

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14746

研究課題名（和文）将来の航空交通管理のための到着・出発機合流最適化アルゴリズムに関する研究

研究課題名（英文）Arrival and Departure Merging Optimization Algorithm for Future Air Traffic Management

研究代表者

虎谷 大地 (Daichi, Toratani)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・電子航法研究所・研究員

研究者番号：10780976

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）：本研究では、空港周辺の空域における航空機の運航を最適化するアルゴリズムの開発を行った。空港周辺空域の航空機運航を最適化するためには、各航空機の軌道の最適化と、到着・出発順序の最適化を同時に行う必要がある。本研究課題では航空機の軌道と順序を同時に最適化するアルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムは羽田空港周辺を模擬したシミュレーションで検証された。シミュレーション結果より、本研究で開発した最適化アルゴリズムを用いることで、各航空機の運航を空域全体で効率化することができることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で扱った、空港に離発着する航空機の軌道と順序の最適化は、現実の世界においては航空管制官の支援ツールのアルゴリズムとして活用される。航空機の最適な軌道と順序を管制官に示すことで、増加し続ける管制官の作業負担を緩和することが期待される。

また軌道と順序を同時に最適化する問題は、連続システム（軌道）と離散システム（順序）を同時に最適化する混合システム最適化問題の一種である。汎用的な混合システム最適化手法はまだ確立されていないため、本研究課題で開発したアルゴリズムは、最適化の分野において学術的意義のある研究である。

研究成果の概要（英文）：This study addressed an optimization algorithm for aircraft operations in a terminal airspace. To optimize aircraft operations in a terminal airspace, the algorithm optimizes the arrival/departure aircraft trajectories and arrival/departure sequence simultaneously. In this study, the optimization algorithm for traffic flow including arrival/departure aircraft was developed. The developed algorithm was reviewed by using a fast-time simulator environment simulating the terminal airspace around Haneda airport. The simulation results showed that the developed algorithm is capable of optimizing the arrival/departure traffic flow in the terminal airspace.

研究分野：航空交通工学

キーワード：航空交通管理 軌道最適化 順序最適化 AMAN DMAN 混合システム最適化 合流最適化

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 航空管制の現場における背景

世界的に増加し続ける航空需要に伴い、航空管制官が取り扱う交通量が増加しており、その結果、管制官の作業負荷も増加し続けている。現状の航空交通の安全性を保ちつつ交通量の増加に対応していくため、管制官の業務を支援する管制支援ツールの開発が世界的に進められている。管制支援ツールのひとつである到着管理システム（Arrival manager: AMAN）は、様々な方角から飛来し、適切な間隔を保ちつつ1列に合流して着陸していく航空機の、円滑な到着交通流の形成を支援するツールである。具体的には、従来、管制官が経験に基づいて決定していた航空機の到着順序を計算し管制官に示すことで、管制官の負荷を軽減するというものである。AMANは既に実用化されつつあるが、さらなる発展として出発管理システム（Departure manager: DMAN）との連携や、到着航空機を平行滑走路の左右どちらに着陸させるか（滑走路割当て）も含めた支援等が求められている。そこでDMANとの連携や、滑走路割当て等を含んだ到着交通流の最適化が可能なアルゴリズムの開発が求められている。

(2) 最適化分野における学術的な背景

到着交通流の合流を最適化する問題は、複数の航空機の軌道と到着順序を同時に最適化する問題である（図1）。ここで航空機の軌道は連続システムである一方、到着順序は離散システムであるため、航空機の合流最適化問題は、連続システムと離散システムが混在する混合システム最適化問題の一種となる。混合システム最適化問題に対する一般的な解法は確立されておらず、解くこと自体が困難な問題である。しかしながら、現実存在するシステムの多くは混合システムであり、混合システムを最適化する手法の開発は当該分野における学術的意義が深い。申請者は過去に到着航空機の合流を最適化する混合システム最適化アルゴリズムを開発したが、そのアルゴリズムは到着航空機しか扱うことができず、かつ1つの合流点しか設定できないものであった。上記1.

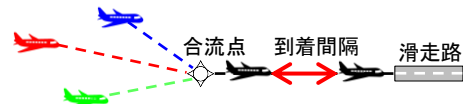


図1. 合流最適化問題のイメージ図

（1）で述べたように、合流最適化アルゴリズムにはDMANとの連携や滑走路割当て等といった、様々な追加項目の最適化も求められている。これらの項目は最適化問題においては、新たな離散パラメータが追加されることになり、解くべき最適化問題がより複雑になることを意味する。そこで本研究では、合流最適化アルゴリズムを拡張することにより、より複雑な混合システム最適化問題を解くことができる最適化アルゴリズムの開発を目指した。

（1）で述べたように、合流最適化アルゴリズムにはDMANとの連携や滑走路割当て等といった、様々な追加項目の最適化も求められている。これらの項目は最適化問題においては、新たな離散パラメータが追加されることになり、解くべき最適化問題がより複雑になることを意味する。そこで本研究では、合流最適化アルゴリズムを拡張することにより、より複雑な混合システム最適化問題を解くことができる最適化アルゴリズムの開発を目指した。

2. 研究の目的

(1) 現実の問題に対応可能な合流最適化アルゴリズムの開発

本研究では、現実の問題に対応可能な、追加の最適化パラメータも同時に最適化可能な合流最適化アルゴリズムの開発を目的とした。研究開始当初は主に、出発航空機の順序づけも同時に最適化することを想定していたが、その後の調査により、その他にも合流最適化問題に取り込むべき項目が挙げられたので、本研究では以下を同時に最適化可能な合流最適化アルゴリズムを開発することとした。

① 出発順序の最適化

到着機と出発機は同一、または影響し合う滑走路を使用して離発着する。そのため、到着機と出発機間も適切な間隔を保ちつつ、順序を最適化する必要がある。出発順序は離散システムであるため、合流最適化問題においては離散パラメータが追加されることになる。

② 滑走路処理容量の最大化

従来の合流最適化手法では、最適化の評価関数に「各航空機の飛行時間の合計最小化」や、「各航空機の燃料消費量の合計最小化」が用いられていた。これらの評価関数は最適化問題としては扱いやすいが、現実問題においては「滑走路処理容量（どれだけ多くの航空機を離発着させられるか）最大化」が求められており、最適化問題と現実問題が必ずしも合致してはいなかった。滑走路処理容量最大化は、合流最適化問題においては数学的表現が困難な評価関数であり、その導入には何らかの工夫が求められる。

③ 滑走路割当ての最適化+滑走路処理容量最大化

多くの大規模空港は平行に並んだ滑走路を有しており、どちらの滑走路に航空機を着陸させるかを柔軟に運用することで、滑走路運用の効率を向上させることができる。滑走路の割当ては、左右どちらの滑走路を選択するかという離散的な意思決定となるため、合流最適化問題においては追加の離散パラメータとなる。特に滑走路割当ての最適化は、上記②と組み合わせることで多くの便益が得られる。

以上の項目と、到着航空機の軌道と順序はいずれも密接な関係があるため、全ての項目は同時に最適化される必要がある。すなわち、最初に滑走路の割当てを決定してから順序を決定するような段階的な準最適化を行うのではなく、本研究では全ての項目を同時に最適化することが可能な最適化アルゴリズムの開発を目的とした。

(2) 開発した最適化アルゴリズムの現実的な問題設定における検証

開発した最適化アルゴリズムの性能を評価するためには、航空機の合流を模擬する数値シミュレーションが行われる。先行研究においては、平面上を移動する簡易的な航空機モデルを用いたシミュレーションが主に行われていたが、開発した最適化アルゴリズムが現実的な問題に対しても有効かを評価するためには、航空機の運動方程式に基づく航空機モデルや、現実の空港や空域の構成を反映したシミュレーション条件を用いる必要がある。そこで本研究では、現実的な空域における交通流を模擬するシミュレーション環境を構築し、開発した最適化アルゴリズムの評価に用いた。

3. 研究の方法

(1) 現実の問題に対応可能な合流最適化アルゴリズムの開発

研究の方法としては、申請者が先行研究で開発した合流最適化アルゴリズム^[1]を拡張することで、目的とするアルゴリズムを開発した。先行研究のアルゴリズムでは、図1の合流最適化問題を、横軸を合流点への到着時間、縦軸を各航空機の軌道の評価関数値で表した、評価関数曲線(図2)で表現される最適化問題に変換して問題を解いていた。評価関数曲線上で表現された最適化問題は、評価関数曲線を区分的に線形化することで、混合整数計画法(Mixed integer linear programming: MILP)を用いて解くことが可能である。そこで、新たに導入する最適化の項目

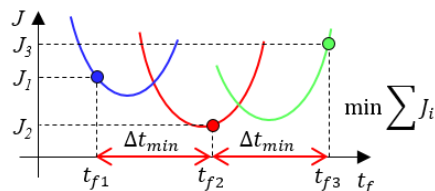


図2. 評価関数曲線上の合流最適化問題

(2. (1) の①~③)を考慮した上で評価関数曲線への変換を行うことで、合流最適化アルゴリズムを①~③に対応可能なアルゴリズムに拡張する。以下に具体的な拡張方法を示す。

① 出発順序の最適化

従来の合流最適化アルゴリズムでは到着機のみでの評価関数曲線をモデリングしており、かつ全ての航空機間に同じ間隔を保つ制約条件を与えていた。出発機が出発時間を遅らせる場合、地上待機が行われるため到着機とは異なる評価関数曲線となるため、出発航空機が地上待機を行う際の評価関数曲線のモデリングを行った。また、到着機と出発機、出発機どうし間に求められる間隔は到着機どうしの間隔と異なるため、航空機の種類ごとに異なる間隔の制約条件を付加できるように最適化アルゴリズムを改良した。

② 滑走路処理容量の最大化

滑走路処理容量は正確には単位時間あたりの離発着回数で定義されるが、元々の合流最適化問題にはそのようなパラメータがない。そこで滑走路処理容量を何らかの方法で数学的に表現し、合流最適化問題の評価関数として導入する必要がある。滑走路処理容量を最大化するには、到着列の最後の航空機の到着時間を最小化するという方法が挙げられる。しかしながら、実際に最適化計算をするまではどの航空機が順序の最後になるかは不明であり、直接的に最後尾の航空機の到着時間を最小化することはできない。そこで本研究では、疑似的な航空機を評価関数曲線に追加し(図3)、全ての航空機は疑似航空機より早く到着するという制約条件を追加した。これにより、必ず最後尾にくる疑似航空機の到着時間を最小化することで、最後に到着する航空機が不明であっても間接的に滑走路処理容量を最大化することが可能となった。疑似航空機の導入は出発機が混在していても可能となるため、この手法は①と同時に導入可能である。

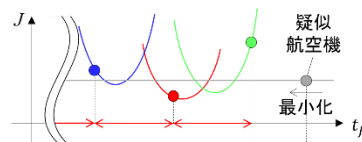


図3. 疑似航空機の導入

③ 滑走路割当ての最適化+滑走路処理容量最大化

航空機の合流と滑走路割当てを同時に最適化する手法は、先行研究^[2]により提案されていた。しかしながら、その手法は②と両立することができなかつたため、①~③を同時に最適化するためには何らかの工夫が必要であった。そこで一方の滑走路に到着する場合の評価関数曲線を第四象限側に反転することで、滑走路割当てでも同時に最適化しつつ、滑走路処理容量を最大化可能な評価関数曲線を提案した(図4)。加えて、疑似航空機の評価関数曲線を二次形式にすることで、両方の合流点における最後尾の航空機の到着時間が、平等に最小化されるように改善を行った。

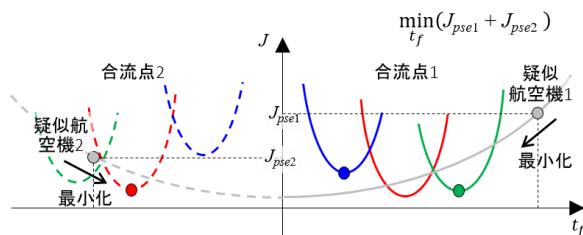


図4. 滑走路処理容量を最大化しつつ滑走路割当て最大化が可能な評価関数曲線

(2) 開発した最適化アルゴリズムの現実的な問題設定における検証

現実的な問題設定で検証用のシミュレーションを行うためには、現実的な航空機モデルを用いた軌道計算と、対象となる空港とその周辺空域をシミュレーション条件として適切に設定す

る必要がある。現実的な航空機モデルを用いた最適な軌道計算方法としては、Wickramasingheら [3] によって欧州 EUROCONTROL 開発の航空機性能モデル Base of Aircraft Data (BADA) や、気象庁提供の数値気象予報データを組み合わせた方法が提案されている。これらのデータは実際の運航でも用いられるものであり、非常に現実的な航空機の最適軌道計算が可能となったが、現実の空域の影響が考慮されていなかった。実際の管制において管制官は、予め区切られた空域の中で航空機をコントロールして、航空機間の間隔維持や到着順序づけを行う。これらの空域は空港や航空路の配置によりそれぞれ固有の形状をしているため、航空機の軌道最適化は、空域による経路の制約を柔軟に設定できる必要がある。しかしながら、軌道最適化に広く用いられている最適制御では、柔軟な経路制約を直接的に扱うことが困難であるため、空域の制約を導入するために何らかの工夫が必要となる。本研究では障害物配置法⁴⁾と呼ばれる、コースを周回するレースカーの軌道を最適化するために開発された手法を導入して、複雑な形状の空域による制約を表現した。障害物配置法は、 p -ノルムと呼ばれる円から正方形に変化する関数で定義された障害物を複数配置することで、柔軟な経路制約を表現可能とする (図 5)。

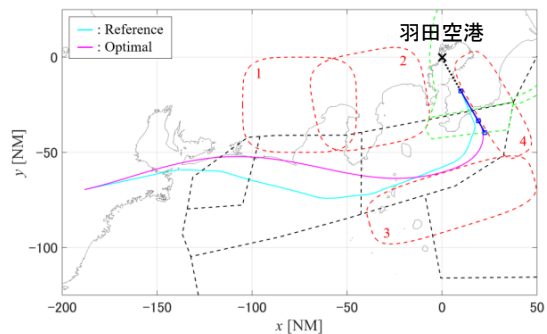


図 5. 障害物配置法を用いた軌道最適化
(シアン：レーダー，マゼンタ：最適軌道，赤：障害物)

4. 研究成果

(1) 現実の問題に対応可能な合流最適化アルゴリズムの開発

①～③に挙げた各項目を 1 つずつ合流最適化アルゴリズムのプログラムに実装し、数値シミュレーションを用いて最適化アルゴリズムの評価を行った。評価の方法としては、追加した項目と元々の到着機の合流 (軌道+順序) を同時に最適化する場合と、個別に最適化する場合のシミュレーションを行い、両者の最適化結果を比較することで、開発したアルゴリズムが①～③の追加項目も最適化できているかを確認した。例えば、③の「滑走路割当ての最適化+滑走路処理容量最大化」であれば、図 6 に示したように左側から多くの航空機が入域してくる状況を設定し、滑走路割当て最適化ありと無しで最適化計算を行った。その結果、滑走路割当て無しで最適化した結果では各航空機の軌道の評価値をよくするため、左側から入域した航空機は全て左側の合流点に到着した。一方、滑走路割当て最適化ありの方では、左側から入域した航空機でも合計の滑走路処理容量を最大化するために右側の合流点に到着するものが現れた。両者の結果を比較すると、滑走路割当てありの方がよりよい評価値を得られていることが確認されたので、合流最適化アルゴリズムが③の項目も同時に最適化できているということが確認された。

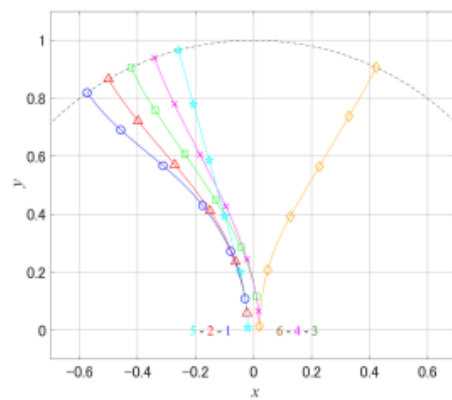


図 6. シミュレーション結果の例
(滑走路割当て最適化+滑走路処理容量最大化)

また①～③を個別に検証後、全項目を実装したプログラムを作成し、シミュレーションによる評価を行った。シミュレーションの結果、開発した合流最適化アルゴリズムが①～③の項目全てを同時に最適化可能であることが示された。

(2) 開発した最適化アルゴリズムの現実的な問題設定における検証

4. (1) で実施したシミュレーションは全て、簡易的な航空機モデルとシミュレーション条件を用いて行われていた。そこで開発した最適化アルゴリズムが現実的な問題設定においてもその性能を発揮することができるかを、現実的なシミュレーション環境で評価した。図 7 に、羽田空港到着交通流に開発した最適化アルゴリズムを適用した例を示す。このシミュレーション環境では、3. (2) で述べた、障害物配置法を用いた軌道最適化を用いて、各航空機の軌道を最適化している。そのため、黒破線で示された空域の制約を

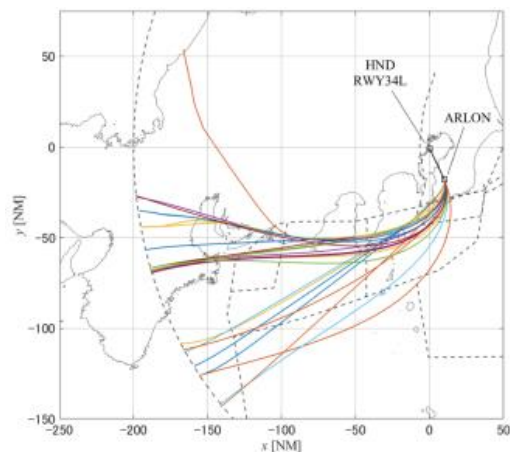


図 7. シミュレーション結果の例
(羽田空港到着交通流)

守りつつ、各航空機が合流することができた。

またこのシミュレーション結果を、従来型の AMAN で広く用いられていた、First-come first-served 型のアルゴリズムの結果と比較し、開発した最適化アルゴリズムの方がよりよい評価値を得られることを確認した。このシミュレーション結果の比較により、開発した最適化アルゴリズムが現実的な問題設定においても有効であることが示された。

参考文献

- [1] D. Toratani, S. Ueno, and T. Higuchi, “Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence for Receding Horizon Guidance in Terminal Area”, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 8, no. 2, pp. 144–153, 2015.
- [2] D. Toratani, and E. Itoh, “Effects on Optimal Merging Trajectories with Allocation Optimization from the Trade-off between Fuel Consumption and Flight Time”, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 11, no. 3, pp. 182–189, 2018.
- [3] N. K. Wickramasinghe et al., “Flight Trajectory Optimization for Operational Performance Analysis of Jet Passenger Aircraft”, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, vol. 12, no. APISAT-2013, pp. a17-a25, 2014.
- [4] 渡辺宗一郎, 原田正範, 「障害物配置法を用いた最適走行の解析」, *日本機械学会論文集*, vol.80, no.817, 2014.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 2件）

1. 著者名 Daichi Toratani	4. 巻 109
2. 論文標題 Application of merging optimization to an arrival manager algorithm considering trajectory-based operations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transportation Research Part C: Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 40 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.trc.2019.09.015	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 虎谷大地, 平林博子, 中村陽一	4. 巻 56
2. 論文標題 障害物配置法を用いた航空管制のための到着軌道最適化手法 -セクタを考慮したベクタリング軌道最適化-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 124 ~ 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.9746/sicetr.56.124	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Daichi Toratani
2. 発表標題 Merging Optimization Method with Runway Allocation Optimization maximizing Runway Capacity
3. 学会等名 AIAA Scitech GNC (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 虎谷大地
2. 発表標題 障害物配置法を用いた航空管制のための到着軌道最適化手法
3. 学会等名 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

計測自動制御学会 制御部門技術奨励賞，学会発表「障害物配置法を用いた航空管制のための到着軌道最適化手法」に対する受賞，2020．

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