

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K14501

研究課題名（和文）ホモトピー法を用いた最適離発着順序を与える航空交通管理アルゴリズムの開発

研究課題名（英文）Development of air traffic management algorithm to provide optimal departure and arrival orders using homotopy method

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の最終目標は、空港に接近する航空機に対して最適な軌道を求めるアルゴリズムの開発である。安全間隔を時間的にも空間的にも扱うことができる時空間座標系を用いて最適解を求めた。二つの課題を本研究では扱った。最初の課題は、時空間座標系を用いた時に同時刻の機体間距離の算出が計算途中では困難なことである。これに対して、最適化計算の外側に拘束条件を生成する外ループを加えた。次の課題は、到着順序の最適化である。過去の研究でホモトピー法を用いて順序の自動最適化を可能としたが、数値計算で不安定が生じた。この課題に対して2つのパラメータを導入し、解の発散を防ぎながら、精度の高い解を得ることを可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空交通量の増大に伴い、空港周辺を航空機に到着順を指示する航空管制官の負担が増加している。負担を軽減する目的で、安全間隔を保ちながら最適な順序と軌道を提供するアルゴリズムの開発を行った。安全間隔は時間的な間隔と空間的な間隔のいずれかが成立することが必要であるが、その選択はアルゴリズムが最適化した。到着順序も人間の判断が介在しないアルゴリズムである。軌道の最適化では、環境影響の低減、パイロット負担の軽減、消費燃料の最小化、乗客の快適性を扱った。計算量が少なく、確実に解を得られるアルゴリズムが得られた。このアルゴリズムは航空交通管理以外の交通流管理の分野にも応用が可能である。

研究成果の概要（英文）：The final purpose of this research is to provide a new algorithm to calculate the optimal order of multiple aircrafts approaching to an airport. Time-space coordinate is applied to the problem, because the requirements of safety are described as time or space separation. This research treats two problems that cause in the previous study. The first problem is to find optimal trajectories in case when a conflict point is unknown. To solve the problem, outer loop for optimization program added. The results of numerical calculations show that safety trajectories are provided within one iteration of outer loop. The second problem is to avoid instability of numerical calculation due to a singularity of matrix. The special boundary conditions cause singular matrices in the optimization calculation. Two parameters are introduced to avoid the singularity and to keep the accuracy. The new algorithm provides the optimal solution without divergence for any boundary conditions.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：航空交通管理 最適制御 誘導航法制御 ホモトピー法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

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。着陸のための滑走路の使用が可能になるまで上空で待機する状態が続くことは、単に当該航空機の到着時間の遅延というサービス上の問題だけでなく、騒音や排気汚染などの環境への悪影響、パイロットや管制官の負荷増大、燃料消費増加による飛行コスト上など多くの問題を生じている。一方、米国の NextGen、欧州の SESAR、日本の CARATS に見られるように、現在は航空交通管理が大きな変革を迎えている。従来の空域管理運用からトラジェクトリ管理運用へ切替えが行われ、地上施設のみならず衛星システムも活用した新たな経路設計が可能となっている。このような変革を迎える中で、混雑緩和にキーとなる到着順序の決定や上空での到着時間の推定は管制官の判断によるところが多く、個人的な経験が効率化の鍵を握っている。管制官のワークロード低減の観点からも、到着順序の最適化ならびに飛行経路の最適化を行い、到着機の望ましい経路と順序を提供するアルゴリズムの開発が要求されているところである。

研究代表者は最適制御理論の航空工学への適応に関する長年の研究経験を活かして、平成 27 年度から挑戦的萌芽研究「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」において、時間と空間座標を同一の変数で扱う時空間座標を導入して、到着機の軌道最適化に関する研究を行っていた。その成果として、時間と空間を同等に扱うアルゴリズムを開発し、境界条件に応じて時間的間隔、空間的間隔あるいは両者を混在した回避を選択する最適軌道を求めることを可能とした。しかし、この研究の前提条件として設定した以下の二点が実用問題への展開する時に解決すべき課題として残されていた。

まず一点目は、図1に示すように時空間座標系において回避すべき点が固定されていた。図1は時空間座標系で飛行経路をプロットしたイメージ図であるが、一方の機体の経路の固定した点に回避両機を楕円体で指定し、他機がその回避領域内に入ることが無い軌道を生成する最適化を行った。前者の飛行経路も最適化されるが、軌道内の特定点に楕円体を固定した条件の下で最適化されていた。実用問題では、干渉点はどこに存在するか未知なので、この制約を外したアルゴリズムの改良が望まれていた。

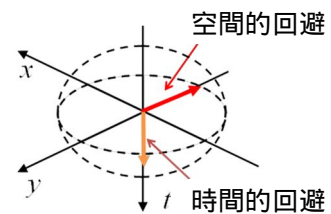


図1 時空間座標系の回避表現

次に二点目は、滑走路進入時に必ず起こる合流問題に於いて、到着機の順序をあらかじめ設定して最適化を行っていた。図2は最適化を行った時空間座標系の飛行経路である。縦に引いた軸が空間座標の原点を通る時間軸である。図中の 5 機は到着間隔を守って、空間座標の原点を通過する条件が与えられている。研究成果では、到着順序を指定し、最適化計算を繰り返すことで最適な到着順序を求めることを提案した。効率よく計算量を減らすことが研究成果として得られているが、もし単純に全点探索をおこなえば、図2に示したケースでも 120 ケースの最適化計算が必要となる。当然のことながら 120 ケースの中には管制官の判断で無駄なケースを排除することができる。しかし、管制官のワークロード軽減を目指すためには、人間の判断が介入しない順序最適化アルゴリズムの提案が必要である。

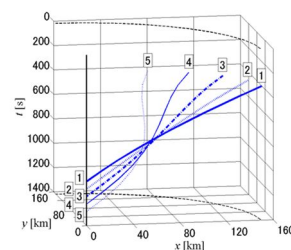


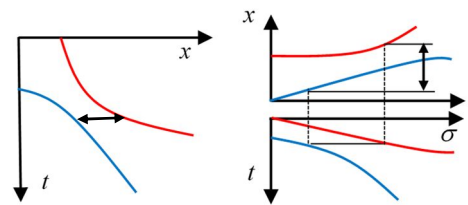
図2 到着順序を指定した5機の軌道最適化計算結果(時空間座標)

2. 研究の目的

本研究の目的は前章で述べた時空間座標系を用いた軌道と順序の最適化アルゴリズムにおいて過去の研究で残された課題の二点である。

- (1) 他機との干渉点が未定の問題への対応
- (2) 人間が介入しない順序最適化アルゴリズムの開発
それぞれに対して、問題となっている点を説明する。

まず、「(1)他機との干渉点が未定の問題への対応」であるが、時空間座標系は空間的回避と時間的回避が同等に扱える利点がある。それは図3a)に示した例で示すと、横軸が座標、縦軸が時間を表した時空間座標系内に2機の軌跡が描かれている。この二本の軌跡の水平距離が空間的間隔を表し、垂直距離が時間的間隔を表している。両軸は同じ従属変数として扱うので、両間隔は差が無く扱うことができる。幾何学的に結果の軌跡をプロットすれば間隔の維持が実現したか否かは容易に判断できる。しかし、計算機内では別の独立変数を用いているので、判断することが容易ではない。図3b)が計算機内であつかう独立変数で時間と距離をプロットした図である。この場合、同一時刻の2機間の距離は異なる独立変数の二点となる。同様に、同一地点の2機の通過時刻間隔も異なる独立変数の二点となる。全点探索を行えば、最小間隔を求めることができるが、効率的でない。従って、効率的に最小間隔を保つアルゴリズムが必要である。



a) 時空間表現 b) 独立変数表現

図3 計算上の空間距離の表現

次に、「(2)人間が介入しない順序最適化アルゴリズムの開発」であるが、2機以上の合流問題では頻繁に発生する問題である。一般の最適化アルゴリズムは、仮定解の近傍で最適解を探索するので、順序の変更は行われない。順序の変更を認めるアルゴリズムは、大域的な探索を行うので、収束性が悪く計算時間がかかる。当然のことながら、順序を入れ替えた複数の問題を解き、最良値を示した順序を選べば、順序の最適化は可能である。しかし、図2の問題では5機しか存在しないのに120通りの最適化問題を解かなければならない。これではより多くの機体が存在する実用化は難しい。実用化のためには、人間が介入せずに順序の最適化ができるアルゴリズムの開発が必要である。

3. 研究の方法

前章で示した課題の説明に入る前に、過去の研究でも使われた基本となる手法である (i) 時空間座標系と (ii) ホモトピー法について述べる。これらの手法を改良することが本研究の主題であり、効率的な飛行経路を得るために必要な手法である。

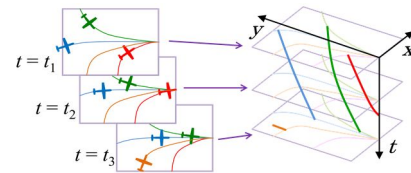


図4 時空間座標系の軌跡

(i) 時空間座標系

時間を空間座標と同じ変数とみなす座標系である。図4は二次元平面と時間による時空間座標のイメージ図である。各機体の軌跡は3本の線で表されている。独立変数には各機体の飛行経路長を選ぶ。飛行経路は、現時点の制御開始時を0とし、制御終了時を1とする変数で定義する。図4に例で言えば、時空間座標でプロットされた曲線の長さで正規化され、到着時間が異なる航空機に対しても、全て0から1の独立変数で整理できる。

(ii) ホモトピー法

連立方程式を数値的に解く手法であり、連続変形法とも呼ばれる。図5はその模式図である。今、解きたい非線形連立方程式を $G(x)=0$ とする。一方、解が既知の連立方程式を $F(x)=0$ とし、その解を x_F とする。方程式を連続に変化させれば、解も連続に変化する性質を使って $G(x)=0$ の解 x_G を得る。連続的に変化させるパラメータ α を導入する。次に定義する関数を常にみたすとする。

$$(1-\alpha)F(x) + \alpha G(x) = 0 \quad (1)$$

この式は、 $\alpha=0$ の時に解が既知の $F(x)=0$ であり、 $\alpha=1$ の時に解が未知の $G(x)=0$ である。既知の関数として $F(x)=G(x)-G(x_F)$ を用いると、上式の全微分から次式が導かれる。

$$x_G = x_F - \int_0^1 \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)^{-1} G(x_F) d\alpha \quad (2)$$

この定積分を行うことで非線形連立方程式の解が得られる。定積分を用いているので、計算時間が確定している特徴がある。

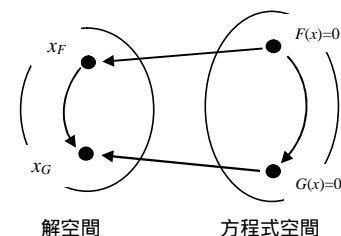


図5 ホモトピー法の概念図

4. 研究成果

4-1 他機との干渉点が未定の問題への対応

干渉する二機の距離を評価することが同一の独立変数では不可能であるが、従属変数の時間を用いれば評価が可能である。すなわち最適化の計算結果では評価が可能であるので、計算結果から干渉点を検出し、干渉点を制約する新たな問題設定を行えば、干渉回避の解が得られる。最適化計算を繰り返す手法を提案する。図6に提案する手法のフローチャートを示す。最初に制約を考慮しない最適化問題を解き、その結果から干渉点を見つけ出す。もし、干渉点が無ければ計算は終了であるが、干渉点があれば、その制約条件を新たに追加した最適化問題を設定し、最適化計算へ戻る。これを繰り返して制約を満たす解を求める手法である。

提案手法の有効性を確認するために2機の降下機が干渉する問題を解いた。図7に当手法を用いた計算結果を示す。破線が干渉を考慮しない最適軌道であるが、途中で1.7kmの最接近距離が示された。両者の距離を10km以上に拘束する制約条件を追加し、再計算した結果が実線である。青の線で示す機体は早めに降下して加速し、緑の線で示す機体は降下を抑えて減速して、互いに干渉点の通過時間を調整している。この場合、図6に示すフローチャートのループは1回で終了した。提案する手法を用いることにより2章で述べた(1)の問題点を解消することができた。

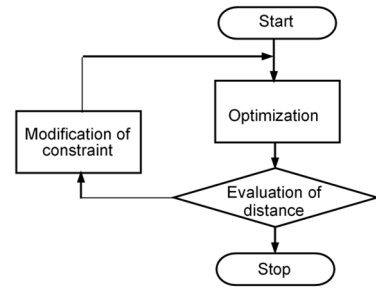


図6 距離評価フローチャート

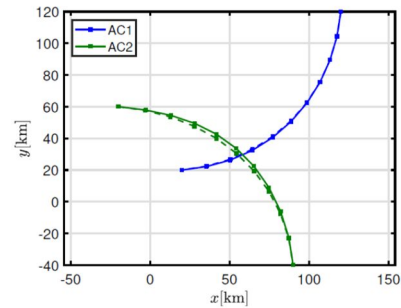


図7 干渉する2機の最適軌道

4-2. 人間が介入しない順序最適化アルゴリズムの開発

到着順序が不明の問題へはホモトピー法を適用することで解消を試みた。ホモトピー法は連続変化法と呼ばれているように、問題の条件を連続的に変化することができる。その利点を活かして、初期の問題は同時に到着する条件に設定しておき、2機間の到着時間を徐々に増加するように問題を連続的に変化させた。その時に、順序の制約を与えないように、終端における拘束条件を次式とした。

$$(t_{fA} - t_{fB})^2 - T_S^2 = 0 \quad (3)$$

ここで t_{fA} と t_{fB} はそれぞれの機体の到着時間であり、 T_S は要求された到着時間間隔である。ホモトピー法における初期の解が既知の問題では $T_S=0$ を用い、終端の解が未知の問題では T_S は要求値とした。式(3)は到着順序を指定しておらず、ホモトピー法の計算過程で順序が決定される手法である。人間の判断が介入しないアルゴリズムとなっている。

提案手法の有効性を検証する目的で、図8に示す条件で2機の合流問題を解いた。左のA機の初期条件を固定し、右のB機の初期位置を変化させて、同じ最適化計算を行った。評価関数には加速減速と旋回率を用いた。前後および左右の加速度である。評価関数は時間積分で定義しているため、総飛行時間も評価されている。両機の初期位置が対称である場合に、それぞれの到着順序が変わることが予想される問題である。図8には、両機の初期位置が対称なケースの単独で求めた最適軌道が一点鎖線で示されている。同時に合流点に到着する軌道である。

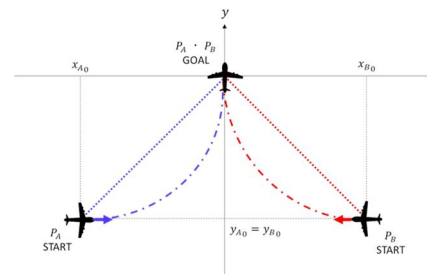


図8 計算条件と単独最適軌道

B機の初期位置を変更して求めた最適解の評価関数を図9に示す。中央の100kmが両機の初期位置が対称のケースに相当する。左の領域ではB機が先に到着し、右側の領域ではA機が先に到着しており、時間間隔が保たれていた。対称の位置である100kmでは計算が発散し、解が得られなかった。しかし、このケースは評価関数がほぼ等しいことが予想される。つまり、どちらが先に到着しても最適問題としては結果の差が小さい境界条件である。実用面からも、この領域の解は不要と判断ができる範囲である。計算の課程で発散傾向を判断することは容易であり、その場合は仮定した順序で到着すればよい。

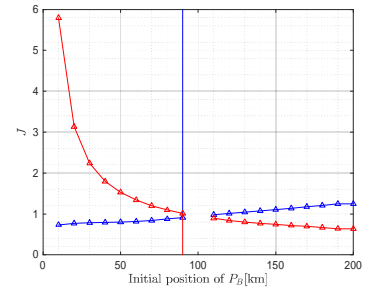


図9 B機位置に対する各機の評価関数の変化

解が発散するケースは実用上問題が無い条件であるが、この領域でも解が発散しない対策を試みた。発散するのは式(2)で示した逆行列 $(\partial G / \partial x)^{-1}$ が原因である。そこで、安定化を試みるために、微小の定数 ε を導入して、式(2)を次式に改めた。

$$x_G = x_F - \int_0^1 \left(\frac{\partial G}{\partial x} + \varepsilon I \right)^{-1} G(x_F) d\alpha \quad (4)$$

ここで、 I は単位行列である。定数 ε に $(\partial G / \partial x)$ の行列式を用いるSR行列がよく知られているが、行列式のオーダーが予想できると計算時間の短縮を重視していることか、行列式ではなく定数を用いることとした。この改良を加えると式(4)の定積分は安定して求めることができるが、元の式(1)の精度が確保できない。そのため、式(1)の精度を保つために一次系の収束項を加える。式(1)の誤差を e とすれば、式(4)は次式と変更する。

$$x_G = x_F - \int_0^1 \left(\frac{\partial G}{\partial x} + \varepsilon I \right)^{-1} \left(G(x_F) + \frac{e}{T} \right) d\alpha \quad (5)$$

ここで、 T は時定数である。この式を用いて、最適解を得ることとした。なお、設計パラメータとして ε と T が新たに加わったので、これらの値の設定が必要である。

改良を加えたホモトピー法による解を図10に示す。最上段の時間は終端で120秒の時間差を確保できている。そのために、最下段で示される速度はB機が減速していることが分かる。図11は誤差 e のノルムを定積分の独立変数 α でプロットしている。最初のステップで急激な増加を示しているが、その後に減少を示し、安定した解が得られている。式(5)の改善を試みる前は発散していたが、式(5)の採用により安定した傾向が得られた。

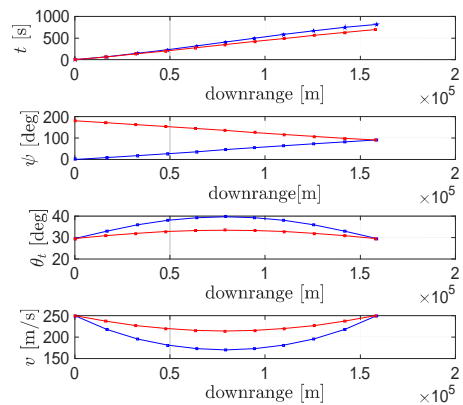


図10 合流問題における最適軌道

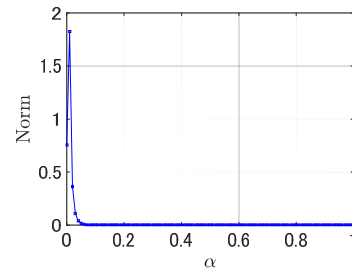


図11 最適計算におけるノルムの変化

4-3. 成果のまとめ

複数の航空機の合流問題に対して、お互いに干渉しない飛行経路と順序の最適化を行うアルゴリズムの開発を行った。時間的回避と空間的回避を同等に扱うことができる時空間座標系を用い、干渉点の回避にはループを追加することで対応が可能であることが示された。一方、順序の最適化については、ホモトピー法を用いて、問題を連続的に変化することにより、人間が介在しないアルゴリズムを提案し、解の発散を防ぐ手法で、安定して解が得られることを示した。得られた結果は管制官にとって、有益な情報提供となる見通しが得られ、今後の航空交通管理に貢献するものと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Seiya Ueno, Hiroko Hirabayashi
2. 発表標題 Continuous Climb Operation Using Stochastic Optimal Control Theory
3. 学会等名 2017 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木亮汰、上野誠也
2. 発表標題 ホモトピー法を用いた到着機の軌道と順序の最適化に関する研究
3. 学会等名 第55回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福本紘司、上野誠也
2. 発表標題 航空機上の計算による最短時間進入軌道と順序の生成手法
3. 学会等名 第55回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuma Miyazaki, Seiya Ueno, Takehiro Higuchi, Rieko Take
2. 発表標題 Optimization on multiple aircraft using homotopy method
3. 学会等名 Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----