

## 9. 中期コンフリクト検出技術の高度化に関する考察

航空交通管理領域 ※瀬之口 敦, 平林 博子, 白川 昌之

### 1 まえがき

我が国の将来の航空交通システムに関する長期ビジョン CARATS[1] では、運航中のリアルタイムな軌道修正に関する施策が挙げられている。それによれば、航空交通量の増大に対応するため、飛行中における時間管理を導入するとともに、中期の航空機のコンフリクト検出・解決支援およびデータリンクによるリアルタイムな必要最小限の軌道修正を実現することが求められている。

本稿では、20 分程度先までの航空機の飛行軌道を予測して潜在的なコンフリクトを検出する中期コンフリクト検出 (MTCD ; Medium-term Conflict Detection) 技術について、データリンクを活用した高度化に関する考察結果を報告する。

### 2 中期コンフリクト検出 (MTCD) 技術

初めに、MTCD の概要および技術的課題について述べる。

#### 2.1 MTCD の概要[2]

航空機に対して確保すべき一定間隔が満たされていない状態をコンフリクトと呼ぶ。2~3 分先までの間に 2 機間の距離が安全間隔 (管制間隔) を割り込むと予測されることを短期コンフリクトと呼ぶのに対し、中期コンフリクトとは 20 分程度先までの時間内に起こり得る潜在的なコンフリクトを指す。そのため、短期コンフリクト警報 (STCA ; Short-term Conflict Alert) 機能が航空管制におけるセーフティネットとしてシステム実装されている一方、MTCD は管制官による間隔付け業務を支援するための機能と考えられている。

図 1 は ICAO ATMRPP の WP 資料[3] から引用したものである。ATM の各機能が横軸の見通し時間および縦軸の予測精度の粒度と信頼性に依りて示されており、それら機能が階層的な

ことを表している。STCA は「Safety Nets」、MTCD は「Tactical Planning」寄りであるが、見通し時間との対応から両者とも「Executive Control」に属する。そのため、必要とされる予測精度は両者とも高く、同程度のものが求められているとわかる。

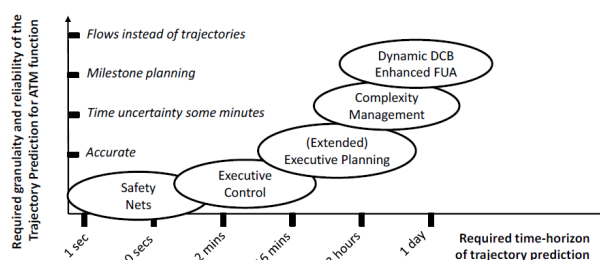


図 1 ATM 機能と必要とされる予測精度[3]

#### 2.2 MTCD の技術的課題[2]

飛行の計画段階から航空機の 4 次元軌道を取り扱う軌道ベース運用 (TBO ; Trajectory-based Operation) においては、MTCD のように、解決すべき予測されたコンフリクトの発生時点からかなり前の、解決までに時間的な余裕のある早い段階の航空管制を支援する機能が重要である。そのため、MTCD は飛行中の航空機対だけでなく、計画段階の航空機とのコンフリクトや不可侵空域への侵入なども検出対象としている。

MTCD が有効に機能するためには、技術の核となる軌道予測の精度向上や受容できる潜在的なコンフリクトの検出数、管制官への情報提供方法の検討などが必要とされている。

### 3 軌道予測精度と中期コンフリクト検出数の分析

先に述べた MTCD の技術的課題の内、潜在的なコンフリクトの検出数は検出間隔などによって変化するため、軌道予測精度と中期コンフリクト検出数の関係を分析した。

### 3.1 中期的な軌道予測の特性[4]

まず、現状を把握するために、レーダデータ（実航跡）と飛行計画情報を用いて 8 分先および 20 分先までの軌道を予測し、実航跡との差を計算することで予測誤差を求めた。

ここでの中期的な軌道予測の概要は次のとおりである。①実航跡を平滑化補間して 1 便毎に時間と位置の 4 次元連続関数を求める。②連続関数から対地速度を求め、8 分先および 20 分先の位置を予測するために用いる。また、③飛行計画情報から飛行経路を抽出し、予測した各フィックスの通過時刻をもとにした 4 次元軌道を生成する。

表 1 に、飛行経路に沿った方向（along-track）および飛行経路に直交する方向（cross-track）に分解した予測誤差を示す。20 分先の予測誤差は 8 分先の予測誤差に比べて当然ながら大きい。また、どちらの場合でも cross-track の予測誤差がそれなりに生じている。これは実際の飛行経路が飛行計画情報からズレていることを示唆するものと考えられる。

表 1 8 分先および 20 分先の予測誤差

	8 分先		20 分先	
	along-track	cross-track	along-track	cross-track
平均	-1.15 NM	-0.03 NM	-2.23 NM	-0.31 NM
標準偏差	5.76 NM	4.71 NM	12.74 NM	8.73 NM

そこで、予測軌道の各時点において航空機がフィックスへ直行しているかどうかを計算したものを表 2 に示す。「直行」は特定のフィックスに 0.05 rad 以内で向かう場合、「通過」は特定のフィックスを 5 NM 以内で通過する場合、「他」は「直行」および「通過」以外として予測軌道の飛行状態を分類した。「標本数」は予測軌道の計算時点毎の総数を指す。「直行」が大部分を占めているため、中期的な軌道予測においては直行先などの将来の飛行経路を正確に把握し、予測に活用できることが重要と考えられる。

表 2 飛行状態の分類

	直行	通過	他	合計
標本数	493,522	121,332	52,868	667,722
割合	73.9 %	18.2 %	7.9 %	100.0 %

### 3.2 予測誤差、検出間隔とコンフリクト検出指数の関係

3.1 節の結果をもとに、予測誤差と検出間隔、コンフリクト検出指数の関係を分析した。

ここでは飛行経路に沿った方向の 1 次元で考えることにより、問題を単純化した。また、絶対値のコンフリクト検出数ではなくコンフリクト検出指数を用いることで、問題を相対的に捉えることとした。すなわち、コンフリクト検出指数が大きければコンフリクト検出数も大きくなる関係があるので、大小比較に着目するための指標としてコンフリクト検出指数を用いた。

予測誤差を  $\sigma$  NM とし、2 機間の距離が  $x$  NM であるときにコンフリクトとして検出する確率  $P(x)$  を、相補誤差関数  $\text{erfc}(x)$  を用いて式 (1) のように定義する。ここで、2 機の位置はそれぞれ正規分布  $N[0, \sigma^2]$ 、 $N[x, \sigma^2]$  に従うものとし、お互いの確率密度関数が重なる面積が  $P(x)$  である (図 2)。また、単純化のために、 $x$  は一様分布を仮定した。

$$\begin{aligned}
 P(x) &= 2 \int_{\frac{x}{2}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt \\
 &= \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{2}\sigma}\right) \dots (1)
 \end{aligned}$$

相補誤差関数  $\text{erfc}(x)$  は以下で定義される。

$$\begin{aligned}
 \text{erfc}(x) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-z^2) dz \\
 &= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-z^2) dz \dots (2)
 \end{aligned}$$

いま、検出間隔を  $d$  NM としたとき、コンフリクト検出指数  $C(d)$  は式(3)で求められる。

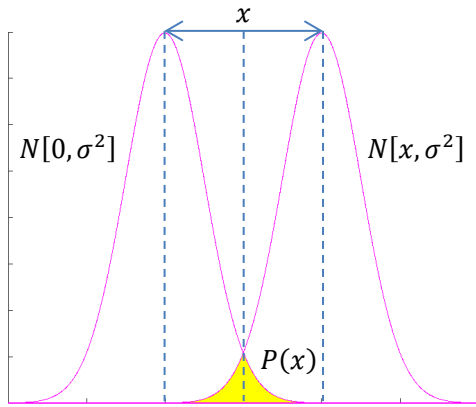


図2 コンフリクト確率の計算イメージ

$$\begin{aligned}
 C(d) &= \int_0^d P(x) dx \\
 &= d \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{2\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{2\sqrt{2}\sigma}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \exp\left(-\frac{d^2}{8\sigma^2}\right)\right) \\
 &\quad \dots (3)
 \end{aligned}$$

横軸に $x$ 、縦軸に $P(x)$ をとったグラフを図3に示す。同様にして、横軸に $d$ 、縦軸に $C(d)$ をとったグラフを図4に示す。水色の点線は $\sigma$ を0~20 NMの範囲で2 NM刻みに変化させたものである(図3および図4ともに、 $\sigma$ が大きくなるにつれて上方向へ変化)。また、桃色の実線は3.1節で求めた20分先の予測誤差 $\sigma = 12.74$ と8分先の予測誤差 $\sigma = 5.76$ 、青色の実線はEUROCONTROLが公開している軌道予測の仕様(0.2 NM/min) [5]から求まる20分先の予測精度 $\sigma = 4$ と8分先の予測精度 $\sigma = 1.6$ の場合をそれぞれ示す。

図3および図4より、予測誤差が小さいほどコンフリクト確率およびコンフリクト検出指数は小さくなるのがわかる。したがって、中期的な軌道予測の精度向上が非常に重要である。

また、コンフリクト検出指数を同程度に収めようとする場合、大きい予測誤差に対しては小さい検出間隔を用いる必要がある。例えば、 $\sigma = 4$  および $d = 10$ のコンフリクト検出指数に対して $\sigma = 12.74$ であれば、 $d \cong 6.2$ 程度の検出間隔を用いる必要がある。大きい検出間隔を実現するためにも軌道予測精度の向上が必要である。

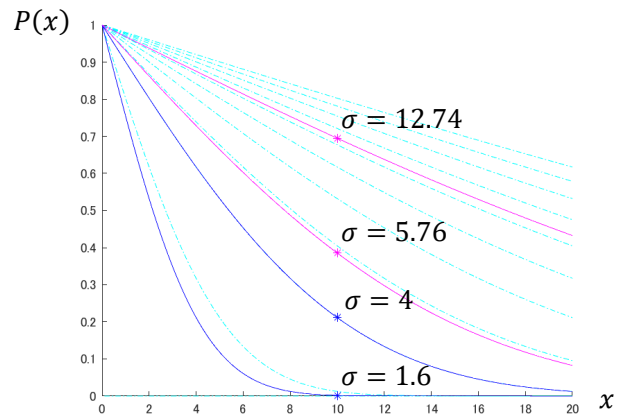


図3 2機間の距離とコンフリクト確率の関係

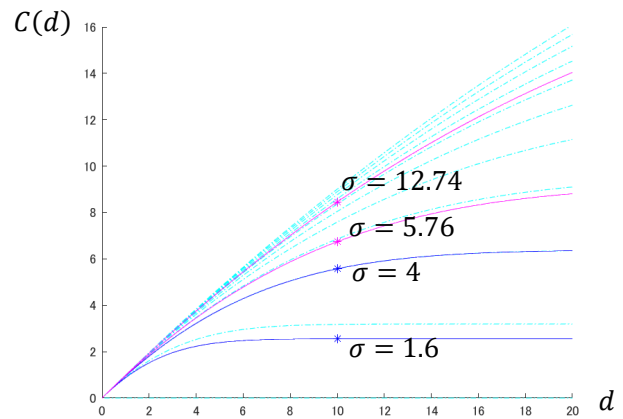


図4 予測誤差、検出間隔とコンフリクト検出指数の関係

#### 4 データリンクを活用したMTCDの高度化に関する考察

3章の議論より、MTCD技術の高度化には中期的な軌道予測の精度向上が鍵となるため、ここではデータリンクの活用による予測精度の向上策について考察する。

予測誤差を細分化すると、航空機の世界推定誤差、風の予測誤差および飛行経路に伴う誤差などが考えられる。また、軌道予測は離陸前の飛行計画段階と飛行中で大きく異なるため、区別して論ずる。

##### ①航空機の世界推定誤差の向上策

データリンクを活用することで、地上側のシステムは航空機の世界推定速度を直接取得すること

ができる。飛行計画段階の軌道予測であれば、取得した対気速度をデータベース化して用いることで予測精度の向上が期待できる。また、飛行中であれば、データベースの値との差分を監視して、無視できない差が生じた場合には予測値を補正するような仕組みが考えられる。

## ②風の予測誤差の向上策

航空機から取得した風情報を数値予報モデルの一観測データとして取り込むことにより、軌道予測に用いる気象予報の精度向上が期待できる。また、飛行中であれば、同一飛行経路上の先行機の風情報を参考にしたり、航空機の飛行管理装置（FMS；Flight Management System）に設定する最新の風情報を機上へアップリンクすることで予測誤差を減少可能と思われる。

## ③飛行経路に伴う誤差の向上策

飛行計画段階においては、やはり飛行経路をデータベース化して共有することが有効と考えられる。標準的な飛行経路の他、交通流の混雑時や悪天の発生時などにおける推奨回避経路の設定により、管制官と運航者の状況認識が向上することで予測性の向上が期待できる。

飛行中においては、FMSに保持されている航空機の飛行経路情報をダウンリンクしたり、承認経路などを機上へアップリンクして管制官と運航者がお互いの意図情報を交換するような仕組みが考えられる。ダウンリンクの手段としては、自動位置情報伝送・監視機能－放送型（ADS-B；Automatic Dependent Surveillance - Broadcast）やSSR Mode SのDAPs（Downlink Aircraft Parameters）、自動位置情報伝送・監視機能－契約型（ADS-C；Automatic Dependent Surveillance - Contract）のEPP（Extended Projected Profile）などが挙げられる。いずれの手段も十分に活用できるほど機上対応および地上整備が進んでいないので実用化はもう少し先になると思われるが、中期以上の軌道予測の精度向上において特に効果が期待できる。また、それぞれの手段は取得可能な情報種別や取得の周期、範囲などが異なるため、利点を組み合わせて運用することが望ましい。

## 5 むすび

本稿では、MTCD技術の高度化における中期的な軌道予測の重要性を示した。また、予測精度の向上に有効な飛行経路の取得について、データリンクと絡めて考察した。今後は飛行計画段階のような早い段階における航空交通管理を支援するための研究開発に取り組みたい。

## 謝辞

レーダデータおよび飛行計画情報のご提供等を通じて本研究にご協力いただきました国土交通省航空局の関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 国土交通省航空局 将来の航空交通システムに関する研究会，“将来の航空交通システムに関する長期ビジョン”，2010年2月.
- [2] 平林 博子，瀬之口 敦，白川 昌之，“中期コンフリクト検出技術の必要性と課題”，第16回電子航法研究所研究発表会，No.4，2016年6月.
- [3] “Accuracy of the flight trajectory”，ICAO ATM RPP，WP601，SESAR，Toulouse，Mar. 2017.
- [4] 白川 昌之，瀬之口 敦，平林 博子，“中期的軌道予測についての一考察”，第55回飛行機シンポジウム，2C02，2017年11月.
- [5] “EUROCONTROL Specification for Trajectory Prediction”，EUROCONTROL-SPEC-0143，Edition 2.0，pp.21-22，2017.