

令和 4 年 5 月 21 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12134

研究課題名(和文) 携帯小型無人固定翼機のスマート飛行戦略実現を保證する有理多項式ファジィ制御

研究課題名(英文) Modeling and Control of a Small Unmanned Aircraft

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小型/携帯可能で特殊な形状の無人航空機の運動方程式と翼が発生する空力特性から非線形制御モデルを構築した。さらに、このモデルを安定化するファジィ制御器の新しい設計法を提案した。とくに、新たに多項式ファジィ制御器を提案し、空力特性の補償を効果的に実現できることを示した。また、多項式ファジィ制御器を拡張した有理多項式ファジィ制御器を合わせて提案し、これらの制御器を用いた制御系設計法の提案も行った。シミュレーションにより、本研究での非線形制御モデル構築、多項式ファジィ制御器、有理多項式ファジィ制御器に対する有効性を検証したのち、小型無人航空機の実機を用いた飛行実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的側面では、新たに多項式ファジィ制御器を提案し、空力特性の補償を効果的に実現できることを示した。また、多項式ファジィ制御器を拡張した有理多項式ファジィ制御器を合わせて提案し、これらの制御器を用いた制御系設計法の提案も行ったことは意義がある。また、小型無人航空機は空飛ぶロボットとして災害救助など様々な用途に活躍が期待でき、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：This report deals with modeling and control of a small unmanned aircraft. First, a nonlinear dynamical model is constructed from the equations of motion of a considered small unmanned aircraft and the aerodynamic characteristics generated by its wings. Furthermore, we develop a new design framework to stabilize the small unmanned aircraft. In addition, a rational polynomial fuzzy controller, which is an extension of the polynomial fuzzy controller, is also proposed, and control system design methods using these controllers are proposed. After verifying the effectiveness of the proposed design methods through simulations, flight experiments are conducted using the actual small unmanned aerial vehicle.

研究分野：ファジィ制御

キーワード：ファジィ制御

1. 研究開始当初の背景

- (1) 研究対象が小型/携帯可能で特殊な形状の無人航空機のため、その運動方程式と翼が発生する空力特性の把握が必要であった。
- (2) 複雑な非線形ダイナミクスをモデルベースで設計する方法としてファジィモデルに基づく制御が知られている。しかし、多項式特性を示す空力特性の非線形性に対する設計には保守性が伴う。
- (3) 多項式特性を示す空力特性の非線形性を扱う新しいモデルとそのモデルに基づく新たな設計法が必要である。
- (4) 無人航空機の飛行ダイナミクスに関する研究の多くはシミュレーションのみを扱っており、実際の機体で実証実験までを行っている研究は非常に少ない。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では、小型無人航空機の運動方程式と翼が発生する空力特性から非線形制御モデルを構築する。
- (2) このモデルを安定化するファジィ制御器の新しい設計法を提案する。
- (3) とくに、新たに多項式ファジィ制御器を提案し、空力特性の補償を効果的に実現できることを示す。
- (4) 多項式ファジィ制御器を拡張した有理多項式ファジィ制御器を合わせて提案し、これらの制御器を用いた制御系設計法の提案も行う。
- (5) シミュレーションにより、非線形制御モデル構築、多項式ファジィ制御器、有理多項式ファジィ制御器に対する有効性を検証したのち、小型無人航空機の実機を用いた飛行実験を行う。

3. 研究の方法

- (1) ここでは、図1に示すような Waypoint (WP) によって定義される WP 座標系での無人航空機の経路追従問題に焦点を当てて説明する。

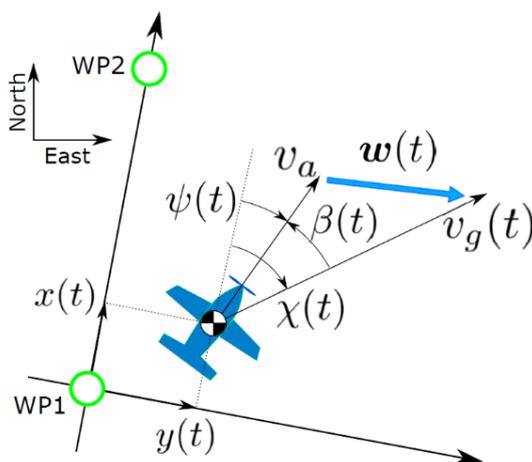


図1 WP座標系と変数定義

WP2 は現在の WP, WP1 は過去 (WP2 へ切り換える前) の WP を示している. 原点を WP1 にとり, WP1 から WP2 へ向かう方向を x 軸と定義し, y 軸は図 1 で示した方向に定義する. この座標系を基に, 無人航空機の運動方程式および翼の空力特性のモデルの導出を行う. なお, 地上を移動する移動体とは異なり, 空中を移動する無人航空機は風の影響で発生するすべりを考慮する必要がある, これが制御を難しくしている. 換言すれば, 対気速度と対空速度のベクトルは一般には一致せず, 両者のなす角度差がすべり角に相当し, 刻々と変わる風向と風速による発生するすべりを考慮しながら飛行制御を行う必要がある.

- (2) 導出された運動方程式および翼の空力特性より, 制御対象の多項式ファジィモデル化を行う. また, 多項式ファジィ制御器, および, 新たに, 有理多項式ファジィ制御器を提案し, その設計条件を導出する.
- (3) 上記の提案手法の有効性をシミュレーションで検証したのち, 小型無人航空機の実機を用いた飛行実験を行う.

#### 4. 研究成果

- (1) 小型無人航空機の 3 次元 6 自由度の運動方程式の導出と風洞実験による翼の空力特性に関する多項式モデルを導出した. この両者を組み合わせて小型無人航空機のダイナミクスを表現する多項式ファジィモデルの構築を行った.
- (2) 構築した多項式ファジィモデルを安定化する多項式ファジィ制御器, および, 有理多項式ファジィ制御器の提案, および, これらを用いた制御系設計条件を Sum-of Squares に基づく条件として導出した. これらの制御器では対空速度の情報をフィードバックすることで漸近安定性を保証しやすくしている工夫がなされている.
- (3) 一般に多項式システムの線形行列不等式 (LMI) 設計条件は保守的になることが知られており, Sum-of Squares の枠組みを用いることでその保守性の軽減を実現した. しかし, Sum-of Squares は非負の多項式であるが, 非負の多項式がすべて Sum-of Squares では表現できないため, 非負の多項式と Sum-of Squares の間には少なからずギャップがあることが知られている. この事実は Hilbert's 17th problem としても知られている, 非常に有名な問題である. 本研究では, そのギャップを埋めるためのいくつかのアイデアが設計条件の中に取り入れられている.
- (4) 新たに提案した有理多項式ファジィ制御器は分数表現の分母部分の多項式が 0 次の多項式の場合, 従来の多項式ファジィ制御器に帰着するため, 自然な拡張となっている.
- (5) 新たに提案した有理多項式ファジィ制御器を用いた無風理想時のシミュレーション結果および実験当日の風を再現したシミュレーション結果を図 2 に示す.

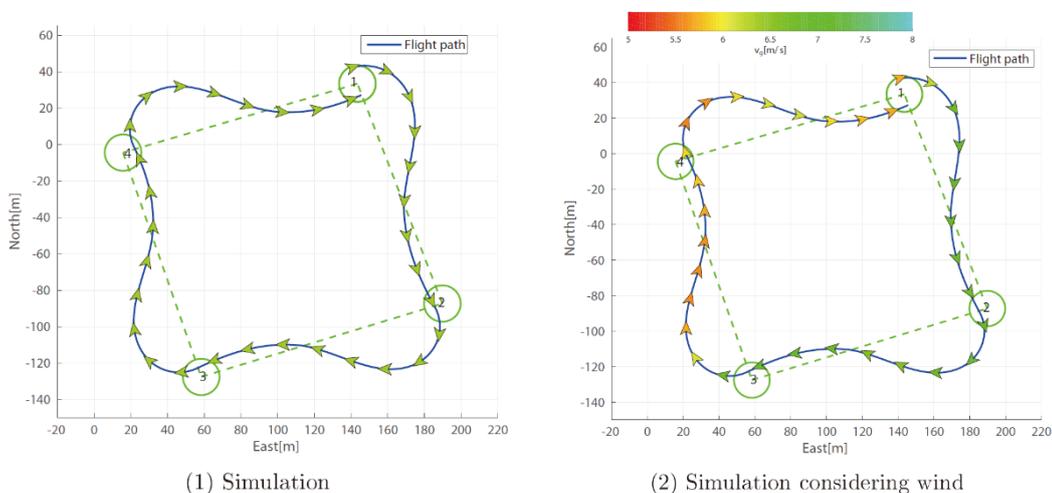
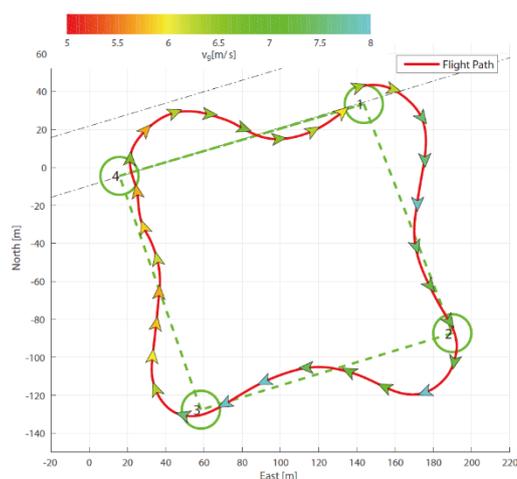


図 2 無風理想時および実験当日の風を再現したシミュレーション結果

図2では、4点のWaypointを設定し、4点の正方形経路の飛行を想定している。風の再現については、実機実験時に観測された風速・風向データを利用するのが良いと考え、後述する図3で示す実機実験時の風速・風向データを利用している。図2では、一定時間間隔での無人航空機の位置を三角のマークで示し、対地速度の違いを色分けで表現している。図2の左の無風理想時の対地速度は常に一定であるが、実験当日の風を再現した右のシミュレーション結果では、追い風では対地速度が速く、向かい風では対地速度が遅くなっており、風の影響がシミュレーション結果に反映されていることがわかる。

- (6) 図3は実機を用いた実験結果を示している。とくに、図2(2)と図3の制御結果は、飛行軌跡のみならず対地速度を含めて一致しており、本研究で構築したモデルの有用性が示されている。また、実機実験でも4つのWaypointを正確に飛行しており、設計した制御器の有効性を検証できた。



(3) Experiment

図3 実機実験の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Lizhen Li and Kazuo Tanaka	4. 巻 19
2. 論文標題 Relaxed Sum-of-Squares Approach to Stabilization of Polynomial Fuzzy Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Control, Automation and Systems	6. 最初と最後の頁 2921-2930
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12555-020-0242-y	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 該当する

1. 著者名 Tanaka Kazuo, Tanaka Motoyasu, Takahashi Yutoku, Iwase Arimasa, Wang Hua O.	4. 巻 68
2. 論文標題 3-D Flight Path Tracking Control for Unmanned Aerial Vehicles Under Wind Environments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 11621 ~ 11634
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TVT.2019.2944879	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 該当する

1. 著者名 Chen Ying-Jen, Chou Hao-Gong, Wang Wen-June, Tsai Shun-Hung, Tanaka Kazuo, Wang Hua O., Wang Kun-Ching	4. 巻 87
2. 論文標題 A polynomial-fuzzy-model-based synchronization methodology for the multi-scroll Chen chaotic secure communication system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Applications of Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 103251 ~ 103251
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engappai.2019.103251	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 該当する

1. 著者名 Chen Ying-Jen, Tanaka Kazuo, Tanaka Motoyasu, Tsai Shun-Hung, Wang Hua O.	4. 巻 51
2. 論文標題 A Novel Path-Following-Method-Based Polynomial Fuzzy Control Design	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cybernetics	6. 最初と最後の頁 2993 ~ 3003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCYB.2019.2956495	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 該当する

1. 著者名 Saenz Jairo Moreno, Tanaka Motoyasu, Tanaka Kazuo	4. 巻 51
2. 論文標題 Relaxed Stabilization and Disturbance Attenuation Control Synthesis Conditions for Polynomial Fuzzy Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cybernetics	6. 最初と最後の頁 2093 ~ 2106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCYB.2019.2957154	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 -

1. 著者名 Tanaka Kazuo, Tanaka Motoyasu, Iwase Arimasa, Wang Hua O.	4. 巻 25
2. 論文標題 A Rational Polynomial Tracking Control Approach to a Common System Representation for Unmanned Aerial Vehicles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 919-930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2020.2965576	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 該当する

1. 著者名 Fan-Nong YU, Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka	4. 巻 *
2. 論文標題 A Polynomial Fuzzy Descriptor System Approach for Rational Fuzzy Control Design	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY 2019)	6. 最初と最後の頁 114-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Kai-Yi Wong, Nana Kariya, Kazuo Tanaka, Motoyasu Tanaka	4. 巻 *
2. 論文標題 Longitudinal Fuzzy Model Construction of a Flying-Wing Unmanned Aerial Vehicle and a Nonlinear Guaranteed Cost Control Approach to Altitude Stabilization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY 2019)	6. 最初と最後の頁 151-157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 苅谷奈々, 田中 基康, 田中 一男
2. 発表標題 非線形コスト保証制御による高度安定化および着陸制御の全翼機飛行実験による検証
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 苅谷奈々, 田中 基康, 田中 一男
2. 発表標題 全翼機の縦方向非線形モデル構築と高度安定化および着陸制御の実現
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
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	田中 基康  (Tanaka Motoyasu)  (50633442)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授    (12612)	

	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
研究協力者	大竹 博  (Ohtake Hiroshi)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	ワン ファ  (Wang Hua)		

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