

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：26402

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15116

研究課題名（和文）航空交通流の四次元管理に資する実運航軌道の高精度予測

研究課題名（英文）Precise prediction of operational flight trajectory for four-dimensional management of air traffic flow

研究代表者

原田 明德（Harada, Akinori）

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号：70785112

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：最適飛行軌道は機上の飛行管理システムに入力されるコストインデックスCIにより変化する。本研究では燃料消費量と飛行時間を用いてCIに類似するパラメタを定義し、これを出発前あるいは上昇中の早い段階で分かる情報から推定するモデルを作成した。同モデルにより推定したパラメタから得られた最適軌道を軌道予測に用いることで500km程度先の点までの飛行時間を、季節的な変動によらず平均4秒、標準偏差2.6秒程度と精度よく予測可能であることが明らかとなった。予測に用いる最適軌道の精度向上および飛行時間の予測精度評価において、航空会社から提供を受けた実飛行データが大いに役立った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国の航空交通において時間ベースでの交通流管理の実現が求められている。航空機の定点通過時刻を地上側で精度良く予測するためには高精度な軌道予測技術が必要である。本研究では経済指標を評価関数として得た最適軌道を用いることで、比較的長距離先の点までの飛行時間を、季節的な変動によらず良好な精度で予測可能であることを明らかにした。本研究の成果は、航空交通流管理のための軌道予測の精度向上に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：The flight profiles generated by flight management systems (FMSs) are necessary for accurate prediction of flight time on the ground side. In this research, an accurate trajectory prediction method was developed with the aim of reproducing trajectories identical to those generated by FMSs on board. A significant feature of the proposed method is that the flight profiles of FMS can be replicated with sufficient accuracy using economic-optimal trajectories with a proposed parameter, pseudo cost index (PCI), determined based on the aircraft mass, calibrated airspeed, and wind velocities at the cruise altitude, which can be obtained at an early stage of flights.

The analysis results indicated that the flight time can be predicted with a high degree of accuracy by the proposed method even in the cases of comparatively long distances over 500 km while suppressing the effects by a seasonal variation on the flight time.

研究分野：航空交通管理

キーワード：航空交通流管理 軌道予測 定点通過時刻予測 軌道最適化 運航効率向上

### 1. 研究開始当初の背景

我が国において、国際化等の影響により今後も航空交通需要は伸び続けることが予想されており、交通量の増加に対応しつつ運航効率の向上に寄与する施策の一つとして到着便の交通流を時間ベースで管理するシステムが提案されている。2010年に国土交通省により策定されたロードマップ CARATS (将来航空交通システムの変革に向けた協調的行動)では、日本の領空および公海上空を一つの大きな統合された空域として捉え「全ての航空機の出発から到着までを一体的に管理」するとともに「全飛行フェーズにおいて時間管理を導入した4次元飛行軌道に沿った運用」を行うことが提言されている。交通量の多い空港へ向かう複数の機体に対し時間ベースで高度、速度等の軌道プロファイルを管理し適切な定点通過時刻を割り当てることができれば、不規則な混雑の発生を事前に回避できるため運航効率の向上が期待できる。定点通過時刻制御の可否は現在ほとんどすべての定期運航便で参照される機上コンピュータの軌道を、地上でいかに精度良く、かつ事前に計算できるかに委ねられている。したがって、飛行前に与えられる最小限の情報から飛行軌道を予測し、飛行経路上の指定点通過時刻を正確に予測する技術の確立が望まれる。実運航では経済効率の良い軌道を飛行することから、機上コンピュータが生成する軌道を、経済効率を最大化するように求めた最適軌道により再現することができると考え、この最適軌道を用いることで高精度な軌道予測が可能になると着想した。

### 2. 研究の目的

時間ベースでの航空交通流の管理により我が国の定期便の運航効率を向上させるという目標を達成するため、航空機の出発前に機上装置が生成する軌道プロファイルを地上側で精度良く計算するための軌道予測技術を確立させることが目的である。

### 3. 研究の方法

本研究にて提案した軌道予測の独創性は機上システムが生成する飛行コマンドを最適軌道を用いて再現する点にある。最適軌道は燃料コストと時間コストのトレードオフを決めるパラメータに対して求められるため、このパラメータを変化させると燃料と時間が異なる複数の最適軌道が得られる。このパラメータを本研究では擬似コストインデックス (CI) と呼称する。出発前あるいは飛行の早い段階で分かる情報からこの擬似CIを計算できれば、機上システムの飛行コマンドを事前に予測することができる。すなわち対地速度のプロファイルが事前に分かるので定点の通過時刻を予測することが可能である。

図1に擬似CIをモデル化する手順を示す。出発前に対地速度のプロファイルを予測することが目的であるので、モデル化においては航空会社より提供を受けた飛行データの対地速度を正解値として参照する。

実際に最も近い軌道を含む最適軌道群は「機上システムが直接運航コスト (Direct Operating Cost, DOC) を最小にするように飛行計画を行っている」という仮定の下、軌道最適化計算により求める。DOCは燃料コストと重み付き時間コストの総和であり、両者のトレードオフを決める重み係数をパラメータとして軌道最適化を行い、最適軌道群を得る。この中から正解値の対地速度に最も近くなる最適軌道を再近傍解として選択し、その最適軌道の燃料消費量と飛行時間の比を擬似CIとして、機体質量、巡航区間の較正対気速度、巡航区間の風速の3つでモデル化する。巡航区間の較正対気速度については、飛行計画の巡航高度および巡航マッハ数より出発前に既知であると仮定した。

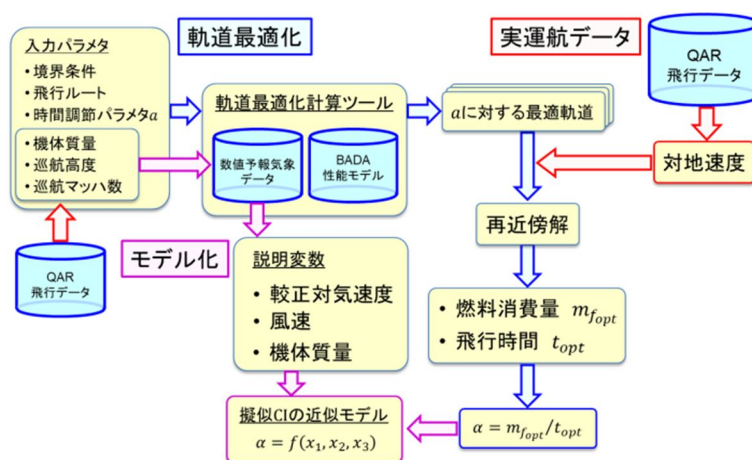


図1 擬似CIのモデル化の方法

#### 4. 研究成果

本研究では主に、国内主要路線の一つである福岡空港発東京国際空港行きの2017年度の便を解析の対象とした。機上システムの飛行コマンドを予測することが目的であるため、標準的な7通りの参照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た便を解析対象とした。図2と図3に、解析対象便の巡航区間における対地速度（平均値）と飛行時間の箱ひげ図を示す。箱の下端と上端はそれぞれ第1四分位数、第3四分位数であり、赤線は標本中央値である。箱の外にある上下の黒線は隣接値のうちの最小値と最大値を示しており、箱の上下端からこの線までひげが伸びている。外れ値の定義は箱の上下端から四分位数間範囲の1.5倍以上離れた値とし、赤い十字記号で示している。青い十字記号は平均値である。

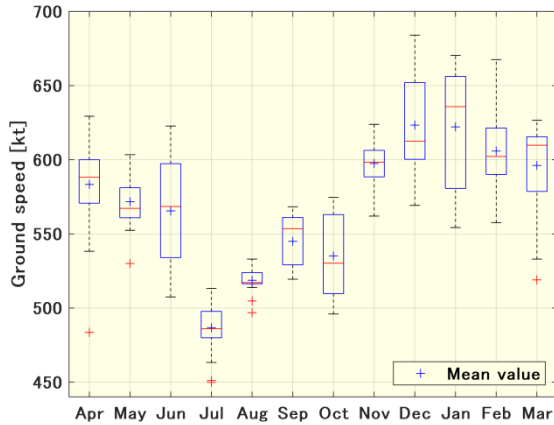


図2 巡航対地速度

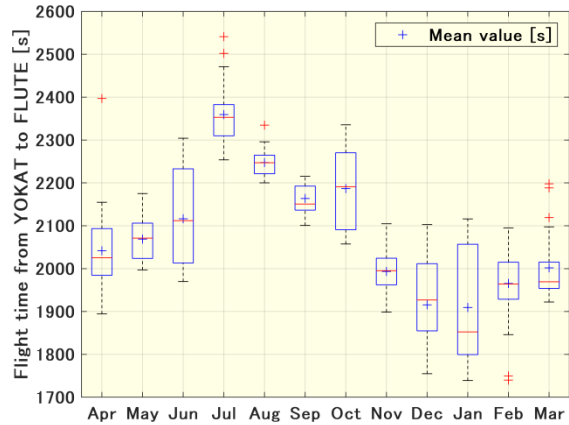


図3 対象区間の実飛行時間

風速が季節で変化することに伴い、年間を通して変化していることが分かる。また、ばらつきは1月が最も大きいこれはジェット気流の位置が変化することで経路上の風の強弱にばらつきがあることが一因である。

前述の方法により作成した擬似 CI の線形近似モデルを用いて飛行時間の予測を行った結果を図4および図5に示す。擬似 CI のモデル作成には2017年4、7、10月、2018年1月の4ヶ月分のデータを使用し、残り8ヶ月分を予測精度の検証に用いた。

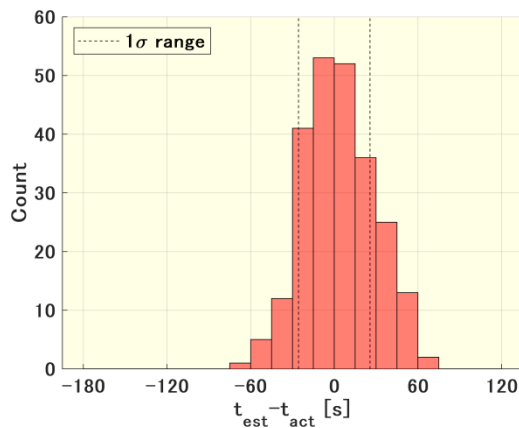


図4 飛行時間の予測誤差

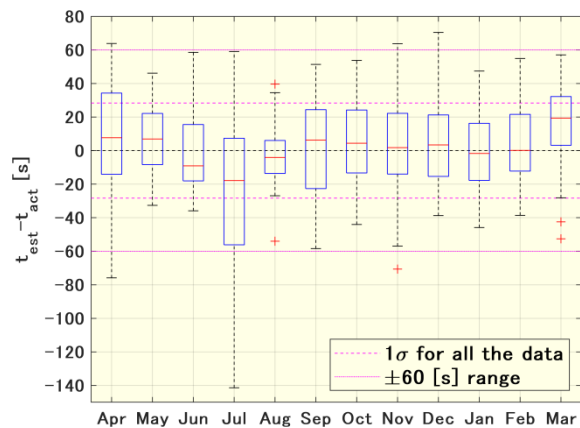


図5 各月の飛行時間の予測誤差

8ヶ月分の予測結果を示した図4について、平均値は3.7秒、標準偏差は25.6秒となった。全体の約98.8%について予測誤差は±60秒以内の範囲に収まった。1σの範囲に収まる便数は全体の66.7%となった。図5より各月の飛行時間の予測誤差は、全データに対する予測誤差の1σの範囲にほぼ収まっていることが分かる。大きな予測誤差となった7月の1便は飛行経路や巡航高度の変更はなかったものの巡航を終える前にマッハ数を変更しており、予測が困難なケースであった。

これらの結果より、本研究の提案手法により500km程度先の点までの飛行時間を、季節や便ごとの飛行状態の違いに起因するばらつきによらず精度よく予測可能であることが示された。本研究の成果は、我が国の航空交通流管理のための軌道予測の精度向上に貢献するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 横山大知, 原田明德	4. 巻 20
2. 論文標題 フライトシミュレータソフトX-Planeによる模擬飛行データの利用可能性の検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 154-165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.20.154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 菊谷尚暉, 入江康平, 原田明德
2. 発表標題 CARATSオープンデータとQAR飛行データを用いた高精度な飛行状態推定法の確立
3. 学会等名 CARATSオープンデータ活用促進フォーラム2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田明德, 武市昇
2. 発表標題 QAR飛行データを用いた運航効率の統計分析 - 飛行性能が運航コストに与える影響 -
3. 学会等名 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田明德, 武市昇
2. 発表標題 最適軌道に基づく軌道予測手法の開発とQAR飛行データによる精度検証
3. 学会等名 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 保阪和史
2. 発表標題 東京国際空港到着機の世界最適化に関する一考察
3. 学会等名 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仲村兼育
2. 発表標題 3パラメタ最適化による飛行軌道予測とQAR飛行データを用いた精度評価
3. 学会等名 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田明德, 武市昇, 岡宏一
2. 発表標題 QAR飛行データによる高精度軌道予測手法の開発
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第58回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山大知
2. 発表標題 フライトシミュレータソフトX-PLANEによる模擬飛行データの利用可能性の検証
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第58回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 保阪和史
2. 発表標題 東京国際空港到着機の現状分析と新たな制御方法の提案
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第58回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田明德, 武市昇, 岡宏一
2. 発表標題 最適軌道を用いた軌道予測の高精度化 第2報
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田明德, 武市昇
2. 発表標題 定点通過時刻予測のための最適軌道に基づく軌道予測手法
3. 学会等名 CARATSオープンデータ活用促進フォーラム2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. HARADA, N. TAKEICHI, K. OKA
2. 発表標題 Accuracy Improvement of Optimal Trajectory-based Trajectory Prediction using Estimated Aircraft Mass
3. 学会等名 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap <a href="https://researchmap.jp/a-harada/">https://researchmap.jp/a-harada/</a> 高知工科大学 所属教員等一覧 <a href="https://www.kochi-tech.ac.jp/profile/ja/harada-akinori.html">https://www.kochi-tech.ac.jp/profile/ja/harada-akinori.html</a> 一般社団法人 日本航空宇宙学会 航空交通管理部門 <a href="https://branch.jsass.or.jp/atmcom/">https://branch.jsass.or.jp/atmcom/</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------