

令和元年6月10日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00327

研究課題名(和文)非線形記述かつ戦略数値記述に巧みなファジィ制御理論構築と航空ロボティクスへの展開

研究課題名(英文)Analysis and Control for Complicated Nonlinear Systems and Its Application to Flying Robots

研究代表者

田中 一男 (Tanaka, Kazuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：00227125

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複雑かつ非線形な翼のAerodynamicsを考慮した飛行ロボットのダイナミクスモデル化を行う。このモデルと機体の剛体運動方程式モデル、および、アクチュエータのダイナミクスモデルを考慮し、飛行ロボット全体の複雑なモデル化を成し遂げる。また、構築した複雑な非線形モデルに対して、非線形制御理論をベースにした飛行安定性を保証するような制御系設計を行う。具体的には、得られた複雑な非線形システムに対する最適2次コスト保証制御の設計条件を考慮する。さらに、設計法の有用性を確認するために、実際の飛行ロボットを用いて広大な飛行実験スペースを確保して本格的な実証実験を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

飛行ロボットは地上からは立ち入れない場所での状況把握や作業支援に利用できるため、人が立ち入ることのできない場所や災害などでの活用が可能であり、その社会貢献は絶大である。ドローンに代表されるようなマルチコプタはホバーリングが可能であるが、飛行効率が悪いため長距離でのミッションには対応できない。本研究で対象としている翼を有する飛行ロボットは複雑かつ非線形な翼のAerodynamicsを考慮して飛行安定化しなければならないが、高速・長距離飛行可能なため飛行ロボットの本来の用途に適したものであり、このタイプの飛行ロボット研究の学術的意義もきわめて大きい。

研究成果の概要(英文)：This reports mainly presents three new results with respect to nonlinear control for a flying robot that is a kind of fixed-wing type unmanned aerial vehicles. The first result is a nonlinear model construction including the aerodynamics and actuators dynamics. The second result is a guaranteed cost control design for the constructed nonlinear model. The controller is designed by minimizing the upper bound of a given quadratic performance function. Hence, the design can be regarded as a nonlinear optimal control design. The third result is that the utility of our modeling and control is demonstrated through real flight experiments.

研究分野：ファジィ制御

キーワード：ファジィ制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

- (1) ドローンに代表されるようなマルチコプタの研究は盛んに行われているが、翼を有する飛行ロボットは複雑かつ非線形な翼の **Aerodynamics** を考慮して飛行安定化しなければならない、高速・長距離飛行可能なためハードウェア/ソフトウェアの信頼性を極限まで高めなければならない、広い実験場を確保しなければならないなど、その制御困難性、実験困難性などのため、翼を有する飛行ロボットの研究事例はマルチコプタに比べて極端に少ない。
- (2) 複雑かつ非線形な翼の **Aerodynamics** までをも考慮した飛行ロボットのダイナミクスに対して、非線形制御理論をベースにした飛行安定性を理論的に保証するような制御系設計もなされていない。逆に言えば、非線形制御理論をベースにした制御系設計が扱っている飛行ロボット制御のダイナミクスは非常に単純化（**Aerodynamics** を考慮していない）したものである。
- (3) (2)に関連した研究報告はシミュレーション研究であり、実用において多くの難点が存在し、実際の飛行ロボットに適用することは困難である。そのため、現在でも、理論的な安定性が保証できない PID 制御器のゲインを試行錯誤的にチューニングする、キネマティクスのみに基づいた誘導経路で問題を単純化して対応するなど、未だに、古典的な手法で自動飛行が行われている。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では、複雑かつ非線形な翼の **Aerodynamics** を考慮した飛行ロボットのダイナミクスのモデル化を行う。
- (2) (1)で構築した複雑な非線形モデルに対して、非線形制御理論をベースにした飛行安定性を保証するような制御系設計を行う。
- (3) (2)の設計法の有用性を確認するために、実際の飛行ロボットを用いて広大な飛行実験スペースを確保して本格的な実証実験を行う。

3. 研究の方法

- (1) 飛行ロボットにより、翼形状や大きさなどが異なるため、個別に **Aerodynamics** モデルを構築しなければならない。本研究では、風洞実験により、対象の飛行ロボットの揚力、抗力などを測定し、**Aerodynamics** モデルを構築する。このモデルと機体の剛体運動方程式モデル、および、アクチュエータのダイナミクスモデルを考慮し、飛行ロボット全体の複雑なモデル化を成し遂げる。
- (2) (1)で構築した複雑な非線形モデルに対して、非線形制御理論をベースにした飛行安定性を保証するような制御系設計を行う。具体的には、得られた複雑な非線形システムに対する最適 2 次コスト保証制御の設計条件を導出する。
- (3) シミュレーションにより提案手法の有効性を検証したのち、実際の飛行ロボットを用いた実証実験を国土交通省の実験承認許可、および、実験地の北海道の地方自治体の許可を得て、安全性に最大限配慮して行う。

4. 研究成果

- (1) 図 1 のような風洞施設において、想定される飛行速度帯域に対して風洞実験を行った。具体的には、対象の飛行ロボットの翼から発生する空気力（揚力、抗力など）を測定した。その結果の一部を図 2 にまとめて示す。この測定データより **Aerodynamics** モデルを構築した。このモデルは多項式近似モデルで表現され、機体の剛体運動方程式（3次元6自由度）モデル、および、アクチュエータのダイ

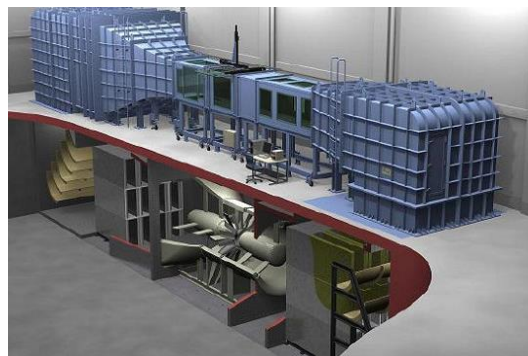


図 1 風洞実験施設

ナミクスモデルと合わせて飛行ロボット全体の複雑なモデル化を行った。

- (2) (1)で構築した複雑な非線形モデルに対して、システムの出力 $\mathbf{y}(t)$ と入力 $\mathbf{u}(t)$ からなる評価関数（2次コスト関数）

$$J = \int_0^{\infty} \{ \mathbf{y}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{y}(t) + \mathbf{u}(t)^T \mathbf{R} \mathbf{u}(t) \} dt$$

の上限値を最小化する以下のような最適2次コスト保証制御の設計条件を導出した。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \lambda \\ & \mathbf{X}, \mathbf{M}_i \\ & \text{subject to} \\ & \mathbf{X} > \mathbf{0} \\ & \begin{bmatrix} \lambda & \mathbf{x}^T(0) \\ \mathbf{x}(0) & \mathbf{X} \end{bmatrix} > \mathbf{0} \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{ii} & \mathbf{X} \mathbf{C}_i^T & -\mathbf{M}_i^T \\ \mathbf{C}_i \mathbf{X} & -\mathbf{W}^{-1} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_i & \mathbf{0} & -\mathbf{R}^{-1} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{ij} + \mathbf{G}_{ji} & \mathbf{X} \mathbf{C}_i^T & -\mathbf{M}_j^T & \mathbf{X} \mathbf{C}_j^T & -\mathbf{M}_i^T \\ \mathbf{C}_i \mathbf{X} & -\mathbf{W}^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_j & \mathbf{0} & -\mathbf{R}^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_j \mathbf{X} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{W}^{-1} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_i & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{R}^{-1} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \end{aligned}$$

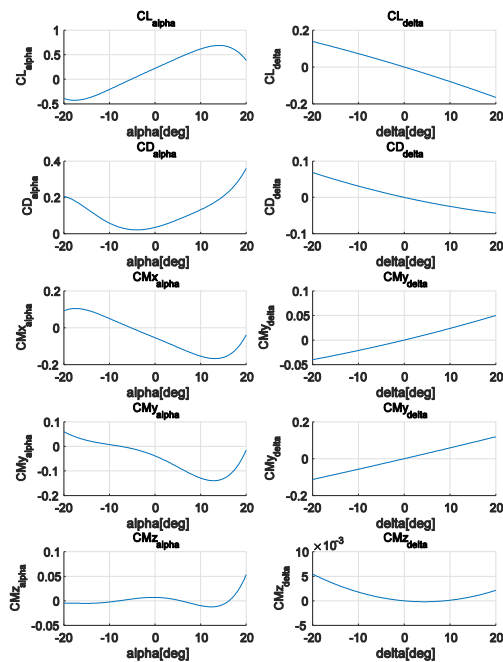


図2 風洞実験データ（一部）

条件式中の詳しい変数についての説明は省略するが、与えられた状態の初期値に対して、 λ を最小化することによって、与えられた2次コスト（評価）関数の上限値を最小化する制御器を設計できる。ここで、 \mathbf{X} , \mathbf{M}_i が決定変数であり、フィードバックゲインはこの決定変数から算出できる。この制御系設計で設計された制御器で制御を行うと、評価関数値は λ 以下となる制御が保証されている。

- (3) (2)で設計した制御器を用いてシミュレーションにより提案手法の有効性を検証した。とくに、シミュレーションでは飛行が安定していても、アクチュエータの飽和など、実機では不安定現象を引き起こす要因があることから、実機を想定した詳細な検討が行われた。その結果、実機実験でも十分精度の良い飛行が可能であると結論し、実際の飛行ロボットを用いた実証実験を、国土交通省の実験承認許可、および、実験地の北海道の地方自治体の許可を得て行った。その結果を図3に示す。

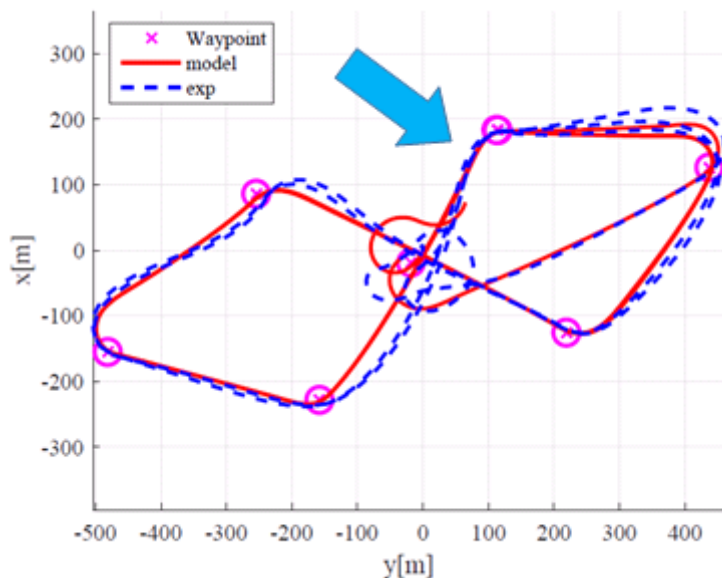


図3 シミュレーション結果と実験結果

図 3 において、水色の矢印は風外乱(1.6m/s)を示しており、Waypoint は×で示してある。設計された制御器は設定された Waypoint に向けて正確、かつ、安定に飛行していることがわかる。また、(1)で構築したモデルによるシミュレーション結果(赤線)と実機による飛行実験結果(青い点線)がほぼ同じ動きをしていることから、(1)で構築したモデルの精度の高さも検証できた。図 4 には、別実験の飛行結果と搭載カメラによる映像を示す(図では、図中央の飛行ルート上の数字とその地点での搭載カメラの映像を示している)。



図 4 飛行実験結果と搭載カメラによる映像

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Kazuo Tanaka, Motoyasu Tanaka, Yutoku Takahashi and Hua O. Wang, A Waypoint Following Control Design for a Paraglider Model with Aerodynamic Uncertainty, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 査読有, Vol. 23, No. 2, pp. 518-523, April 2018.
DOI: 10.1109/TMECH.2017.2728678
- ② Radian Furqon, Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, and Hua O. Wang, An SOS-based Control Lyapunov Function Design for Polynomial Fuzzy Control of Nonlinear Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 査読有, Vol. 25, No. 4, pp. 775-787, August 2017.
DOI: 10.1109/TFUZZ.2016.2578339
- ③ Anh-Tu Nguyen, Kazuo Tanaka, Antoine Dequidt, Michel Dambrine, Static Output Feedback Design for a Class of Constrained Takagi-Sugeno Fuzzy Systems, Journal of the Franklin Institute, 査読有, Vol. 354, No. 7, pp. 2856-2870, May 2017.
DOI: 10.1016/j.jfranklin.2017.02.017

[学会発表] (計 9 件)

- ① Jairo Moreno Saenz, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Control Synthesis for Polynomial Fuzzy Systems using Line-Integral Polynomial Fuzzy Lyapunov Function, the 2018 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 査読有, pp. 2925-2930, Miyazaki, Oct., 2018.
DOI: 10.1109/SMC.2018.00498
- ② Kai-Yi Wong, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, A New Nonconvex Design Algorithm for Optimal Polynomial Fuzzy Control, the 2018 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 査読有, pp. 2937-2942, Miyazaki, Oct., 2018.
DOI: 10.1109/SMC.2018.00500
- ③ 岩瀬惟真, 田中基康, 田中一男, 多項式システム記述に基づく飛行ロボットの経路追従制

御系設計と実験による検証, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2017, 3E4-02, 仙台, Dec. 2017

- ④ Jairo Moreno Saenz, Motoyasu Tanaka and Kazuo Tanaka, Stabilization Conditions for a Class of Nonlinear Systems via Line-Integral Fuzzy Lyapunov Function, 第60回自動制御連合講演会, SaB1-5, 調布, Nov. 2017.
- ⑤ Alissa Ullly Ashar, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Positivstellensatz Relaxation for Sum-of-Squares Stabilization Conditions of Polynomial Fuzzy Systems, Joint 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, 査読有, SS-04-1-1, Otsu, June, 2017.
DOI: 10.1109/IFSA-SCIS.2017.8023363
- ⑥ Jairo Moreno Saenz, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Stability Analysis for Polynomial Fuzzy Systems Based on Line-Integral Fuzzy Lyapunov Function: A Copositive Relaxation Approach, Joint 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, 査読有, SS-04-1-3, Otsu, June, 2017.
DOI: 10.1109/IFSA-SCIS.2017.8023262
- ⑦ 岩瀬惟真, Kai-Yi Wong, 田中基康, 田中一男, パラフォイール型飛行ロボットの最適2次コスト保証制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 1P1-E02, 福島, May 2017
- ⑧ 尾鷲真士, 田中基康, 田中一男, Flying-wing 型飛行ロボットのモデル構築と飛行安定化制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 1P2-E04, 福島, May 2017
- ⑨ 伊藤唯, 遠藤祐甫, 田中基康, 田中一男, Flying-wing 型 UAV の制御系設計と飛行実験による検証, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A2-18a4, 横浜, June 2016

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/tanaka2lab/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 田中 基康

ローマ字氏名: (TANAKA, motoyasu)

所属研究機関名: 電気通信大学

部局名: 大学院情報理工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：50633442

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：大竹 博

ローマ字氏名：(Ohtake, hiroshi)

研究協力者氏名：Hua Wang

ローマ字氏名：(WANG, hua)

※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。