

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04574

研究課題名(和文) 複数航空機群の自律分散型管制を実現するためのローカルな制御・推定アルゴリズム

研究課題名(英文) Local control / estimation algorithm to realize autonomous decentralized control of multiple aircraft

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学群)・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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：複数航空機に対する自律分散型の管制への適用を念頭に、各機が独立して飛行軌道の更新を行ってもコンフリクト(安全間隔を下回っている状況)が生じないような最適飛行軌道の生成手法を提案した。提案手法では、各機が持つ飛行意図の推定を適宜実行しつつ、その推定結果や通信遅延、風等に不確かさがあるという条件下においてもコンフリクトのない最適軌道を高速に求められるようにしている。その有効性は数値シミュレーションによって確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無人・有人のどちらの航空機についても、将来的にはより高密度な環境下で運航することが期待されているが、そのために欠かせないのが、コンフリクトの無い各機の飛行軌道を計算する技術である。本研究で提案された手法は、各種の現実的な状況を考慮した条件下で、コンフリクトのない最適軌道を高速かつロバスト(頑健)に得ることを可能としており、将来の高密度な航空機運航の実現に向けた基盤技術として寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：In order to apply to autonomous decentralized control for multiple aircraft, we proposed a method for planning optimal flight trajectory so that conflicts (i.e., loss of necessary separation) do not occur even if each aircraft updates its flight trajectory independently. The method incorporates flight intent inference as appropriate and calculates conflict-free trajectories at high speed even under uncertain conditions in intent inference results, communication delay, wind, etc. The effectiveness of the method was confirmed by numerical simulations.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：自律分散 飛行意図推定 モデル予測制御 不確かさ 逐次凸化 コンフリクト(干渉)回避 実時間最適化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

無人機の実利用の動きが世界規模で加速しており、それに伴い無人機が一部空域を有人機と共有することも検討されている。このように多種の航空機が同一の空域で飛行する場合、各機にコンフリクト回避の責任を持たせる形で、機体間の情報共有に基づく自律分散型の管制を行うことが有効となる可能性がある。また、旅客機の運航についても、中央集中型でなく、各機に飛行中のコンフリクト回避の権限と責任を一部委譲する形の航空交通管理システムについて検討が進められている。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究は、様々な目的地や任務等を有する複数の航空機に対する自律分散型の管制に適用とすることを念頭に、以下を満たす制御・推定アルゴリズムを提案し、その有効性を数値シミュレーションで実証することを目的として実施した。

- (1) 各機が独立して飛行軌道の更新を行ってもコンフリクトが生じないように、機体間の情報共有に基づいて自律分散的に飛行軌道を生成できること
- (2) 各機における飛行意図の推定を利用したコンフリクト回避、および飛行意図推定の結果や風条件・通信遅延の不確かさを考慮したロバストなコンフリクト回避を実行できること
- (3) コンフリクト回避や各種の不確かさ条件を含む飛行軌道生成問題を実時間レベルで高速に解けること

3. 研究の方法

(1) 自律分散型の軌道最適化に対応したコンフリクト回避問題の定式化

各機が独立に軌道最適化を行っても軌道間で必要な間隔を確保できるような、機体間の情報共有に基づくコンフリクト回避問題の定式化を行った。飛行計画の共有に基づく定式化だけでなく、通信面での実用性を考慮して動態(位置・速度)情報だけの共有に基づく定式化も行った。

(2) 飛行意図推定およびその不確かさを考慮したコンフリクト回避問題の定式化

これまで独自に開発・提案してきた周辺機の飛行意図推定手法(最適制御の逆問題を解く手法)に対して、AD 運航への対応やコンフリクト回避時の方向の推定などを含む拡張を施した。また、この拡張版の飛行意図推定を利用したコンフリクト回避問題を定式化するとともに、推定の特性を考慮した離散的な飛行意図の不確かさのモデル化も行い、コンフリクト回避問題への反映を行った。

(3) 風速や通信遅れ等の様々な不確かさへの対処

実用上の影響の大きいことが想定される風速や通信遅延の不確かさを考慮したコンフリクト回避問題の定式化を行った。

(4) 高速計算に適した軌道最適化手法の検討

軌道最適化問題は一般に非凸最適化問題として表現されるが、これを逐次凸化によって高速に解けるようにすべく、それに適した機体運動モデルの導出を行った。また、軌道最適化問題に対する汎用的で高速な解法として、問題を非凸 2 次制約 2 次計画問題に変換した後、逐次凸化するアプローチを導出した。さらに、確率的な不確かさを含む軌道最適化問題の解法についても検討を行った。

4. 研究成果

(1) 実時間での飛行計画の情報が共有可能という仮定のもとで、各機による独立計算に対応したコンフリクト回避条件と凸 2 次式表現による機体の運動モデルを導入した軌道最適化問題を解くアルゴリズムを開発し、交通流形成問題(複数機を 1 つの参照軌道に収束させる問題)に適用した。機数・初期状態・風速などを様々な変化させたシミュレーションを通じて、実時間計算が可能であることや、ほとんどのケースで安全間隔を維持しながら効率的な交通流形成を行えることを確認した(文献)。図 1 にシミュレーション結果の例を示す。また、実時間で動態情報だけが共有されるという前提のもと、周辺機の飛行意図推定(文献)とそれに基づく機体間の協調速度ベクトルの計算を事前に行い、求めた協調速度ベクトルに基づいて分散型モデル予測制御による軌道最適化を行うアルゴリズムも開発し、得られる軌道の妥当性や計算速度の実用性を、複数の条件下でのシミュレーション結果から確認した(文献)。図 2 に、異なる目的地に向かう 2 機間のコンフリクト回避に適用したシミュレーション結果の例を示す(図中の CPA は最接近点(Closest Point of Approach)を意味する)。このシミュレーションでは Aircraft 2 に左回避しか行わないという飛行意図を持たせている。Aircraft 1 は当初コンフリクトを解消する上で効率的な右回避を行おうとするが、飛行意図推定の結果が反映されてすぐに左回避に切り替えており、意図推定を組み合わせることの有効性が確認された。

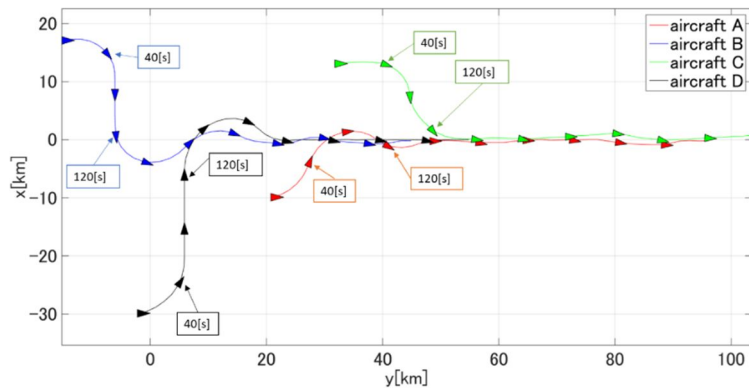


図1 コンフリクト回避を伴う交通流形成の例(文献より)

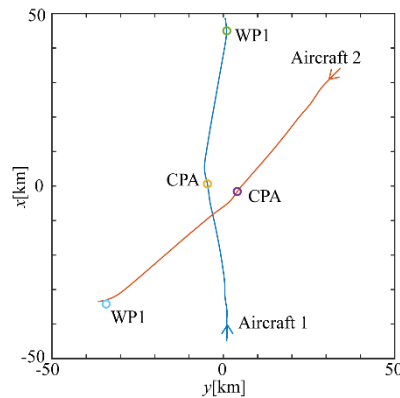


図2 飛行意図推定に基づくコンフリクト回避の例(文献より)

(2) 上記(1)の手法の拡張版として、飛行意図推定を利用しつつ、その離散的な不確かさを風の不確かさとともに考慮して複数機間の協調速度ベクトルを同時最適化する手法(文献)と、同時最適化を無くした上で、飛行意図や風の最悪ケースを想定したコンフリクト回避条件を設定し、完全分散型のモデル予測制御によって軌道最適化を行う手法(文献)の二通りを提案した。飛行意図としては、一連の4Dウェイポイント(時刻と位置座標を指定したウェイポイント)の通過や定点回りの旋回などに対応できるようにしている。目的地や任務の異なる複数機のコンフリクト回避シミュレーションへの適用の結果、両手法ともにロバストな間隔確保性能を有することが確認できた。図3に後者のシミュレーション結果の例を示す。また、通信遅延の不確かさを考慮した軌道最適化(ただし飛行意図推定は含まない)についても検討を行い、一定のロバスト性と計算負荷のスケラビリティ・実時間性を確認することもできた(文献)。

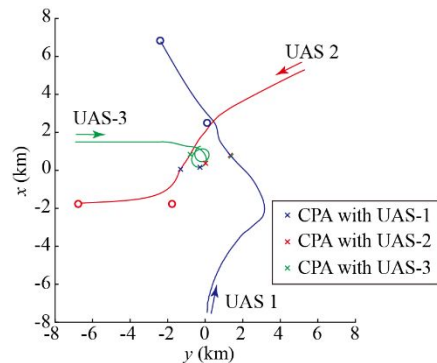


図3 飛行意図や風外乱の不確かさのもとでのコンフリクト回避の例(文献より)

(3) 不確かさに対応可能な汎用的軌道最適化手法として、Unscented変換に基づく確率的表現と、それに伴う非凸制約条件の逐次凸化・凸緩和を用いたモデル予測制御ベースの手法を提案した。これは、多くの確率変数を伴う問題においても、比較的高速な計算が可能な手法である。この手法を単一の航空機に対する不確かさのもとでの軌道最適化問題(風速およびインナーループの対気速度制御則の応答が不確かさを持つ問題)に適用し、実時間レベルで妥当な計算結果が得られることを確認した(文献)。

(4) 有理多項式や三角関数を含む式で表される動的システムの軌道最適化について、凸な2次目

的関数と複数個の凸 2 次制約，および単一の凹 2 次制約を用いてスパースな式で表現するための一般的枠組みを示すとともに，そのスパース性を活かしつつ凹制約を逐次凸近似して高速な最適化計算を実行するアルゴリズムを新たに提案した（文献 ）。上記(2)の飛行意図・風・通信遅延の不確かさを考慮した複数機のコンフリクト回避問題や，より複雑な問題である質点航空機の地上車両とのランデブー問題（文献 ）への適用を通じて，提案したアルゴリズムの有効性を確認することができた。なお，このアルゴリズムは，上記(3)の Unscented 変換に基づく不確かさの表現にも適用が可能である。

(5) 派生的な研究テーマとして，自律分散的な制御則を適用した無人機による，群への合流可能性判定に関する解析手法についても提案を行った。限られたセンサー・通信能力を持つ無人機が大型無人機の率いる群にピギーバックのような形で合流する場合等への応用を想定したものであるが，合流先の無人機の軌道に不確かさがある場合でも，混合論理的システムを用いた定式化に基づく最適化問題を解くことで，ロバストに合流可否の判定を行えることを確認した（文献 ）。

< 引用文献 >

- Kotaro Kakehashi and Nobuhiro Yokoyama, Real-Time Traffic Flow Formation of Multiple Aircraft Using Distributed Model Predictive Control, The Proceedings of the 2018 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2018), Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 459, 2019, pp.2036-2052.
- 阿河菜々花，横山信宏，逆最適制御に基づく 3 次元空間上での飛行意図の推定，日本航空宇宙学会論文集，Vol. 66, 2018, pp.135-142.
- 横山信宏，飛行意図推定を利用した複数航空機の分散的軌道最適化，日本航空宇宙学会論文集，Vol. 69, 2021, pp.197-205.
- Nobuhiro Yokoyama, Decentralized Conflict Detection and Resolution Method Accounting for Uncertainties of Trajectories, Proceedings of 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2021.
- Nobuhiro Yokoyama, Decentralized Trajectory Optimization for Multiple UASs under Uncertainty of Intent and Wind, Proceedings of 10th IFAC Symposium on Robust Control Design (ROCOND 2022), 2022.
- 外園悠希，横山信宏，通信の不確かさを考慮した複数の固定翼無人機の軌道最適化，第 59 回飛行機シンポジウム講演集，2021.
- Nobuhiro Yokoyama and Yoshinori Matsuno, Stochastic Model Predictive Control for Airspeed Optimization Using Successive Convexification, Proceedings of AIAA SciTech 2019 (AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference), 2019.
- 横山信宏，DC 計画法に基づく航空機の軌道最適化問題の定式化とその解法，第 8 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム講演集，2021.
- ド・ヴァン・クアン，横山信宏，DC 計画法を用いた複数 UAV と UGV とのランデブー軌道最適化，第 9 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム講演集，2022.
- 齋藤遼太郎，横山信宏，軌道の不確かさに対するロバスト性を保証した無人航空機の合流解析手法，航空宇宙技術，Vol. 19, 2020, pp.121-129.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 齋藤遼太郎, 横山信宏	4. 巻 19
2. 論文標題 軌道の不確かさに対するロバスト性を保証した無人航空機の合流解析手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 121-129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.JSASS-D-19-00011	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 阿河菜々花, 横山信宏	4. 巻 66
2. 論文標題 逆最適制御に基づく3次元空間上での飛行意図の推定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 135-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.66.135	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 Kotaro Kakehashi and Nobuhiro Yokoyama	4. 巻 459
2. 論文標題 Real-Time Traffic Flow Formation of Multiple Aircraft Using Distributed Model Predictive Control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Proceedings of the 2018 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2018), Lecture Notes in Electrical Engineering	6. 最初と最後の頁 2036-2052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-13-3305-7_163	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 横山信宏	4. 巻 69
2. 論文標題 飛行意図推定を利用した複数航空機の分散的軌道最適化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 197-205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.69.197	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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Nobuhiro Yokoyama
2. 発表標題 Decentralized Trajectory Optimization of Multiple Aircraft Using Intent-Based Coordination
3. 学会等名 AIAA SciTech 2021 (AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山信宏
2. 発表標題 DC計画法に基づく航空機の軌道最適化問題の定式化とその解法
3. 学会等名 第8回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 2021年

1. 発表者名 横山信宏
2. 発表標題 飛行意図推定を利用した複数航空機の分散的軌道最適化
3. 学会等名 第58回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiro Yokoyama
2. 発表標題 Decentralized Conflict Detection and Resolution Method Accounting for Uncertainties of Trajectories
3. 学会等名 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山信宏, 松野賀宣
2. 発表標題 不確かな風を考慮した航空機の降下軌道最適化
3. 学会等名 計測自動制御学会 第7回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤遼太郎, 横山信宏
2. 発表標題 軌道に不確かさを含む無人航空機群の合流の解析
3. 学会等名 第7回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryotaro Saito and Nobuhiro Yokoyama
2. 発表標題 Mixed Logical Dynamical Modelling of UAV Cluster Controlled by Decentralized Law
3. 学会等名 2019 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤遼太郎, 横山信宏
2. 発表標題 群行動する無人航空機の交通流形成の解析
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Yokoyama and Yoshinori Matsuno
2. 発表標題 Stochastic Model Predictive Control for Airspeed Optimization Using Successive Convexification
3. 学会等名 AIAA SciTech 2019 (AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kotaro Kakehashi and Nobuhiro Yokoyama
2. 発表標題 Real-Time Traffic Flow Formation of Multiple Aircraft Using Distributed Model Predictive Control
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤遼太郎, 横山信宏
2. 発表標題 確率的予測に基づく航空機のロバストな衝突回避手法の一検討
3. 学会等名 第6回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

1. 発表者名 棧宏太郎, 横山信宏
2. 発表標題 風外乱の環境下における複数航空機の実時間交通流形成
3. 学会等名 第56回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Yokoyama
2. 発表標題 Decentralized Trajectory Optimization for Multiple UASs under Uncertainty of Intent and Wind
3. 学会等名 10th IFAC Symposium on Robust Control Design (ROCOND 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Hokazono, Nobuhiro Yokoyama
2. 発表標題 Trajectory Optimizations of Unmanned Aircraft Systems Including Conflict Resolution Under Communication Uncertainty
3. 学会等名 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 外園悠希, 横山信宏
2. 発表標題 通信の不確かさを考慮した複数の固定翼無人機の軌道最適化
3. 学会等名 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ド・ヴァン・クアン, 横山信宏
2. 発表標題 DC計画法を用いた複数UAVとUGVとのランデブー軌道最適化
3. 学会等名 第9回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 2022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
---------	---------