

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02340

研究課題名（和文）耐故障飛行制御システムと飛行実証

研究課題名（英文）Fault-Tolerant Flight Control System and Its Flight Demonstration

研究代表者

土屋 武司 (Tsuchiya, Takeshi)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：50358462

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,480,000円

研究成果の概要（和文）：飛行中の航空機が故障を含む従来の自動操縦機構の機能しない状態に陥ったときにおいても、飛行安全が確保され、パイロットに負担をかけない誘導飛行制御システムを得るための研究を行った。既存の自動操縦器、およびパイロットの手動操縦と協調的に使用されることを前提とし、単純適応制御、構造化H<sub>∞</sub>制御といった先進的な制御手法を既存の飛行制御に組み込むことを研究した。また、安全に空港まで誘導する飛行軌道を機上で計算する手法を研究した。その実証試験は数値シミュレーションを用いて行っただけでなく、パイロット操縦を含むフライトシミュレータと無人航空機を用いて実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機が故障を含む状況下においても飛行安全を維持するための誘導飛行制御システムを研究し、数値シミュレーション、パイロット操縦を含むフライトシミュレーション、無人航空機によってその効果を実証した。本研究は先進的な制御手法を航空機の飛行制御に実践適用するという学術的意義があり、またそれによって、航空機の飛行安全を高める社会的意義も持つ。

研究成果の概要（英文）：We conducted research to develop a guidance flight control system that ensures flight safety and does not burden the pilot, even when an aircraft in flight encounters a failure that renders conventional autopilot mechanisms inoperative. The study assumed the use of existing autopilots and manual pilot control in a cooperative manner, and aimed to integrate advanced control techniques such as simple adaptive control and structured H<sub>∞</sub> control into existing flight control systems. Additionally, we investigated methods for calculating flight paths onboard that safely guide the aircraft to an airport. The validation tests were conducted not only using numerical simulations but also with flight simulators, including pilot operations, and unmanned aerial vehicles.

研究分野：飛行力学

キーワード：飛行制御 最適制御 安全

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

航空輸送の需要は指数関数的な増加が予想される一方で、航空機の全損事故の確率は下げ止まりの傾向にある。このため、航空機の墜落事故件数は今後、急増すると危惧されている。航空事故の原因の多くは、パイロットエラー、機材故障によるものと分析されている。一方で、現在の航空機の通常運航は自動操縦で飛行可能であるが、不具合時には自動操縦を手動操縦に切り替えることが必要であり、そのときにパイロットのワークロードの増加が事故に繋がることが多いとされている。

加えて、近年のパイロット不足はパイロット間の技能格差を生じさせている。さらに、いわゆる「空飛ぶクルマ」と呼ばれる小型航空機が新しいモビリティとして多数提案され、高度に知的な飛行制御システムの開発が必要といわれている。それらは、パイロットと飛行制御システムの協調が求められ、また実装を容易にする観点から、既存の飛行制御装置に対してアドホック的に追加が可能であることが望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究は以下の3点の研究を行う。

- (1) 故障など安全を脅かす状態に突然落ちたときにおいても、安定飛行を維持する実用性を考慮した先進的な飛行制御システムの研究
- (2) 上記(1)の飛行制御システムとパイロット操縦の協調制御に関する研究
- (3) 故障などで飛行継続が困難になった航空機を安全にかつ迅速に滑走路まで誘導させる実時間軌道最適化に関する研究

これまで、飛行制御に先進的な制御手法を適用する研究、また実時間飛行軌道最適化に関する研究の多くは、限定的な状況を考慮した数値シミュレーションによる基礎研究に限られている。本研究は、フライトシミュレータ、無人航空機を用いた飛行実証を実施することを目標とし、より現実的な状況の中で、実践適用を念頭に置いて研究することを前提とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、数値シミュレーションに加え、固定座席式のフルフライトシミュレータ、小型無人航空機の整備も行い、これら機器を用いて研究の実証を進めていく。

#### (1) 先進的な飛行制御システムの研究

飛行中に突発的な故障などが発生した航空機が適応的に飛行安定を維持できる耐故障飛行制御システムを研究開発する。あらたに開発する飛行制御システムは、実用化の障壁が低いように、認証を受けた既存の自動操縦システムとは切り離し可能な独立した付加的なシステムとする。基本となる制御手法は、適応制御、ロバスト制御であり、これらを飛行制御システムに応用し、数値シミュレーション、小型無人航空機で実証する。

#### (2) 飛行制御システムとパイロット操縦の協調制御に関する研究

固定座席式のフルフライトシミュレータを整備し、上記(1)で開発した飛行制御システムが存在するなかで、同時にパイロットが操縦を行う Pilot-In-the-Loop シミュレータ実験を行う。パイロットの操縦が飛行挙動に及ぼす影響、またパイロットが受ける感覚について調べる。

#### (3) 航空機の実時間軌道最適化に関する研究

機体故障時の緊急着陸を想定し、パイロットの負荷を低減するために、飛行軌道の自動生成に関する研究を行う。故障によって機体運動に拘束条件が課せられ、また飛行禁止領域などの拘束条件も存在する場合がある。さらに、飛行中の風などの不確定な要因が存在する。これら不確定な条件下、空港まで誘導する最適軌道を航空機オンボードで求めるアルゴリズムを、数値シミュレーション手法を用いて研究する。

### 4. 研究成果

#### (1) 単純適応制御を適用した耐故障飛行制御システムの研究成果

一般的に、耐故障飛行制御 (FTC, Fault-Tolerant Control) システムは、故障検知器と再構築可能な制御器から構成される。一方で、適応制御を用いた場合、故障検知器は陽に必要としないが、故障が起きていない場合もゲインが目標値に対して適応的に変化してしまう。現在の航空機の高い安全性を考慮すると、故障が起きた場合、あるいは重度の故障が起きた場合のみ、故障に対応するために適応制御器を使用することが望ましい。そこで本研究では、故障への対応能力に加え、故障の判断、通常時の最適性などを総合的に満たすために、故障検知器と耐故障制御器を合わせた耐故障飛行制御システムを研究した。

故障検知器 (FDI, Fault Detection and Isolation) では、コマンドと応答の関係を線形自己回帰モデルを使用して航空機の固有運動を推定する。そこから推定された航空機の有次元安定微係数が閾値を越えると故障と判定して単純適応制御が機能を開始し、学習を始める。単純適応

制御を既存の自動操縦制御系に付加することで、既存の航空機への実装が容易となる。

図 1、2 にシミュレーションの結果の一例を示す。飛行シミュレーション開始後に航空機の縦の安定性が減少させる故障が起きたと想定する。提案システムの FDI はおよそ 10 秒後に故障と判断を行い、その後、単純適応制御が学習を開始し、故障に対応した制御を行っている。以上のように、正常飛行時は通常の自動操縦装置が機能し、故障後には耐故障飛行制御システムが機能して機体を制御するシステムを示すことができた。

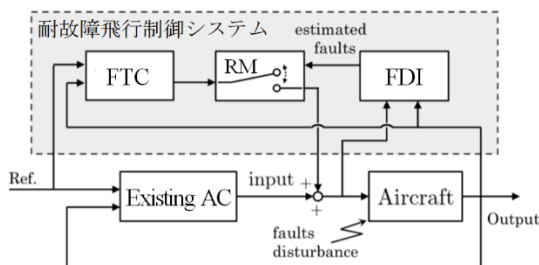


図 1 耐故障飛行制御システムの概要

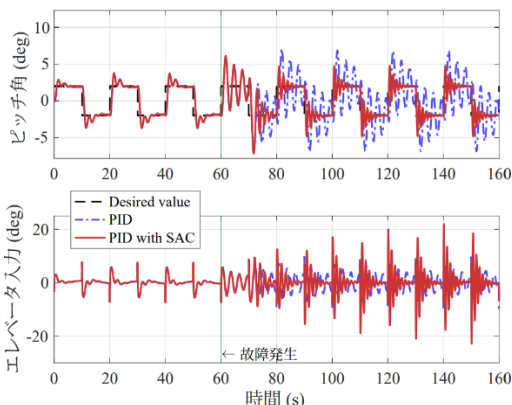


図 2 故障発生前後の挙動

(2) 耐故障飛行制御システムを含む制御システムへ適用する構造化  $H_\infty$  制御に関する研究成果

適応制御を用いた故障検知器付きの耐故障飛行制御システムは、故障を検知し、適応制御が学習を完了するまでの間、一時的に挙動が乱れるという欠点があった。そこで、元の自動制御器に可能な範囲で最大限の安定性を維持させる機能を持たせることを考える。そのために、ロバスト制御を適用することを考えた。一般的なロバスト制御器は高次制御器になる傾向がある。そこでロバスト制御の中でも制御器の構造を指定して設計できる構造化  $H_\infty$  制御に着目し研究した。制御構造としては、実際の航空機に広く適用されている C\*制御則によるフィードバックに加え、飛行条件に応じてゲインを調整する Gain-Scheduled 制御も適用し、設計問題の可解性および制御性能の向上を図った。研究では、晴天乱気流などによって生じる飛行中の動揺が起因となる航空事故を抑制するため、上記の制御手法に事前風情報が得られたとして、それをフィードフォワードとして組み込むことを検討した。

図 3、4 にシミュレーションの結果の一例を示す。航空機の飛行中の挙動を乱す突風外乱に遭遇しても、提案する制御システムは垂直方向加速度 ( $N_z$ ) の変動を抑えていることが分かる。

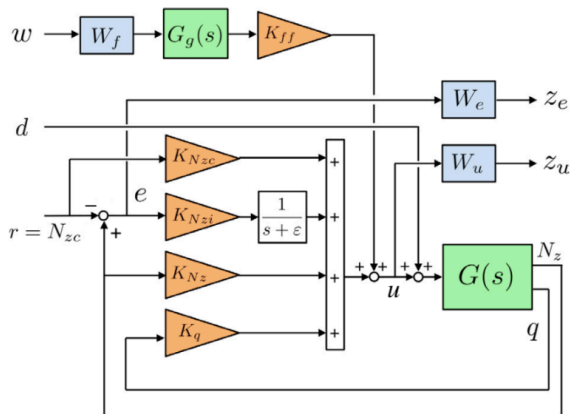


図 3 事前風情報を考慮した構造化  $H_\infty$  制御の概要

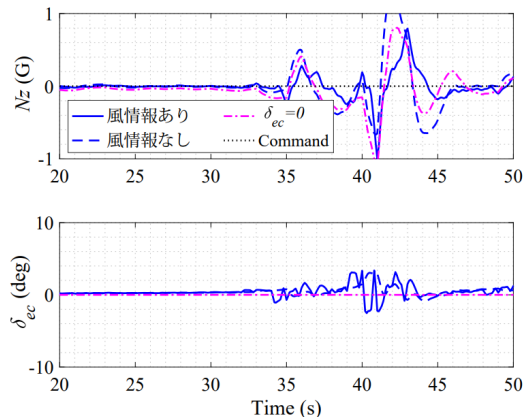


図 4 動揺抑制制御の結果

(3) Pilot-In-the-Loop 試験によるパイロット操縦との協調制御に関する研究成果

操縦シミュレータによる評価は、耐故障飛行制御システムをより実用的で信頼性の高いものにするための重要なステップであると考えた。とくに、適応制御的な手法の場合、パイロット操縦が閉ループ系に存在するため、全体の制御性能が意図しない変化をする可能性があった。本研究では、提案する耐故障飛行制御システムが緊急事態におけるパイロットの作業負担を軽減する効果があるかどうかを検証した。また、故障に限らず、上述したような突風外乱に遭遇した時、パイロット操縦を補助できるか否かの検証を行った。

研究では、図 5 で示す固定座席式フルフライトシミュレータの整備を行った。そして、人間のパイロットを介した Pilot-in-the-Loop 実験により、パイロットの操縦と研究提案した飛行制御システムを組み合わせたシミュレーションを実施し、統計的手法によって実験データを解析した。その結果は、パイロットの操縦が存在するほうが存在しないよりも動揺が大きく、パイロット操縦有りでは平均して制御性能が悪化した。これはパイロット操縦下での飛行制御を設計するには、操縦を考慮に入れた制御系設計を初めから行う必要があることを示している。

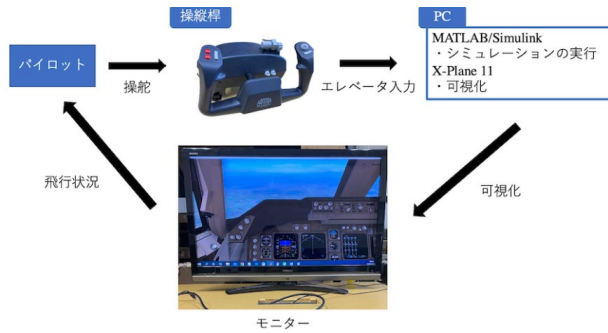


図5 整備された固定座席式フルフライトシミュレータ

(4) 不確実環境下における確率論的軌道最適化法に関する研究成果

不具合を起こした航空機が緊急で着陸する最適軌道を自動で計算するためには、風や航法誘導誤差、故障に伴う航空機モデルの誤差等の不確実性に対応する必要がある。センサによる状態観測と推定、着陸目標までの誘導軌道の実時間生成、フィードバック制御等がこれを構成する。本研究に関して、不確実環境下での共分散勾配に基づく減感度軌道最適化法を提案した。

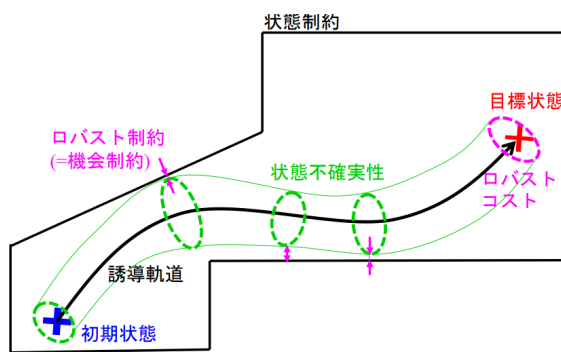


図6 確率論的軌道最適化の概要

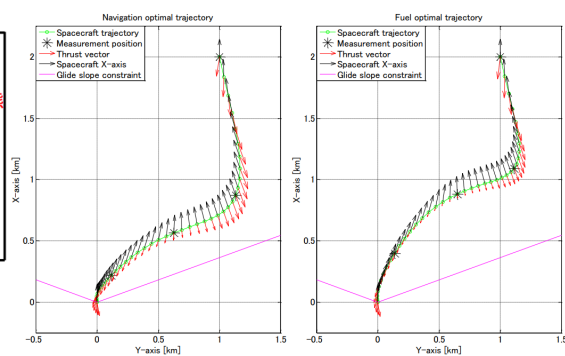


図7 シミュレーションの結果

(5) 航空機の実時間軌道最適化に関する研究成果

上述の軌道最適化法を応用して、故障した航空機が空港まで最短時間に到着できる安全な飛行軌道をオンボードで実時間に計算する手法を研究した。評価関数に将来予測を組み込んだ Receding Horizon 法に離散時間に変化をつけ、さらに最適解の逐次更新に Neighboring Extremal 法を取り入れることを提案した。図8にその計算例を示す。

(6) 無人航空機を用いた飛行実証に関する成果

離陸重量 2kg ほどの小型無人航空機を用意し、本研究で研究された飛行制御システムを組み込んだ飛行制御装置を開発して飛行実験を行った。机上の計算シミュレーションだけでなく、無人航空機であっても実際の飛行で有効性の確認を行った。飛行実験はコロナ禍で実施が遅れたが、研究期間の延長で完結させることができた。

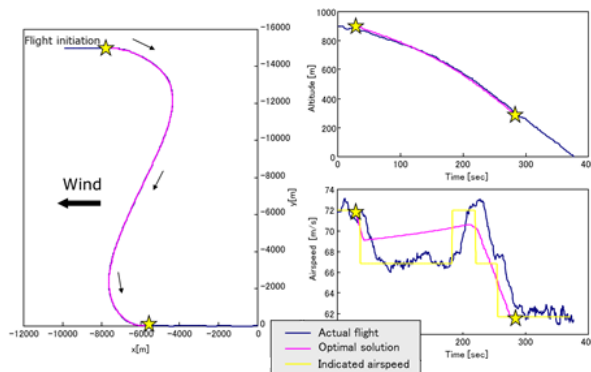


図8 滑走路までの最適軌道計算結果例

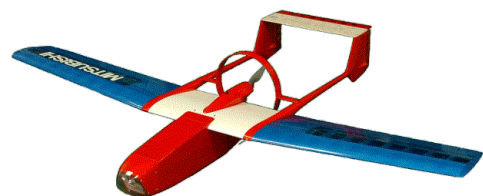


図9 飛行実験に使用した小型無人航空機

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Takase Ryoichi, Yoshikawa Nobuyuki, Mariyama Toshisada, Tsuchiya Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Stability-certified reinforcement learning control via spectral normalization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Machine Learning with Applications	6. 最初と最後の頁 100409 ~ 100409
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mlwa.2022.100409	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8件（うち招待講演 1件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Takase, R., Yoshikawa, N., and Tsuchiya, T.
2. 発表標題 Estimating Bounded Uncertain Model for Stability-Certified Reinforcement Learning
3. 学会等名 2022 61st Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, SICE 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋武司
2. 発表標題 航空機の飛行制御，設計に関する研究・教育とMATLAB活用事例
3. 学会等名 MathWorksライブイベント（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上村常治，松永大一郎，土屋武司
2. 発表標題 人間の操縦を模した、飛行模擬装置の自動着陸
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Komaru, Ryoichi Takase, Takeshi Tsuchiya, Yoshiro Hamada, and Takashi Shimomura
2. 発表標題 Gain-Scheduled Preview Control for Aircraft Gust Alleviation Using Structured H <sub>∞</sub> Control Design
3. 学会等名 The 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shimizu, Y. and Tsuchiya, T.
2. 発表標題 Construction of Deep Reinforcement Learning Environment for Aircraft using X-Plane
3. 学会等名 59th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takase, R., Tsuchiya, T., and Suzuki, S.
2. 発表標題 Consideration for Flight Controller Design Benchmark with OpenAI Gym
3. 学会等名 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田拳斗, 高瀬諒一, 土屋武司
2. 発表標題 Gust Alleviation using Preview Controller for a Flexible Aircraft Model
3. 学会等名 The 2019 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 殿垣克典, 高瀬諒一, 土屋武司
2. 発表標題 Pilot-in-the-Loop Simulation of a Robust C* control law
3. 学会等名 The 2019 Asia-Pacific 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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------