

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月17日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26289321

研究課題名(和文) 耐故障飛行誘導制御に関する研究

研究課題名(英文) Research on Fault Tolerant Guidance and Control of Aircraft

研究代表者

鈴木 真二 (SUZUKI, SHINJI)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：30196828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：飛行中の故障時に、適応的に制御則を調整することで、故障後も安定した飛行を実現する耐故障飛行制御システムを開発し、実験用航空機を用いた飛行試験を実施し、補助翼や昇降舵の効きの低下、飛行中の重心移動による安定性の低下を補償できることを確認した。その後、安定化された機体をパイロットが実際に操縦可能かどうかを評価するために、フライトシミュレータにより故障後のパイロットワークロードを計測し、耐故障飛行制御システムが故障時にパイロットの操縦を容易にすることを確認した。さらに、故障後にパイロットの飛行を支援するために、飛行経路を実時間で最適に生成する実時間最適飛行経路生成システムを開発し有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

飛行中の故障時に、適応的に制御則を調整することで、故障後も安定した飛行を実現する耐故障飛行制御システムを開発し、実験用航空機を用いた飛行試験を実施し、飛行中の故障による安定性の低下を維持できることを確認した。また、安定化された機体をパイロットが実際に操縦できることをフライトシミュレータにより評価し、耐故障飛行制御システムが故障時にパイロットの操縦を容易にすることを確認した。さらに、飛行経路を実時間で最適に生成する実時間最適飛行経路生成システムを開発し、故障後のパイロットの作業を軽減できることを示した。

研究成果の概要(英文)：A fault tolerant flight control system has been developed to achieve stable flight even after a failure by adaptively adjusting the control law during the flight. Flight tests using an experimental aircraft were conducted, and it was confirmed that the decrease in effectiveness of the aileron and elevator and the decrease in stability due to the movement of the center of gravity in flight could be compensated. The pilot workload was measured by a flight simulator to assess whether the pilot could actually maneuver the stabilized aircraft by the proposed system. As a result, it has been confirmed that the fault tolerant flight control system facilitates piloting in case of the sudden fault. Finally, in order to support the pilot's flight after a failure, we developed a real-time optimal flight path generation system that optimally generates the flight path in real time and verified its effectiveness.

研究分野：飛行力学

キーワード：航空宇宙工学 耐故障飛行制御 最適制御 安全

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空輸送の需要は世界的に今後20年間に3倍に増加すると予想されるが、航空機の全損事故の確率は、100万離陸回あたり1件弱の値を保ち、下げ止まりの傾向にある。このことは、航空機の墜落事故件数が今後20年に約3倍に急増すると危惧される。航空機全損事故の原因は、1950年から2009年までの1300件の全損事故のうち、50%がパイロットエラー、22%が機材故障、12%が天候によるものと分析されている。このうち、単純なパイロットエラーはCRM (Cockpit Resource Management) などの訓練法の導入により減少し、機材故障や悪天候によるパイロットワークロードの増加がパイロットエラーを誘発する事故が今後は増加すると予想される。というのは、現状の航空機は自動操縦で飛行可能であるが、機材故障時や悪天候時には自動操縦を急遽、手動操縦に切り替えが必要になりパイロットのワークロードが急増するからである。こうした背景により耐故障飛行誘導制御に関する研究を提案した。

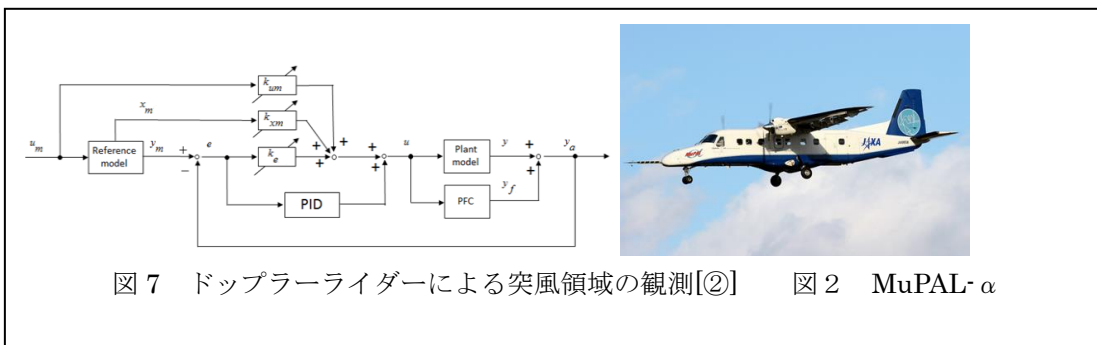
2. 研究の目的

航空輸送の需要は世界的に今後20年間に3倍に増加すると予想される一方、航空機の事故確率は横ばいであり、更なる安全性の向上が世界的な課題である。この研究では、飛行中の機材の故障や破損などの際に、自動操縦が解除され、パイロットのワークロードが急増した場合に、適応型自動制御システムをパイロット操縦と協動的に使用し、パイロットを支援するシステムの研究開発を行う。さらに故障や破損によって飛行制約が厳しくなった航空機の飛行経路を自律的に自動生成する実時間飛行経路最適化手法を開発する。シミュレーションによる実証を経て、実験用航空機による飛行実証を最終的に計画することで、耐故障飛行制御誘導技術の実用化の基礎を確立する。

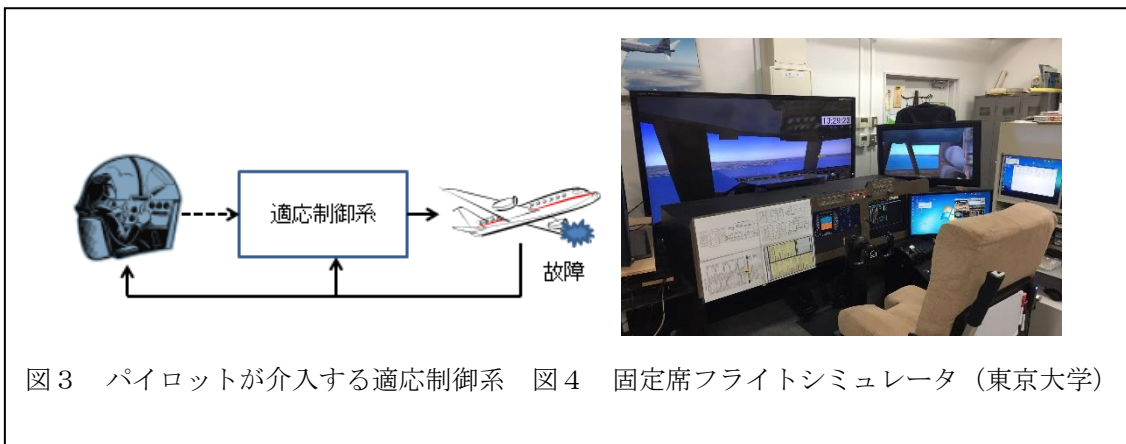
3. 研究の方法

(1) SACによる耐故障飛行制御

飛行中の故障による動特性の変化を適応的に制御する耐故障飛行制御側として、本研究では、図1のように既存のPID制御系に単純適応制御 (SAC) システムを付加する方式を採用する。同手法は、故障を陽に同定する必要がないので、制御能力が故障後も確保されていれば直接的に耐故障飛行制御が可能となる。



本研究では JAXA 保有の実験用航空機 MuPAL-α (図2)を用いた飛行試験により提案する手法の有効性を実証する。飛行中の故障としては、(a) 横方向の故障として補助翼 (エルロン) の効きの低下、(b) 縦方向の故障として昇降舵 (エレベータ) の効きの低下、(c) 安定性の低下として重心の前方移動、の3ケースを扱う。こうした故障は、MuPAL-αのFBW (Fly By Wire) 操縦システムの制御プログラムを変更することで模擬的に故障を発生させた。同機には助手席に安全パイロットが登場し、非常時には瞬時に手動操縦に切り替えることで飛行安全を確保している。



(2) SAC とパイロットとのインターフェース分析

上記の(1)では、目標値を機械的に与えたが、パイロットが積極的に制御する際には、目標値をパイロットが指示し、適応制御系の外側のループにパイロットの操縦が加わることになる(図3)。この際に、パイロットの操縦と適応制御系の干渉を評価する必要がある。ここでは、東大の固定席フライトシミュレータ(図4)を用いて、着陸時の操縦を模擬し、耐故障飛行制御側がある場合と、ない場合においてパイロットのワークロードを評価する。機体は上記(1)と同じ JAXA 保有の MuPAL- α であり、パイロットは、元エアラインの機長経験者(上村常治、連携研究者)である。

(3) 実時間飛行経路最適化

最適制御理論を応用し、飛行中の航空機の最適飛行経路を求めるアルゴリズムを研究する。実時間で最適解を求めるためには過大な計算負荷がかかるため、時々刻々変化する飛行状況に応じて、最適解を正確に求めることは不可能に等しい。そこで、最適解が自明な状況をまず考え、そこから状況変化に応じて最適飛行経路を求める方法を研究する。一方、風のような不確定な要素を含む最適制御問題をリアルタイムに求めるための確率論的最適制御問題の基本アルゴリズムに関する研究を行った。

4. 研究成果

(1) SAC による耐故障飛行制御

数値シミュレーションによる検証ののち、MuPAL- α による飛行試験を実施し、(a)補助翼(エルロン)の効きを20%に減少、(b)昇降舵(エレベータ)の効きを20%に減少、また、(c)縦の静安定係数($Cm\alpha$)を10%に減少させた飛行試験を実施した。

図5はその一例で、故障(a)の場合の、PID制御だけの場合と、SACを付加した場合のロール角応答の比較である。エルロンの効きの低下により、PID制御のみの場合は、目標値への追従精度が悪化しているが、SACを付加した場合は、効きの低下を適応的に保障するように耐故障飛行制御システムが機能していることが確認された。故障(b)、故障(c)に対しても飛行試験によってその効果を確認した[①]。

(2) SAC とパイロットとのインターフェース分析

MuPAL- α が着陸進入時に(d)エルロンの効きが20%に低下、(e)エルロンと方向舵(ラダー)の効きが共に20%に低下した状態で、パイロットの操縦を評価した。この際のパイロットワークロードをエルロン、ラダーの操舵量の絶対値の平均値を正常時の値を1として正規化し、定量化した。

図6は実験結果であり、耐故障飛行制御システムがない場合は、(d)ではエルロンのワークロードが、(e)ではエルロンとラダーのワークロードが故障により増加するが、適応制御システムが作用した場合は、パイロットワークロードは故障がない場合とほぼ同等に保たれることが判明した。このことより、耐故障飛行制御システムが作動することにより、パイロットは、故障の発生を意識することなく機体を通常のように操縦可能であることが確認できた[7]。

(3) 実時間飛行経路最適化

JAXAは晴天乱気流を検知可能な航空機搭載型のドップラーライダーを開発している。それによると、サンプリングレート1秒、距離5kmの範囲の風を観測できる(図7)。このドップラーライダーを用いて航空機前方のある範囲に存在する風の情報を観測し、そこから空間的な突風分布をRBFネットワークによって内挿補間する。そうして構成された突風領域を安全に飛行するために、航空機の運動を質点運動としてモデル化し、突風領域から求められる動揺のある範囲に抑える制約条件の下、突風回避飛行を最小限に抑える最適制御をリアルタイムに求めるアルゴリズムの開発と実証を行った(図8)。

まず、ドップラーライダーの離散的な観測点から突風分布を予測するアルゴリズムを開発した。ここで求められた突風領域のモデルを用いると、突風領域を回避する最適経路を求める最適制御問題が大局的最適解への収束が保証される二次錘計画問題(SOCP)となり、求解に優れる。また、この問題形式は最適制御問題を実時間、航空機上のオンボードで求めることにも優れている。リアルタイム最適化法はReceding Horizon法を採用した。図9に計算例を示す。航空機はドップラーライダーによって逐次観測される突風領域を推定し、リアルタイムに最適回避経路を求め、それに沿った飛行が行えていることを示している。

不確定な要素を含む最適制御問題をリアルタイムに求めるための確率論的最適制御問題の基本アルゴリズムに関する研究に関しては、最適制御問題に確率的に変動するパラメータの変動が、確率分布として正規分布であると仮定し、最適制御問題を線形2次形式に近似すると、決定論的な最適制御問題に変換でき、高速に求解できることを確認し、アルゴリズムを構築した。求められたアルゴリズムは、航空機の衝突回避問題への適用を試みる予定である[8]。

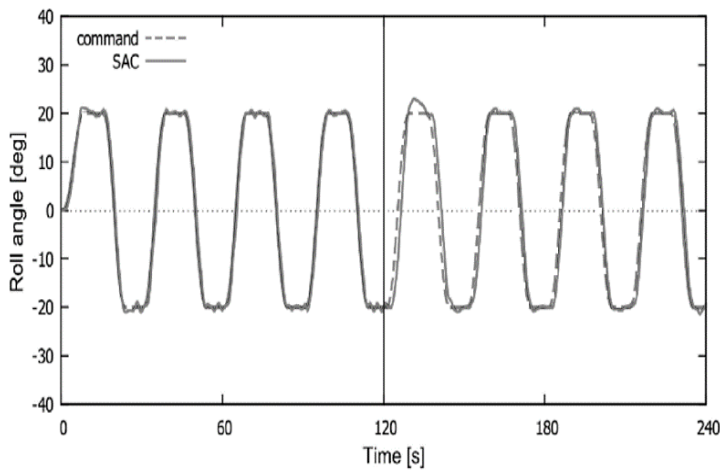
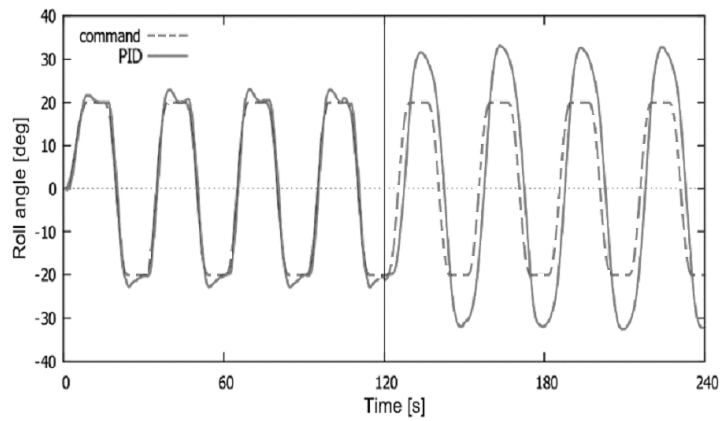


図5 エルロンの効きが120秒後に20%に低下。上はPID制御、下はSACを付加した場合のロール角応答（破線は目標値、実線は出力）【①】

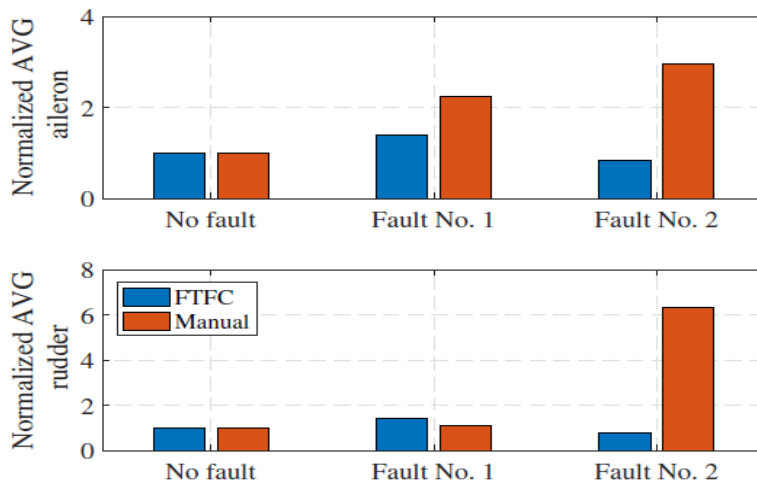


図6 エルロンの効きが20%低下（d、Fault No.1）、エルロンとラダーの効きが同時に20%低下（e、Fault No.2）した場合のパイロットのワークロードの比較。青は耐故障飛行制御作動時、赤は非作動時。【7】

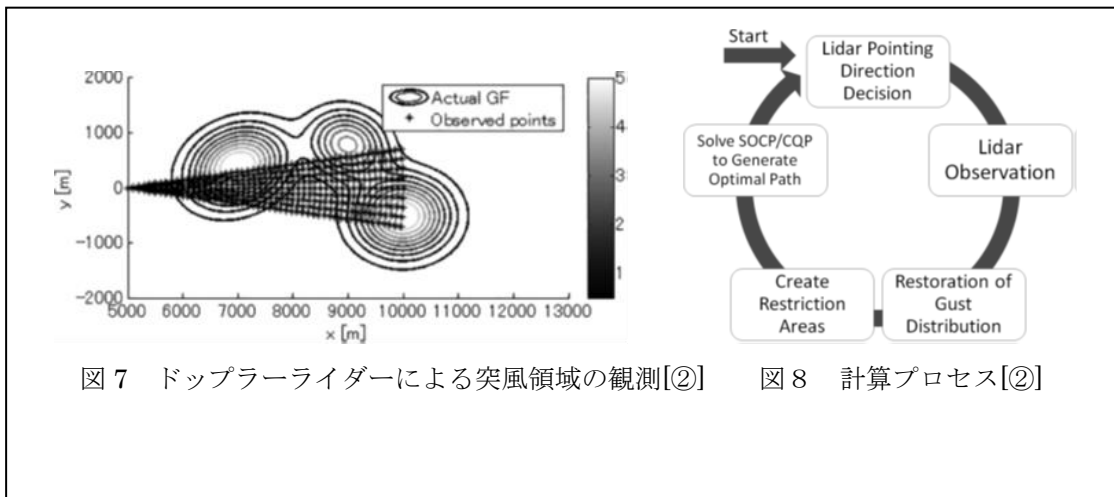


図7 ドップラーライダーによる突風領域の観測[②]

図8 計算プロセス[②]

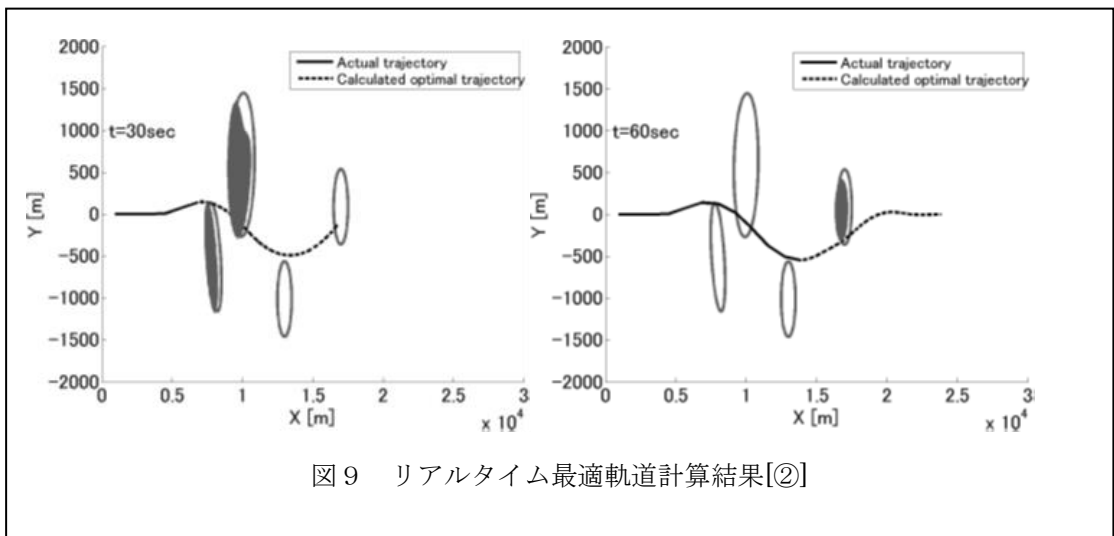


図9 リアルタイム最適軌道計算結果[②]

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 Hidenobu Matsuki, Taishi Nishiyama, Yuya Omori and Shinji Suzuki, Kazuya Masui and Masayuki Sato, Flight Test of Fault-Tolerant Flight Control System Using Simple Adaptive Control with PID Controller, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 90-1, 2018, 210-218
- ② 正村康太郎, 土屋武司, 航空機搭載ライダーからの情報を用いた突風領域最適回避経路の実時間生成, 日本航空宇宙学会論文集, 65-6, 2017, 227-234

[学会発表] (計9件)

- 1) T. Nishiyama, S. Suzuki, M. Sato, and K. Masui, Simple Adaptive Control with PID for MIMO Fault Tolerant Flight Control Design, AIAA SciTech, 2016/1/4~1/8, San Diego, USA
- 2) 松木 秀伸, 西山 泰史, 鈴木 真二, 佐藤 昌之, 増位 和也, 単純適応制御を用いた航空機の重心後退時における耐故障飛行制御に関する研究, 日本機械学会 第24回 交通・物流部門大会, 2015/12/16~12/1, 東京都渋谷区 東大生産研
- 3) 佐藤 昌之, 増位 和也, MuPAL- α の可変操縦制御を用いた B747 モデルの突風および操縦応答模擬, 第53回飛行機シンポジウム, 2015/11/11~11/13, 愛媛県松山市松山市総合コミュニティセンター
- 4) 西山 泰史, 鈴木 真二, 単純適応制御による航空機の耐故障飛行制御, 日本航空宇宙学会 年会講演会, 2015/4/16~4/17, 東京都文京区東京大学山上会館
- 5) 松木秀伸, 西山泰史, 鈴木真二, 単純適応制御を用いた航空機の重心後退時における耐故障飛行制御に関する研究, 2016/4/14~4/15, 東京大学山上会館.
- 6) Shomura, K. and Tsuchiya, T. Real-Time Optimal Path Generation Avoiding Turbulent

Areas Using LIDAR Information、APISAT-2016 (国際学会)、2016/10/25~10/27、富山市、富山国際会議場

- 7) Ryoichi Takase, Jorg O. Entzinger, and Shinji Suzuki、Fault-tolerant Flight Control System with Simple Adaptive Control Considering Pilot Input、31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (国際学会)、2018
- 8) 清水 裕二, 土屋 武司、着陸及び障害物回避の確率的制御、第 61 回自動制御連合講演会、名古屋、2018/11/17
- 9) 佐藤 昌之, 鈴木 真二、Horizon2020 研究プロジェクト「VISION」における耐故障飛行制御の概要、第 61 回自動制御連合講演会、名古屋、2018/11/17

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：土屋 武司

ローマ字氏名：(TSHUCHIYA ,takeshi)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院工学系研究科

職名：教授

研究者番号：5 0 3 5 8 4 6 2

研究分担者氏名：増位 和也

ローマ字入力：(MASUI,kazuya)

所属研究機関名：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名：航空技術部門 飛行技術研究ユニット

職名：研究員

研究者番号：5 0 3 5 8 6 5 2

研究分担者氏名：佐藤 昌之

ローマ字氏名：(SATO, masayuki)

所属研究機関名：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名：航空技術部門

職名：主任研究開発員

研究者番号：90358648

(2)研究協力者

研究協力者氏名：上村 常治

ローマ字氏名：(UEMURA ,tsuneharu)

※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、研究者個人に帰属されます。