飛行と気象の状況による予測飛行時間の不確かさのモデル化^{*1}

Feasibility Study on Modeling of Flight Time Prediction Uncertainty using Flight and Meteorological Conditions

元 谷 章 博^{*3}・武 市 昇^{*2,*3}
Akihiro MOTODANI and Noboru TAKEICHI

Key Words: Air Traffic Management, 4 Dimensional Trajectory, Flight Time Uncertainty, Prediction Model

Abstract: A precise flight time uncertainty prediction is expected to enable a more efficient air traffic management. According to an uncertainty propagation equation derived from a physical model, the flight time uncertainty increases as a function of ground speed and the variances of true air speed and head wind speed. These factors also depend on the flight and meteorological conditions. It is expected possible to improve the uncertainty prediction accuracy by appropriately taking these factors into its modeling. Through the clustering analysis of the actual flight and weather forecast data, the feasibility of the flight time uncertainty modeling using the flight speed and weather forecast information is clearly demonstrated.

1. は じ め に

世界的な経済成長や国際化により航空交通需要の増加が予測されている¹⁾。この需要増加に対応すべく航空交通管理システムの抜本的な変革が計画されており、その一つに現行の空域ベース運用から軌道ベース運用への移行が挙げられる。この軌道ベース運用では、離着陸を含むすべての飛行を一元的に管理することが計画されており²⁾、各航空機は予め設定された軌道に沿って飛行する。このため軌道ベース運用の実現に向け、航空機の正確な時間管理が重要となり、四次元航法が注目されている。四次元航法は、精密な時間管理のために、通過地点とその通過時刻により指定した経路による運航管理方法である³⁾。しかし、飛行中の航空機は、気象などの影響を受けるため、予測飛行時間に誤差が生じることは避けられない。この予測飛行時間の誤差の程度、つまり予測飛行時間の不確かさを予測し管理に導入することで、より効率的な運用が可能になるものと考えられる。一例として、航空機間の時間間隔を安全性を保証しながら最適に設定することで空域容量の拡大を図ることが挙げられる⁴⁾。このような効率的な運航を目指して、予測飛行時間の不確かさの予測やモデル化に関する研究が行われてきた。その中で、飛行時間の予測誤差の標準偏差が飛行距離あるいは時間に比例することが理論的に示され^{4),5)}、さらに複数の研究において、特定の期間（数日～数年）の

特定の経路の航空機の飛行時間を解析し、飛行時間の予測誤差の標準偏差が飛行距離あるいは時間に比例することが実証されている⁶⁻⁸⁾。このように過去の研究では、予測飛行時間の不確かさと飛行距離や時間との比例関係のみを示す単純なモデルが得られているのみである。

本来、予測飛行時間の不確かさは、様々な要因の影響により生じると考えられるため、その様々な誤差要因と影響を明らかにし、それを考慮した予測飛行時間の不確かさを予測する詳細なモデルが望まれる。そこで筆者らは、巡航直線飛行における予測飛行時間の誤差伝搬モデルを構築し、様々なパラメータのうち、まず飛行速度の影響を明らかにした⁹⁾。本研究では、飛行速度だけでなく気象予報情報を用いた予測飛行時間の不確かさの予測の可能性を明らかにする。このため、運航データおよび気象予報データに対してクラスタリングを適用し、不確かさの予測における飛行状況と気象状況の影響を明らかにする。

2. データの処理

2.1 使用するデータ 本研究では、SSR Mode S システムにより取得した運航データを使用する。SSR Mode S システムが提供するデータ内容には、レーダー測位による緯度・経度の位置情報に加え、指示大気速度、真大気速度、マッハ数、対地速度、気圧高度などの航空機からダウンリンクされた動態情報が含まれる¹⁰⁾。2015 年 8, 9 月のデータを使用する。また、数値気象予報値として気象庁が提供する全球モデル数値予報値 GSM¹¹⁾を使用する。GSM の予報値は 6 時間ごとに更新され、最も予測精度がよいと考えられる各予報時刻における初期予報値を緯度・経度・高度・時刻に対して線形補間し、任意の時刻・位置の気象予

^{*1} © 2018 日本航空宇宙学会

平成 29 年 4 月 14 日、日本航空宇宙学会第 48 期年会講演会にて発表

平成 29 年 8 月 2 日原稿受付

^{*2} 連絡先著者 (Corresponding author): takeichi@tmu.ac.jp

^{*3} 首都大学東京システムデザイン研究科航空宇宙システム工学科

報値を得る．本研究では，風速と気温を使用する．

2.2 目標飛行時間の推定 本研究では，予測飛行時間の不確かさを定量的に評価するために飛行時間の予測誤差の標準偏差を指標とする．飛行時間の予測誤差は，目標飛行時間と実際の飛行時間の差で求めることができるが，前節で述べた SSR Mode S システムによる運航データからは各航空機の目標飛行時間を直接得ることができない．そこで，数値気象予報値 GSM を用いて各航空機が目標とした飛行時間を推定することとした．

目標飛行時間という各航空機の飛行意図を推定するにあたり，まず明確な飛行意図をもっていると思われる飛行区間を抽出する．巡行区間における航空機は，指示大気速度，真航路角，気圧高度を保って飛行することが多いため，各飛行軌道の指示大気速度の最頻値から ± 5 [kt] 以内かつ真航路角の最頻値から ± 1.5 [deg] 以内を 100 km 以上維持しながら巡航している等速・直線・巡航区間を，明確な飛行意図をもつ飛行区間として抽出する．ただし，各飛行軌道の気圧高度の最頻値から ± 100 [ft] の区間を巡行区間とみなす．抽出された飛行軌道データ数は 13604 となった．抽出された飛行軌道を第 1 図に示す．

次に，抽出後の各飛行の目標飛行時間 T を推定する．ある距離 D を飛行するときの目標飛行時間 T を推定することは，目標対地速度 V_{GS} を推定することと等価である（式 (1)）．そこで，意図したとみなせる指示大気速度から数値気象予報値を用いて算出する対地速度を目標対地速度と想定する．式 (2) により，指示大気速度 V_{IAS} を機首方向の真対気速度 V_{TAS}' に変換する．ただし， p は気圧高度より標準大気モデルから求めた気圧， ρ は気温から求めた大気密度である．これを式 (3) により真航路方向に変換した値を目標真対気速度 V_{TAS} とみなす．ただし， θ_W は航空機の機首方向と真航路方向の差である．

$$T = \frac{D}{V_{GS}} \quad (1)$$

$$V_{TAS}' = \left[\frac{2p}{\mu\rho} \left\{ \left(1 + \frac{p_0}{p} \left[\left(1 + \frac{\mu}{2} \frac{\rho_0}{p_0} V_{IAS}^2 \right)^{\frac{1}{\mu}} - 1 \right] \right)^{\mu} - 1 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$V_{TAS} = V_{TAS}' \cos \theta_W \quad (3)$$

この目標真対気速度 V_{TAS} と真航路方向の風速 W_H の予報値の和から目標対地速度 $V_{GS} (= V_{TAS} + W_H)$ が求まり，ある距離 D を飛行したときの目標飛行時間 T を推定することができる．明確な飛行意図をもつとみなした抽出データ（第 1 図）の対地速度の観測値から求めた 10 km の飛行時間と推定した目標飛行時間の誤差の分布を第 2 図に示す．

2.3 類似する飛行データのクラスタリング 予測飛行時間の不確かさを飛行と気象の状況ごとに評価するために，抽出後の飛行データを類似する飛行データごとに分類する．このように，データの全集合から類似する特徴パラメータをもつデータ集合に分類する手法をクラスタリングといい，

第 1 図 抽出した軌道

第 2 図 飛行時間の予測誤差の分布

分類後のデータ集合をクラスタという．ここでは，クラスタリングの基準となる特徴パラメータに，飛行速度や気象状況を表すパラメータを用いることにより，分類後のクラスタによって類似する気象状況で類似する飛行速度をもつ飛行データ集合を模擬する．ここでは特徴パラメータに 10 km の距離を飛行する間の対地速度，飛行方向の風速，横風の風速の絶対値，気温の平均値を用いる．

気象などの確率的な影響により生じる各飛行パラメータの分布から各種の統計量を精度よく抽出するためには，クラスタリング後のクラスタ内の特徴パラメータが極端な外れ値を含まない正規分布に近い分布を形成することが望ましい．そこで混合正規分布の密度推定によるクラスタリングを用いる．この手法では，まず飛行データ集合を特徴パラメータを基底とする多次元空間における複数の多次元正規分布の重ね合わせとみなし，構成要素となる各正規分布の確率密度関数を EM（反復期待値最大化）アルゴリズム¹²⁾により推定する．そして，式 (4) に示す，あるデータ Y が観測されたときの正規分布 G_i の生起確率 $P(G_i|Y)$ をデータ Y の正規分布 G_i への所属度とみなし，各データを所属

第3図 あるクラスタ内の特徴パラメータの分布

する正規分布に確率的に割り当てることができる¹³⁾。

$$P(G_i|Y) = \frac{P(Y|G_i)P(G_i)}{\sum_{j=1}^M P(Y|G_j)P(G_j)} \quad (4)$$

この手法により模擬した類似する飛行状況における飛行データ集合は、特徴パラメータの分布が概ね正規分布に従い、極端な外れ値をもたない。なお、次章以降の解析ではクラスタ内の飛行時間誤差の標準偏差を算出するため、そのデータ数が50を下回るクラスタは使用しないこととした。初期クラスタ数を250とした結果、157個のクラスタを得た。この例として、ある一つのクラスタ内の特徴パラメータ（対地

速度 V_{GS} 、飛行方向の風速 W_H 、横風の風速の絶対値 $|W_C|$ および気温 $Temp$ の平均値）と飛行時間の予測誤差の分布を第3図に示す。それぞれ極端な外れ値をもたず、山型の分布となっていることがわかる。また、各クラスタ内の各特徴パラメータの平均値と飛行時間の予測誤差の標準偏差との関係を第4図に示す。飛行時間の予測誤差の標準偏差と、対地速度 V_{GS} 、飛行方向の風速 W_H 、横風の風速の絶対値 $|W_C|$ および気温 $Temp$ の平均値との相関係数は、それぞれ $R = -0.85$ ($p < 0.01$), $R = -0.83$ ($p < 0.01$), $R = 0.36$ ($p < 0.01$), $R = -0.34$ ($p < 0.01$) であり、いずれのパラメータも飛行時間の予測誤差の標準偏差と有意な相関をも

第 4 図 各特徴パラメータと飛行時間の予測誤差の標準偏差の関係

つことが明らかとなった。

3. 飛行時間の予測誤差の伝搬モデル

3.1 飛行時間の予測誤差の伝搬モデルの導出 まず、航空機を質点としてみなした単純な力学モデルに基づく飛行時間の予測誤差の伝搬モデルについて述べる。航空機を質点としてみなした単純な力学モデルにおいて、飛行時間 T と真対気速度 V_{TAS} および風速 W_H 、飛行距離 D の関係は式 (5) のようになる。ただし、真対気速度 V_{TAS} と風速 W_H はどちらも真航路方向成分を考える。飛行距離 D を一定とすると、飛行時間 T の予測誤差 ΔT の誤差要因になり得るのは、真対気速度 V_{TAS} および風速 W_H の誤差 ΔV_{TAS} 、 ΔW_H のみであり、この関係は式 (6) のように表せる。式 (5) と式 (6) から飛行時間の予測誤差 ΔT は、 ΔV_{TAS} と ΔW_H の関数として式 (7) のように表せ、それらを V_{TAS} と W_H に対して微小とみなして線形化すると式 (8) を得る。さらに本論文では単純化のため V_{TAS} と W_H が無相関であることを仮定すると、分散の定義式から飛行時間の予測誤差 ΔT の標準偏差 σ_T を式 (9) のように得る。式 (9) は、飛行時間の予測誤差のばらつきが誤差要因のばらつきから発生する関係を表し、誤差伝搬モデルと呼ばれる。この誤差伝搬モデルは、一定距離を飛行するときの飛行時間の予測誤差の標準偏差は対地速度の 2 乗に反比例し、その係数は

真対気速度の誤差分散と風速の誤差分散によって決まることを示している。

$$T = \frac{D}{V_{TAS} + W_H} \quad (5)$$

$$T + \Delta T = \frac{D}{V_{TAS} + \Delta V_{TAS} + W_H + \Delta W_H} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta T(\Delta V_{TAS}, \Delta W_H) &= \frac{-(\Delta V_{TAS} + \Delta W_H)D}{(V_{TAS} + W_H)(V_{TAS} + \Delta V_{TAS} + W_H + \Delta W_H)} \\ &= -\frac{(\Delta V_{TAS} + \Delta W_H)D}{(V_{TAS} + W_H)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta T(\Delta V_{TAS}, \Delta W_H) &= -\frac{D}{(V_{TAS} + W_H)^2} \Delta V_{TAS} \\ &\quad - \frac{D}{(V_{TAS} + W_H)^2} \Delta W_H \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sigma_{T, \text{Model}} = \sqrt{E[(\Delta T)^2]} = \frac{\sqrt{\sigma_{V_{TAS}}^2 + \sigma_{W_H}^2}}{V_{GS}^2} D \quad (9)$$

3.2 実測値を用いた誤差伝搬モデルの予測精度評価 飛行時間の予測誤差の伝搬モデル (式 (9)) の出力 $\sigma_{T, \text{Model}}$ と、実運航データの観測値から得た飛行時間の予測誤差の標準偏差 $\sigma_{T, \text{Real}}$ を比較することで、誤差伝搬モデルの予測性能を評価する。比較評価には 10 km を飛行したときの飛行

第5図 予測誤差の標準偏差の散布図と回帰直線（一律の $\sigma_{V_{TAS}}^2$, $\sigma_{W_H}^2$ を入力とした場合）

第6図 予測誤差の標準偏差の散布図と回帰直線（飛行と気象の状況ごとの $\sigma_{V_{TAS}}^2$, $\sigma_{W_H}^2$ を入力とした場合）

時間の予測誤差の標準偏差を用いた。ここで予測モデルの入力パラメータである誤差要因の誤差分散 ($\sigma_{V_{TAS}}^2$ と $\sigma_{W_H}^2$) は、13604 の飛行データの真大気速度および飛行方向の風速の誤差分布の分散を算出し、これを実測値としてモデルの入力に用いた。それぞれの値は、 $\sigma_{V_{TAS}}^2 = 0.60 [\text{m}^2/\text{s}^2]$ と $\sigma_{W_H}^2 = 2.87 [\text{m}^2/\text{s}^2]$ となった。第5図に予測モデルの出力 $\sigma_{T,est}$ と、実運航データから求めた飛行時間の予測誤差の標準偏差 $\sigma_{T,act}$ との散布図と回帰直線を示す。このとき、予測性能を表す予測値と目標値の相関係数 R と RMSE は、 $R = 0.854$ ($p < 0.01$), $\text{RMSE} = 0.049 [\text{s}/10 \text{ km}]$ となった。

ここで、入力パラメータである誤差要因の誤差分散に飛行と気象状況ごとの値を用いる場合について考える。これは、モデルへの入力値である $\sigma_{V_{TAS}}^2$ と $\sigma_{W_H}^2$ にクラスごとに算出した値を用いることに相当する。このときの誤差伝搬モデルの予測精度を第5図と同様に第6図に示す。このときの予測値と目標値の相関係数 R と RMSE は、 $R = 0.99$ ($p < 0.01$), $\text{RMSE} = 0.0099 [\text{s}/10 \text{ km}]$ となった。この結

果は、飛行時間の予測誤差の標準偏差を飛行と気象の状況によるクラスタリングにより非常に高い精度で予測できることを示している。

以上の通り、従来の研究で示されていた飛行と気象の状況によらない予測（第4図に示す結果に相当する）と比較して、飛行と気象の状況ごとの予測（第5図に示す結果に相当する）がより高い精度を達成することが明らかとなった。

4. ま と め

本研究では、飛行時間の不確かさを事前に予測し管理することで、より効率的な運航が期待できることに着目し、その予測の可能性を評価した。飛行時間の不確かさを飛行状況ごとに解析すべく、混合正規分布の密度推定によるクラスタリングを用いて飛行状況ごとのデータ集合を作成した。そして力学モデルに基づいた飛行時間誤差の誤差伝搬モデルを構築し、飛行と気象の状況ごとに変動する誤差要因をモデルに反映することにより高精度な予測が可能になることを明らかにした。今後の実用化に向けては、様々なパラメータの影響により飛行時間の不確かさが発生するメカニズム、および各要因の重要性を明らかにすることが課題となる。

参 考 文 献

- 1) Boeing: Current Market Outlook 2013–2032, 2013.
- 2) 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，国土交通省，2010.
- 3) 矢田士郎：四次元航法とそれに対応する管制に関する一考察，第5回電子航法研究所研究発表会，2005.
- 4) Paielli, R. A. and Erzberger, H.: Conflict Probability for Free Flight, J. Guid. Control Dynam., **20**, 3 (1997), pp. 588–596.
- 5) Irvine, R.: A Geometrical Approach to Conflict Probability Estimation, Air Traffic Control Quarterly, **10**, 2 (2002), pp. 85–113.
- 6) Paielli, R. A.: Empirical Test of Conflict Probability Estimation, USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Orlando, 1998.
- 7) Robert, E. and De Smedt, D.: Comparison of Operational Wind Forecasts with Recorded Flight Data, 10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Chicago, June 10–13, 2013.
- 8) Takeichi, N., Tachibana, M., Abumi, Y. and Bayasgalan, E.: Waypoint Optimization for Accurate Pseudo-RTA in Descent Trajectory, IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference, Prague, September 13–17, 2015.
- 9) 元谷章博，武市 昇：四次元航法における飛行時間のばらつきのモデル化，日本航空宇宙学会論文集，**65** (2017), pp. 130–134.
- 10) Senoguchi, A. and Koga, T.: Analysis of Downlink Aircraft Parameters Monitored by SSR Mode S in ENRI, 28th Digital Avionics Systems Conference, Orlando, Florida, October 25–29, 2009.
- 11) 気象庁データ オリジナルデータ 数値予報 GPV—生存圏データベース，<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/original/> (2016/12/3 アクセス)
- 12) Redner, R. A. and Walker, H. F.: Mixture Densities, Maximum Likelihood and the EM Algorithm, SIAM Rev., **26**, 2 (1984), pp. 195–239.
- 13) 宮本定明：クラスター分析入門，第1版，森北出版，東京，1993，pp. 53–56.