

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04588

研究課題名(和文) 航空機を失速から回復させる誘導制御則の確率最適制御理論的アプローチ

研究課題名(英文) Guidance and control law for recovering aircraft from stall condition using stochastic optimal control theory

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) 8,400,000円

研究成果の概要(和文)：航空機の失速後の姿勢損失(LOC-I)は重大な死傷事故につながるために、様々な面から対策をとる必要がある課題である。本研究は誘導制御の立場から二つのアプローチを用いて、失速後の自動回復を実現する方針で研究を進めた。第一のアプローチは非モデル制御で回復制御則の設計を試みた。その効果を検証するために、高精度化した数値モデルを用いた数値計算と模型飛行機を用いた飛行実験で確認することを行った。第二のアプローチは失速後の現象を確率事象として扱い、最適な回復制御を確率最適制御で求めるアプローチである。新規アルゴリズムの開発を行い、計算結果から非モデル制御の改善案の明示が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機の失速後の姿勢損失は重大な死傷事故につながるために、様々な面から対策をとる必要がある課題である。本研究は誘導制御の立場から失速後の自動回復を実現する方針で研究を進めた。失速後の現象は不確実性が多く、厳密なモデル化が不可能である。それに対して、パイロット訓練で用いられている非モデル制御の導入を試みた。検証のために、上空でモニタが可能な計測システムを開発し、模型飛行機を用いた自動制御実験で検証を行った。さらに、失速現象を確率で表現し、最適制御を適用することで、非モデル制御の改善案の明示を可能とした。いずれもアプローチも自動回復に向けた有益な成果が得られ、社旗貢献につながるものである。

研究成果の概要(英文)：LOC-I (loss of control in-flight) occurs outside of the normal flight envelope with uncontrollable motion and always leads to fatal accidents. The final target of this research is to provide an automatic control that prevents the fatal accident. Two approaches are treated in this research. The first one is non-model based control and the other one is stochastic optimal control. Non-model based control is often used in pilot training that does not use a mathematical model for recovery control logic. The effectiveness of designed controller is confirmed in the experiments using hobby aircraft. The measuring system in flight experiment is also developed. Numerical software for stochastic optimal control does not exist, so a new algorithm is developed in this research. The results of optimal control problem after stall condition of aircraft provide the good information to improve the non-model based controller.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：飛行力学 数値流体力学 非モデル制御 失速回復制御 確率最適制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機の失速後の姿勢喪失による操縦不能状態(LOC-I: Loss of control - in flight)は重大な事故につながることが多い。図1は2001年から2010年までの10年間に起こった民間ジェット機事故による死亡者数を原因別に集計したグラフである。事故数では4位であるLOC-Iが死亡者数では第1位となっており、航空死亡事故件数の原因の約4割を占めている。この事態に対して、各国の機関が委員会等を設置してLOC-I事故防止に向けての調査・検討が始められた。米国連邦国空局(FAA: Federal Aviation Administration)や国際民間航空機関(ICAO: International Civil Aviation Organization)では最近になってLOC-I防止の訓練が規定として載せられた。一方、小型機を利用してLOC-I時の訓練を行う民間企業も設立された。しかし、LOC-Iからの回復に明確な手順が示されていない現状であった。LOC-I状態からの最適な回復手順の提示、さらには、自動制御によるLOC-I状態からの自動回復が望まれながら、解決しなければならない課題として未着手のまま残されていた。

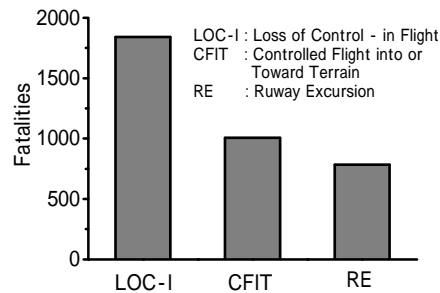


図1 民間ジェット機事故による死亡者数

LOC-I状態からの回復に自動制御が機能できていない理由はLOC-I状態の空力が非定常状態であるためにモデル化が困難であることが挙げられる。姿勢変化中の翼が発生する空気力は非定常であり、定常状態とは異なる値を示すことが実験データで報告されている。その値を正確に求めようとすると、高い精度の流体力計算が必要である。仮に正確に流体力が求められたとしても、僅かな状態の違いで大きな流体力の差が発生する。従来で行われた制御対象をモデル化して制御系を設計する手法には限界があり、航空機の空力モデルを用いずに誘導制御系を構築する手法が必要である。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は確定的モデル化が困難な制御対象に自動制御系を設計することである。理論アプローチとして、信頼性の低い確定的モデルを用いて制御系を設計することは行わず、全くモデルを用いない制御系の設計に着目した。実際、パイロットの訓練ではモデルを用いずにLOC-Iからの回復を実現している。従って、非モデル制御(Non-model based control)によるフィードバック制御を適用することを採用した。しかし、非モデル制御の設計手法には解決すべき問題点があり、本研究では以下の課題を解決することを研究目的とした。

- (1) 非モデル制御の有効性の検証方法
- (2) 最適非モデル制御の設計方法

通常、制御系設計では、有効性の検証にシミュレーションによる検証が行われる。シミュレーションは、数値計算である場合や試験装置である場合がある。しかし、本課題は数値モデルの信頼性が低いので、数値モデルの高精度化は、将来の実現に向けて取り組むべき課題であるが、現状では後者の試験装置による実証に頼らざるを得ない。本課題における試験装置とは、模型航空機に相当する。従って、有効性の検証では、(1-1)失速後の空力モデルの高精度化と(1-2)模型航空機を用いた非モデル制御の検証実験を目的とした。次に、モデルが確定していれば最適な制御の設計方法は既に確立している。本研究の制御対象はモデルが不確定である。この課題に対しては、二段階の目的を設定した。まず、(2-1)確定モデルに対する非モデル制御と最適制御の比較であり、次が(2-2)確率最適制御の適用である。制御対象は不確定現象であるが、同一制御対象に対する性能評価が前者であり、確率分布する制御系対象に対する制御系設計が后者である。このように、研究目標を細分化することで、各ステップの研究成果を確実に得るように目的を設定した。

3. 研究の方法

(1-1) 失速後の空力モデル高精度化

失速後の剥離状態での空気力を計算空気力学(CFD)を用いて算出するには、計算負荷が非常に高いために効率のよい手法を選択する必要がある。本研究では、壁面近傍の速度境界層と空間のはく離流れとを別のモデルを用い、これらを局所的な流れに応じて自動的に切り替える手法を用いた。得られた結果を実験値と比較し、提案する手法の有効性を検討した。

(1-2) 模型航空機を用いた非モデル制御の検証実験

提案する非モデル制御を模型飛行機のコントローラに組み込み、失速状態からの回復制御を行って、制御系の有効性を検証した。模型飛行機であっても、失速時には 30 ~ 50m の高度損失が発生するので、失速は実験担当者から離れた位置で行われる。そのために、失速状態のモニターならびに姿勢計測にカメラを搭載した回転翼機を飛ばし取得した画像から姿勢角等を算出するソフトウェアの開発も行った。このような実験システムの構築が本研究の課題の一つである。

(2-1) 確定モデルに対する非モデル制御と最適制御の比較

非モデル制御と高度損失を最小化する最適制御を失速モデルを持つ航空機の運動方程式を用いて数値シミュレーションで比較を行った。非モデル制御はその時の飛行状態で制御入力を段階的に切替える制御である。一方、最適制御は全制御区間の情報を用いて最適入力を連続関数で与える。当然、高度損失は最適制御の方が少なくなるが、非モデル制御の改善に関する情報を与えることができる。

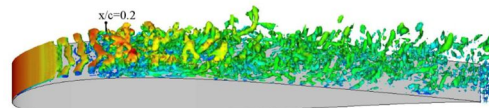
(2-2) 確率最適制御の適用

確率最適制御問題は確率密度関数が与えられる確率変数を含む最適制御問題である。一般に、評価関数が二重積分になるので、必要条件を導くことができない。また確率最適制御問題を解くアルゴリズムもない。それに対して、確率変数を離散化し、複数点で近似的に定式化すれば、従来のアルゴリズムを適用することができる。この離散方法に関する検討を数値計算で確認した。

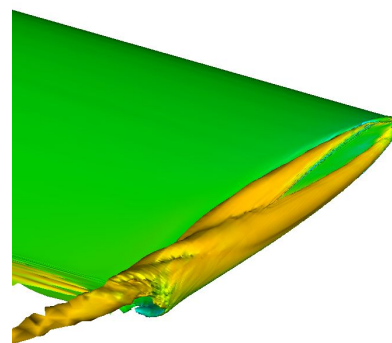
4. 研究成果

(1-1) 失速後の空力モデル高精度化

計算空気力学(CFD)を用いて、航空機まわりのはく離流れと空気力を予測するプログラムを開発し、計算を実施した。高レイノルズ数の乱流の数値計算は非常に計算負荷が高いため、現実的な計算時間で複数ケースの解析を可能とするために、壁面近傍の速度境界層ではレイノルズ平均乱流モデルを用い、空間のはく離流れにはラージエディシミュレーション(LES)を用い、これらを局所的な流れに応じて自動的に切り替える手法(DES)を用いた。また、予測精度の向上にはCFDの計算格子の品質も重要である。壁面近傍では縦横比の大きな格子を用いざるを得ないが、LESには等方的な格子が望ましい。そこで、立方体格子を機体形状に合わせて局所的に細分化していく八分木格子生成法を用いた。以上の解析手法



a) 翼上面はく離渦流れ



b) 切り落とし翼端はく離渦流れ

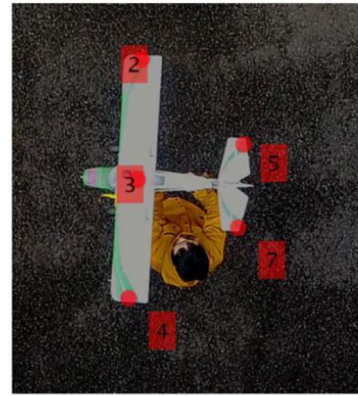
図2 はく離渦流れの解析

を用いて、図2にあるような翼単体の上面はく離渦流れや切り落とし翼端から生じる高迎角はく離渦流れの解析を実施し、圧力等の時間変動値と平均値を実験結果と比較した。その結果、平均値は概ね良好であることが確認され、変動成分の定量的予測には空間の解像度が大きな要因であることが示された。

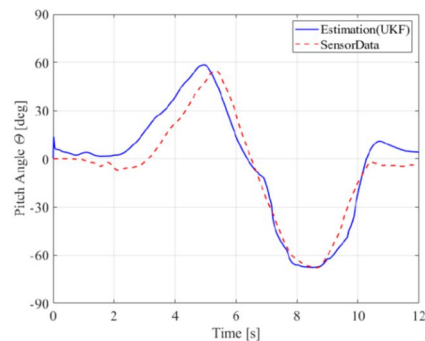
(1-2) 模型航空機を用いた非モデル制御の検証実験

模型航空機を実際に失速させ、その後設計した回復制御を行い、高度損失の低減に有効であるかを実験で計測した。模型航空機には慣性センサーおよび空力センサーが搭載されているが、飛行履歴や姿勢をカメラ画像で計測する実験システムを開発した。模型航空機であっても、失速させる高度は50m以上であり、地上の観測機器からは離れた場所である。そのために、回転翼機を飛行させ、空中での観測点を設けることとした。回転翼機は市販の機体を利用したが、高度保持モードを利用すると安定した高度維持が得られるため、空中での固定点を得ることができる。このような計測システムは実例報告がなく、計測システムの可能性を確認することを主目的とした。搭載したカメラ画像から模型航空機の姿勢を検出するためにソフトウェアを開発した。カメラ画像から模型航空機に塗られた特定色で塗られたマーカを検出し、それが航空機のどの点であるかを識別し、その画像位置から模型航空機の姿勢を算出するソフトウェアである。カメラ画像上のノイズの課題、さらに姿勢によってマーカが見えなくなるために検出点が不連続となる課題がある。観測対象は非線形性が高いシステム方程式を有するために、ノイズ除去にはUKF(Unscented Kalman Filter)を採用した。検出点の不連続性に対して、画像から検出された二次元座標から三次元座標に変換することが必要である。検出点はノイズ等の影響で確率変数であることを考慮して、マハラノビス距離の使用を採用した。図3 a)は高度約20mの上空から地上の機体を撮影した画像であるが、この時のピッチ角を算出した結果が図3 b)である。搭載した慣性センサーのデータを比較した結果、数度の誤差の範囲で計測が可能であることが確認され、本システムの可能性が立証できた。

失速からの回復制御は、パイロットの手順と同じように、飛行状態に応じて、回復操作を段階的に行う制御である。状態量をフィードバックするのではないために、制御対象のモデル情報を利用しない非モデル制御である。制御性能は低下することは否めないが、モデル誤差に対してロバスト性が高く、現象に不確実性が高い失速現象に適していると判断して設計を行った。今回は垂直面内の回復制御系を設計した。ピッチ角や迎角を入力とし、エレベータ操舵ならびに推力操作を出力とする制御系である。設計では仮定した失速モデ

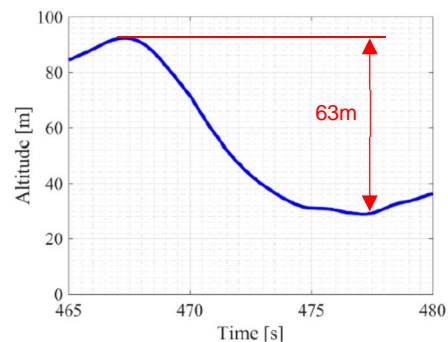


a) 識別点の検出

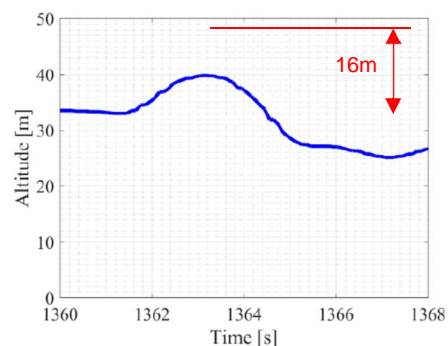


b) 慣性センサー値との比較

図3 画像を用いた機体姿勢検出



a) 無制御状態



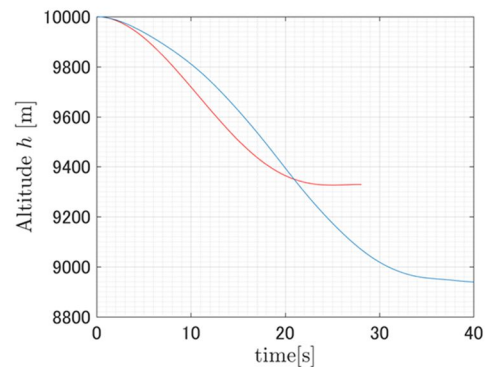
b) 回復制御の実行

図4 模型航空機による失速回復実験

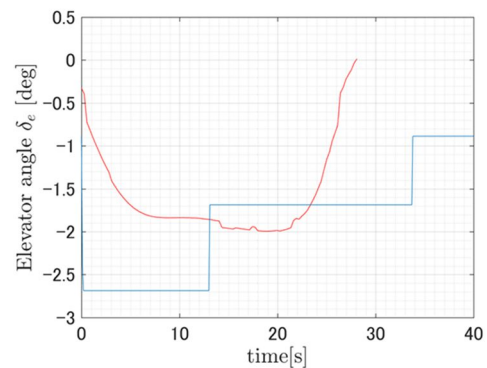
ルを用いて数値計算により有効性を確認したが、その時に使用した失速モデルは実験に用いた模型航空機とは異なる機体データを使用している。図 4 a)は失速後にエレベータ角ならびに推力を定常時に戻しただけの制御を行わない飛行である。航空機を持つ静安定特性から姿勢が戻り、その結果、水平飛行状態に戻る性質がある。高度損失は約 63m であった。図 4 b)は回復操作を搭載コントローラに組み込み、非モデル制御により回復制御を行った結果である。高度損失は約 16m に抑えられている。非モデル制御で設計された失速回復制御則の有効性が確認できた。

(2-1) 確定モデルに対する非モデル制御と最適制御の比較

失速後の回復制御の性能は最低高度で表現することが妥当である。非モデル制御で設計された制御則の性能を確認する目的で、同じ確定モデルを用いて求めた最適制御による最低高度との比較を行った。小型機の空力データを用い、初期条件に水平飛行ができない低い速度を与え、引き上げ後に水平飛行となるまでの損失高度で評価した。結果の一例を図 5 に示す。図 5 は非モデル制御で設計した制御則による回復制御結果を青線で、最適制御の計算結果を赤線で両者の比較を示した。図 5 a)は損失高度を表しており、非モデル制御では 1064[m]、最適制御では 670[m] である。最適制御は与えられた特定のモデルに対する最小損失高度の結果であり、損失高度は少ない値が出てくるがモデル誤差などの不確定性に対するロバスト性は低い。ただ、制御則の限界を示すことと非モデル制御の設計を見直すにはよい情報を与える。例えば、図 5 b)はエレベータ角の比較であるが、前半に差があることが確認できる。他のモデルでも最適制御による入力を求め、全体として同じ傾向が確認できれば、非モデル制御を見直すことができるが、使用した失速を表す空力モデルが多くないので、その段階の改良は行わなかった。



a) 高度の比較



b) エレベータ角

図 5 非モデル制御(青)と最適制御(赤)

(2-2) 確率最適制御の適用

確率最適制御は確率変数を含む最適制御問題である。そのために、確率変数に対する積分を行うことで、評価関数の期待値が計算できる。具体的には次式の評価関数を最小化する。

$$J_1 = \int_{-\infty}^{\infty} p(z) \left\{ \int_{t_0}^{t_1} L(x, u, z) dt \right\} dz \quad (1)$$

ここで z が確率変数、 $p(z)$ が確率密度関数である。しかし、この二重積分の停留点を満たす必要条件を導くことは無理であるので、確率変数を離散化した近似式を用いることとした。

$$J_2 = \sum_{i=1}^N \left\{ w(z_i) \int_{t_0}^{t_1} L(x, u, z_i) dt \right\} \quad (2)$$

確率変数は N 点を選び、それぞれに重み w を掛けた評価関数を定義した。ここで、確率変数の点の選び方および重み w の決め方が課題として挙げられる。確率密度関数が正規分布の場合、離散点で求められる平均値と標準偏差を確率密度関数に一致させると、式(1)と式(2)の評価関数値が一致することまで数値計算で確認した。失速現象への適用は未検討課題として残された。

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 1件）

1. 発表者名 長崎史直、上野誠也、樋口丈浩、齊藤雄太
2. 発表標題 模型飛行機を用いた航空機の失速からの回復制御実験
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 齊藤雄太、樋口丈浩、上野誠也、長崎史直
2. 発表標題 画像情報を用いた航空機の失速時の運動推定
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長崎史直、上野誠也、樋口丈浩
2. 発表標題 航空機の垂直面内における失速からの回復制御に関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第49期年会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daichi Aoki, Takehiro Higuchi, Seiya Ueno and Shunnosuke Nagase
2. 発表標題 Development of Towed-Type Multi-rotor with Fixed Stabilizers
3. 学会等名 Asia Pasific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
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
研究 分担者	樋口 文浩 (Higuchi Takehiro) (20403652)	横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授 (12701)	
研究 分担者	宮路 幸二 (Miyaji Koji) (60313467)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	