

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760671

研究課題名(和文) 実時間最適化に基づく複数航空機間の衝突回避経路生成アルゴリズム

研究課題名(英文) An Algorithm for Planning Collision-Free Trajectories of Multiple Aircraft Using Real-Time Optimization

研究代表者

横山 信宏 (Yokoyama, Nobuhiro)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・システム工学群・准教授)

研究者番号：10425788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円、(間接経費) 0円

研究成果の概要(和文)：混雑した空域での航空機運航へ応用することを念頭に、水平面内および三次元空間において、複数の航空機が衝突回避経路を生成するためのアルゴリズムを開発した。本アルゴリズムはモデル予測制御の考え方をを用いて実時間で数理計画問題を解くものであり、各機の経路をそれぞれ独立に計算可能とするための制約条件、問題の可解性を帰納的に保証するための終端制御則、および機体の非線形な動特性・運動制約を反映した制約条件が組み込まれている。数値シミュレーションにより、本アルゴリズムにおいて、機体数を増やしても計算量が現実的な範囲に抑えられること、および飛行力学的に妥当で安全な経路を計算できることを示した。

研究成果の概要(英文)：We developed an algorithm for planning horizontal/three-dimensional collision-free trajectories for multiple aircraft in a congested airspace. The algorithm solves mathematical programming problems in real time based on a model predictive control scheme. Moreover, it adopts constraints to enable the synchronous trajectory calculations, a terminal controller to guarantee the recursive feasibility of the resulting problems, and constraints corresponding to the dynamics and performance limits of the aircraft. Through numerical simulations, the effectiveness of the algorithm was demonstrated in terms the scalability of the computational cost and the dynamical feasibility as well as the safety of the calculated trajectories.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：モデル予測制御 衝突回避 実時間最適化 数理計画法

1. 研究開始当初の背景

近年、航空輸送需要は増加の一途を辿っており、日・米・欧のいずれにおいても、多数の航空機を効率的かつ安全に飛行させるための研究開発プログラムが進行中である。また、無人機の運用機数や運用頻度も急増傾向にあり、空域の有効活用や安全性確保について、検討すべき課題が多い。

特に、狭い空域内で航空機を飛行させる場合、有人機・無人機を問わず、他機との衝突回避のための誘導を、各機の責任のもとで分散的に行うことが望ましい。現在、旅客機には衝突回避システムである TCAS(Traffic alert and Collision Avoidance System)が搭載されているが、TCAS は垂直方向の緊急回避のみを指示するための装置であるとともに、基本的には2機間の衝突回避を想定してアルゴリズムがつけられているため、混雑の度合いや空域の制約条件によっては、その有効性が限定的なものになってしまう。

以上により、混雑している空域においては、以下の要件を満たすような計算を各機体上の計算機で実行できることが望ましいと考えられる。

- (1) 3機以上の機体がそれぞれ独立に計算を行っても、互いに干渉しない最適な(安全で効率的な)回避経路を求められること
- (2) 水平面内および3次元空間においても飛行力学的に妥当な経路を求められること
- (3) 所定のサンプリング時間内に経路が確実に求まること

過去の研究において、幾つも衝突回避経路生成アルゴリズムは検討されているが、安全性・効率性を最大限に追求する上では、経路生成問題を最適化問題として捉えるアプローチが有効であると考えられる。しかしながら、上記の(1)から(3)までをすべて満たすような最適化ベースのアルゴリズムはこれまでに提案されていなかった。

2. 研究の目的

以上の背景に基づき、本研究課題では下記の性質を有する飛行経路生成アルゴリズムの開発を行うことを目的とした。

- (1) データリンクによって各機体の位置・経路に関する情報を共有できるとの仮定のもと、水平面内および3次元空間において、3機以上の複数機がそれぞれ独立に計算を行っても、干渉しない(安全間隔が保証された)経路を確実に求めることができる。
- (2) 水平面内および3次元空間において、各機体の非線形な動特性および運動制約を考慮した、飛行力学的に妥当な飛行経路が得られる。
- (3) 安全性・効率性に最も優れた飛行経路、すなわち大域的に最適な飛行経路を高い確率で求めることが可能である。

(4) 2~3機間だけでなく、多数の機体を扱う問題でも実時間計算が可能である。すなわち、計算負荷がスケーラブルである。

3. 研究の方法

(1) モデル予測制御理論に基づく経路生成問題の定式化

本研究課題で扱う経路生成問題は、実時間で一定時間先の将来(予測ホライズン)までの機体の運動を予測して最適な経路を求めるものであるため、モデル予測制御理論との親和性が高い。そこで、モデル予測制御理論に基づき、サンプリング時間ごとに数理計画問題の解として経路を求めるアルゴリズムを検討した。アルゴリズム内で扱う数理計画問題においては、研究目的に基づき、下記の点について考慮した。

可解性：各サンプリング時間における各機の数理計画問題の可解性を保証するために、モデル予測制御においてしばしば用いられる仮想的な終端制御則を、ここで扱う問題に適した形で導入し、帰納的に可解性が保証される(あるサンプリング時間において可解となれば、以後のサンプリング時間における可解性が保証される)ように定式化することを検討した。

非干渉性：水平面内および3次元空間において、各機体間で干渉しない回避経路を得るために、前のサンプリング時間で得られた(全機が共有する)各機の経路情報に基づいて、各機が更新する経路上ノードの制約条件(更新許容領域)を割り当てるアプローチを検討した。

機体の動特性・運動制約の反映：水平面内および3次元空間における機体の動特性・運動制約は一般に非線形制約条件として表されるが、数理計画問題に適した形の制約条件として、これらを表現することを検討した。

(2) 経路生成問題に対する大域的最適化手法の検討

一般の経路生成問題の大域的最適解を高い確率で得られるようにするため、半正定値計画緩和に基づく定式化を行い、緩和の次数を上げることで大域的最適解の良い近似解が得られるような数値解法を検討した。また、小規模な問題に対して数値計算による有効性の検証を行った。

一方、回避経路生成問題のような比較的規模の大きい問題には、半正定値計画緩和は実時間性およびソルバーの精度の観点から適用が困難であったため、回避経路生成問題は最終的に混合整数2次計画問題として定式化することとした。

(3) 数値シミュレーションによる検証

機体数、各機体の性能・初期位置・初期速度・目標位置を様々に変化させて、衝突回避

の数値シミュレーションを行い、得られる飛行経路の妥当性と、アルゴリズムの実時間性（特に、機体数と計算時間との関係）について検証を行った。

4. 研究成果

(1) 「研究の方法」の(1)で述べたアプローチに基づき、水平面内および3次元空間における複数機の回避経路生成アルゴリズムを開発し、下記の点に関して数学的な保証を与えることができた。

可解性：各機の経路が、予測ホライズン以降は他機との安全間隔を保った円となるような終端制御を導入することで、アルゴリズムで扱う混合整数計画問題が帰納的に可解性を有することを数学的に証明した(雑誌論文, 学会発表,)。非干渉性：「研究の方法」の(1)で述べた制約条件の割り当てを無限時間先まで(終端制御則で扱う円状の経路の区間まで)適用することにより、3機以上の機体が独立に経路の更新を行っても、それらが許容領域内である限り、結果として得られる各経路が無制限時間にわたって干渉せず、安全間隔が常に保証されることを数学的に証明した(雑誌論文, 学会発表,)。また、この制約条件を、飛行性能が異なる機体間の間隔確保条件としても適用可能となるように拡張した(学会発表)。

機体の動特性・運動制約の反映：機体の状態変数、制御入力に対して座標変換を適用し、0-1変数を補助的に導入することにより、混合整数型の線形制約または凸2次制約としてこれらを表現する方法を確立した。また、これらの制約条件の許容領域が、もとの制約条件の許容領域の部分集合となる(もとの制約条件の十分条件となる)ように定式化を行い、それにより、得られる解が必ず物理的に実行可能な解となることを保証した(雑誌論文, 学会発表,)。

上記 ~ は、「研究の目的」の(1)~(2)に対応する性質を数学的に担保するものであるが、これらは、従来の回避経路生成アルゴリズムにはない優れた性質である。また、本研究課題で導入した、終端制御則、非干渉化のための制約条件、機体の動特性・運動制約を表現するための制約条件をそれぞれ必要に応じて修正することで、航空機の運航シーンに応じた様々な応用発展させることも可能であると考えられる。

(2) 半正定値計画緩和を用いた定式化を簡単な例題に適用することにより、経路生成問題の大域的最適解の近似解が得られることを確認した(学会発表,)。図1に計算例を示す。緩和の次数を増やすことによって、

数値解(relaxed)が、大域的最適解の解析解(analytical)にほぼ一致していることが確認できる。

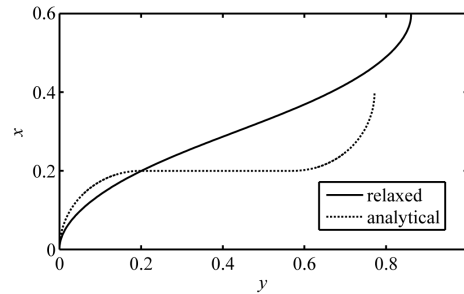


図1 半正定値計画緩和で求めた経路の例(学会発表, 緩和の次数: 1)

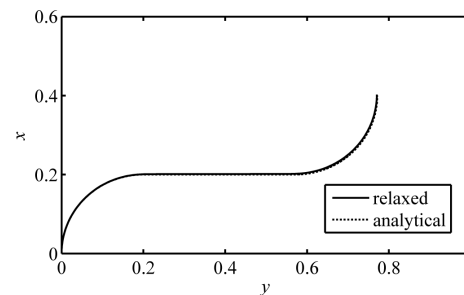


図2 半正定値計画緩和で求めた経路の例(学会発表, 緩和の次数: 2)

また、既述した理由のため、回避経路生成問題は、最終的には混合整数2次計画問題として定式化したが、ここでは、制約条件が元の非線形制約条件の十分条件となることを保証し、また、制約条件の分割数(バイナリ変数の個数)を増やした場合に元の制約条件に漸近するような定式化を行った。これにより、十分な分割数を有する混合整数2次計画問題を解けば、元の問題の大域的最適解の良い近似解が得られることを保証できるようになった(雑誌論文, 学会発表,)。

(3) 「研究の方法」の(3)で述べたアプローチに基づき、開発した回避経路生成アルゴリズムの数値シミュレーションを行った結果、得られた飛行経路がすべて飛行力学的な制約条件および安全間隔を満たす妥当なものであることを確認できた。計算結果の例を図3から図5に示す。

また、水平面内・3次元空間のいずれの回避経路生成アルゴリズムにおいても、多数の機体を扱う問題で実時間性が成立すること、および計算負荷にスケラビリティがあることを確認できた(雑誌論文, 学会発表,)。図6に、機体数と計算時間の関係の一例を示す。最適化ベースの経路生成アルゴリズムにおいて、スケラビリティが成り立つことを示した例は稀であり、多数の機体が密集する混雑した空域への適用可能性を示したという点においても重要な成果と言える。

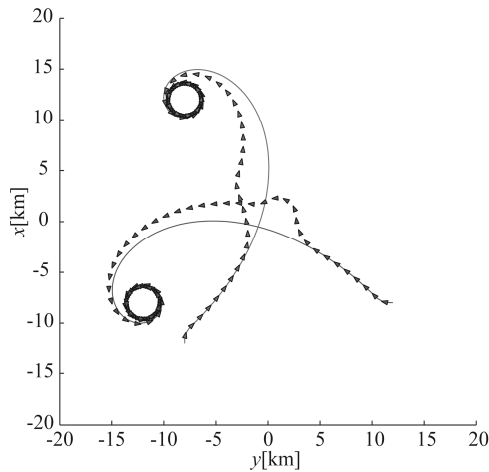


図3 水平面内における2機の回避経路の例 (雑誌論文, 実線はノミナル経路)

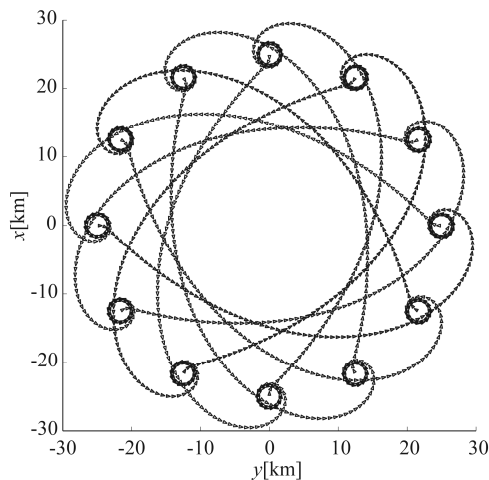


図4 水平面内における12機の回避経路の例 (雑誌論文)

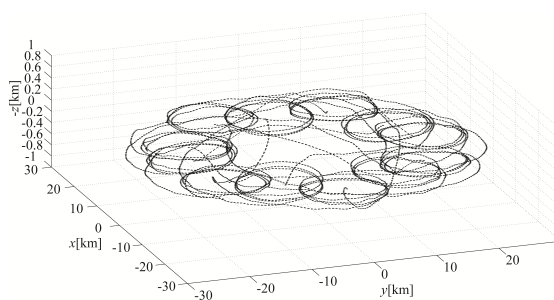


図5 3次元空間内における12機の回避経路の例 (学会発表)

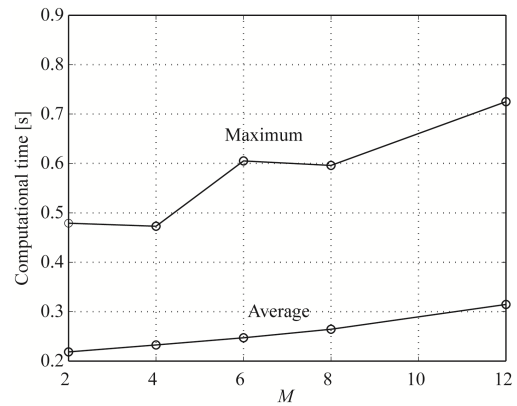


図6 機体数 M と計算時間 (雑誌論文)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Nobuhiro Yokoyama, Model Predictive Control for Parallel Planning of Conflict Free Trajectories for Multiple Aircraft, Transactions of the Japan Society for Aeronautics and Space Sciences, 査読あり (掲載決定)

〔学会発表〕(計5件)

Nobuhiro Yokoyama, Decentralized Model Predictive Control for Planning Three-Dimensional Conflict-Free Trajectories, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (AIAA SciTech), Jan. 13-17, 2014, National Harbor, Maryland, USA.

Nobuhiro Yokoyama, Model Predictive Control for Parallel Planning of Conflict Free Trajectories of Multiple Aircraft, The 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Nov. 20-22, 2013, Takamatsu, Kagawa.

横山信宏, 実時間最適化に基づく航空機の衝突回避経路生成, 計測自動制御学会第13回制御部門大会, 2013年3月6~8日, 福岡県福岡市

Nobuhiro Yokoyama, Global Optimization of Path-Constrained Optimal Control Problems via Semidefinite-Programming Relaxations, AIAA 51st Aerospace Sciences Meeting, Jan. 7-10, 2013, Grapevine, Texas, USA.

横山信宏, 半正定値計画緩和に基づく大域的軌道最適化, 計測自動制御学会第29回誘導制御シンポジウム, 2012年5月17~18日, 茨城県つくば市

6. 研究組織

(1)研究代表者

横山 信宏 (YOKOYAMA, Nobuhiro)

研究者番号: 10425788