

1. 動態情報を用いる近接予測検出手法の評価

航空交通管理領域 ※瀬之口 敦、福田 豊

1. はじめに

航空機には、安全性の観点より、他の航空機との間に管制間隔を確保する必要がある^[1]。日本国内における水平方向の管制間隔は、RDP（Radar Data Processing System; 航空路レーダ情報処理システム）のデジタルモードによるレーダ管制の場合5 NMである（1 NM = 1,852 m）。垂直方向の管制間隔は、計器飛行方式の場合41,000 ft以下で1,000 ft、41,000 ft超で2,000 ftである（1 ft = 0.3048 m）。

航空機が他の航空機と接近し、水平方向および垂直方向の管制間隔どちらも確保できない状態をコンフリクトと呼ぶ。航空管制官は、航空機間に適切な間隔が設定されるよう、RDPの画面上に表示される航空機の位置や高度等を基に、航空機へ必要に応じた管制指示を発出する。

航空管制官が使用するRDPには航空機接近予測処理機能が備わっている^[2]。この機能は、航空機の位置や高度を含むレーダデータおよび追尾処理による水平方向の速度ベクトルや高度変化率を用いて、航空機の3分先までの位置や高度を予測する。3分先までのコンフリクトが予測検出された場合、コンフリクト警報を管制卓に表示させ、航空管制官に注意を促す。

航空機接近予測処理機能で用いられる直線予測手法は航空機の等速直線運動を仮定するため、航空機の位置や高度を予測する際、水平方向の速度ベクトルや高度変化率の推定誤差や変動による誤差が生じやすい。また、旋回から直進、上昇から水平といった飛行局面の変化を直線予測手法で予測するには限界がある。

現在、日本国内の航空路監視レーダにおいては従来方式のSSR（Secondary Surveillance Radar; 二次監視レーダ）の改良型であるモードSが順次導入されている。SSRモードSは、航空機の位置や高度を精度良く取得できるだけでなく、機上のFMS（Flight Management System; 飛行管理システム）が管理する対地速度、垂直速度、磁針路、選択高度等のフライトデータをGICB（Ground Initiated Comm-B; 地上喚起コムB）プ

ロトコルによりダウンリンクして取得する機能も併せ持つ^[3]。これら機上のフライトデータを地上側で利用することは、航空交通管理の向上に寄与するものと考えられている。先の航空機接近予測処理機能については、不要なコンフリクト警報が低減し、航空管制官の作業負荷の軽減に資するものと期待されている。

電子航法研究所では、これまでにフライトデータを用いたコンフリクト予測検出手法について検討し、水平方向と垂直方向の予測誤差の低減等を示した。また、予測誤差の低減がもたらすコンフリクト警報への効果について知見を得るために、警報発生状況についての解析を実施してきた^{[4]-[5]}。

本報告では、電子航法研究所で開発した航空機のフライトデータを用いるコンフリクト予測検出手法について、その特徴とコンフリクト警報への導入効果の検証例を示す。

2. コンフリクト警報

図1にコンフリクト警報の表示例を示す。三角形が航空機の位置を示し、コールサインや高度関連情報、型式、対地速度等を示すデータブロックが付いている。コンフリクト予測検出手法により将来的なコンフリクトが検出されると、対象航空機のデータブロック中に“CNF”が点灯し、コンフリクト警報のリスト（図1左上のリスト）も更新される。

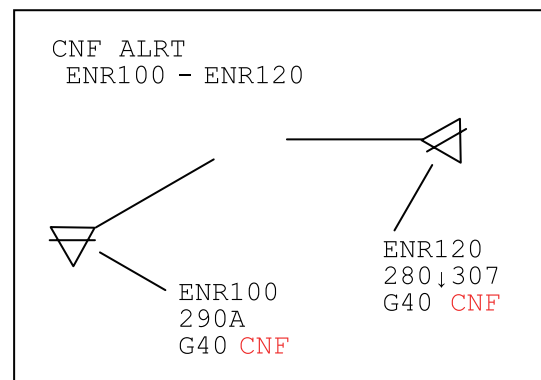


図1 コンフリクト警報の表示例

次に、コンフリクト予測検出手法について説明する。現状の検出手法は2種類あり、LP-CDM（Linear Prediction – Conflict Detection Method）およびFP-CDM（Flight Plan – Conflict Detection Method）とここでは呼ぶことにする。

2.1. LP-CDM

図2にLP-CDMの概念図を示す。

航空機*i*の位置を $\mathbf{x}_i(t)$ 、速度を $\mathbf{v}_i(t)$ とする。 t は時刻である。LP-CDMは航空機が等速直線運動で飛行すると仮定し、時刻 $t + \tau$ における航空機*i*の予測位置 $\mathbf{p}_i(t, \tau)$ を予測する。したがって、予測位置 $\mathbf{p}_i(t, \tau)$ は式(1)により求まる。

$$\mathbf{p}_i(t, \tau) = \mathbf{x}_i(t) + \tau \cdot \mathbf{v}_i(t) \quad (1)$$

予測時間 T_p を定義すると、コンフリクト予測検出機能は τ を $0 \leq \tau \leq T_p$ の範囲で変化させ、航空機*i*の予測位置 $\mathbf{p}_i(t, \tau) = (p_{xi}, p_{yi}, p_{zi})$ と航空機*j*の予測位置 $\mathbf{p}_j(t, \tau) = (p_{xj}, p_{yj}, p_{zj})$ の接近時刻を水平方向と垂直方向で別々に求めながら、式(2)および式(3)による検出間隔の判定を行う。もし式(2)と式(3)が同時に満足されれば、コンフリクトとみなす。 $R_{horizontal}$ および $R_{vertical}$ はそれぞれ水平方向と垂直方向のコンフリクトの検出間隔である。

$$\sqrt{(p_{xi} - p_{xj})^2 + (p_{yi} - p_{yj})^2} \leq R_{horizontal} \quad (2)$$

$$|p_{zi} - p_{zj}| \leq R_{vertical} \quad (3)$$

2.2. FP-CDM

図3にFP-CDMの概念図を示す。

LP-CDMと比較して、FP-CDMは飛行計画情報を利用する点異なる。飛行計画情報には航空機が飛行を予定している経路情報について、

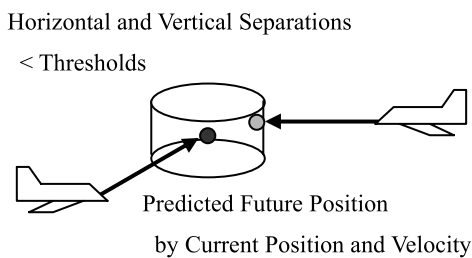


図2 LP-CDMの概念図

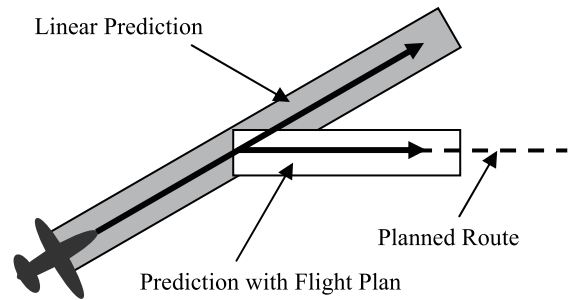


図3 FP-CDMの概念図

ウェイポイントを繋げた書式で記されている。FP-CDMは航空機が計画された経路を飛行しているかどうか判定し、経路上にあると判定すれば予測線分を計画された経路に沿って伸ばす。したがって、その際の予測線分はウェイポイントに従い折れ曲がる。経路上でないと判定した場合は、LP-CDMと全く同様である。

3. フライトデータを用いるコンフリクト予測検出手法

電子航法研究所で開発した航空機のフライトデータを用いるコンフリクト予測検出手法について、その特徴を従来のコンフリクト検出手法と比較しながら示す。

フライトデータを用いるコンフリクト予測検出手法が、従来のコンフリクト予測検出手法と異なる点は、航空機の予測線分を求める際の速度値および航空機の飛行状態の判定方法である。これらを表1にまとめる。

予測線分はLP-CDMにおける式(1)を用いて、FP-CDMと同様に飛行計画情報に応じて折れ曲がる。ただし、この際に用いる速度 $\mathbf{v}_i(t)$ は機上側の対地速度、トラック角変化率、垂直速度を用いる。これら3つの値に対しては、平滑処理を実行することもでき、予測に最適なパラメータを設定することも可能である。

航空機の飛行状態の判定について、水平方向では新規にロール角の絶対値を、垂直方向では指示高度の代わりに選択高度を用いている。ロール角はバンク角とも呼ばれ、機体を垂直状態から左右に傾けた際の角度である。選択高度は機上側の高度の制御目標である。

機上のフライトデータには、航空機の状態や意図が最新かつ正確に反映されていると考えら

**表 1 航空機のフライトデータを用いる予測
検出手法の特徴**

	従来手法	新規手法	備考
位置 $\mathbf{x}_i(t)$	レーダの測定値	レーダの測定値	変更なし
速度 $\mathbf{v}_i(t)$	レーダ位置からの推定値	機上で算出された対地速度, トラック角変化率, 垂直速度	航空機の状態が反映された値の使用&各値の平滑処理が可能
飛行状態の判定 (水平方向)	水平方向の速度ベクトルの絶対値	ロール角の絶対値	直線飛行 or 旋回飛行の判定
飛行状態の判定 (垂直方向)	飛行計画情報の指示高度	機上で入力された選択高度	予測線分における上昇/降下区間 or 巡航区間の判定

れる。そのため、水平方向の速度ベクトルや高度変化率の推定誤差や変動による誤差の減少が期待でき、また航空機の飛行状態をより早く、制御に応じた線分で予測することが可能である。

4. シミュレーションによる導入効果の検証

新規に開発した航空機のフライトデータを用いるコンフリクト予測検出手法について、計算機シミュレーションによりコンフリクト警報への導入効果を検証した。

シミュレーションにおける航空交通流は実運用のピーク時間帯の交通流を想定した。東京航空交通管制部のレーダ覆域における2時間分とし、取り扱い機数は575機である。そのうち、22機分のフライトデータが取得可能として、フライトデータを用いるコンフリクト予測検出手法と用いない場合の予測検出手法を同様の環境下で模擬した。

RDPにおけるスキャン更新間隔を参考に、航空機に関するレーダデータおよびフライトデータの各値は10秒毎の更新とした。コンフリクトの検出間隔もRDPのシステムパラメータを参考に決定した。水平方向の検出間隔 $R_{horizontal}$ は5

NM (1 NM = 1,852 m), 垂直方向の検出間隔 $R_{vertical}$ は41,000 ft (1 ft = 0.3048 m) 以下で700 ft, 41,000 ft 超で1,600 ft とした。

その結果、10ペアのコンフリクト予測検出について、フライトデータを用いる場合と用いない場合で変化があった。なお、この10ペア全て、片方がフライトデータの存在する航空機、もう一方は存在しない航空機の組み合わせであった。以下、その内の2例を示す。

4.1. 選択高度を用いる効果

選択高度による垂直方向の飛行状態の判定がコンフリクトの予測検出に変化を与えた例を図4および図5に示す。赤線および青線は航空機の高度である。赤線の航空機はフライトデータが存在し、その選択高度を黄緑線で示した。コンフリクトが予測検出された時間に対しては点を打った。図4が選択高度を用いない場合、図5が選択高度を用いた場合にあたる。

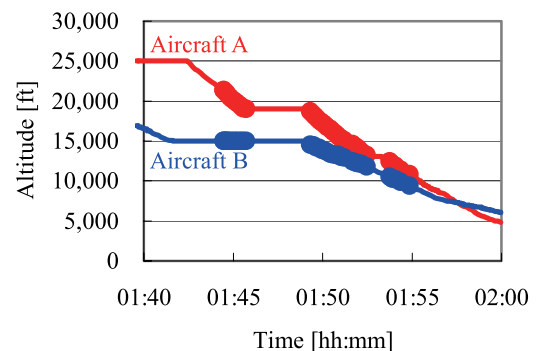


図 4 選択高度を用いない場合

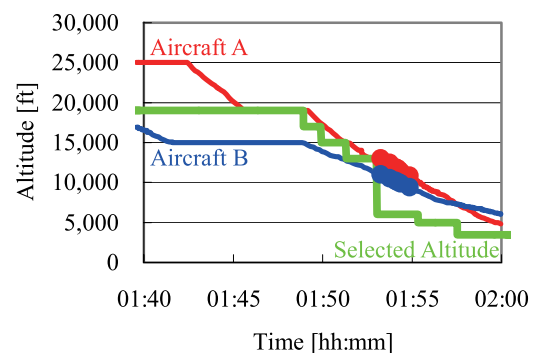


図 5 選択高度を用いた場合

図4, 図5より, フライトデータを用いる場合, すなわち選択高度により垂直方向の飛行状態を判定する場合には, 間隔が設定されていたと考えられる 01:45 や 01:50 付近の状況について, コンフリクトと予測検出しない。

選択高度は機上側の高度の制御目標として, 航空機の状態や意図を最新かつ正確に反映していると考えられるので, 地上側の管制指示との一致をとる等, 活用するのが望ましい。

4.2. ロール角を用いる可能性

ロール角による水平方向の飛行状態の判定がコンフリクトの予測検出に変化を与えた可能性のある例を図6に示す。システム座標平面に航空機の位置を赤線および青線で描写した。コンフリクトが予測検出された時間に対しては線上に10秒間隔の点を打った。中抜点はフライトデータを用いる場合, 中塗点は用いない場合である。また, 赤線の航空機はフライトデータが存在し, そのロール角を図7にあわせて示す。

図6, 図7より, フライトデータを用いる場合, すなわちロール角の絶対値により水平方向の飛行状態を判定する場合には, 1スキャン (= 10秒) 程度早くコンフリクトと予測検出した。

離陸後に上昇中の, 水平方向での相対位置が離れていく本状況は, 警報の発出そのものが不要である可能性が高い。上昇区間の高度変化率や旋回飛行における水平方向の速度ベクトルを平滑処理し, 予測に最適なパラメータを設定することにより, コンフリクトの予測検出をさらに改善できる可能性がある。

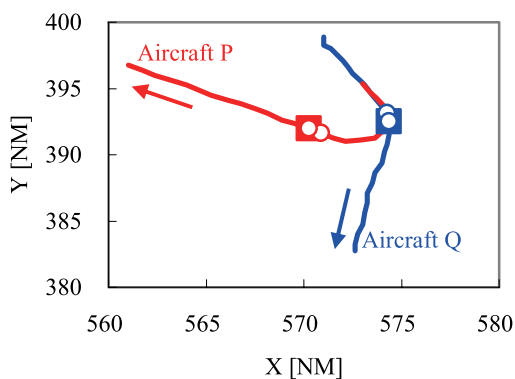


図6 コンフリクトの予測検出例

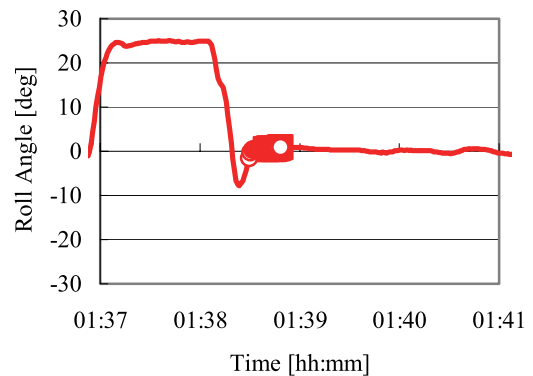


図7 ロール角

5. まとめ

電子航法研究所で開発した航空機のフライトデータを用いるコンフリクト予測検出手法について, その特徴とコンフリクト警報への導入効果の検証例を示した。フライトデータを用いるコンフリクト予測検出手法は, 航空機の予測線分を求める際の実速度値および航空機の飛行状態の判定方法に特徴がある。計算機シミュレーションにより検証した導入効果の例として, 選択高度による垂直方向の飛行状態の判定について, その効果を示した。

謝辞

本研究にご協力いただいた国土交通省航空局をはじめとする関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] “航空管制入門”, 財団法人航空交通管制協会 発行, 1999.
- [2] “RDP システム概論”, NTTデータ通信株式会社 編集, 財団法人航空振興財団 発行, 1997.
- [3] “<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/12/121112/01.pdf>”.
- [4] 福田, “管制卓のコンフリクト警報機能”, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 56, No. 650, pp. 82-85, Mar. 2008.
- [5] 瀬之口, 福田, “航空機の動態情報を利用するコンフリクト検出手法の研究開発動向”, 日本航海学会 2008 年度秋季研究会プログラム, http://www.ne.jp/asahi/aerospace/workspace/presentation/200810_Conflict.pdf, Oct. 2008.