

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14249

研究課題名(和文)四次元航法の飛行時間誤差管理の導入による極限までの高精度化

研究課題名(英文) Feasibility Study on Accuracy Improvement of 4D Trajectory Management through Flight Time Uncertainty Management

研究代表者

武市 昇 (Takeichi, Noboru)

首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：90371153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：四次元航法は将来の航空交通管理の中核をなす技術である。本研究では、不確かさの管理を導入することにより、四次元航法の精度を向上させる手法を明らかにする。実運航データの解析により不確かさモデルを構築し、シミュレーションおよび実データを用いた模擬実験によりその適用効果を検証した。一連の研究により、従来に無い高精度な不確かさモデルの構築、精度を向上させる経路設計手法などを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The four-dimensional trajectory management is expected to become one of the core technologies for future air traffic management. In this study, the methodologies and effectiveness of the introduction of the uncertainty management into the four-dimensional trajectory management is investigated. Through various analyses using actual trajectory data, the methodologies to develop an accurate uncertainty model as a function of meteorological condition, and to optimize the waypoint placement to improve the arrival time accuracy have been clarified.

研究分野：航空交通管理

キーワード：航空交通管理 軌道ベース運用 四次元航法 時間管理運航 不確かさ管理

1. 研究開始当初の背景

現在の航空交通では、航空機は全ての過程で航空管制官の指示に従い飛行し安全性を確保しているが、安全間隔を保つための迂回や低速飛行を強いられ、多くの燃料を浪費し遅延の蓄積が避けられない。一方、近年の航空機は自己位置の精密な把握と飛行速度の精密な制御が可能であり、三次元の位置および時刻の計四次元のパラメータで航空機の飛行を制御する「四次元航法」が可能である。現在、将来の航空交通システムが検討され、四次元航法はその中核をなす技術の一つとなる。四次元航法の飛行時間管理の精度が向上すれば、各々の航空機間の間隔の精密な制御も可能となり、高密度航空交通流を安全に運航できるはずである。風により次の目的地の通過時刻が「何秒間遅れる(早くなる)か」は予測できないが「何秒程度ずれ得るか」は予測できる。一方、次の目的地までの距離が大きい程より大きな飛行時間誤差を相殺できるが、風の影響でより大きな誤差が蓄積する。応募者は、飛行中に生じ得る誤差の大きさが予測でき、同時に制御しうる飛行時間が既知であれば、目的地の通過時刻の高精度化が可能であることを着想した。

2. 研究の目的

まず、飛行時間の不確かさのモデル化可能性を明らかにする。そして、距離・速度などの飛行条件、風向きとその強度など環境条件と飛行時間の不確かさとの相関を明らかにする。次に、飛行時間の不確かさモデルを用いて、それを最小化するようなウェイポイント配置の可能性、およびその最適な配置方法を明らかにする。そして、飛行時間の不確かさの管理の導入が四次元航法の管理にもたらす効果を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、理論解析、数値解析および実運航データ解析を組み合わせ研究を実施する。まず飛行時間の不確かさのモデルを実運航データの解析により構築する。次に、不確かさの理論解析および実運航データの解析により、様々な状況において正確に不確かさを予測するモデルを構築する。同時に、飛行時間の不確かさモデルを用いた数値解析によりウェイポイントの最適な配置方法を明らかにする。そして実運航データを用いた模擬実験によりその効果を実証する。

4. 研究成果

一連の研究により以下の成果を得た。

1. 実運航データの解析による飛行時間の不確かさのモデル化
 2. 飛行と気象状況を考慮した飛行時間不確かさ予測モデルの構築
- この研究では、以下の様な飛行時間の不確かさの理論式を導き、

$$\sigma_{GS}^2 = \left(1 + \left(\frac{W_c}{V_{TAStr}} \right)^2 \right) \sigma_w^2 + \left(\frac{M^2 \kappa R}{2V_{TAStr}} \right)^2 \sigma_T^2 + \left(\frac{M \kappa RT}{V_{TAStr}} \right)^2 \sigma_M^2$$

以下の一連の図1～図4に示すように、実運航データのデータへのクラスタリングと重回帰分析の適用により、そのパラメータを決定することにより、飛行と気象の状況を考慮した飛行時間の不確かさの予測を実現した。そして、その不確かさ予測モデルの特長を実運航データを用いた模擬実験により実証した。

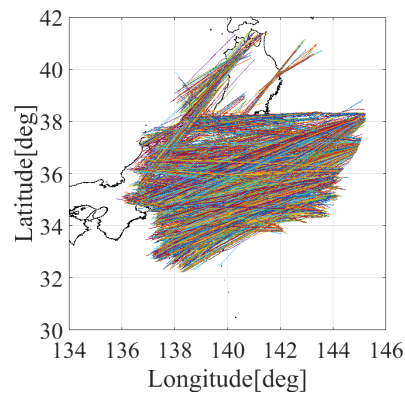


図1 抽出した軌道データ

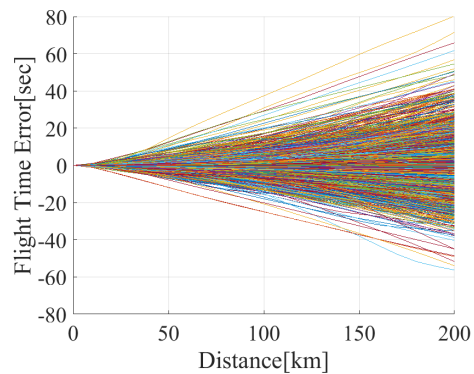


図2 飛行時間誤差の解析

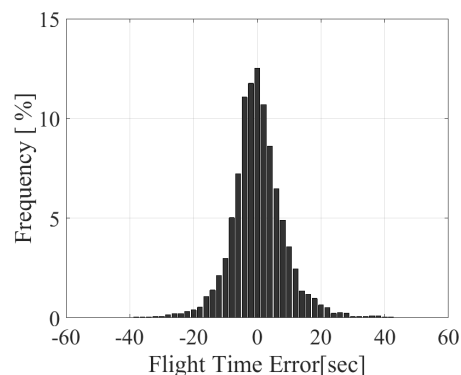


図3 飛行時間誤差のヒストグラム

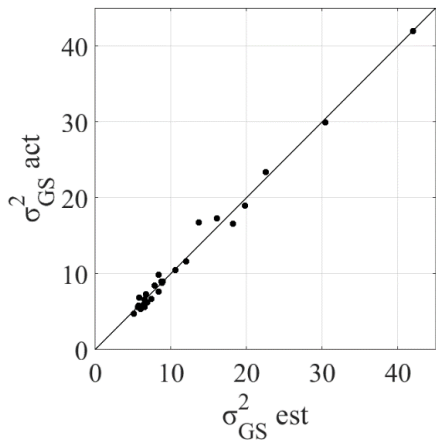


図4 重回帰分析

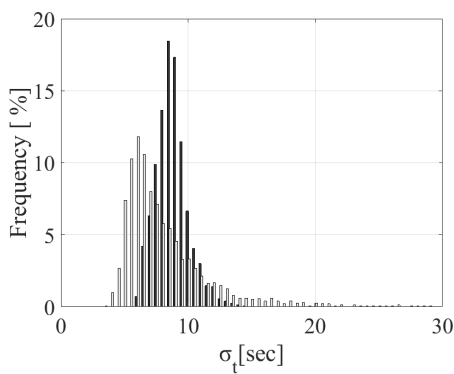
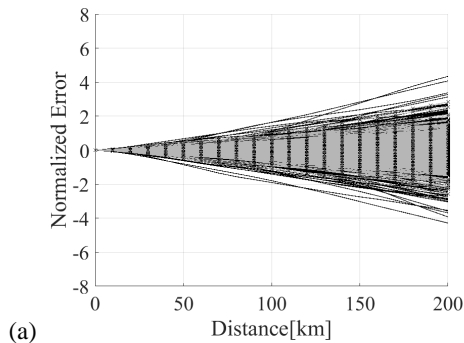
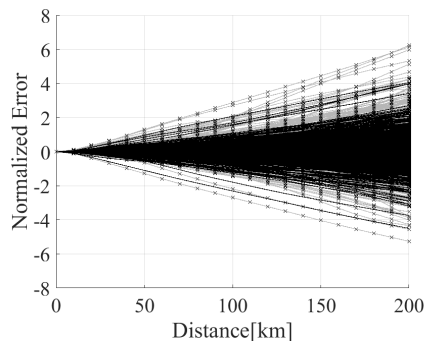


図5 従来の予測モデルと提案する予測モデルによる予測値のヒストグラム

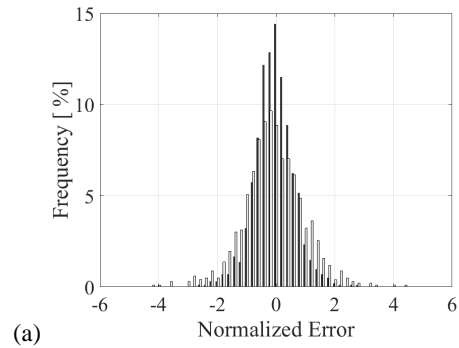


(a)

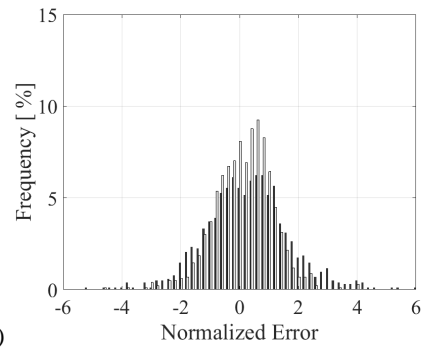


(b)

図6 実運航データを用いた模擬実験



(a)



(b)

図7 不確かさ予測の模擬実験：従来モデル

ルでは過大或いは過小な予測となる

3. ウェイポイント配置による到着時刻制御の高精度化

4. 非線形計画法を用いたウェイポイントの最適配置

この研究では、これまでに導いた不確かさモデルを用い、ウェイポイントを通過する度に漸化式に従うモデルの以下の様な最適化問題を導出した。

$$\min \text{STD}_{terminal} (D_1, D_2, \dots, D_N)$$

$$\text{STD}_{i+1} = \left(\int_{-\infty}^0 t^2 f_i(t - t^{ext} (D_{i+1} - D_i)) dt + \int_0^{\infty} t^2 f_i(t + t^{red} (D_{i+1} - D_i)) dt \right)^{\frac{1}{2}} + \sigma (D_{i+1} - D_i)$$

$$f_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \text{STD}_i^2}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\text{STD}_i^2}\right)$$

$$0 < D_1 < D_2 < \dots < D_N < D_{terminal}$$

これを非線形計画法の一つである逐次二次計画法を用いて数値的に解くことによりウェイポイント配置を最適化した。以下に成果を示す。

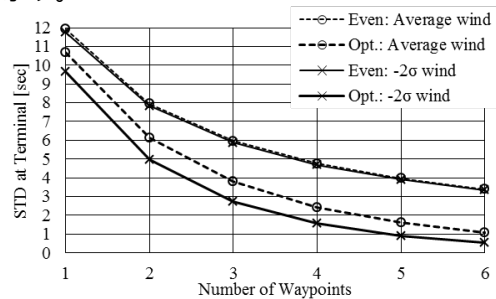


図8 到着時刻精度の変化

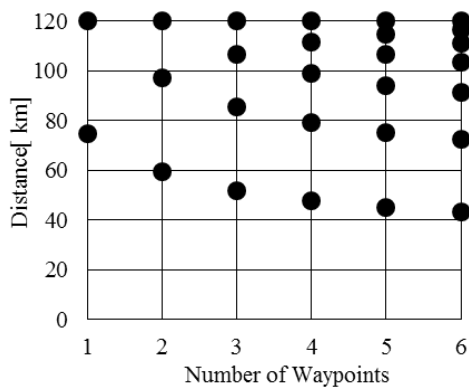


図9 ウェイポイントの最適位置

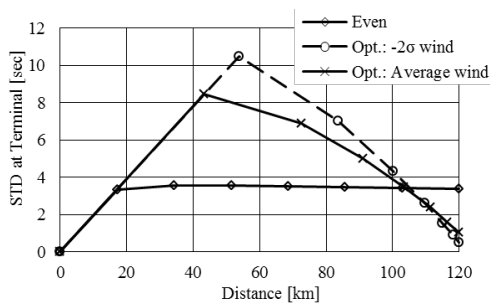


図10 飛行時間不確かさの履歴 (ウェイポイント6点の場合)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Takeichi, N., "Waypoint Position Optimization for Accurate Ground-Based Arrival Time Control of Aircraft," Journal of Advanced Transportation, 掲載決定済み.

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, Vol. 65, No. 3, pp. 130-134, 2017.

Takeichi, N., "Nominal Flight Time Optimization for Arrival Time Scheduling through Estimation/Resolution of Delay Accumulation," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 77, April 2017, Pages 433-443.

〔学会発表〕(計6件)

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, Czech, Sep. 13-17, 2015.

元谷章博, 武市昇, "四次元航法における飛行時間誤差への飛行速度の影響," 1D4, 日本航空宇宙学会第47期年会講演会, 東京, 2016年4月14~15日.

元谷章博, 武市昇, "機械学習を用いた飛行時間のばらつきのモデル化," 2B15, 日本航空宇宙学会第48期年会講演会, 東京, 2017年4月13~14日.

Takeichi, N., and Motodani, A., "Feasibility Study on Modeling of Cruise Flight Time Uncertainty," IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference, St. Petersburg, FL, Sep. 17-21, 2017.

Motodani, A. and Takeichi, N., "Prediction of Flight Time Uncertainty for 4D Trajectory Management," ENRI International Workshop on ATM/CNS, Tokyo, Japan, Nov. 14-16, 2017.

Takeichi, N., "Adaptive Prediction of Flight Time Uncertainty for Ground-Based 4D Trajectory Management," AIAA-2018-0423, AIAA Modeling and Simulation Technology Conference, Kissimmee, FL, 8-12 Jan. 2018.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武市 昇 (TAKEICHI, Noboru)

首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号: 90371153

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者