討 — 知識を用いた予測手法について —,” 1992 信学秋大, B-117, Sep. 1992.
- [4] 西村, 三浦, 森川, 渡邊, 水町: “飛行計画・航空路概念を用いた管制警報システム,” 1993 信学春大, B-161, Mar. 1993.
- [5] 三浦, 森川, 渡邊, 水町: “飛行計画・航空路概念を用いた管制警報システム — シミュレーションによる評価 —,” 1993 信学秋大, B-146, Sep. 1993.
- [6] 三浦, 森川, 渡邊, 水町: “管制警報システムにおける異常接近情報の取扱,” 1994 信学春大, B-176, Mar. 1994.
- [7] 三浦, 松本, 森川, 水町: “航空機の衝突回避 — ポテンシャルを用いた地上ベース回避手法 —,” 1994 信学秋大, B-153, Sep. 1994.

研究会

- [8] 三浦, 渡邊, 水町: “ターミナル管制警報システム,” 信学技報 SANE91-65, Feb. 1992.
- [9] 西村, 三浦, 森川, 渡邊, 水町: “地上ベース管制警報システム — 飛行計画・航空路概念の導入 —,” 信学技報 SANE92-111, Feb. 1993.

- [10] 三浦, 森川, 渡邊, 水町: “管制警報システムに関する検討 — 警報に付随する情報について —,” 信学技報 SANE93-82, Jan. 1994.
- [11] 三浦, 松本, 森川, 水町: “ポテンシャルの概念を用いた航空機の衝突回避手法 — 地上ベース水平回避手法 —,” 信学技報 SANE94-24, Jul. 1994.

論文誌

- [12] 三浦, 森川, 水町: “管制警報システムにおける管制用データベース,” 信学論 B-II (採録決定).
- [13] 三浦, 森川, 水町: “ポテンシャル勾配を用いた航空機の衝突回避手法 — 地上ベース水平回避手法 —,” 信学論 B-II (1995年5月号 採録予定).

Bibliography

- [1] J. Walsh and J. Wojciech: "TCAS in the 1990s", *Navigation*, **38**, 4, 383-397, 1992.
- [2] 東福寺 則保: "航空管制ダイナミックシミュレーションのためのターゲット制御法", *信学論 (B-II)*, **J76-B-II**, 1, 37-44, January, 1993.
- [3] J. A. Deckert: Integrating TCAS into the airspace management system, 1992 Position Location and Navigation Symposium, 218-222, 1992.
- [4] A. W. Merz: "Maximum miss aircraft collision avoidance", *Dynamics and Control*, Vol 1, no. 1, Mar. 1991, p25-34.
- [5] Heinrich Hemker: "Sicherheits-Abstand-Kollisionswarningsystem TCAS II hat Anfangsprobleme uebeswunden" ("An Internal of safety - The TCAS II collision warning system has overcome its initial problem"), *Flug Revue/Flugwelt International*, no.1, Jan. 1994, p54-58.
- [6] D. Kügler: "Die Konflikterkennung Belm Bordkollisionsschutzsystem ACAS II" ("Conflict recognition in the onboard collision protection system ACAS II"), *Zeitschrift Für Flugwissenschaften und Weltraumforschung*, vol. 17, no.4, Aug. 1993, p270-278.
- [7] Carl Schaefer: "Formal specification of the TCAS Protocol", in *AIAA Computing in Aerospace Conference*, 9th, San Diego, CA, Oct., 19-21, 1993, Technical papers, Pt. 1 , Washington, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993, p349-361.
- [8] R. L. Ford and D. L. Powell: "A new threat detection criterion for airborne collision avoidance systems", *Journal of Navigation*, vol.43, Sept.

1990 p.391-403.

- [9] "Horizontal plane trajectory optimization for threat avoidance and way-point rendezvous"
- [10] Patrik R. Williams: "Aircraft collision avoidance using statistical decision theory", in Sensors and sensor systems for guidance and navigation II; Proceedings of the Meeting, Orland, FL, Apr. 22-23, 1992, Bellingham, WA, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1992, p29-34.
- [11] Welsh Joseph: "TCAS in the 1990's", Navigation v38n4 winter 1991-1992 p383-397
- [12] Deckert, James A.: "Integrating TCAS into the airspace management system", Rec IEEE PLANS Position Location Navig. Symp. IEEE 1992 Position Location and Navigation Symposium — PLANS'92, Montrey, CA, USA, Mar. 24-27 1992, Publ. by IEEE USA 1992 p218-222.
- [13] Gray J. E. and Murray. W: "A derivation of an Analytic expression for the tracking index for the Alpha-Beta-Gamma filter", IEEE Trans. AES (VSA) 29[3] 1064-1065 ('93).
- [14] 鬼塚 武郎: "人工現実感を応用した運航完成方式の提案, ニアミス防止の手段として", 情報処理学会シンポジウム論文集 91[7] 173-180('91).
- [15] Koichi Kondo: "Motion planning with six degree of freedom by multi-strategic bidirectional heuristic free-space enumeration", IEEE Trans. on Robotics and Automation.

謝辞

本研究を通じて、終始有益かつ適切な御教示を賜った水町 守志 教授 に深く感謝致します。

また研究に際して数々の助言を頂いた 森川 博之 講師 ならびに研究活動を進めるにあたって数々の便宜を図って頂いた 渡邊 廣次 助手 に感謝致します。

本研究グループのメンバーであった卒論生の 福田 盛介 君, 元大学院生の 西村 秀隆 君, 元卒論生の 松本 裕司 君, 福岡 晃 君 には, 本論文作成に至るまで, 様々な面で協力を頂きました。ここに感謝致します。

その他水町・森川研究室の学生諸君をはじめとした多くの方々にも研究・生活両面から協力・助言を頂き、感謝の念に堪えません。

最後に、これまでの研究生生活を物心両面から支援してくれた、両親をはじめとする親族に深く感謝の意を表します。

平成6年12月20日