

3. ターミナル空域での衝突危険度推定ソフトウェア

航空交通管理領域*藤田 雅人

1 導入

航空路の経路間隔や管制間隔を設定する際は、潜在的な危険因子（ハザード）を洗い出す必要がある。その後、衝突危険度を推定し、経路間隔や管制間隔の短縮により増大する危険度が許容範囲内にあるかを確認されることが多い。危険因子を洗い出す作業（ハザード同定）は安全管理上、不可欠な作業であるが、本稿では論じない。参考文献[1],[2]を参照されたい。

JASMA (Japan Airspace Safety Monitoring Agency)^[3]は福岡飛行情報区における PBN (Performance-based Navigation) 運航・RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum) 運航の安全性を監視する監視機関^{[4],[5]}であり、定期的に衝突危険度を算出している。

空域の衝突危険度を算出するモデルを衝突危険度モデルと言い、Reich モデル^{[6],[7],[8]}・Hsu モデル^{[9],[10]}・Rice モデル^[11]が知られている。Reich モデルは定常状態（誤差の分布が時間に依存しない状態）の衝突危険度を算出するためのモデル式であり、現在の PBN 運航・RVSM 運航の安全監視のための衝突危険度推定に用いられている。洋上空域やエンルート空域と異なり、ターミナル空域においては Reich モデルが採用している定常状態の仮定が成立しないことが多い。Hsu モデル・Rice モデルでは非定常状態の衝突危険度推定が可能である。我々は、ターミナル空域において、新方式導入前に Rice モデルを用いて、大雑把な衝突危険度推定を行えるよう、ソフトウェアの開発を行っている。本稿では、Rice モデルの基本的な考え方と当該ソフトウェアの開発状況を紹介する。

2 Rice 衝突危険度モデル

2機の航空機は体積を持つ。この体積が物理的に重なったとき、航空機は衝突する。航空機の相対運動を考えることにより、1機は静止していると考えてよい。また、航空機の形を直方

体や円筒形などの単純な立体図形で近似すると、航空機が衝突する頻度は、衝突体積と呼ばれる静止立体図形（図1参照）に質点が衝突する頻度と同一であることが分かる。

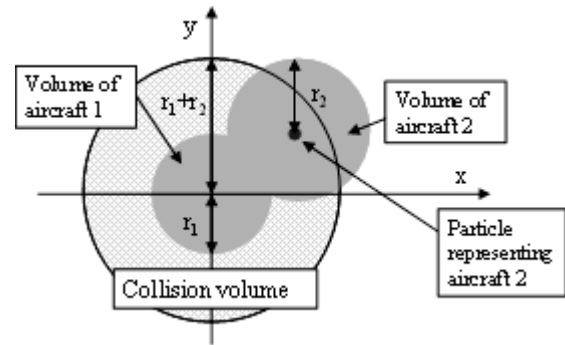


図1：衝突体積

各時刻での航空機の相対位置と相対速度の確率分布が与えられていれば、与えられ時間内に静止立体図形と衝突する質点の数の期待値を求めることが出来る。参考文献[11]では、衝突する質点数の期待値が非常に小さいという仮定の下、これを求める近似式を導出している。Rice モデルでは危険曝露率 (Risk exposure) 関数の時間積分が衝突する質点の数の期待値と一致する。

$$\Pr\{\text{collision during } [t_0, t_1]\} = \int_{t_0}^{t_1} \Psi(u) du \quad (1)$$

$$\Psi(u) = \iiint_{\partial\Omega} \iiint_{\mathbb{R}^3} f_t(X, V) (\vec{n} \cdot \vec{V})^+ dV dX \quad (2)$$

式(2)は危険曝露率関数の計算方法を示している。 $f_t(X, V)$ は、時刻 t での相対位置・相対速度分布の確率密度関数である。 Ω は衝突体積を表し、 $\partial\Omega$ はその境界を表す。 $\vec{n} \cdot \vec{V}$ は境界面上の内

向き法線ベクトルと速度の内積であり、 $(\vec{n} \cdot \vec{V})^+$ は $\vec{n} \cdot \vec{V}$ が正の値の時は $\vec{n} \cdot \vec{V}$ となり、それ以外の時は、0となる。

式(2)の記述は一般的で、ソフトウェアに実装するのは非常に難しい。しかし、「航空機の水平方向・鉛直方向の位置誤差・速度誤差は独立である」等の新たな仮定を導入すると、式(2)は比較的、計算しやすい式に変形することができる。本稿で紹介するソフトウェアには変形された式が実装されている。

3 平均衝突危険度

Rice モデルでは、固定された二機の航空機ペアの衝突危険度を計算している。しかしながら、方式設計では、独立に運用される飛行方式の間隔が安全か否かを判別する必要がある場合もある。飛行方式に従って飛行する航空機は交通流を作る。図2上下に示されたような、2本の交通流（実線矢印）を考えてみる。丸印は、管制官が見ているある航空機（2機）の位置である。同一番号は同一時刻の位置であることを示している。破線は（管制官から見た）航空機間の間隔である。上の図とは、下の図より航空機間の間隔が狭いため、他の条件が変わらなければ、上の図の航空機ペアの方が下の図の航空機ペアより衝突の危険性が高いと想定される。

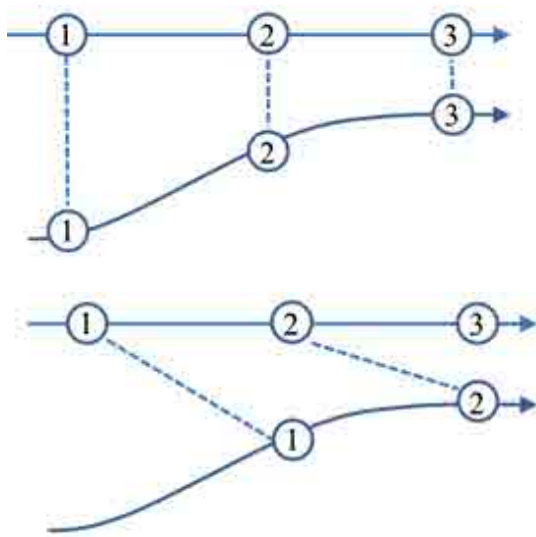


図2：独立な交通流と見た目の管制間隔

独立に運用されている限り、上図の状況が発

生する確率と下図の状況が発生する確率は同一である。航空機の運航が、上図で行われていると仮定して、既存の Rice モデルにより衝突危険度を計算すると、衝突危険度の過大評価となる恐れがある。また、下図の状況を仮定すると衝突危険度の過小評価になる恐れがある。上図の状況の発生確率と下図の状況の発生確率は同一であることを考慮すると、平均衝突危険度を計算するのが妥当であろう。

F_1 と F_2 を異なる運用方式に従う航空機が作る独立な交通流とする。 n_1 と n_2 (機/時間)を F_1 と F_2 の流量とする。 T_1 と T_2 は各交通流に含まれる航空機が方式に則って飛行する際の飛行時間である。 F_1 の方式で飛行する航空機が、方式に則った飛行を開始してから t 時間後の航空機の位置と速度の分布を表す確率密度関数を $f_1(t, X, V)$ とする。(t が時刻ではなく、方式に則った飛行を開始してからの経過時間であることが文献[11]の Rice モデルと異なる。) $f_2(t, X, V)$ も同様に定義する。このとき、1時間あたりの衝突事故件数の期待値は以下の式で表される。

$$n_1 n_2 \int_0^T \int_0^T \Psi(s, t) dt ds \tag{3}$$

ここでも、 $\Psi(s, t)$ を危険曝露率関数と呼び、以下の式で定義する。

$$\Psi(s, t) = \iiint_{\partial\Omega} \iiint_{\mathbb{R}^3} f(s, t, X, V) (\vec{n} \cdot \vec{V})^+ dV dX \tag{4}$$

$$f(s, t, X, V) = \int_{\mathbb{R}^3} \int_{\mathbb{R}^3} f_1(s, X + \zeta, V + \eta) f_2(t, \zeta, \eta) d\zeta d\eta \tag{5}$$

ここで計算している値は、[4], [5]のように「1飛行時間あたりの衝突事故件数の期待値」ではなく、「1時間あたりの衝突事故件数の期待値」である。任意の時刻での平均飛行機体数は $n_1 T_1 + n_2 T_2$ 機であるため、式(3)で計算した「1時間あたりの衝突事故件数の期待値」を「1飛行時間あたり」に変換するには、式(3)の計算値を $n_1 T_1 + n_2 T_2$ で割ればよい。

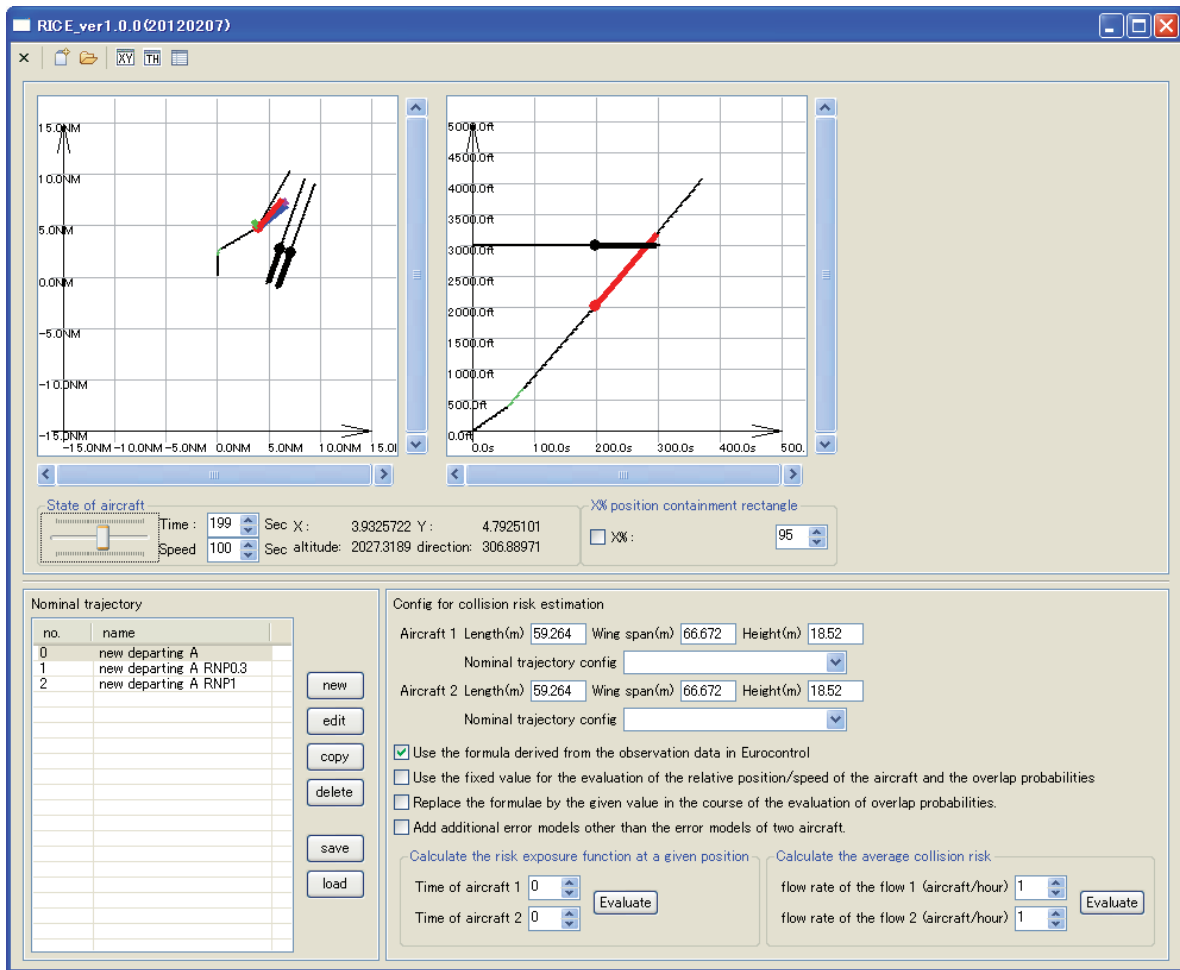


図3 RICEソフトウェア外観

4 RICEソフトウェア

ターミナル空域における衝突危険度推定ソフトウェア RICE の操作画面を図3に示す。

当該ソフトウェアでは、誤差を無視した航空機の予定トラジェクトリと誤差分布の情報を入力する。

航空機のトラジェクトリの定義では、速度 (IAS, TAS, GS) や上昇率・旋回角・風向・風速を入力する。これらの入力値から軌跡の生成を行う際は、航空機を体積のない質点と考える。このような単純な予定トラジェクトリを組み合わせ、予定トラジェクトリモデルを構築する。

誤差分布に関する情報の入力に際しては、風速・ヘディング・航法精度に関する簡易な誤差モデルを選択することが出来る。これらの誤差は、正規分布ないし両側指数分布に従うと仮定されている。

航法精度に関するモデルでは、RNAV-X, RNP-X, VOR 誤差モデルが提供されている。RNAV-X, RNP-X の誤差モデルに関しては、参考文献[13]に記載されているモデルを採用した。

5 ソフトウェアの検証

RICE ソフトウェアの構築に際しては、過去のソフトウェア資源を流用せずにソフトウェアを構築し、RICE ソフトウェアの出力結果と過去の衝突危険度推定値が一致するかどうかでソフトウェアの出力する値の妥当性を検証することとした。検証に用いるシナリオには文献[14]のものを採用した。

文献[14]では図4に示したシナリオでの平均衝突危険度を求めた。VOR機が地点Aから離陸し、二度の旋回を行った後、地点FにあるVOR上空を越えていく。一方、RNP機は地点

Iから地点Jまでを等高度で飛行する。

RICE ソフトウェアでは、文献[14]より複雑な運動モデルを採用しており、同一の計算結果を望むことは出来ない。(RICE ソフトウェアでは旋回半径に関してより現実的な仮定が採用されている。) しかしながら、表 1 にあるように RICE ソフトウェアの計算結果と文献[14]の結果は概ね大きな乖離がないことが分かった。さらに検証を進めるためには、他のシナリオでの RICE ソフトウェア以外の計算結果との比較も必要となる。

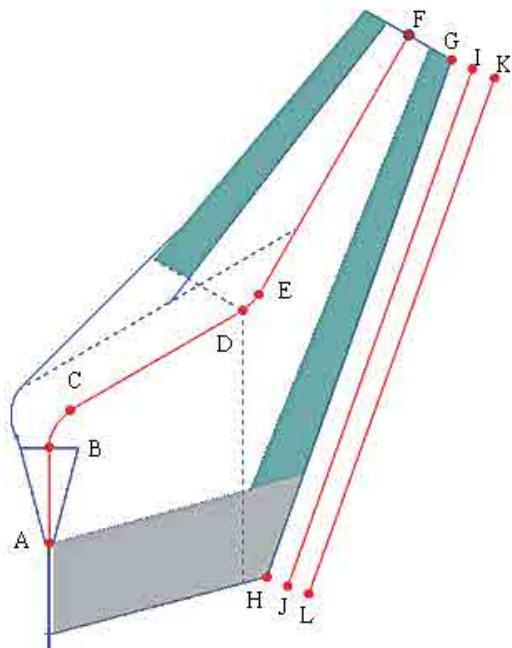


図 4 文献[14]のシナリオ

Category	Cat. A	Cat. A	Cat. C	Cat. C
RNP-type	RNP 0.3	RNP 1	RNP 0.3	RNP 1
衝突危険度 ([14])	6.28×10^{-9}	8.18×10^{-10}	1.96×10^{-6}	2.27×10^{-7}
衝突危険度(RICE)	6.50×10^{-9}	9.38×10^{-10}	9.08×10^{-7}	6.98×10^{-8}

表 1 文献[14]のシナリオでの衝突危険度計算結果

6 まとめ

本稿では衝突危険度推定式の一つである Rice モデルを紹介した。そして、独立に運用される方式が作る 2 つの交通流の平均衝突危険度が計算できるように Rice モデルを変形した。

上記の変形モデルをソフトウェアとして実装した。ソフトウェアの妥当性検証のため、過去に衝突危険度推定を実施したシナリオで、新たに当該ソフトウェアを用いて、衝突危険度推定を行った。その結果、両者の計算値が大きく異なることが確認できた。

当該ソフトウェアを実運用に耐えるものとするためには、計算の更なる高速化や運動モデル・誤差モデルの追加、他のシナリオでの計算結果の検証などを行う必要がある。

参考文献

- [1] 藤田雅人, 天井治, 森亮太, 「定性的空域安全性評価手法について」, 電子航法研究所第 10 回 (平成 22 年度) 研究発表会, pp.87-94.
- [2] FAA/EUROCONTROL ATM Safety Techniques and Toolbox
http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2007/023_Safety_techniques_and_toolbox.pdf, 2nd ed. (2007)
- [3] JASMA, <http://www.jasma.jp/index.html>
- [4] ICAO: “Manual of Operating Procedures and Practices for Regional Monitoring Agencies in relation to the use of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum above FL 290”, Doc 9937/AN 474, 2004.
- [5] ICAO: “Asia-Pacific Region En-route Monitoring Agency (EMA) Handbook”, ver. 2, 2010.
- [6] P. G. Reich, “Analysis of long range air traffic systems-separationstandards – I”, Journal of navigation, vol.19, no.1, pp.88–98, 1966.
- [7] P. G. Reich, “Analysis of long range air traffic systems-separationstandards – II”, Journal of navigation, vol.19, no.2, pp.169–186, 1966.
- [8] P. G. Reich, “Analysis of long range air traffic systems-separationstandards – III”, Journal of navigation, vol.19, no.3, pp.331–347, 1966.
- [9] D. Anderson and X. G. Lin, “A collision risk model for a crossingtrack separation methodology”, Journal of navigation, vol.49, pp.337–349, 1996.
- [10] D. A. Hsu, “The evaluation of aircraft collision probabilities at intersecting routes”, Journal of navigation, vol.34, no.1, pp.78–102, 1981.
- [11] K. Mehadhebi and P. Lezard, “Application of the Rice formula to the design of stationary and non-stationary collision risk models”, NT03-1028, Centre d’Etudes de la Navigation Aérienne, 2003.
- [12] M. Fujita, “Convolutions of Gaussian distributions and double exponential distributions”, ICAO SASP/WG/WHL/18-IP/2, Brussels, 8-19 November, 2010.
- [13] “Report of the Mathematicians Sub Group meeting at the SASP WG/WHL/8 meeting”, ICAO SASP/WG/WHL/8, Rio de Janeiro, 7-18 November 2005.
- [14] M. Fujita, “Average collision risk for OR 26”, ICAO SASP/WG/WHL/17-WP/18, Montreal, 10-21 May, 2010.