

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04544

研究課題名（和文）航空オープンデータを用いた空域交通流の数理的モデル化と制御

研究課題名（英文）Modeling and Control of Airspace Traffic Flow Using Aviation Open Data

研究代表者

平石 邦彦（Hiraishi, Kunihiko）

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：40251970

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：国土交通省航空局が公開している民間航空機の航跡データを用いることにより、以下の2つの航空交通流の数理モデルを構築し精度を評価した。(1) 航空機のセクター間移動を線形状態方程式でモデル化する。それを用いて近い将来の各セクター内の混雑度の予測を行うことができる。実データの航空容量と比較して精度を評価する。(2) 航跡データから重要点を抽出し、それらの点をリンクで結んだグラフを抽出する。つぎに、グラフの各リンク上の移動時間の確率分布を求め、得られた確率分布に従って各航空機がグラフ上を移動する離散事象シミュレーションモデルを構築する。実データの航空容量と飛行時間と比較することでモデルの精度を評価する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、交通流のモデル化に関し、待ち行列ネットワークなどのマクロモデルとマルチエージェントシミュレーションなどのミクロモデルの中間の粒度をもつメソモデルを開発し、その有用性を示したことにあり、メソモデルでは、個々のエージェント（空域交通量では各機体）は区別できる一方、エージェントのダイナミクスに関しては交通流全体の動作を抽象化したものを用いる。これにより、ミクロモデルよりも少ない計算量で個々のエージェントのふるまいを近似できる。社会的意義については、広い空間における人流や野生動物の行動経路の解析など、特定の経由点を与えない交通流の解析において、新たな手法を提案したことが挙げられる。

研究成果の概要（英文）：Using flight trajectory data provided by Japan Civil Aviation Bureau, MLIT, we developed the following two mathematical models for airspace traffic flow. (1) We model the inter-sector traffic flow by a linear state equation. Based on this model, we can predict traffic volume of each sector in the near future. Accuracy of the model is evaluated by comparing the prediction with actual traffic volume. (2) We first extract important points in the flight trajectory, and then compose graphs having these points connected by links. Next flight time distribution is computed for each link. Finally, we compose a discrete-event simulation model in which each aircraft moves on links following the flight time distribution. Accuracy of the model is evaluated by comparing the prediction with actual flight time and traffic volume.

研究分野：システム数理と応用

キーワード：交通流 予測モデル ビッグデータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機需要は世界的に増大しており、航空交通量の増大にどのように対応するかは、各国において大きな課題となっている。米国ではNextGen、欧州ではSESARといった、次世代の航空交通システムの構築に向けた長期計画が策定されている。我が国においても、国土交通省航空局がCARATS^{*1}という長期ビジョンを策定した。交通量の増大に対応するためには、空港の処理能力、航空管制方式、航法装置、飛行ルート設定など、さまざまな方法での改革が求められている。航空局は、大学・企業などの多くの研究者にCARATSに参画してもらうことを目的として、日本上空の民間航空機位置の時系列データを公開しており、それを用いた様々な研究開発が行われている。

*1 CARATS: Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems (航空交通システム変革に向けた協動的行動)。 http://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html

2. 研究の目的

CARATS オープンデータ (以下 CARATS データ) は 2012 年度からの奇数月 (2017 より毎月) における 1 週間の航跡データであり、各行が「時刻、航空機 ID、緯度、経度、高度、機種」からなる csv ファイルとして提供されている。時刻は 10 秒間隔である。対象となる航空機は福岡 FIR (Flight Information Region) 内の全民間航空機である。WEB 上で航跡を表示するサイトである Flightradar24^{*2} は航空機自体が位置情報を発信する ADS-B のデータを用いているのに対し、CARATS データはレーダーにより取得された位置データを用いているという違いがある。空域は FIR、ACC (Area Control Center)、セクター (sector) という階層で細分化されている。このうちセクターが航空管制を行う最小単位であり、その中に存在できる航空機の最大数 (セクター容量) が決められている。容量を超えると異常接近や航空管制のミスなどのリスクが高まる。したがって、航空交通量をセクター容量以下に抑える航空管制が必要である。本研究の目的は、航跡データから、空域における交通流のダイナミクスを表現する数理モデルを構築することである。構築したモデルを用いることで混雑度の予測を行い、それに基づいた空域交通流の制御を行うことが可能になる。

*2 Flightradar24: <https://www.flightradar24.com/>

3. 研究の方法

2 種類の数理モデルを構築する。

(1) 線形状態方程式表現を用いた空域交通流モデル

以下の手順でモデルを構築する。

研究代表者らによる既存結果であるポイントごとのセクター判定アルゴリズムを適用することにより、各時刻におけるセクター内航空機数からなるベクトル (空域スナップショット) を求める。

スナップショットを状態変数ベクトルとするような離散時間の線形状態方程式を導出し、状態遷移行列を状態変数ベクトルの時系列から推定する。このとき、多数 (数百 ~ 数千) の状態遷移行列から代表値を抽出するためにクラスタリングの手法を適用する。

状況に応じて誤差を最小にする状態遷移行列を選択するアルゴリズムを開発する。

モデルから計算される状態変数の値を実データと比較することにより、誤差を評価する。

(2) 軌道クラスタリングに基づいた空域交通流モデル

以下の手順でモデルを構築する。

空域における代表的経路を、軌跡クラスタリングの手法を適用してグラフの形で抽出する。

実経路とグラフ上の経路の誤差を定量的に評価する。

グラフ上の各リンクを移動する時間の確率分布を求める。

グラフの各リンク上を各航空機が で求めた確率分布で移動する離散事象シミュレーションモデルを構築する。

実データと比較することで、空域混雑度および各航空機の到着時刻の誤差を評価する。

4 . 研究成果

2つのモデル構築に関し、得られた成果について述べる。

(1) 線形状態方程式表現を用いた空域交通流モデルの構築

3で述べた研究手法に基づき、与えられた航跡データから線形状態方程式モデルを構築するためのワークフローを作成した。図1はセクター間交通量モデルを示したものである。このモデルからつぎの線形状態方程式を構成する。

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k)$$

ここで、 k は離散時刻、 $x(k)$ は時刻 k における状態変数ベクトルで、各セクター内に存在する航空機数を成分にもつ。 $A(k)$ は状態遷移行列で空域のダイナミクスを表す。 $u(k)$ は時刻 k における入力ベクトルで、対象とする空域外、あるいは、空港から新たに空域に流入する航空機数を表す。 $B(k)$ は流入した航空機のインターバル $[k, k+1)$ におけるダイナミクスを表す。行列 A 、 B は状況により変化する。

航跡データからセクター間移動イベントを抽出し、多数の行列 A 、 B を抽出する。その中から代表元を選ぶために、K-Means クラスタリングを適用する。各時刻 k における行列 $A(k)$ 、 $B(k)$ を選択する方法として2つの方法を提案した。方法1は、時刻 k において $x(k-1)$ から $x(k)$ を最も精度よく求められる行列（最適行列） A^* 、 B^* を全探索により求め、それを $x(k+1)$ の推定に用いるというものであり、状況の変化が緩やかならば有効な手法である。方法2は過去 n ステップの最適行列の履歴が与えられたときに、ある行列が最適行列として選択される条件付き確率 $p_A(A_0 | A_1, \dots, A_n)$ 、 $p_B(B_0 | B_1, \dots, B_n)$ を求め、それらを用いて次式により $x(k+1)$ を計算する。

$$x(k+1) = \sum_{A_i} p_A(A_i | A^*(k), \dots, A^*(k-n+1)) \cdot A_i x(k) + \sum_{B_j} p_B(B_j | B^*(k), \dots, B^*(k-n+1)) \cdot B_j u(k)$$

モデルを構築するときのパラメータは2つあり、離散時刻の間隔 d と状態遷移ベクトルのクラスタ数 K である。様々なパラメータ値で2つの手法を比較したところ、 d が小さい領域では手法2が、また K が大きい領域では手法1がすぐれているとの傾向が見られた。

上記の結果は、つぎの論文にまとめられている。

R. Mishima, K. Hiraishi, Modeling Inter-Sector Air Traffic Flow and Sector Demand Prediction, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E105-A, No.10, pp. 1413-1420 (2022).

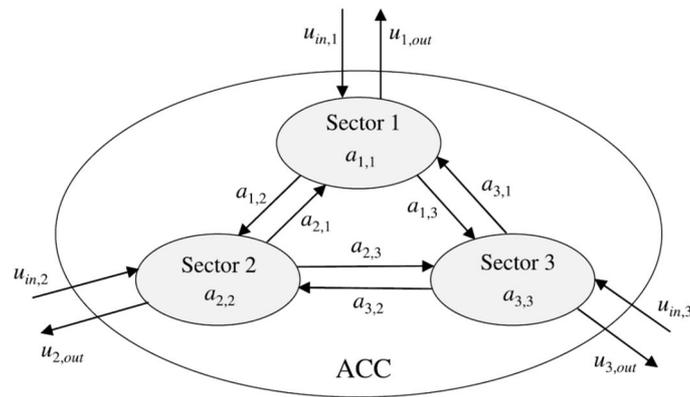


図1 . セクター間交通量モデル

(2) 軌跡クラスタリングに基づいた空域交通流モデルの構築

最初に、空域における航空機の航跡データから、主要な経路をグラフの形で抽出する手法を開発した。手法は2つあり、最初の手法は軌跡データの密度ベースクラスタリング(density-based clustering)に基づく手法、2番目の手法は空間分割と軌跡クラスタリング(trjectory-based clustering)を組み合わせた方法であり、図2に示す羽田空港周辺の航跡データに適用した結果、図3に示すようなグラフ(抽象化ルートグラフ)が得られた。つぎに、抽象化ルートグラフの各リンクについて、リンクの始点から終点までの移動に要する時間の確率分布を求めた。この2つの情報から、航空機の動きを再現する離散事象シミュレーションモデルを構築した(図4)。シミュレーションモデル上では、各航空機と1対1に対応するエージェントが存在する。各エージェントは抽象化グラフ上での経路情報を持ち、各エージェントは、リンク上を前述の通過時間の確率分布に従って移動する。このモデルは、個々のエージェントは区別できるが、経路およびダイナミクスは抽象化したものを用いるという、マイクロモデルとマクロモデルの中間の粒度を持つメソモデルに位置付けられる。モデルの精度は、空域混雑度(対象空域に存在する航空機数)および各航空機のフライト時間(対象空域内に存在する時間)について実データとの差により評価した。空域混雑度については平均誤差が1前後という良好な結果が得られた。フライト時間については精度よく再現される場合もあったが、一度誤差が発生すると、それが後続の航空機に伝搬する傾向も見られた。

本研究で提案した手法は、航空機の軌跡だけでなく、ウェイポイント情報が得られない軌跡データ(例: 広い空間における人流)のモデル化に適用可能である。

これらの結果はつぎの2つの論文にまとめ、さらに論文誌に投稿中である。。

Kenji Uehara, Kunihiko Hiraishi, A Framework for Extracting Abstracted Route Graphs Toward Air Traffic Flow Modeling, Proc. 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2022), pp. 1564-1569 (October 9-12, 2022, Online & Prague, Czech Republic).

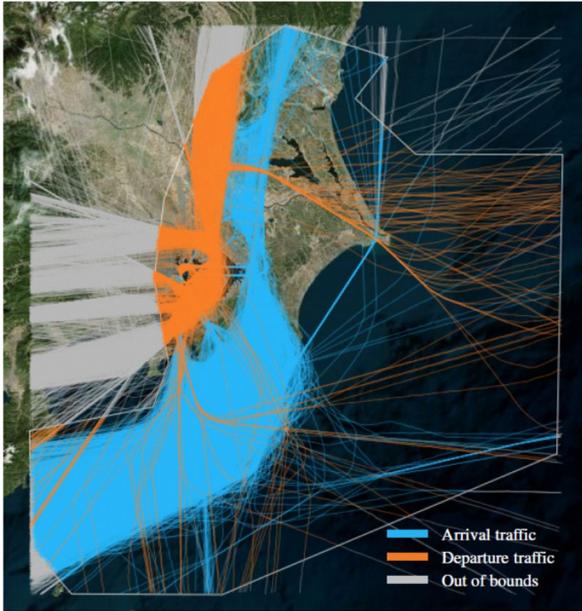


図 2 . 航跡データ

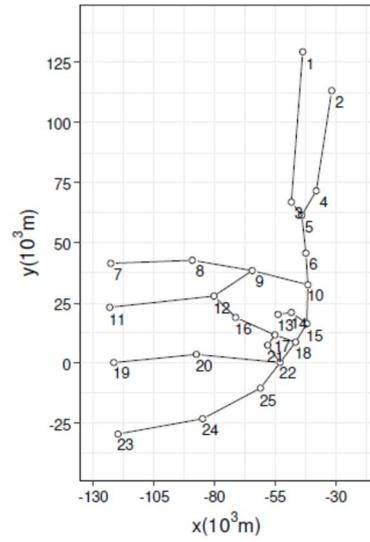


図 3 . 抽象化ルートグラフ(Departure)

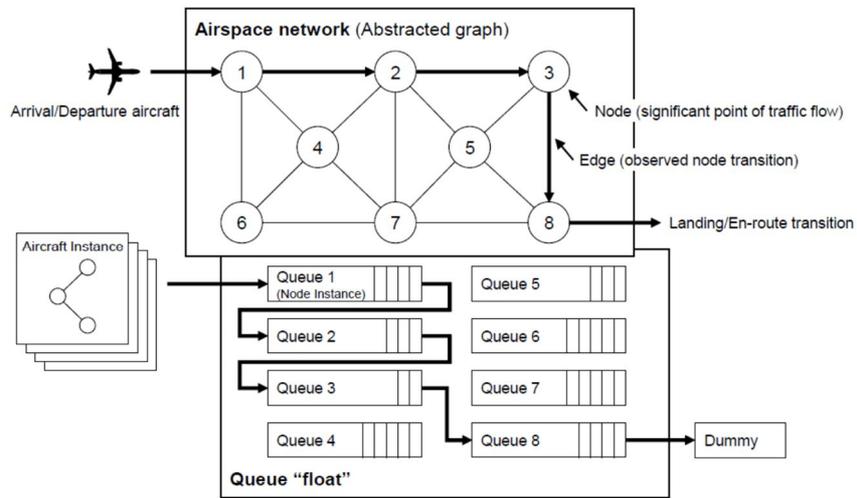


図 4 . 離散事象シミュレーションモデルの概要

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 MISHIMA Ryosuke, HIRAIISHI Kunihiko	4. 巻 E105.A
2. 論文標題 Modeling Inter-Sector Air Traffic Flow and Sector Demand Prediction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1413～1420
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2021EAP1147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kenji Uehara, Kunihiko Hiraishi	4. 巻 -
2. 論文標題 An Efficient Mesoscopic Modeling Method for Large Volume Traffic Flow Using Process Mining Techniques	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. IEEE CSDE & i-COSTE 2021	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CSDE53843.2021.9718441	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 -
1. 著者名 上原 健嗣, 平石 邦彦	4. 巻 MSS2021-51
2. 論文標題 プロセスマイニングを応用した大容量交通流の Mesoscopicモデル化手法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 112-117
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 三島諒亮, 平石邦彦	4. 巻 MSS2020-49
2. 論文標題 航空オープンデータを用いたセクター間交通流のモデル化と混雑度予測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 27-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 上原 健嗣, 平石 邦彦
2. 発表標題 固定経路のない交通流データにおける主要経路抽出手法
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Uehara, Kunihiro Hiraishi
2. 発表標題 A Framework for Extracting Abstracted Route Graphs Toward Air Traffic Flow Modeling
3. 学会等名 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Uehara, Kunihiro Hiraishi
2. 発表標題 An Efficient Mesoscopic Modeling Method for Large Volume Traffic Flow Using Process Mining Techniques
3. 学会等名 IEEE CSDE & i-COSTE 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上原 健嗣, 平石 邦彦
2. 発表標題 プロセスマイニング技術を応用した空港面交通流のメソスコピックモデル化手法
3. 学会等名 CARATSオープンデータ活用促進フォーラム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上原 健嗣, 平石 邦彦
2. 発表標題 プロセスマイニングを応用した大容量交通流の Mesoscopicモデル化手法
3. 学会等名 電子情報通信学会システム数理と応用研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三島諒亮, 平石邦彦
2. 発表標題 航空オープンデータを用いたセクター間交通流のモデル化と混雑度予測
3. 学会等名 電子情報通信学会システム数理と応用研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------