ADS搭載機の縦方向速度予測誤差

藤田 雅人*

Longitudinal speed prediction error of ADS-aircraft

Masato FUJITA

Abstract

Automatic Dependent Surveillance (ADS) equipped aircraft transmits its position, the predicted position at the time of 37 minutes later once every 1600 seconds, the location of next waypoint and the estimated time of arrival at the waypoint, etc. The ground system uses this information for surveillance. The update rate of the position information is much lower than that in radar surveillance (4 sec – 10 sec). Therefore, the position prediction plays a key role in ADS.

This paper gives the definition of ‘longitudinal speed prediction error’ and gives the distribution of them using ODP (Oceanic Air Traffic Control Data Processing System)’s position prediction algorithm. It also gives an example of a large speed prediction error and gives the distribution of longitudinal speed prediction errors, if such errors were remedied.

Keywords : Automatic Dependent Surveillance (ADS), longitudinal speed prediction error, air traffic

キーワード: 自動位置情報伝送・監視機能 (ADS), 縦方向速度予測誤差, 航空交通

1. はじめに

1.1 背景

航空機との衝突を防止するために航空機間の最低間隔である管制間隔基準が定められている。航空交通管理管制官（以下、管制官と呼ぶ）は航空機間の距離が管制間隔未満とならないように管制を行っている。管制間隔は推定される衝突危険度（1 飛行時間あたりの衝突事故数の期待値）が目標安全度を越えないように決められている。

自動位置情報伝送・監視機能(ADS, Automatic Dependent Surveillance) による監視下では、周期的に航空機が機上装置で測位した位置を地上系に送信している。通報周期の長い洋上空域における ADS 環境下の縦方向（進行方向）の管制間隔に関する衝突危険度の推定には、ADS の縦方向速度予測誤差の推定が必要となる。^{(6),(7)}

2004 年 4 月までは位置通報の通報周期は 960 秒であったが、現在 1600 秒となっている。位置通報の周期が 960 秒のデータに関しては、縦方向速度予測誤差の推定方法や推定結果が報告されている^{(4),(5)}が、通報周期が 1600 秒になってからのデ

ータはまだ解析されていない。本稿では、通報周期が 1600 秒になってからのデータを解析した。また、過去の研究では、航空機の進行方向成分のずれを縦方向速度予測誤差として計算していたが、本稿では縦方向速度予測誤差を経路方向のずれとして定義した。経路方向のずれを計算するためには、航空機の飛行経路を知る必要がある。従来は、ADS データから航空機の位置を推定し、当該機はその近傍にある経路を飛行するつもりであったと仮定していた。しかし、何らかの原因により航空機が経路から大きくずれる可能性もある。（その時に得られたデータが、航空機の安全を脅かす大きな誤差のあるデータかも知れない。）従来の方法では、データ抽出時にそのデータを無視してしまう可能性がある。本稿では、航空機の飛行するつもりであった経路に関するデータ（FDMS データ、後述）と照合することにより、任意の経路を飛行するつもりであった航空機の ADS データを抽出する方法を紹介する。

従来の方法では最初の位置通報後 960 秒毎に位置通報するものと仮定し、その通報予定時刻にも

* 正会員 (独) 電子航法研究所 航空交通管理領域 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-23)

っとも近い時刻に送信された ADS データのみ抽出していた。しかし、航空機が横方向にオフセット飛行する時には、現在、通報周期を 320 秒にかえることとなっている。つまり、航空機はその運行中、通報周期をかえる可能性があり、従来の方法は使えない。したがって、全ての時間的に連続する ADS データの対を航空機毎に取り、解析を行うこととした。

1.2 自動位置情報伝送・監視機能 (ADS) ^{(1),(2)}

洋上空域を飛行する航空機の監視は音声通信またはデータリンクによる位置通報によるないし ADS に基づいて行われている。ADS では、航空機は送信時刻、位置情報およびその他の追加情報を自動的に衛星通信等経由で送信し、地上ではその情報を監視に用いる。機上側から地上系へのデータリンクをダウンリンクといい、逆をアップリンクという。

ADS 搭載機はまず、衛星通信等で AFN (ATS Facilities Notification) メッセージ⁽³⁾を送信する。AFN メッセージにより、地上系は当該機が ADS 搭載機か否かを判別する。地上系は ADS 搭載機に対して、位置通報が必要になる条件、ならびに航空機が送信するデータの種別をアップリンクする。このメッセージはコントラクトメッセージと呼ばれている。位置通報が必要となる条件は以下の通りである。

- 周期レポート (一定周期毎に通報)
- イベントレポート (以下のイベント発生時)
 - ✧ Waypoint Change Event (針路の変更・ウェイポイントの通過)
 - ✧ Lateral Deviation Change Event (オフセット飛行等)
 - ✧ Vertical Rate Change Event (上昇・効果率の変更)
 - ✧ Altitude Range Event (飛行高度帯の変更)
- デマンドレポート (地上からリポート要求時)

放送型自動位置情報伝送・監視機能 (ADS-B, B は Broadcast の略) と区別するため、地上系がコントラクトメッセージで航空機が送信するデータの種別を指定する自動位置情報伝送・監視機能を、ADS-C (C は Contract の略) と呼ぶこともある。本稿では簡単のため ADS と呼ぶ。

位置通報を送信する際には、以下のデータのうち、コントラクトメッセージで指定されているデータも同時に送らねばならない。

- Flight Identification Group (便名)
- Predicted Route Group (次およびその次の位

置通報点の位置と次の位置通報点の予定通過時刻)

- Earth Reference Group (対地速度と真方位、上昇・降下率)
- Air Reference Group (対気速度とヘディング、上昇・降下率)
- Meteorological Group (風速・外気温)
- Airframe Identification Group (機体番号)
- Fixed Projected Intent Group、Intermediate Projected Intent Group (X 分後の予測位置及び途中通過地点。X はコントラクトメッセージで送信。福岡飛行情報区 (日本が管制を担当する空域) では X=37)

1.3 洋上管制データ表示システム (ODP)

福岡飛行情報区では周期位置通報の通報周期は 1600 秒 (オフセット飛行時は 320 秒) とされている。これは、4 秒ないし 10 秒周期で航空機の位置情報が得られるレーダ監視と異なり、監視情報の更新率が低い。

洋上管制データ表示システム (ODP、Oceanic Air Traffic Control Data Processing System) では、航空機の現在位置を表す基本通報メッセージの他に Predicted Route Group 及び Fixed Projected Intent Group を用いて航空機の位置を予測し、それを表示する (平成 19 年度より Intermediate Projected Intent Group も使用予定)。管制官はその予測位置をもとに管制を実施している。

1.4 縦方向速度予測誤差

航法機器等の発達により、航空機は高い精度で経路に沿って飛ぶことが可能になった。進行方向での ODP の予測精度が低ければ、逆に高い経路維持性能のために、管制官が ODP 画面上で航空機の間十分な距離を確保していても、所定の間隔を欠如する可能性が高くなる。

各位置通報時刻の縦方向速度予測誤差は先の通報から決まる予測位置と当該通報の通報位置から決まる縦方向位置予測誤差 (Fig.1) を通報間隔 (時間) で割った値で定義する。縦方向位置予測誤差は位置予測誤差の経路方向成分であり、詳細は 3.2.4 節で説明する。

本稿では ADS データを用いた縦方向速度予測誤差の計算手法及びその計算結果を紹介する。

Fig. 1 Longitudinal position prediction error

2. 使用したデータ

2.1 DLCS データ

神戸航空衛星センターから提供された DLCS (Data Link Center System) データを解析に用いた。神戸航空衛星センターは航空機と ODP のデータ通信の中継地点であり、DLCS データには受信時刻とともに ADS メッセージ・AFN メッセージ・DIS メッセージ(ADS Disconnect Message)が含まれている。

当該データは 2005 年 9 月 1 日から翌年 8 月 31 日までに収集されたものである。ただし、2005 年 11 月 18 日及び 2006 年 1 月 17 日から 2 月 9 日までのデータは省かれている。

2.2 FDMS データ

ADS データで見る限り、航空機がある経路から外れて飛行しているように見える場合でも、航空機はその経路を飛ぶつもりであった可能性がある。縦方向速度予測誤差の計算に必要な縦方向位置予測誤差が位置予測誤差の経路方向への成分である以上、航空機がどの経路を飛行するつもりであったのかを知る必要がある。

FDMS (Flight Data Management System) データには便名、機体番号 (必須ではない)、通過位置通報点名、通過時刻等の情報が記載されており、FDMS データにより航空機がどの経路を飛行するつもりであったのかが分かる。

2005 年 9 月 1 日から翌年 8 月 31 日までの FDMS データを東京航空交通管制部及び航空交通管理センターより提供していただいた。

3. 解析手法

3.1 概略

Fig.2 に解析処理のフローチャートを示す。まず、DLCS データならびに FDMS データをデコードし、データベース化した。さらに、北太平洋航空路システム(NOPAC, North Pacific, Fig.3)に含まれる位置通報点名からなるデータベースを作成した。

次に ADS メッセージを便毎に分ける作業を行った。FDMS データには福岡飛行情報区の通過位置通報点名・通過時刻等が記載されているが、福岡飛行情報区外での飛行実績については記載がない。一方、DLCS データは神戸航空衛星センターで送受信される全てのメッセージが含まれている。Fig.4 に示されている周期レポート及びデマンドレポートの送信位置から分かるように、福岡飛行情報区外での観測データも含まれている。

この度の解析では福岡飛行情報区内における ADS データのみを解析に用いるが、他の研究での応用を可能とするために、福岡飛行情報区外でのデータも便毎に分けることとした。そのため、AFN メッセージ・DIS メッセージ等を用いて、ログオンからログオフまでの一連のデータリンク毎に ADS データセットを分割した。次に、分割された ADS データセット毎に対応する FDMS データを探し出した。ADS データセットと FDMS データに記載されている機体番号が一致し、データリンクサービスを受けた時間帯と FDMS データの飛行時間帯に重なりがある場合に ADS データセットと FDMS データが対応するとした。

Fig. 2 Flow chart of analysis

Fig. 3 NOPAC route system

Fig. 4 Geographical Distribution of Periodically and Demanded Reported Positions

FDMS データには通過した位置通報点名ならびに通過時刻から航空機が NOPAC を飛行させていた時間帯は特定できる。それをもとに NOPAC に含まれる位置通報点名のデータベースを参照して NOPAC ルートを飛行していた時間帯に送受信された ADS データを便毎に抽出した。

NOPAC を飛行する航空機の ADS データを抽出する方法として、「NOPAC の航空路から X 海里まで離れた位置の観測データを、航空路を飛行していた航空機のもののみならず」という方法もある。この手法では、航空機がある航空路を飛行するつもりであったのに、大きく横にずれた時に送信された ADS データは抽出後のデータに含まれない。大きな横ずれと ADS 縦方向予測誤差との関連性があった場合、この手法では大きな ADS 縦方向予測誤差を見逃すことになる。横ずれと ADS 縦方向予測誤差の関係が明確

でないため、FDMS データと対比させることとした。

最後に、抽出されたデータから、一レコードが、「便名、機体番号、先に送信された ADS 基本メッセージ(送信時刻・位置)、位置予測に必要な付加情報、次に送信された ADS 基本メッセージ」からなるテーブルを作成し、予測位置ならびに位置予測誤差を計算した。計算方法の詳細は次節に譲る。

3.2 予測位置ならびに位置予測誤差の計算法

3.2.1 位置予測に用いる情報

ODP では Predicted Route Group 及び Fixed Projected Intent Group のみが位置予測に用いられている。ODP で使用されている方法と同じ方法で、これらの情報を位置予測計算に用いた。つまり、Predicted Route Group 及び Fixed Projected Intent Group に記載されている位置のうち、航空機はまず到達時刻が早い方の位置に向かい、当該位置に到達後は残りのメッセージに記載されている位置に向かうと仮定した。

3.2.2 球面上の 2 点間の距離

球面上の任意の 2 点 P, Q の球面上の距離 $d_s(P, Q)$ は

$$d_s(P, Q) = 2R \sin^{-1}(d_{3\text{-dim}}(P, Q)/2R) \quad (1)$$

で計算した。ただし、 $d_{3\text{-dim}}(P, Q)$ は 2 点 P, Q の 3 次元空間におけるユークリッド距離であり、 R は球面の半径を表す。

3.2.3 予測位置の計算

ODP では地球を球体であると仮定し、航空機は大円経路上を等速運動すると仮定されているので、以下に述べる簡単な計算方法で予測位置を計算した。

現在位置 P 、 N 時間後の予測位置 Q が分かっているときに、 M 時間後の予測位置 T を求める。航空機は平面 OPQ による球面の切断面(円)上を飛行する。 N 時間のうちに $d_s(P, Q)$ の距離だけ飛行する航空機は M 時間で $\frac{M}{N} d_s(P, Q)$ だけ飛行する。

したがって、 P から Q の側に距離 $\frac{M}{N} d_s(P, Q)$ だけ先にある点が T である。 OP と OT の成す角を ϕ とすると、

$$R\phi = d_s(P, T) = \frac{M}{N} d_s(P, Q) \quad (2)$$

である。

次に、点 O から直線 PQ におろした垂線の足を H とし、直線 OT と直線 PQ の交点を S とする。 θ を

4. 解析結果

4.1 通報間隔

デマンドレポート及び周期レポートは Periodic Report というメッセージ形式で送信されている。Fig. 7 は同一便の連続する Periodic Report の組に対して、その通報間隔を表したものである。2 つの Periodic Report の間にイベントレポートがあった場合は集計に加えていない。

Num. of basic report pairs

Fig. 7 Distribution of intervals of basic reports (NOPAC)

コントラクトメッセージでは 320 秒ないし 1600 秒の通報間隔となっているため、通報間隔が 5 分から 6 分のデータと 26 分から 27 分のデータが多い。

4.2 縦方向速度予測誤差

通報間隔が 26 分から 27 分のデータを用いて ADS 通報の縦方向速度予測誤差を計算した。3 章で述べた方法で縦方向位置予測誤差を計算し、1.4 節で述べたように、縦方向位置予測誤差を通報間隔で割り、縦方向速度予測誤差を計算した。縦方向速度予測誤差と相対頻度の関係を Fig.8 に示す。

Fig.8 で縦方向速度予測誤差が最小値を取ったデータについて述べる。このデータは NOPAC の R220 航空路 (Fig.2 参照) を西向きに飛行した航空機が送信したレポートをもとに計算したものである。これには Fixed Projected Intent Group が含まれていなかった。そして、Predicted Route Group で与えられた次の位置通報点の位置は送信された現在位置の東に位置し、予定通過時刻は 10 秒後であった。これは次の通過位置通報点名が機上で更新されないうちに Predicted Route Group メッセージが作成されたため起こったと推察される。

試みに、Fixed Projected Intent Group と Predicted Route Group の両方が揃っているデータのみについて縦方向速度予測誤差を計算した。計算結果を Fig. 9

に示す。

Fig.8 でいくつか見られた絶対値が 100knots を越える誤差が Fig.9 では全て省かれていることが見てとれる。

Fig. 8 Longitudinal speed prediction error distribution
(No data omitted, NOPAC)

Fig. 9 Longitudinal speed prediction error distribution
(Data omitted, NOPAC)

5. 結論

本稿では ADS 航空機の縦方向速度予測誤差を定義し、その求め方を示した。

2005 年 9 月 1 日から翌年 8 月 31 日までの FDMS データを解析した結果、洋上空域を飛行する航空機のうち、ADS 搭載機は 2 割程度であり、NOPAC を飛行する航空機でも 3 割に満たないことが分かった。

また、同時期の DLCS データを用いて、Fixed Projected Intent Group が含まれていない ADS データも含めて、縦方向速度予測誤差を計算すると、その絶対値の最大値は 668knots であった。

Fixed Projected Intent Group が含まれていない ADS

データを省いて、縦方向速度予測誤差を計算すると、その絶対値の最大値は 72.0knots であった。

以上により、Fixed Projected Intent Group が含まれていない ADS データを用いずに位置予測をした方が高い予測精度が得られることが分かった。

謝辞

DLCS データを提供していただいた神戸航空衛星センター及びFDMSデータを提供いただいた東京航空交通管制部及び航空交通管理センターの関係各位に感謝いたします。ODPに関する情報提供をしてくださった日本電気株式会社の笹本康行氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) Automatic Dependent Surveillance (ADS), ARINC characteristic 745-2, 1993.6
- (2) Minimum Operational Performance Standards Airborne Automatic Dependent Surveillance (ADS) Equipment, RTCA Do-212, 1992.10
- (3) ATS Data Link Applications over ACARS Air-Ground Network, ARINC characteristic 622-4, 2001.10
- (4) 河道貴宏・長岡栄・天井治・高橋聖・中村英夫：自動従属監視による縦方向予測誤差のモデル, 日本航海学会論文集, Vol. 110, pp.37-44, 2004.3
- (5) 宇田川聡・天井治・長岡栄・高橋聖・中村英夫：自動位置情報伝送・監視機能(ADS)の縦方向位置予測誤差分布の推定方法, 第 45 回飛行機シンポジウム講演集, 2G10, 2007.10
- (6) Anderson, D. A Collision Risk Model Based On Reliability Theory That Allows For Unequal Navigational Accuracy, ICAO SASP-WG/WHL/7 WP/20 REVISED, 2005.5
- (7) Fujita, M. Nagaoka, S and Amai, O. Safety Assessment prior to Implementation of 50NM Longitudinal Separation Minimum in R220 and R580, ICAO SASP-WG/WHL/9 WP/14, 2006.3

質疑応答

浪江宏宗（防衛大学校）：

37 分後の予測位置が与えられないのはどういう原因によるものか。

藤田雅人：

航空機の搭載機材が対応していないということが

考えられるが、調査はしておらず、原因は不明である。

浪江宏宗（防衛大学校）：

Intermediate Projected Intent Group が実装されていないのは問題ではないか。

藤田雅人：

その通りだと思う。使用データの収集期間には Intermediate Projected Intent Group が実装されていなかったもので、本研究での予測位置推定に用いていない。しかし、今年度から実装予定だと聞いている。

Fixed Project Intent Group が含まれない場合には Intermediate Projected Intent Group も含まれないので、今回紹介した大きな予測誤差が出てしまう Fixed Project Intent Group が含まれないレポートに関しては Intermediate Projected Intent Group が予測位置計算に実装されてもなくなる。