

時間管理システムのための 高精度軌道予測に関する一考察

原田 明德¹・武市 昇²・岡 宏一³

^{1,3} 非会員 高知工科大学システム工学群 (〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185)

¹harada.akinori@kochi-tech.ac.jp, ³oka.koichi@kochi-tech.ac.jp,

² 非会員 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域
(〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)
takeichi@tmu.ac.jp.

利用量の多い主要空港においては到着機の混雑を避けるべく複数機の到着時刻を事前に正確に予測できる必要がある。最適な到着時刻を割り当てることで運航効率の向上が期待される。したがって、軌道予測は到着管理におけるキー技術であり地上における軌道予測の精度が焦点となる。本研究は、我が国の定期運航便の効率向上を実現するため、飛行管理システム (Flight Management System, FMS) の軌道を予測し正確な定点通過予測時刻を与える解析ツールを確立させることを目的とする。実際の飛行が FMS に従っていることを前提とするため、所定の飛行ルートを一定の巡航高度で飛行している便を軌道予測の対象とし、計 191 便に対して予測された軌道の飛行時間と実際の飛行時間との差から定点通過時刻の予測精度を評価する。解析ツールには航空機の性能モデルや気象データの精度、計算方法などに起因する誤差が含まれており精度はさらに向上させる必要があるが、本手法が到着管理システムのための軌道予測のツールとして十分機能する可能性があることを示す結果が得られた。

Key Words: CARATS Open Data, Trajectory Based Operation, trajectory prediction, trajectory optimization, Flight Management System

記号の説明

a	: 時間調節のための重み係数
D	: 抗力
g	: 重力加速度
H	: 高度
J	: 評価関数
L	: 揚力
m	: 機体質量
t	: 時間
T	: 推力
V	: 速度
x	: 進行距離
γ	: 飛行経路上昇角
μ	: 燃料流量

添字

a	: 対気成分
W	: 風

1. はじめに

航空交通需要は世界的な増加が見込まれている。最新の航空旅客需要予測¹⁾によると 2017 年から 2036 年ま

での予測旅客輸送量の伸びは東欧、中東、中国、南アジアにおいて顕著であり、我が国においても今後も伸び続けていくことが予想されている。航空交通量の継続的な増加により、環境問題をはじめ経済性や利便性、安全性の低下など複数の問題が生じることが懸念される。これらの諸問題に対し、我が国では国土交通省航空局と海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所を中心として長期的な展望に基づくロードマップである CARATS Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems) が策定されその推進が図られている²⁾。CARATS の示す変革の指針の一つである軌道ベース運用 (Trajectory Based Operations, TBO) に関連して近年では運航効率の向上に寄与するため到着管理システムに関する研究が行われている³⁾。これまでの研究で、機体が各々の性能を発揮できるように飛行することに加え、適切な到着時刻を割り当てることで管制方式基準を満たしつつ効率を向上させることが可能であることが示されている⁴⁾。文献⁵⁾にも述べられているように、到着時刻制御の可否は現在ほぼすべての定期便で使用されている飛行管理装置 (Flight

Management System, FMS) のコマンドを地上でいかに精度よく再現できるかに委ねられている。つまり、地上において複数機の到着時刻を正確に予測でき、かつ未来の状況を考慮して適切に調整し各機体に割り当てることができれば、飛行中の航空機は地上からの指示に従って到着時刻を再設定することで運航効率を向上させることができる。近年装備されている FMS の中には RTA (Required Time of Arrival)⁹⁾ と呼ばれる機能を有するものがあり、到着時刻の指定は技術的にはすでに可能となっている。FMS の生成するコマンド、すなわち高度や運航速度等の飛行軌道を地上で正確に予測するには FMS 自体の計算ロジックや機体の厳密な性能モデルなどが必要となる。これらは開示されていないが適切な指標に基づいた最適化や本研究分野でしばしば使用される性能モデル等によりある程度再現できると考えられる。そこで、本研究では我が国の定期運航便の効率向上を実現するため、FMS の軌道を予測し正確な定点通過予測時刻を与える解析ツールを確立させることを目的とする。軌道予測については、過去、米国にて複数の研究がなされており⁷⁻¹⁰⁾、我が国においてはこれまで電子航法研究所にて重点的に行われてきた¹¹⁾。本研究が提案する軌道予測の特徴は、実際の運航では FMS に入力される CI は航空会社や便ごとに異なることを考慮し、本解析ツールにおいても CI に対応するパラメータを変化させることで上昇から降下までの軌道をフェーズに分けることなく得ることができ、同時に実際の運航で設定された CI を推定することも可能な点にある。本研究の目指す軌道予測解析ツールは、飛行前に決まる CI、飛行ルート、機体重量を入力すれば高度および速度の軌道が決定され定点通過時刻あるいは到着時刻を事前に精度良く予測することができるというものである。実際の飛行が FMS に従っていることが前提となるため所定の飛行ルートを一定の巡航高度で飛行している便を軌道予測の対象とし、複数のケースに対して予測された軌道の飛行時間と実際の飛行時間との差から定点通過時刻の予測精度を評価する。

2. 日本国内の航空路監視レーダデータ

(1) CARATS Open Data2014

本論文が解析に使用するデータは平成 28 年 8 月に公開された CARATS Open Data 2014 である。2014 年 5 月から 2015 年 3 月までの奇数月合計 6 週間分で構成されている。記録されている航空機の位置情報は国土交通省航空局航空交通管制部の運用する航空路監視レーダ (Air Route Surveillance Radar, ARSR) によって収集されたものであり、それぞれのデータを統合し、座標変換や

平滑化処理等を行って作成されたものである。データ処理の詳細については文献¹³⁾に述べられている。また、文献¹⁴⁾ではキャビン内で取得した GPS (Global Positioning System) データを用いてレーダデータの精度評価を行っている。

表-1 CARATS Open Data 2014 の概要¹²⁾

データ期間	2014 年	5 月 12 日 (月) から 18 日 (日)
		7 月 14 日 (月) から 20 日 (日)
		9 月 15 日 (月) から 21 日 (日)
		11 月 10 日 (月) から 16 日 (日)
	2015 年	1 月 12 日 (月) から 18 日 (日)
		3 月 9 日 (月) から 15 日 (日)
対象	計器飛行方式による定期運航便	
データ項目	時刻, 仮想便名, 緯度, 経度, 高度, 型式	
データ周期	約 10 秒	
取得元	札幌・東京・福岡・那覇航空交通管制部の RDP データ ¹⁾ および FDPS データ ²⁾	

(2) 解析対象

本論文では国内主要路線の一つである福岡発羽田行きの便を解析対象とする。この便が主に使用する RNAV (aRea NAVigation) 航空路は Y23 であるが標準計器出発方式 (Standard Instrument Departure, SID) 経路と航空路をつなぐ転移経路が複数設定されており、便によってはこれらの経路上のいくつかのウェイポイントを通過せずにショートカットして飛行するものもあるため、図-1 および表-2 に示すように 5 通りの参照経路を定めた。FMS が生成する軌道を地上で再現することが目的であるため、SID 経路上のウェイポイント YOKAT と Y23 上の FLUTE の間の 5 通りの経路を大幅な延伸なく、かつ巡航高度を変更せずに飛行しているケースのみを抽出し、管制指示による迂回や巡航高度の変更を行っているケースは解析の対象外とする。2014 年 5 月と 2015 年 1 月のそれぞれ 3

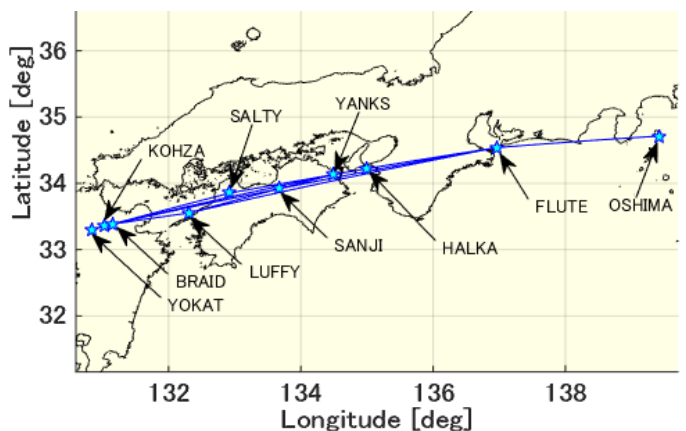


図-1 軌道最適化に用いる参照経路 (福岡→羽田)

¹⁾ Radar Data Processing System: 航空路レーダ情報処理システム

²⁾ Flight Data Processing Section: 飛行情報処理部

表-2 軌道最適化参照経路の詳細 (福岡→羽田)

Route number	RJFF TRANSITION				Y23			VORTAC ³	
1	YOKAT	KOHZA	BRAID	SALTY	YANKS	HALKA	FLUTE	OSHIMA	
2									LUFFY
3				SANJI					
4				LUFFY					
5				SANJI					

日問わず、A320、B738、B763、B772 の 4 機種について解析を行う。表-3 は解析対象の便数と、参照経路以外の航空路を飛行または FLUTE までに経路の大幅な延伸があり解析対象外とした便数を日および機種ごとにまとめたものである。解析対象とする便数の合計は 191 便である。

表-3 解析対象の便数 (左) と解析対象外とした便数 (右)

対象日	A320		B738		B763		B772	
2014年								
5月12日	4	9	7	9	3	4	11	12
5月15日	10	2	10	4	5	0	11	11
5月18日	9	3	8	5	3	3	20	3
2015年								
1月12日	6	4	2	2	2	1	18	6
1月15日	6	3	2	2	2	1	23	3
1月18日	6	4	3	3	2	2	18	7
合計	41	25	32	25	17	11	101	42

3. 軌道予測による定点通過時刻予測

(1) 概要

軌道予測による到着時刻の精度評価には図-2 に示す飛行状態推定および軌道最適化の 2 つの方法を用いる。実際の飛行時間あるいは定点通過時刻は Open Data の時刻データから直接求められるが、軌道予測のために運航上重要なマッハ数や校正対気速度 (Calibrated Airspeed, CAS) などの対気情報を精度よく推定しておく必要がある。これらの対気情報は気象データおよび性能モデルを用いた飛行状態推定により時刻および位置のデータから推定することができる。次に、飛行状態推定と同じ条件および気象データ、性能モデルを用いて軌道最適化を行う。評価関数は燃料と重み付き時間の総和とする。燃料と時間のトレードオフを決める重み係数がコストインデックスに対応する。この重み係数を変化させることで飛行時間が異なる複数の最適軌道が得られる。これらの中から飛行状態推定により得られた軌道に最も近い軌道を選び予測軌道とする。この予測

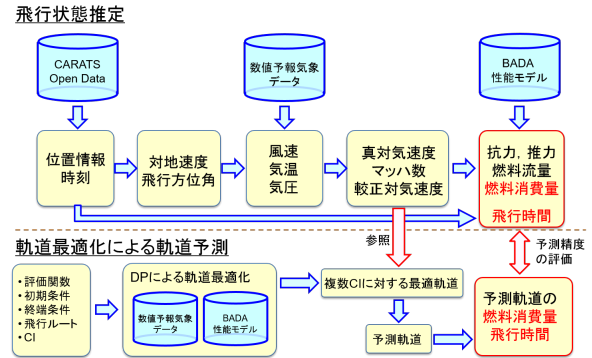


図-2 軌道予測による到着時刻予測精度の評価方法

軌道が定点を通過する時刻と実際の通過時刻との差を取ることで定点通過時刻の予測精度を評価する。

(2) 飛行状態推定

定点通過時刻を精度よく予測するには、まず実際の飛行のマッハ数や校正対気速度などの対気速度情報を把握しておかなければならない。対地速度は Open Data に格納されている位置情報および時刻から求めることができ、これに風速、気温等の気象データを適用することで対気速度情報を推定することができる。さらに機体の性能モデルを用いることで抗力、推力、揚抗比、燃料流量等が推定可能である。燃料消費量の推定は機体質量の変化を考慮するために必要である。気象データには気象庁の数値予報の現況値を利用し、格子点値 (Grid Point Value, GPV) を空間方向に内挿して機体位置における風速、気温、気圧を求める。本論文では GSM (Global Spectral Model) 日本域を使用する¹⁵⁾。機体性能モデルには EUROCONTROL が維持・管理する BADA モデルの Revision 3.11 を使用する¹⁶⁾。

気象データおよび機体性能モデルの誤差については、エアラインから提供を受けた実機の記録データと比較し、風速については誤差の自乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error, RMSE) が 3[m/s]程度¹⁷⁾、飛行全体での燃料消費量の誤差は±5%程度以下^{18) 19)}という結果が得られている。

気象および機体性能モデルによる誤差の他に、燃料消費は機体質量の影響を受けるが、初期質量のデータ

³ VORTACAN: VHF Omnidirectional Range Tactical Air Navigation

は得られないことから 10,000[ft]通過点における機体質量を BADA モデルの標準質量の 80%と仮定する. これらのモデルや質量に起因する誤差を完全になくすことは现阶段では不可能ではあるが, 解析結果の有効性を大きく損なうほどではない. 一方, これらの一連の計算方法は自由に与えた経路や高度, 速度などの任意の軌道の消費燃料を推定することができるため, 軌道最適化における評価関数の計算にも適用する.

(3) 飛行軌道最適化

FMS はブラックボックスであり飛行プロファイルを与える計算のロジックは公開されていないが, ある評価指標に基づき軌道の計算が実行されていると考えられる. そこで, 軌道最適化計算により FMS の生成する軌道がある程度再現できると仮定する. 本節では軌道予測に用いる軌道最適化計算の方法について述べる.

まず, FMS が計算している評価指標が直接運航コスト (Direct Operating Cost, DOC) であると仮定し, 軌道最適化計算において最小とすべき評価関数を式(1)のように燃料消費量と飛行時間の組み合わせとして設定する. 両者はトレードオフの関係にあることから時間調節のための重み係数 a を導入する.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [\mu(t) + a] dt \quad (1)$$

ある a に対して最適化を行うと飛行可能な軌道の中から消費燃料が最小となる軌道が決まり, 重みに応じた飛行時間が求められる. この重み係数は CI と深く関係している. ここで, DOC は式(2)のように運航にかかる費用として表される.

$$J_{dollars} = \int_{t_0}^{t_f} \left[\frac{1}{100} \frac{C_{fuel}}{0.4536} \mu(t) + \frac{C_{time}}{3600} \right] dt \quad (2)$$

C_{fuel} は燃料コスト [cent/lb] で C_{time} は時間コスト [dollars/hour] である. コストインデックスは燃料コストあたりの時間コストと定義されることから, 式(1)および式(2)より以下の関係が導かれる.

$$CI = \frac{C_{time} [\text{dollars/hour}]}{C_{fuel} [\text{cent/lb}]} = 79.37a \quad (3)$$

a をゼロとすると燃料消費最小の軌道が得られる. また, a を正の値にとるとことで飛行時間を短く, 負の

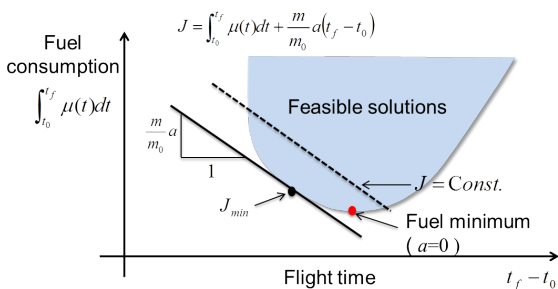


図-3 CI に対する燃料消費と飛行時間の関係

値にとることで長くすることができ, 図-3 に示すようなパレート面が形成される. CI はこのパレート面の接線の傾きに等価であり燃料消費と飛行時間のトレードオフを決める自由なパラメタであるため運航会社の方針によって決定される.

機体の運動は質点近似運動方程式により表現する. 5 つの参照経路のいずれかに沿って飛行することを前提とするため横の自由度は導入せず, 状態変数は較正対気速度および気圧高度の 2 つとし, 対応する制御入力として推力および飛行経路上昇角を与える.

$$\frac{dx}{dt} = V \cos \gamma + V_w \quad (4)$$

$$\frac{dH}{dt} = V \sin \gamma \quad (5)$$

$$m \frac{dV}{dt} = T - D - mg \sin \gamma_a - m \frac{dV_w}{dt} \cos \gamma_a \quad (6)$$

$$m \frac{d\gamma}{dt} = L - mg \cos \gamma_a = 0 \quad (7)$$

式中の添字なしの V は真対気速度であり状態変数の較正対気速度を変換して得られる. V_w は風速である. 式(7)は準定常近似を表している. 旅客機の運動では経路角の時間変化率は小さいためこの近似が成り立つ.

最適解の探索には等式不等式拘束条件や格子点データの取り扱いが容易である動的計画法を用いる. これは状態変数を格子点に量子化しそれらの組み合わせで表現される軌道の中から最適性の原理に基づいて最適解を得るものである. 計算時間短縮のために MS-DP (Moving Search space Dynamic Programming) 法²⁰⁾を適用するが直接法に分類される他の勾配法に比べ収束性は比較的良く, 必要であれば状態空間内の全領域を探索することで大域的最適解を得ることもできる. 参照経路に沿った進行距離 x の値は終点 OSHIMA にて固定であるが, この進行距離を状態変数に加え時間を独立変数とすると終端自由・終端状態量固定となり, 次元が増えるばかりでなく, 状態変数と制御入力の数差により格子点間の状態遷移を一定の制御入力値で実現できなくなることに加え, 初期推定解の終端時刻を仮定しなければならなくなるという問題が生じる. 本研究では, x は時間とともに変化するのでこれを独立変数とし終端固定とすることでこれら計算上の問題を解決している.

(4) 軌道予測

複数の重み係数 a に対して求められた最適軌道の中から, 飛行状態推定により得られた軌道に最もよく合うものを一つ選び予測軌道とする. 本解析では運航上使用される速度の一つである CAS の軌道の整合性を予測軌道の決定指標とした. 軌道最適化の区間は YOKAT

—OSHIMA 間とするが、FLUTE 以降は管制指示により迂回するケースが多いため、CAS の整合性の評価区間は YOKAT—FLUTE 間とする。すなわち、経度に対し最適軌道の CAS の値と飛行状態推定により得られた実際の飛行の CAS の値との差の絶対値の合計が最小になる最適軌道を選択し予測軌道とする。この予測軌道による飛行時間と実際の飛行時間との差分をプロットし定点通過時刻の予測精度を評価する。

4. 定点通過時刻の予測精度評価

(1) 計算条件

軌道最適化における計算条件を表4に示す。

表4 軌道最適化の計算条件

飛行ルート	参照経路 1~5 (YOKAT から OSHIMA まで)			
飛行距離	X_0 :	0	X_f :	約 810 [km]
	ΔX :	約 20 [km]		
高度	H_{min} :	設定なし	H_{max} :	H_{cruise_act}
	ΔH :	400 [ft]		
較正対気速度	V_{min} :	BADA 規定値	V_{max} :	BADA 規定値
	ΔV :	2 [kt]		
初期条件	H_0 :	H_{YOKAT}	V_0 :	V_{est_YOKAT}
	m_0 :	m_{YOKAT}		
終端条件	H_f :	H_{OSHIMA}	V_f :	V_{est_OSHIMA}
重み係数	a :	0 ~ 2 まで 0.05 刻み (41 点)		

独立変数である飛行距離については YOKAT—OSHIMA 間を参照経路に沿って約 20[km]の間隔となるよう分割し、軌道最適化計算のセクションを定義している。 H_{cruise_act} は実際の飛行の巡航高度、 V_{est_YOKAT} 、 V_{est_OSHIMA} は飛行状態推定により得られた CAS の始点と終点における値である。また、 m_{YOKAT} は YOKAT における機体質量であり、すでに通過している高度 10,000[ft]点で仮定した BADA 標準重量の 80%から幾分か減少した値である。探索範囲は初期推定解のまわりに速度、高度それぞれ $\pm 5\Delta V$ 、 $\pm 5\Delta H$ としている。

(2) 定点通過時刻の予測精度

a) 統計解析結果

図4から図-7は、解析対象とした全 191 便の、予測軌道が定点を通過する時刻と実際の通過時刻との差分をヒストグラムとしてプロットしたものである。参照経路は 5 つあり図-1 に示すすべてのウェイポイントをすべての便が通過している訳ではないため、東経 132, 135, 137, 139.41 度線と交差する点を定点としている。参照経路の違いによりこの定点は東経 132 度および 135

度上で緯度方向に少々ばらつくが、このばらつきが始点 YOKAT からの飛行時間に及ぼす影響は無視できる程度である。なお、Y23 上の HALKA および FLUTE はほぼ東経 135 度線および 137 度線上にあり、東経 139.41 度線は OSHIMA VORTAC を通過する。FLUTE は解析対象のすべての便が通過しているが、この点以降は管制指示により迂回あるいは別の経路を飛行する便が多く見られる。表-5 に定点通過予測時刻の実際の値からの差に対する平均値と標準偏差を示す。東経 132 度では始点からの距離が短いため、 ± 30 [s]以内に収まるケースが 157 便と全体の 82 %を占めており予測の精度は保たれている。東経 135 度と 137 度での時間差の平均値は同じ値を取っているが、標準偏差については東に進むにつれて増加しておりばらつきが拡大していることが分かる。東経 137 度での結果より、FLUTE 通過予測時刻の標準偏差の範囲は -70.9 [s]から 4.7[s]である。軌道予測の対象とした YOKAT—FLUTE 間において時間差の平均値が負となっていることから、予測軌道の速度は実際の速度よりも平均して速い傾向があると言える。FLUTE 以降は管制指示により迂回したり別の経路を飛行したりする便が多い一方、軌道予測では FLUTE、OSHIMA 間をつなぐ最短経路を設定しているため予測時刻との差が一気に拡大しばらつきも大きくなっている。

FLUTE までの定点通過予測時刻が実際よりも早くなる理由を予測軌道と実際の軌道を比較しながら説明する。例として、図-8および図-9に A320および B738 の 2 機種について東経 131 度から東経 136.9 度までの各定点における通過時刻の予測誤差の評価結果を示す。図-10から図-15 はそれぞれの機種のマッハ数、較正対気速度、気圧高度の経度に対するプロットである。図-8 より、A320 ではシアン色のマーカーで示す時間差の平均値は東経 134 度付近まで負の方向へ増えていきそれ以降はほぼ横ばいである。これは図-10 より、マッハ数について東経 134 度付近までは赤線で示す予測軌道の方がシアン色と青色で示す実際の軌道よりも大きな値を取っているためである。それ以降は予測軌道は実際の軌道の平均的な値を取っていることから時間差はそれ以上拡大せず横ばいになったと考えられる。較正対気速度はおおよそ合っているように見えるが高度については上昇と降下において予測軌道の方が高くなっている。

表-5 時間差の平均値と標準偏差 (全 191 ケース)

	平均値 [s]	標準偏差 [s]
東経 132 度	-14.6	26.2
東経 135 度	-33.1	34.1
東経 137 度	-33.1	37.8
東経 139.41 度	-107.7	167.3

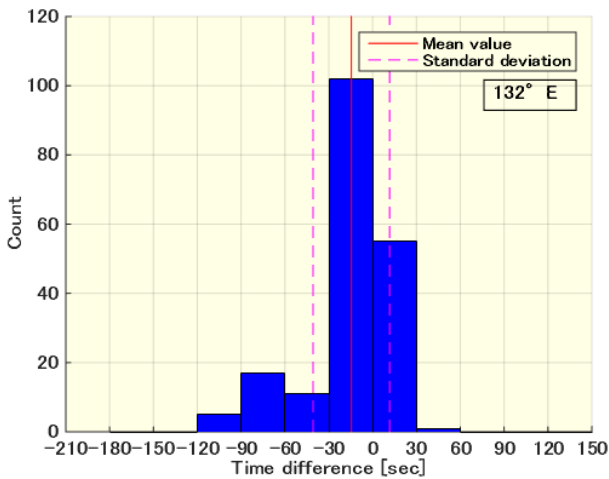


図-4 定点通過予測時刻の実際の値からの差 (東経 132 度)

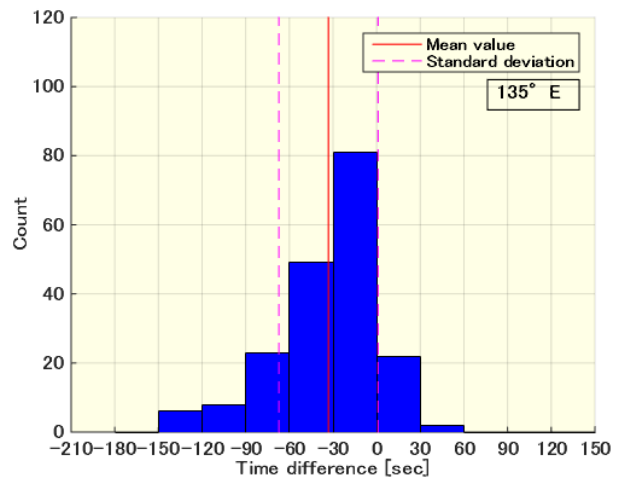


図-5 定点通過予測時刻の実際の値からの差 (東経 135 度)

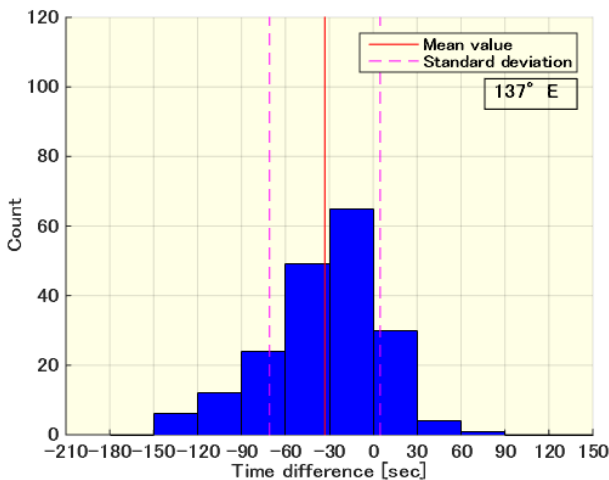


図-6 定点通過予測時刻の実際の値からの差 (東経 137 度)

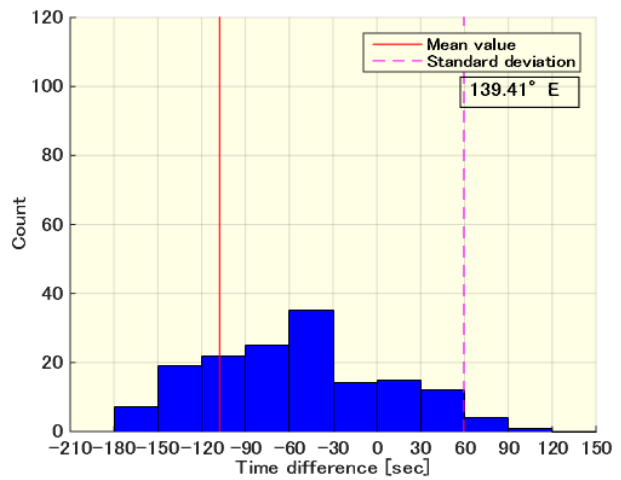


図-7 定点通過予測時刻の実際の値からの差 (東経 139.41 度)

A320 では CAS の軌道はおおよそ合うが気圧高度とマッハ数についてはずれが残る結果となった。一方、B738 では時間差の平均値は-10 秒程度までに留まっており、ばらつきさえ抑えられれば予測の正確性はより向上すると言える。軌道については、気圧高度およびマッハ数は比較的合っているものの CAS は上昇および降下において実際の軌道の方が大きくなっており、予測軌道は BADA の上限値 280 [kt] で頭打ちになっている。

b) 予測誤差の原因

到着時刻の予測誤差には予測軌道が実際の軌道から外れることによる誤差に加え、予測軌道自体の誤差も含まれる。これらの誤差の発生理由を以下にまとめる。

- 実際の飛行が FMS の飛行コマンドに従っていない。

現在、すべての便が FMS の飛行コマンド通りに飛行している訳ではないため、FMS のコマンドを正確に再現するツールを得たとしても評価においてこの原因による誤差は必ず含まれることとなる。ただし、FMS は機体の性能を考慮し経済効率の良い軌道を生成するため、将来的にはすべての機体が FMS のコマンドに従って飛行することが望ましいと考えられる。

- 軌道予測において参照する軌道の精度が低い。

図-10 から図-13 より実際の飛行について推定したマッハ数や CAS の軌道は大きく振動していることが分かる。これはレーダデータの精度に起因するものであると考えられる。飛行状態推定においてレーダデータの緯度・経度の誤差が対地速度を介して CAS の推定に影響を及ぼすことで、軌道予測において実際とは異なる CI の最適軌道を選択する可能性がある。この問題は GPS により得られた位置データを使用する、あるいは QAR (Quick Access Recorder) 等で記録された精度のよい対地速度データそのものを使用することにより解決することができる。

- 数値予報気象データと BADA 性能モデルおよび計算手法による誤差。

Open Data に格納されている時刻データはレーダの計測誤差を無視すれば真値と考えてよいので、予測軌道がよく合う場合でも定点通過時刻の予測誤差には最適軌道の飛行時間に起因する誤差が含まれる。軌道最適化において使用した気象データ、BADA モデルおよび最適化手法がこの差異を発生させる要因となる。気象データの気温や風速の誤差および BADA モデルに

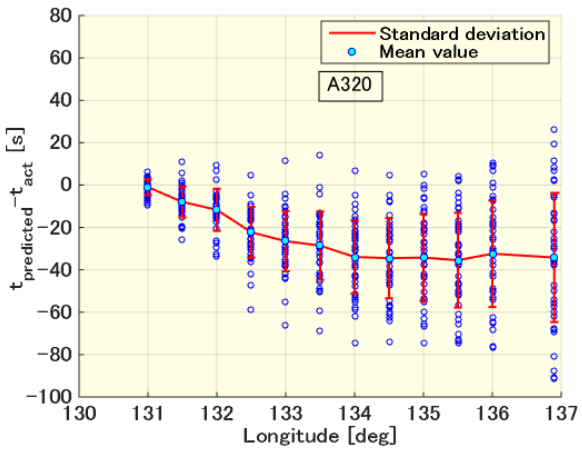


図-8 定点通過時刻の予測誤差 (A320, n=41)

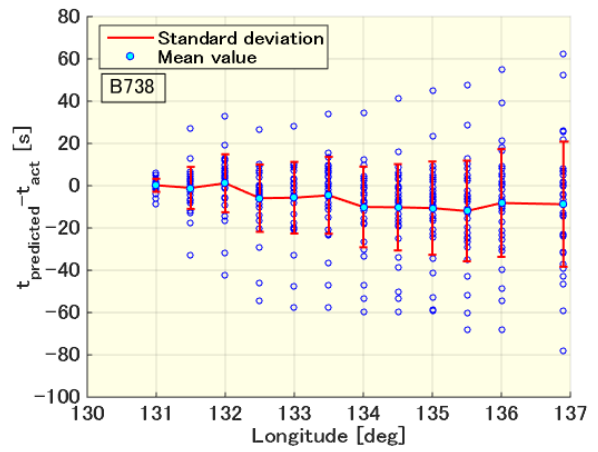


図-9 定点通過時刻の予測誤差 (B738, n=32)

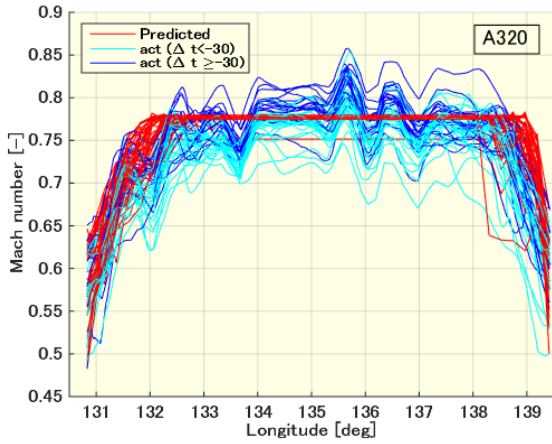


図-10 マッハ数 (A320)

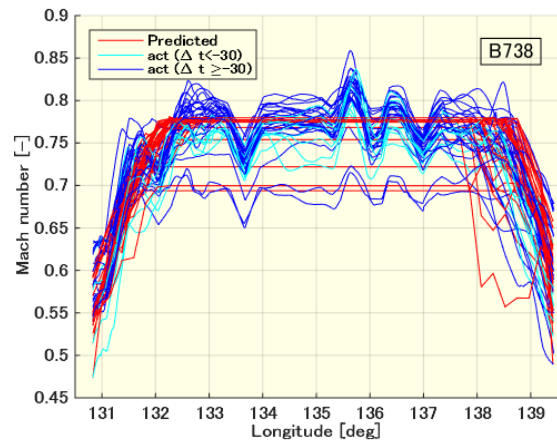


図-11 マッハ数 (B738)

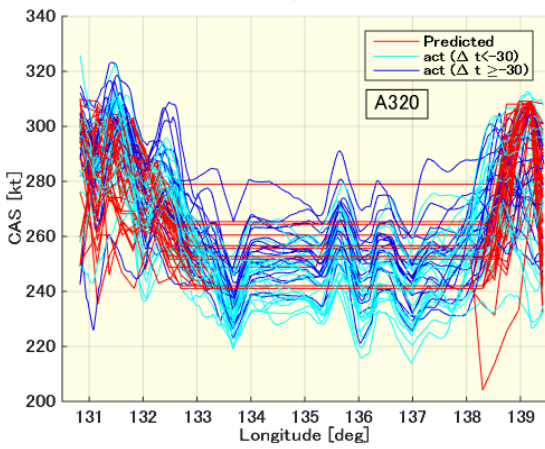


図-12 較正対気速度 (A320)

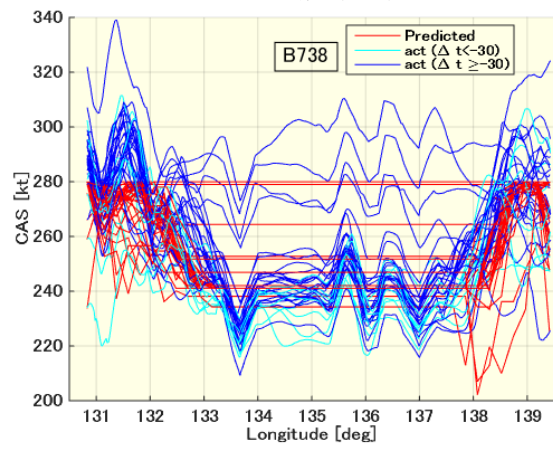


図-13 較正対気速度 (B738)

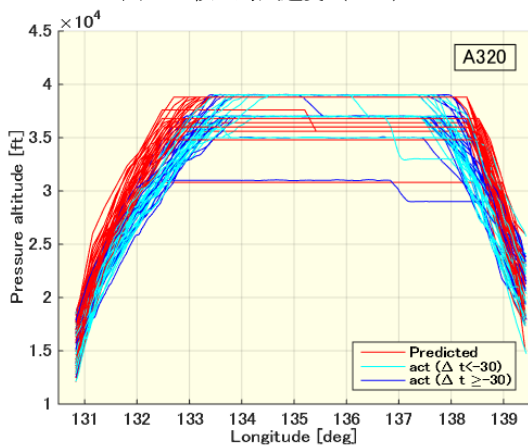


図-14 気圧高度 (A320)

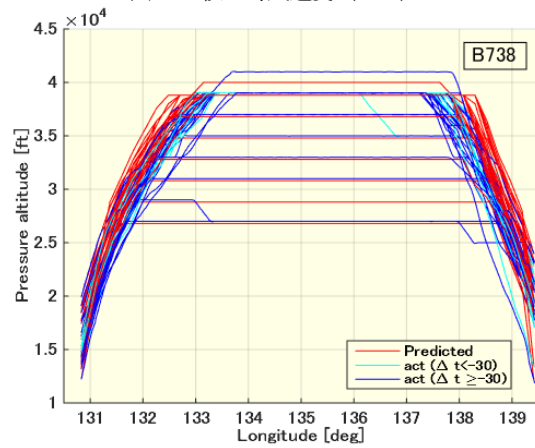


図-15 気圧高度 (B738)

おける空力や推力、燃料流量などのモデル化誤差は飛行時間と燃料ひいては機体質量の計算に影響し、BADAの標準運航規定は高度や速度に対する拘束条件に影響する。また、本研究では計算手法に大域的最適化手法に属する動的計画法を用いているため、FMSの解よりも良い、すなわち評価関数値がより小さい解を与える可能性がある。したがって、実際のCIに対応する重み係数を用いても軌道が一致しないCIの領域が存在する可能性がある⁹⁾。より精度の高い気象データおよび性能モデルを使用することができ、計算手法もFMSのロジックにより近いものへと修正できればこれらに起因する定点通過時刻の予測誤差は抑制されると考えられる。

5. まとめ

本研究では、将来の航空交通システムにおいて重要となる到着管理システムの研究開発に寄与することを目的とし、FMSの軌道を予測し到着時刻を精度よく予測することのできる解析ツールの開発を試みた。2014年5月と2015年1月の6日間にRNAV航空路Y23の一部を含む参照経路を飛行する4機種合計191便を対象として軌道予測を行ったところ、FLUTE通過予測時刻の実際の通過時刻からの差は平均で-33.1[s]、標準偏差は37.8[s]となり予測した到着時刻の方が短くなる傾向が見られた。較正対気速度の推定精度を上げるためより精度の高い飛行データを用いることでこれらの誤差はある程度抑制することが可能である。ただし、軌道最適化計算において使用した数値予報気象データおよびBADA性能モデルの精度、FMSの計算ロジックの再現については今後の課題である。本研究では軌道最適化に基づく軌道予測によりFMSの軌道を正確に再現でき定点通過時刻あるいは到着時刻を精度よく予測できる可能性を示した。

謝辞：気象庁数値予報データについては、京都大学生存圏研究所が公開しているホームページ上のデータを使用した。また、機体性能モデルについては、EUROCONTROLが開発、維持しているBADAモデルを使用した。これらの機関が提供する便宜に対して謝意を表す。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本航空機開発協会：民間航空機に関する市場予測 2017-2036, p. 28, 2017年3月, URL: http://www.jadc.jp/files/topics/118_ext_01_0.pdf
- 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 CARATS, Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems, 2010. URL: <http://www.mlit.go.jp/common/000123890.pdf>
- 3) 国土交通省、交通運輸技術開発推進制度：交通・輸送システムの安全性・信頼性向上・交通の利便性向上、円滑化、効率化と地域活力の向上、航空機の到着管理システムに関する研究、平成26年度～平成28年度, URL: <https://www.mlit.go.jp/common/001154232.pdf>, <http://www.mlit.go.jp/common/001194143.pdf>
- 4) Miyazawa, Y., Matsuda, H., Shigetomi, S., Harada, A., Kozuka, T., Wickramasinghe, N.K., Brown, M. and Fukuda, Y.: Potential Benefits of Arrival Time Assignment-Dynamic Programming Trajectory Optimization applied to the Tokyo International Airport, 11th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM Seminar 2015), Lisbon, 2015.
- 5) 樋口雄紀, 田村恵一, 小塚智之, 北詰有人, 宮沢与和, マーク・ブラウン：効率的な到着管理のためのFMSを利用した到着時刻制御の検討, 第54回飛行機シンポジウム, 富山, 2016年10月.
- 6) Jackson, Michael R. C.: Airborne Required Time of Arrival (RTA) Control and Integration with ATM, 7th AIAA Aviation, Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Belfast, September, 2007.
- 7) Williams, D. H. and Green, S. M.: Flight Evaluation of Center-TRACON Automation System Trajectory Prediction Process, NASA/TP-1998-208439, July, 1998.
- 8) Abramson, M. and Ali, K.: Integrating the Base of Aircraft Data (BADA) in CTAS Trajectory Synthesizer, NASA/TM-2012-216051, September, 2012.
- 9) Mercer, J., Bienert, N., Gomez, A., Hunt, S., Kraut, J., Martin, L., Morey, S., Green, S. M., Prevôt, T. and Wu, M.G.: The Impact of Trajectory Prediction Uncertainty on Air Traffic Controller Performance and Acceptability, 13th AIAA Aviation, Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Los Angeles, August, 2013.
- 10) Thippavong, D. P.: Top-of-Climb Matching Method for Reducing Aircraft Trajectory Prediction Errors, Journal of Aircraft, 53, 5 (2016), pp. 1211-1223.
- 11) 瀬之口敦, 白川昌之, 平林博子：運航速度データベースに基づく軌道予測の評価, 第15回電子航法研究所研究発表会, 平成27年6月.
- 12) 国土交通省航空局交通管制部：交通管制部の所有するデータの提供について, 2015年2月27日, URL: http://www.mlit.go.jp/report/press/kouku13_hh_000074.html
- 13) 岡恵, 福田豊, 上島一彦：航空交通の運用データの一般公開と活用, 第52回飛行機シンポジウム, 長崎, 2014年10月.
- 14) 重富貞成, 松田治樹, 小塚智之, 宮沢与和：CARATS Open Dataの精度に関する一検討, 航空宇宙技術, 15 (2016), pp. 15-21.
- 15) 京都大学生存圏研究所, 気象庁データ, URL: <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-original.html>
- 16) EUROCONTROL Experimental Center: User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.11,

- EEC Technical/Scientific Report, No.13/04/16-01, 2013.
- 17) 十時寛典, 小塚智之, 宮沢与和, 船曳孝三: 定期便フライトデータと気象庁数値予報 GPV データとの比較評価, 航空宇宙技術, 12 (2013), pp.57-63.
- 18) Harada, A., Miyamoto, Y., Miyazawa, Y. and Funabiki, K.: Accuracy Evaluation of an Aircraft Performance Model with Airliner Flight Data, Trans. JSASS Aerospace Technology Japan, 11 (2013), pp. 79-85.
- 19) 田村恵一, 原田明德, 樋口雄紀, 松田治樹, 宮沢与和: 貨物便の飛行データを用いた航空機の性能モデルに関する研究, 航空宇宙技術, 16 (2017), pp. 27-36.
- 20) 宮沢与和, 原田明德, ビクラマシンハ・ナヴィンダ, 宮本侑斗: 旅客機の性能モデルが最適巡航周期解に及ぼす影響, 航空宇宙技術, 12 (2013), pp. 99-105.

A Study on Precise Trajectory Prediction for Trajectory Management System

Akinori HARADA, Noboru TAKEICHI and Koichi OKA

Operational efficiency of current air traffic is expected to be improved by assigning the arrival time on each flight while maintaining each aircraft performance. Flight trajectory prediction is a key technology to predict the arrival time precisely. If the precise arrival time can be calculated on ground side, overall efficiency will increase by flying so as to achieve the optimal arrival time which calculated and assigned on multiple aircraft. This paper aims to develop a calculation tool which enables precise trajectory prediction. This tool should be capable of providing the trajectories identical with those generated by Flight Management System (FMS). In the tool, trajectory optimization calculation is implemented for various Cost Index (CI) values by dynamic programming, and the optimal trajectory closest to the actual one is adopted as the predicted trajectory. The appropriate objects are extracted from the radar tracking data for the analysis. The prediction accuracy of waypoint passing time is evaluated by comparing the flight time of predicted trajectories with the flight time of actual trajectories.