

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630388

研究課題名(和文)トポロジー概念による空港周辺の最適航空交通管理アルゴリズムに関する研究

研究課題名(英文)Study on Optimal Air Traffic Control in Terminal Area using Topology Concept

研究代表者

上野 誠也(Ueno, Seiya)

横浜国立大学・環境情報研究科(研究院)・教授

研究者番号：60203460

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の最終目標は航空交通管理の最適なアルゴリズムを開発するところにある。そのために空港周辺の航空機の経路生成に時間と空間を同時に扱う時空間座標系の導入を検討した。これにより航空機の経路生成という最適制御問題は数学的空間内に最適な曲線を描く問題へと変換される。二機の航空機に衝突の危険があるときに、時間的回避と空間的回避を同時に扱うことができるために、効率の良い回避方法を短時間で求めるアルゴリズムが開発された。実時間に対応できるように、連続して進入してくる対象機に対応できる改良も加えた。空港を離発着する実データに応用して、その有効性を確認した。さらに、時空間座標系の応用例も示した。

研究成果の概要(英文)：The final purpose of this research is to develop a new algorithm to calculate the optimal trajectories of aircraft in the terminal area. In order to generate the algorithm, time-space coordinate is introduced and the optimal control problem is transformed to a problem to draw optimal line in a mathematical space. In the time-space coordinate, time is treated as one of state variables. In a case when two aircraft have risk of conflict, there are two ways for pilots to avoid the collision. One is to change the course of aircraft to provide separation in space and the other is to change the speed of aircraft to provide separation in time. It is sometimes difficult to choose one of two ways. In such case, time-space coordinate provides benefit to reduce computational time. Numerical results using actual data show the benefit and the applications of time-space coordinate.

研究分野：工学

キーワード：航空交通管理 誘導航法制御 最適制御 時空間座標系

1. 研究開始当初の背景

航空輸送量の増大に伴い、空港周辺における航空機の過密状態は急激に悪化している。滑走路の使用が可能となるまで上空で待機する状態や直前の機体の後方渦の影響を回避するために時間間隔を空ける経路変更は、航空機の到着時間の遅延を招くのみならず、消費燃料の増加によるコストの問題や騒音領域の増大などの環境の問題などを引き起している。一方、米国のNextGen、欧州のSESARに見られるように全世界的に航空交通管理の改革が進められている。日本においても、諸外国との連携しつつ、数値目標を定めた大規模な改革を進めている。そこにおいては、航空衛星システムを活用し、空港への曲線進入も可能な航空交通管理が提案されている。しかし、理論面の開発が遅れており、経路の最適化においては距離の制約である衝突回避と時間の制約である後方乱流回避を同時に扱うことが困難である。新たな航空交通管理機能を十分に活用できる理論を、新たな概念で構築することに期待が高まっていた。

2. 研究の目的

本研究は大きく二つの目的のもとに研究を進めた。第一の目的は、様々な制約条件を満たしながら、複数機の空港侵入の最適軌道を求めることにある。本研究は時間と距離を同一の変数と考え、4次元空間内の軌道最適化問題として定式化し、幾何学(トポロジー)の概念から問題解決を行う。(図1)先に示した時間の制約条件も距離の制約条件も、4次元空間内の距離の制約条件で表現が可能である。さらに、最適化する軌道は時間を含む空間軌道であるから逆力学を用いることで消費燃料も算出できる。このように4次元空間内の軌道は、評価すべき航空機の物理量を表現することができるので、最適化問題の対象として利用可能である。また、4次元空間内の軌道の最適化は、軌道が連続的に変化する性質を利用したホモトピー法が利用可能である。ホモトピー法は線形近似を用いることなく最適軌道を求めることができるので、有限時間の計算量で最適軌道を求めることができる利点がある。

本研究の第二の目的は、上述のアプローチを用いて、実時間で最適軌道を求めるアルゴリズムを開発することである。実運用で有効なツールとなるためには、切れ目のない時間に対応するために最適化の対象とする4次

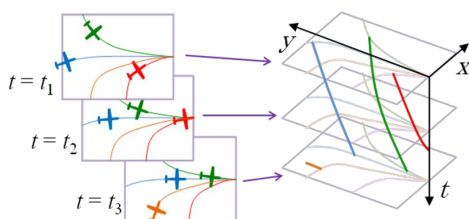


図1 時空間座標系への変換

元空間を無限に拡張する必要がある。実際問題として無限領域の計算は不可能である。そこで、本研究では無限領域の評価関数を用いながら、遠方の影響が少ない評価を行うことで、実時間に適したアルゴリズムの開発に取組む。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために3項目の方法で解決を目指した。それぞれ斬新なアイデアを含んでいる方法である。

(1) 4次元空間の軌道最適化問題 航空機の軌道の最適化は制御分野からのアプローチが多く使われている。制御分野では、時間を独立変数とした状態方程式で記述される航空機運動を対象とする。しかし、複数機を同時に扱う航空交通管理では、個々の機体ではなく空域の最適化を対象としている。本研究は、時間も航空機の位置と同等の変数と扱うことで、空域の最適化を可能とするアプローチを使用する。具体的には、軌道の長さを独立変数(s)とし、空域に入った始点を  $s=0$ 、空港に到着した終点を  $s=1$  とする独立変数で各機体の軌道  $p_i(s)$  を記述する。この記述により、空域内の軌道の最適化が可能となる。

(2) ホモトピー法を用いた最適化 軌道の最適化には、軌道を連続的に変化させるホモトピー法(連続変形法)を用いる。方程式を連続的に変化させれば、解(軌道)も連続的に変化する性質を用いている。(図2)当手法は線形近似を用いることなく、既存の軌道を最適化させることが可能であるため、最適解を得るための計算量が確定している。計算時間が限られた実時間システムを構築するためには有力な手法である。

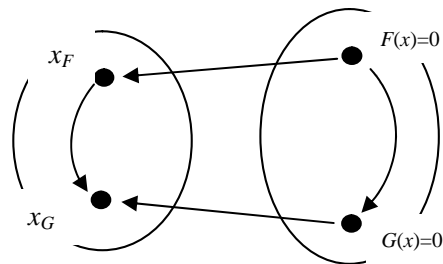


図2 ホモトピー法概念

(3) 無限の時間領域の評価関数 最適化の対象とする時間は、現実の問題では無限の広がりを持つ。最適制御の分野では、線形システムを対象とした最適レギュレータを除き、無限積分の評価関数を扱うことはほとんど無い。本研究では、非線形システムに対する無限の時間領域の評価関数を扱う。しかし、時間を座標と同じ変数として扱う本研究では、評価関数は有限区間の積分値で表現できる。その代わりに、対象とする機体が無限数存在することになるが、干渉を考慮することで近似解を得るアプローチを試みる。

#### 4. 研究成果

各年度毎に得られた成果を示す。

平成 25 年度は、モデリングの妥当性の検証と有限領域での最適化手法の開発を計画としていた。モデリングの妥当性の検証では、本研究の特徴である時間を座標と同じ変数として扱い 4 次元空間内の軌道最適化を行うことに用いるモデルの妥当性を検証した。まず、ダイナミクスを考慮した軌道の物理量の表現を 4 次元空間内の軌道の変数で表現することの妥当性を検証した。これにより、速度という物理量は 4 次元空間内の曲線の傾きで表現でき、消費燃料や後方乱流の危険性なども表現することができた。

有限領域での最適化手法の開発では、前述のモデルを用いて、2 次元平面の座標と時間の領域での最適化問題を扱った。2 機の航空機の飛行経路が干渉する問題を解くことができ、時間的な回避と空間的な回避が評価関数の重みで連続的に変化することが示された。この両者を同等に扱えるのは、時間を空間座標と同じ変数として扱ったモデルの特徴である。(図 3~5)

平成 26 年度は、有限領域での最適化手法の開発を進めることと実時間最適軌道計算

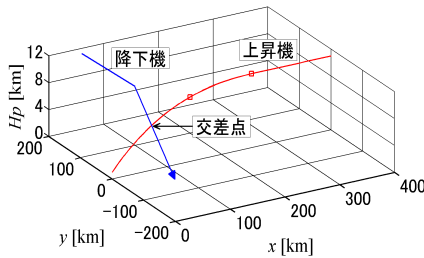


図 3 2 機が干渉する問題

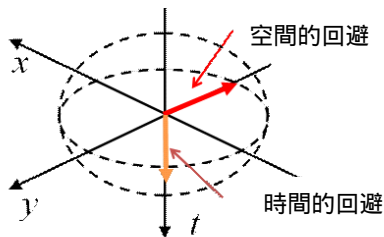


図 4 時空間座標系における回避表現

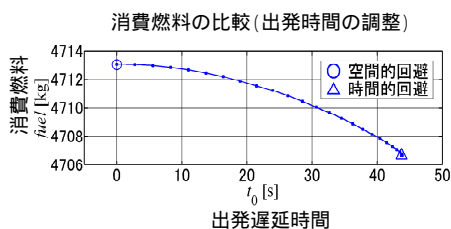
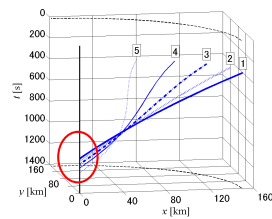


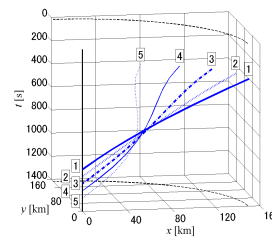
図 5 出発機の出発時間遅延による最適軌道の消費燃料変化

アルゴリズムへの拡張を計画としていた。有限領域での最適化手法の開発では、平成 25 年度に複数機の軌道上での干渉を時空間座標系を用いることで最適な衝突回避を行うことを示した。その時は、主に上昇機と下降機の干渉問題であった。それに対して平成 26 年度は、5 機による合流点通過順序の最適化を含む軌道最適化問題を扱った。(図 6)

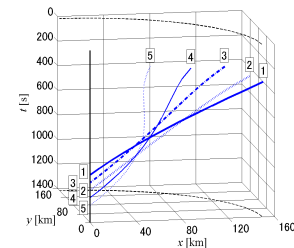
これは連続的な軌道最適化と離散的な到着順序の最適化問題を解くことが要求され、混合整数問題として扱うことを試みた。そのために、通過時間で評価関数が示された評価関数曲線を導入して最適解を求めた。すなわち、合流点を通る時間で個々の機体の評



a) 単機最適化: 通過時間間隔が合流点で満たされない



b) 5 機の最適化: 通過時間間隔が合流点で確保される



c) 5 機の最適化: 3 番機の進入が早くなると合流点での通過順序が変更となった

図 6 複数機の順序と軌道の最適化問題 (時空間座標系での表現)

価関数値を求めた最適解の集合である。単純に計算すると膨大な量になり、実時間システムへの適用は難しくなる。それに対し、ホモトピー法を活用することで、計算量を減らすことを試み、大幅な計算時間削減が実現できた。結果は良好に得られ、成果を論文として投稿した。

実時間最適軌道計算アルゴリズムへの拡張では、空港周辺に到着する機体が無限に続くことに対応するアルゴリズム開発である。無限に到着機が空港周辺に到着するといっても、時間が経った後の機体が現在の機体の飛行経路に影響を及ぼすことは小さい。この点を考慮すれば、有限時間内の最適化を行うことで近似的に無限時間領域の最適化が可能である。従って、有限時間内の最適化を与えられた時間内に終了することが重要である。本研究では、計算時間が確定できるホモトピー法を導入することで対応することを検討した。そして、レーシングホライズンの考え方を導入し、連続的に最適化する時間区間を移動させることで、連続時間問題に対応できることを示した。(図7)レーシングホライズンの区間で最適化を行い、最初の区間だけを用いる手法である。現在、離発着に参与している機体で最適化を行い、一定時間が経つとその時点で参与している機体で次の最適化を行う。その間で、対象機体の変更も可能である。

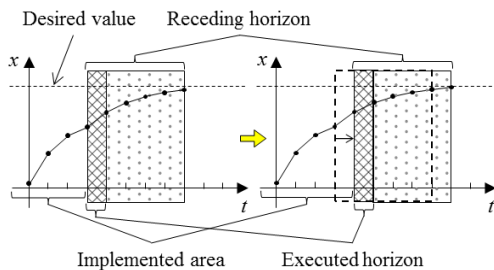


図7 レーシングホライズンの原理

平成27年度は、時空間座標系を用いた最適化を進展させて三次元軌道への適用と実データを用いた検証を計画としていた。三次元軌道への適用では、空港周辺の騒音問題に着目した軌道生成を試みた。騒音が環境に与える影響は、騒音の大きさに影響する距離と騒音の持続に影響する時間を同時に評価することが必要になる。この点に関して、時空間座標系は両者を同時に扱うことができるので、定式化および解法が簡単になる。得られた成果は国際会議で発表しており、高い高度を維持して、継続的な降下で進入する経路が求められた。さらに、三次元軌道への適用では、複数の編隊を変更する課題にも応用した結果を得ている。

実データを用いた検証では、成田を離陸する2機と羽田に着陸する2機が太平洋上で交差する実データを電子航法研究所からいただき、その条件を用いて最適化を行った。(図8)消費燃料を評価関数として合計4機の軌道最適化を行った。同一機種4機による最適化では、軌道の制約を課したために、時間領域で接近を回避する軌道が得られ、上昇機と降下機が交互に通過する解が選られた。(図9)機種によって消費燃料が異なるために、最後に通過する機首を消費燃料の多い機種に変更すると通過順序が変化する傾向を把

握することができた。(図10)

トポロジーの概念、すなわち時空間座標系を用いて空間内に最適曲線を描く軌道生成をテーマとして研究を進め、目標とした成果が得られた。将来の課題としては、曲線の始点を変更することで順序の入れ替えを行えるアルゴリズムの開発があるが、本研究の成果である時空間座標系を用いることで開発の目途が立っている。

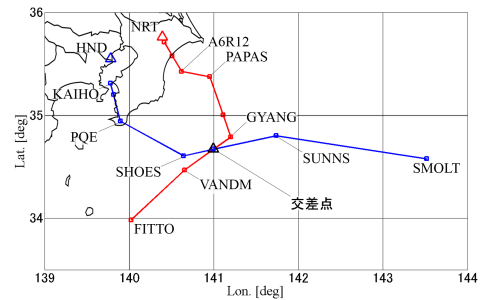
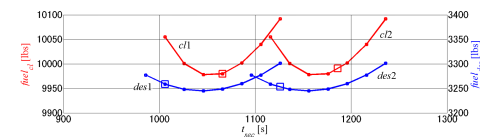
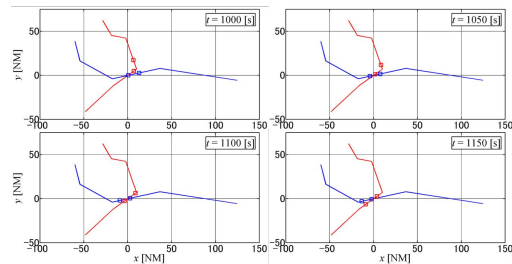


図8 実データによる検証:羽田へ降下する2機と成田から上昇する2機の干渉



a) 評価関数曲線



b) 飛行軌跡

図9 軌道(速度)と順序の最適化  
同一機種(B-777)の場合

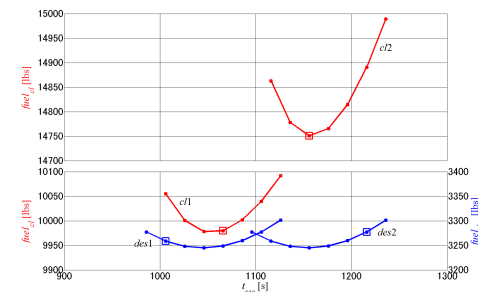


図10 軌道(速度)と順序の最適化における評価関数曲線:機種異なる場合  
(3機のB-777と1機のB-747)

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

虎谷大地、上野誠也、樋口丈浩、空港周辺空域における上昇機のための最適な回避軌道に関する研究、航空宇宙技術、査読有、Vol.14、2015、pp.105-112 .

Daichi Toratani, Seiya Ueno, Takehiro Higuchi, Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence for Receding Horizon Guidance in Terminal Area, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 8, No. 2, 2015, pp.144-153.

### [ 学会発表 ] ( 計 8 件 )

Daichi Toratani, Daniel Delahaye, Seiya Ueno, Takehiro Higuchi, Merging Optimization Method with Multiple Entry Points for Extended Terminal Maneuvering Area, Proceedings of EIWAC 2015, EN-A-010, 2015.

Daichi Tajima, Seiya Ueno, Takehiro Higuchi, Study on Minimum-Fuel Trajectories of Descending Aircraft in the Terminal Area with Arrival Time Separation, Proceedings of APISAT 2015, 2015.

Fuka Amano, Seiya Ueno, Takehiro Higuchi, Study on Optimal Trajectory of Descending Aircraft for Reduction of Noise Problem, Proceedings of APISAT 2015, 07-04-4, 2015.

Daichi Toratani, Seiya Ueno, Takehiro Higuchi, A Study on the Receding Horizon Guidance with the Sequence Optimization for the Terminal Area, Proceedings of SICE Annual Conference 2014, 査読有, Sept. 2014.

Daichi Toratani, Seiya Ueno, A Study on Trajectory Optimization for the Terminal Area, Proceedings of International Conference on Research in Air Transportation, 査読有, May 2014.

Daichi Toratani, Seiya Ueno, Takehiro Higuchi, Study on Optimal Conflict-Free Trajectory for Air Traffic Management in Terminal Area, Proceedings of Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 査読有, Oct. 2013.

他 2 件

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

上野誠也 ( UENO, SEIYA )

横浜国立大学・大学院 環境情報研究院・教授

研究者番号 : 60203460