

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21560816

研究課題名（和文） 最適情報量経路を用いたホバー機の障害物回避に関する研究

研究課題名（英文） Study on Collision Avoidance of Hovering Aircraft using Optimal Information Amount Guidance

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

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、航空機が取得できる情報量を最適化することにより、衝突の危険性を抑えた安全な飛行の実現を示すことである。情報量を物理量と同等に扱い、情報量のフィードバックにより飛行経路の最適化を行う。瞬時における最適化による誘導と将来の区間を含めた最適化による誘導の比較を行い、後者の評価関数に入力の変数の二乗項を含めると、両者は同じ傾向となることが示された。二次元移動体でその有効性を実証した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of research is to develop a guidance and control law that reduces the risk of collision in aerial traffic using optimization of information amount on airspace. The guidance and control law deals with information amount as same as physical values such as velocity or position. Two guidance and control laws are proposed. One is a feedback law of present variables, and the other is a solution of optimal control problem. The optimal trajectory becomes similar to the feedback trajectory when the criterion includes square of input variable. The experiments on the ground traffic system show the advantage of information amount feedback.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：航空宇宙工学、最適制御、ヘリコプター、衝突回避、制御工学

1. 研究開始当初の背景

近年開発が著しい無人機が実用化すれば、幅広い運用が機体されている。地震などの都市災害による地上交通が遮断された時に、これらの無人機はその能力を発揮する。しかし、

飛行領域の安全性は確保されておらず、情報が不完全な環境での飛行が必要である。一方、既に実用化されている無人ヘリコプターは、災害現場の情報収集、山岳地帯で建設支援などに使用されている。これらの飛行環境は必

ずしも良好なものではなく、不確実な情報下での運用が要求される。一方、旅客機などの航空機事故の大半は、不確実な情報下で起きた地面あるいは他機との衝突である。情報量を飛行経路生成にフィードバックすることで、衝突の危険性が低下することが期待できる。さらに、情報量のダイナミクスを考慮し、情報量を獲得する誘導則を含めることで安全性の増加が期待できる。従って、不確実情報下における障害物回避誘導則は、近い将来に必要な技術となることが予想される。

2. 研究の目的

現実の飛行では不確実情報下で行われているにもかかわらず、情報を不確実として扱った研究例は少ない。一般に、国内外に問わず障害物回避の研究^[3]は確実なセンサー情報が入手される前提で進められており、不確実な情報下における安全性の高い誘導則の研究はほとんど行われていない。その点に着目し、本研究の学術的に独創的な点は情報量を物理量と同等に扱う点である。これにより、安全性が高い経路を得ることを可能とする成果が期待できる。人間の行動においても、情報量が不足すれば情報を獲得する行動が知られている。例えば、見通しの悪い交差点を左折するとき、減速したり、右側へ進路を膨らませたりして安全を確保している。これらの人間の無意識行動を、無人機の制御則として実現させることを期待している。

本研究は、「衝突回避制御則」「情報量フィードバック」「実時間最適化」という研究代表者の研究成果を進め、これらの成果を終結させ、実用的なシステムを構築することを目的としている。過去の衝突回避制御則の研究では、衝突の危険性を定量的に表す「危険度」を提案し、その有効性を示している。情報量フィードバックの研究では、情報量を評価することの重要性を導いている。実時間最適化

の研究では、通常オフラインで計算される最適経路を機上計算機で処理可能とする手法を示している。

本研究の主たる目的は、航空機が取得できる情報量を最適化することにより、衝突の危険性を抑えた安全な飛行の実現を示すことである。その目的のために以下を実施する。

(1) 最適情報量経路が衝突回避に有効であることを示す。

(2) 機上で処理が可能な実時間最適計算手法を開発する。

(3) 提案する制御則の有効性を飛行実験により実証する。

これらの課題により、飛行経路のリスク管理が安全性の向上に有効であることを実証する。本研究では、獲得できる情報量を評価関数とする最適制御問題として定式化し、その飛行経路の有効性を示すとともに、屋内飛行実験による実証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するための流れを示す。本研究は「理論解析・評価」をベースに2段階の実証実験である「2次元地上実験」と「3次元飛行実験」で構成されている。検証する制御則は、「情報量フィードバック誘導 (IAF)」と「最適情報量誘導 (OPT)」である。IAF は、研究代表者の過去の研究成果であり、その時点での情報量の値により、制御する誘導則である。

回避経路が得られている。OPT は最適制御理論に基づく誘導であり、現時点から指定された時間内で情報量を最大化する誘導則である。目的で示した3項目に対して、それぞれの研究手法を示す。

(1) 最適情報量経路の検討

情報量を評価関数に組み込んだ最適制御問題を数値的に解くことにより、情報量の評価が最適経路に与える影響を評価する。研究

代表者が作成した最適制御問題プログラムを使用して、数値計算により解を求める。

(2) 実時間最適計算手法の開発

搭載計算機で最適経路を計算するには、有限時間で解を得る必要がある。ところが、最適制御問題の解法の多くは、繰り返し計算で最適性の条件を満たすまで計算を行っており、計算時間の推定が困難である。本研究では、有限時間で解を得る手法の開発とその実証である。研究代表者はこの問題に対して、ホモトピー法を用いた研究を行っている。本研究でも、その手法を応用し、さらに本研究で扱う最小情報量経路問題に適した改良を行うことを目的としている。

(3) 2次元地上実証実験設備の開発と実施

2次元実証実験は、移動体に地上走行車両を用いた平面内の障害物回避誘導則の実証実験である。移動体は方向の制御と加速減速の制御を可能とし、ホバリング機の平面運動の模擬まで可能としている。移動体に搭載された距離測定センサーを用いて、移動体から障害物までの相対距離と方位角を計測できるものとする。この計測値により、移動体が入手している情報量を求めることができ、制御則への入力として利用する。地上実証実験の主目的は、最終的な目的である飛行実証実験に使用する制御ハードウェア、計測機器の検証である。

(4) 3次元飛行実証実験装置の開発と実施

3次元飛行実証実験は、移動体にホバリング機を用い、3次元空間内の障害物回避誘導則の実証を行う。ホバリング機は複数搭載されて電動ダクトファンにより、任意の運動を可能としている。既に地上実証実験で使用された距離測定センサーを用いて、移動体から障害物までの相対距離と角度を計測する。この計測値により、移動体が入手している情報

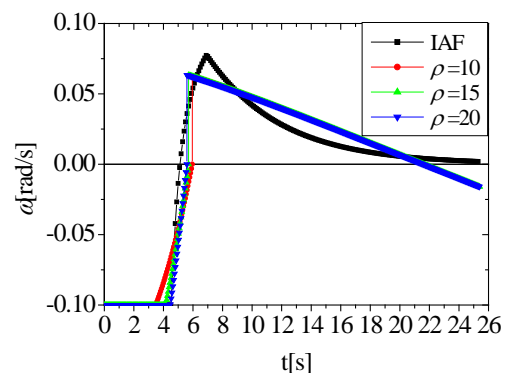
量を求めることができ、制御則への入力として利用する。

4. 研究成果

手法で述べた項目に従って、得られた成果を記述する。

(1) 最適情報量経路の検討

障害物との距離で定義される衝突の危険性を数値で表現した危険度と回避のための入力を評価関数に組み込んだ最適制御問題を数値的に解くことにより、最小限の入力で安全性を確保する最適経路を求めることができる。初期位置を変更して最適経路を求めることにより、最適経路の初期位置の依存性を求めた。IAFで得られる経路は回避の最適性を考慮していないが、最適経路により近い経路が得られれば、安全かつ穏やかな回避が実現したことになる。この目標となる最適経路を求めた。経路の特徴としては、回避のための入力が時間に対して線形に増加する特徴が得られた。一方、IAFで得られた経路も同様の傾向が見られたが、その勾配に差異が見られた。定性的には類似の傾向が得られたが、定量的な調整が必要であるとの結論に至った。次に、獲得する情報量を評価関数として数値解を求めた。これは獲得する情報量を最大限に追及した時の経路を求めることであり、本研究の、IAFの極限值を示すことにな



IAF と入力の二乗項を含む最適入力
の比較： ρ は情報量にかかる重み

る。情報量を最大にするためには、情報量が減少する前に行動をとる必要があり、フィードバックで実現するには新たな課題があることが示された。IAF で得られる軌道は、単に視覚情報の増大のみを考慮した軌道より入力消費（二乗項）を考慮した最適軌道に類似であることが示された。

(2) 実時間最適計算手法の開発

搭載計算機で最適経路を計算するには、有限時間で解を得る必要がある。ところが、最適制御問題の解法の多くは線形近似をベースに開発された計算手法であり、最適性の条件を満たすまで繰返し計算を行っており、計算時間の推定が困難である。そこで、本研究では線形近似を用いない手法であるホモトピー法を適用し、計算時間の確定と短縮を試みた。本手法は本研究への応用のみならず、他の軌道最適化にも応用できる。実装に向けては、計算能力が低い搭載 CPU で計算が可能とするためのアルゴリズムの開発を行い、計算時間の計測を行った。具体的には、帯行列となる逆行行列の計算を、小ブロックに分けて行う独自のアルゴリズムを用いた。計算量は軌道を離散化した計算点数に依存するが、1 秒の計算サイクルに 7 点の離散化した軌道の最適計算が実証実験で使用する搭載 CPU で可能であることが確認された。回避軌道の生成には十分な点数と判断でき、実装の目的は達成できた。

(3) 2次元地上実証実験設備の開発と実施

2次元実証実験とは、移動体に地上走行車両を用いた平面内の障害物回避誘導則の実証実験である。移動体は方向の制御と加速減速の制御を可能とし、ホバリング機の平面運動の模擬まで可能としている。移動体に搭載された測域センサーを用いて、移動体前方領域内に障害物により視野が遮断される領域を求めることができる。この値は移動体が入

手している情報量に直結する値であるので、制御則への入力として利用する。測位センサーと制御用コンピュータのインターフェースを中心に実験設備の開発に着手し、安定して情報量を取得することができた。この地上実験装置を用いて、IFB の実証実験を実施した。地上走行車両に搭載された測域センサーで障害物を感知し、回避する走行実験である。さらに、制御則に IFB を付加した走行実験を実施し、IFB の効果を実証した。数値計算で得られた成果が、ノイズを含む実験でも有効に機能した。なお、1 基のセンサーで情報量レベルの計測と回避すべき侵入機の識別が可能であることが示され、次の段階である飛行体のセンサー数に反映した。

(4) 3次元飛行実証実験装置の開発と実施

飛行実証実験に用いる飛行体の設計を最適化し、製作するための準備を行った。複数のダクトファンを搭載したホバリング可能な機体を設計した。前項の実験成果を受けて、搭載機器の選定を行った。飛行体はホバリング可能な機体でありながら、姿勢を変更せずに移動することを特徴としている。さらに、地面効果を有効に使用することで、消費エネルギーを抑える飛行体を開発していた。飛行実証を行う時は、地面から離れた上空にて三次元軌道生成が可能な場合と地面付近を飛行中における地面の制約を受ける場合を実証できる特徴がある。機体の高度は超音波高度計による計測値をファン出力にフィードバックを行う高度制御を行い、数mmの飛行状態を維持することが実現できた。この地面効果を利用した通常飛行時は、上空を飛行する状態に比べて、約 40%の出力減を達成できた。最適軌道計算を実装 CPU で確認する飛行実験を行うまでに至っていないが、実験に使用する機体の性能特性の計測まで行うことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① T. Higuchi, K. Kokubu, and S. Ueno, Experiment of Collision Avoidance Control Law with Information Amount Feedback using Vehicle Model, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol.6, No.1, 2013, pp.1-6.
- ② T. Higuchi, S. Ueno and K. Iwama, Collision Avoidance Control Law for Helicopters using Information Amount Feedback, 計測自動制御学会産業応用論文集, 査読有, Vol.10, No.24, 2011, pp.182-189.

[学会発表] (計 8 件)

- ① D. Toratani, Research and Development of Double Hexa-rotorcraft (DOT-HR), International council of Aeronautical Sciences, 25 Sept. 2012, Brisbane(Australia).
- ② 上野誠也、視覚情報量フィードバックによる飛行経路形成、第 54 回自動制御連合講演会、2011 年 11 月 20 日、豊橋。

[図書] (計 1 件)

- ① S. Ueno and T. Higuchi, Collision Avoidance Law using Information Amount Feedback, J. Awrejcewicz ed., Numerical Analysis -Theory and Application-, Intech, 査読有, 2011, pp.609-626.

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