

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18289

研究課題名(和文) 飛行モードのオンライン推定を利用した有人および無人航空機の間隔確保システム

研究課題名(英文) Separation Assurance System for Manned and Unmanned Aircraft Using Real-Time Inference of Flight Mode

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：複数の有人および無人航空機を同一空域で安全に運用するための基礎技術として、時々刻々における各機の飛行意図(目標点への移動、定点周りの旋回、他機・領域回避等の飛行モード)を実時間で推定するアルゴリズムと、推定した意図に基づく軌道予測を利用して間隔確保を各機で分散して行うための実時間軌道最適化アルゴリズムを提案した。また、様々な条件下での数値シミュレーションを通して、これらのアルゴリズムの有効性(推定の正確さ、軌道の妥当性)および計算の高速性を確認した。

研究成果の概要(英文)：As a basic technology for safely operating multiple manned and/or unmanned aircraft in the same airspace, we proposed 1) an algorithm for real-time inference of flight intent (e.g., travelling to a target point, turning around a fixed point, separation from neighboring aircraft or a certain region) of each aircraft, and 2) a decentralized real-time trajectory optimization algorithm to maintain the separation from neighboring aircraft using the trajectory prediction based on the flight intent inference. Through numerical simulations under various conditions, the inference accuracy, the validity of the trajectories, and the high computational speed of these algorithms were confirmed.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：航空機 推定アルゴリズム 実時間最適化 間隔確保 モデル予測制御 自律分散 軌道最適化 逆最適制御

1. 研究開始当初の背景

無人航空機に対する需要が世界的に高まっており、有人航空機の飛行する空域の一部においても混在する形で運航できないか検討されている。このような空域においては、多様な飛行目的・飛行パターンを有する複数の機体が存在するため、常に安全な間隔確保を各機の責任下で実現することが重要となる。また、従来の有人航空機だけの運航空域においても、各機の責任の元で間隔確保を行いつつ、軌道設定の自由度を向上させてより効率化を図るような運航が検討されている。

上に挙げた運航形態のどちらも、潜在的な衝突可能性を正確に予測することと、それを回避するための軌道計算を各機が実時間で独立して行うことを必要とする。これらのためには、一般に周辺機の飛行予定軌道が分かっている必要はないが、現行システムにおいては、空域内のすべての機体間で軌道情報を共有することが難しい。一方、比較的実装が容易な周辺機の現在位置・速度の観測に加えて、ウェイポイントへの移動、定点周りの旋回、他機・領域の回避などの飛行意図(飛行モード)に関する情報が得られれば、潜在的な衝突可能性を予測して自律的に間隔確保を行うのに役立つと考えられる。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究は以下の3つの目的のもとで実施した。

- (1) 時々刻々において観測された航空機の位置・速度等の情報から、その機体の飛行意図(飛行モード)を推定するアルゴリズムを提案すること
- (2) 推定した飛行意図を利用して、自律分散的に機体間の安全な間隔確保を実現できるような実時間軌道計算アルゴリズムを提案すること
- (3) 上記(1)、(2)のアルゴリズムについて、様々な数値シミュレーション例を通じてその有効性および実時間での計算可能性を実証すること

3. 研究の方法

(1) 飛行意図推定アルゴリズムの検討

パイロットやオペレータの有無に関わらず、一般に、航空機の操縦のいかなるフェーズにおいても、何らかの目的に基づく合理的な制御が行われている。そこで、本研究では、過去の飛行軌道が、何らかの目的関数に基づく準最適制御則によって得られたものと仮定し、最適制御の逆問題、すなわち、観測された飛行軌道から目的関数を逆算する問題として飛行意図の推定問題を定式化し、それを解くための有効なアルゴリズムを検討した。

(2) 実時間軌道計算アルゴリズムの検討

推定された意図から周辺機の将来軌道を予測して自律分散的に回避するための、実時間軌道計算アルゴリズムについて検討を行った。具体的には、回避のための制約条件を含む有限時間の最適制御問題(モデル予測制御問題)としての定式化と、将来軌道の予測において、他機の誘導制御則や風等に起因する不確かさを反映するためのアプローチについて検討を行った。

4. 研究成果

(1) 飛行意図推定

2次元および3次元空間において、観測された飛行経路から最適制御の逆問題を解き、特定のウェイポイントへの移動、ウェイポイント周りの旋回、他機や領域(悪天候領域や飛行制限区域)の回避といった各飛行意図の目的関数への寄与度(重み係数の値)を求めるアルゴリズムを開発し、数値シミュレーション例を通じて、得られる推定結果の妥当性(軌道と推定意図との間の整合性)や実時間での計算可能性を示すことができた[雑誌論文, 学会発表, -]。また、提案アルゴリズムが、ウェイポイントの情報が不明な場合や、軌道が風の影響を受ける場合にも適用可能であることを示した[雑誌論文, 学会発表]。

飛行意図推定に関する数値計算例を図1および図2に示す。図1は2次元空間におけるシミュレーションで生成した観測軌道の例であるが、図2に示すとおり、時々刻々の推定によって重みの数値として求めた飛行意図の時間履歴は、図1の軌道の様相と整合している。各サンプリングにおける計算時間は、通常のノートPCを使用した場合、最大でも約0.23[s]と、十分に短い値であった。

さらに、提案アルゴリズムでは、観測軌道が最適性の必要条件だけでなく十分条件も近似的に満足するような条件設定を実時間計算の枠組みで施すとともに[雑誌論文, 学会発表,]、各飛行意図の目的関数への寄与度が数学的に一意に定まるための条件についても導出した[雑誌論文, 学会発表]。これらにより、アルゴリズムの理論的な妥当性を保証できるようになった。

航空機の飛行意図推定に関する先行研究は幾つか存在するが、最適制御の逆問題という視点からこの問題に取り組んだ例はなく、提案したアルゴリズムは本研究独自のものである。今後の課題として、より様々な飛行パターンを反映した実用的な意図推定を行うべく、提案アルゴリズムの拡張を行うことや、ウェイポイント情報・風の不確かさに対する定量的なロバスト性評価を行うことなどが挙げられる。

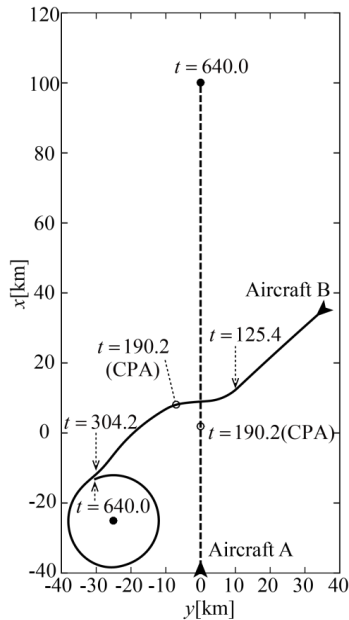


図1 観測軌道の例 (雑誌論文 より)

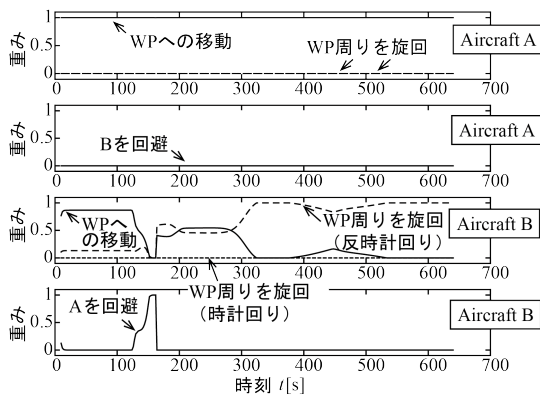


図2 図1の軌道に対して推定された重み (雑誌論文 より、一部日本語表記に修正)

(2) 実時間軌道計算

実時間軌道計算のための基礎的なアルゴリズムとして、多項式で記述された非線形動的システムに対するモデル予測制御のアルゴリズムを開発した[学会発表]。このアルゴリズムのオフライン計算部分は、閉ループ系の安定性、評価関数の上限値、オンライン計算の可解性を予め保証できるという特徴を有し、また、オンライン計算部分は高速計算が可能である。間隔確保問題への適用は将来的な課題であるものの、簡易的な例題では良好な最適化計算結果が得られることを確認できた。

また、飛行意図推定を利用した間隔確保の手法として、分散型モデル予測制御(各サンプリング時間に、各機が独立して有限時間の最適制御問題を解く手法)に基づく軌道最適化アルゴリズムを開発した。特に、間隔確保のための許容領域について、0-1変数を用い

て表す場合と、凸領域で近似する場合の比較検討を行い、それぞれの特性に応じた妥当な飛行軌道が得られること、および平均計算時間が実用的なレベルとなることを確認した[学会発表]。

回避軌道に関する数値計算例を図3および図4に示す。これらは、0-1変数を用いて間隔確保のための許容領域を表す手法を適用した場合の最適軌道を表している。飛行意図推定を利用していない図3の軌道では、赤線部分において許容間隔を下回っているのに対し、図4の軌道では、飛行意図推定を利用してより正確な予測軌道を生成することにより、許容間隔を全域で確保できている。

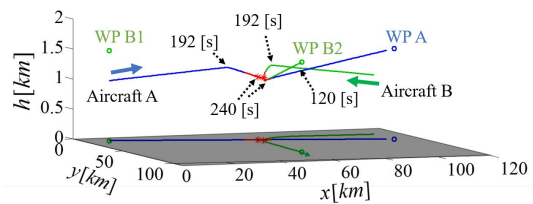


図3 意図推定を利用しない場合の3次元回避軌道の例 (学会発表 より)

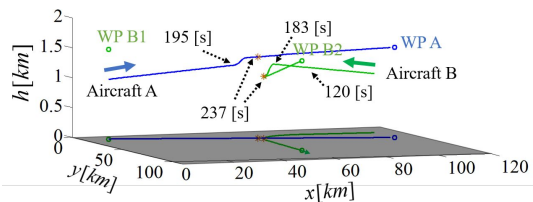


図4 意図推定を利用した場合の3次元回避軌道の例 (学会発表 より)

さらに、実用性の観点から、周辺機の誘導制御則・風・飛行意図等の不確かさのもとで、各機が自律分散的に間隔確保を行うためのアルゴリズムも開発した[学会発表]。これは、不確かさのもとで起こる確率的な軌道のばらつきを、Unscented変換と呼ばれる手法で定式化し、上述の分散型モデル予測制御に組み込んだものである。また、実時間計算を可能にすべく、最適化問題の制約条件に逐次凸近似と呼ばれる手法を適用することにより、計算負荷を軽減している。数値シミュレーションを通じて、このアルゴリズムで得られる軌道の妥当性と計算の実時間性を確認することができた。

このアルゴリズムによる数値計算例を図5に示す。ここでは、他機回避の意図を持たず、ウェイポイント B1, B2 を順次通過する意図だけを持った航空機 B に対し、航空機 A が回避を行うシナリオを想定している。航空機 A が航空機 B の意図を推定しない場合は、許容間隔を大幅に下回っているのに対し、推定を

行う場合は、ほぼ安全間隔を達成できている。これは、意図の不確かさを反映して予測軌道の拡がりをより保守的に表現した効果によるところが大きい。この計算例における1サンプリング時間あたりの最大計算時間は、通常のデスクトップ計算機を用いた場合で約0.17[s]と、十分に短い値であった。

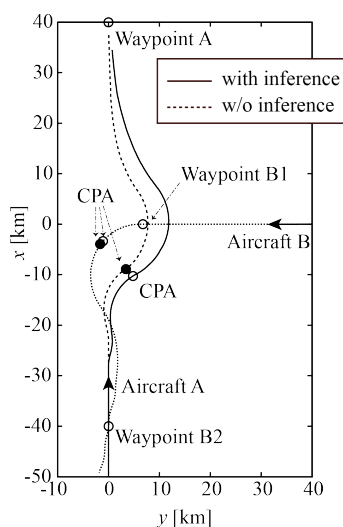


図5 不確かさのもとでの最適回避軌道の例 (学会発表より。CPAは最接近点を表す。)

モデル予測制御に基づく間隔確保軌道の最適化を提案している先行研究も幾つか存在するが、飛行意図推定やその不確かさを反映したモデル予測制御を提案している点が、本研究における独自の成果である。今後の課題として、学会発表で検討したような、閉ループ系の安定性や実時間計算の可解性を予め保証できるような手法を適用可能とすべく、定式化の修正を行うことが挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

N. Yokoyama, Inference of Aircraft Intent via Inverse Optimal Control Including Second-Order Optimality Condition, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 41, No. 2, 2018, pp. 349-359, 査読有。
DOI: 10.2514/1.G002792

〔学会発表〕(計9件)

N. Yokoyama, Decentralized Conflict Detection and Resolution Using Intent-Based Probabilistic Trajectory Prediction, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (AIAA SciTech Forum 2018)*, AIAA 2018-1857, 2018.
DOI: 10.2514/6.2018-1857

阿河菜々花, 横山信宏, 飛行意図推定と

モデル予測制御を利用した航空機のコンフリクト回避に関する研究, 第5回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, Paper No. Sa93-1, 2018.

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, 第55回飛行機シンポジウム, JSASS-2017-5111, 2017.

N. Aga and N. Yokoyama, Conflict Resolution Using Flight Intent Inference of Neighboring Aircraft, *2017 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology*, Paper No. G4-1, 2017.

N. Yokoyama, Inference of Aircraft Intent via Inverse Optimal Control Including Second-Order Optimality Condition, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (AIAA SciTech Forum 2017)*, AIAA 2017-1254, 2017.
DOI: 10.2514/6.2017-1254

N. Yokoyama, Inference of Flight Intent Based on Inverse Optimal Control, *30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2016-0501*, 2016.

N. Yokoyama, Inference of Flight Mode of Aircraft Including Conflict Resolution, *2016 American Control Conference*, pp. 6729-6734, 2016.
DOI: 10.1109/ACC.2016.7526731

N. Yokoyama, Approximate Model Predictive Control for Polynomial Systems Using Sum-of-Squares Programming, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (AIAA SciTech Forum 2016)*, AIAA 2016-0869, 2016.
DOI: 10.2514/6.2016-0869

横山信宏, 航空機の飛行モード推定に関する一覽書, 第58回自動制御連合講演会, Paper No. 1F1-4, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 信宏 (YOKOYAMA, Nobuhiro)
防衛大学校・システム工学群・准教授
研究者番号: 10425788

(2) 研究協力者

阿河 菜々花 (AGA, Nanaka)
防衛大学校・理工学研究科・前期課程学生