

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420215

研究課題名(和文) 構造的かつ戦略的に巧みなハイパースマート飛行体の開発と制御

研究課題名(英文) Development and Control of Smart UAVs

研究代表者

田中 一男 (Kazuo, Tanaka)

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、スマート飛行体制御の理論構築からシステム構築までを一貫して行う。スマートな飛行を実現するために、風向/風速の実時間推定、自動離着陸などのフライトマネージメント機能を兼ね備えた携帯可能な小型飛行体を開発する。さらに、長距離飛行ミッションを視野に入れた飛行実証実験を行う。この実証実験では、複数台のカメラを搭載した機体を滑走路から数キロ先の洋上まで飛行させ、災害時の情報収集ミッションの実現可能性を示す。

研究成果の概要(英文)：This report presents a framework for development and control of a smart unmanned aerial vehicle (UAV). The framework provides a smart and feasible way of automatic landing control and wind direction/velocity estimation. To achieve the automatic landing control, we construct a nonlinear dynamical model and design a stable altitude controller based on the nonlinear dynamics. In addition, a nonlinear observer is designed to estimate wind direction/velocity during flight of the small UAV. Several long flight experiments have been carried out in an aerospace field, Japan. The experimental results show the capabilities of the framework for development and control of a smart UAV in realizing rescue missions.

研究分野：インテリジェント制御，飛行ロボット

キーワード：飛行ロボット 無人航空機 自動着陸

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 最近、様々な飛行体（飛行ロボット）に関する研究が盛んに行われている。有事の際に人間などが地上から立ち入れない場所での情報収集が期待されている。現在までに、自動離着陸、風向/風速の実時間推定などのフライトマネージメント機能を兼ね備えた携帯可能で小型のスマート飛行体に関する研究はなされていない。
- (2) 小型飛行体は風の影響を強く受ける。  
(1)でも述べたが、風の影響を知るために、実際に小型飛行体を飛行させて、風向および風速を飛行中に実時間で精度良く推定した研究はほとんどない。
- (3) 小型のスマート飛行体制御に関する研究を理論構築からシステム構築まで一貫して行っている研究は皆無である。
- (4) 小型飛行体制御に関する研究はシミュレーションのみの研究も多い。また、実機実験を行っている研究でも短距離飛行が対象である。数 km 以上の飛行距離を対象にした小型飛行体の実践実証実験はほとんどなされていない。

## 2. 研究の目的

- (1) 本研究では、スマート飛行体制御のための方法論の構築を行う。とくに、小型のスマート飛行体制御に関する研究を理論構築からシステム構築まで一貫して行う。
- (2) スマート飛行体制御実現のための非線形ダイナミクスの構築、とくに、力学的観点からのモデリングと実機による飛行実験データからのパラメータ同定を行う。
- (3) 構築された非線形ダイナミクスに基づく制御系設計を飛行体の持つハードウェア的制約を考慮した実用的な観点から模索する。
- (4) スマートな飛行実現のために、風向/風速の実時間推定、自動離着陸などを実現する。
- (5) 長距離飛行ミッションを視野に入れた飛行実証実験を行う。この実証実験では、複数台のカメラを搭載した機体を滑走路から数キロ先の洋上まで飛行させ、災害時の情報収集ミッションの実現可能性を示す。

## 3. 研究の方法

- (1) 飛行体は非線形なダイナミクスを持つだけでなく、その飛行状況によりダイナミ

クスの特性が変化する。とくにトリム平衡点からのダイナミクスの変化を不確かさと定義し、この不確かさを許容する非線形ダイナミクスに対するロバスト制御の方法論を開発する。

- (2) 飛行体のモデリングにおける空力特性に関しては風洞実験を行い、そのデータを活用する。その他の特性（パラメータ）については、実機による飛行実験データを利用したパラメータ同定を行う。
- (3) 本質的に不安定な飛行体の制御において、実機の墜落の危険性を回避するためにも、実際に即した制御系設計が必要で、とくに、アクチュエータの飽和を考慮した制御が必須である。この点を考慮した制御系設計を行う。
- (4) 風向/風速の実時間推定を実現するために、研究代表者らの最新の研究成果である非線形オブザーバ理論を適用可能な形に発展させる。
- (5) 実機による実証実験を行い、本研究の有効性を明らかにする。ひとつは自動離着陸制御実験、もうひとつは災害時の情報収集ミッションを想定した飛行実験を行い、本研究の有効性を検証する。なお、本研究に関するすべての飛行実験は国土交通省に申請し、事前に許可を得て行っている。

## 4. 研究成果

- (1) 飛行体は非線形なダイナミクスを持つだけでなく、その飛行状況によりダイナミクスの特性が変化する。とくにトリム平衡点からのダイナミクスの変化を不確かさと定義し、この不確かさを許容する非線形ダイナミクスに対するロバスト制御の方法論を開発した。紙面の都合上これらの詳細は省略する。詳細については、下記の論文にまとめられている。

Kazuo Tanaka, Motoyasu Tanaka, Ying-Jen Chen, and Hua Q. Wang, A New Sum-of-Squares Design Framework for Robust Control of Polynomial Fuzzy Systems with Uncertainties, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 94-110, Feb. 2016.  
DOI: 10.1109/TFUZZ.2015.2426719

多くの非線形制御理論研究では、数学的な完備を迫るあまり、実際の応用では大きな制約や問題が生じる。本研究のような複雑な飛行体への適用を意識した理論構築は稀で、実際の実機実験までに至っている研究は皆無である。実機へ

の展開までも視野に入れた理論研究の内容については紙面の都合上省略する。詳細については、下記の論文にまとめられている。

Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake and Hua O. Wang, Discrete Polynomial Fuzzy Systems Control, IET Control Theory & Applications, DOI:10.1049/iet-cta.2013.0645

Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Hua O. Wang, A Non-Monotonically Decreasing Relaxation Approach of Lyapunov Functions to Guaranteed Cost Control for Discrete Fuzzy Systems, IET Control Theory & Applications, Vol. 8, No. 4, pp. 288-296, Nov. 2014. DOI:10.1049/iet-cta.2013.1132

- (2) 飛行体のモデリングにおける空力特性に関しては風洞実験を行った。その他の特性（パラメータ）については、実機による飛行実験データを利用したパラメータ同定を行った。
- (3) 本質的に不安定な飛行体の制御において、実機の墜落の危険性を回避するためにも、実際に即した制御系設計が必要で、とくに、アクチュエータの飽和を考慮した制御が必須である。この点を考慮した制御系設計を行った。詳細については、下記の論文にまとめられている。

Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Hua O. Wang, Stability Analysis and Region-of-Attraction Estimation Using Piecewise Polynomial Lyapunov Functions: Polynomial Fuzzy Model Approach, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 23, no. 4 pp. 1314-1322, August, 2015. DOI:10.1109/TFUZZ.2014.2347993

- (4) 非線形多項式オブザーバを用いて風向風速の実時間推定を実現した。図1は非線形オブザーバを用いた小型飛行体の飛行中の風向/風速推定の結果である。実験はほぼ一定風向/風速の状況下で行われた。図中の太い青色の矢印が実験中の風向きを示している。水色の小さな矢印方向に左回りで小型飛行体が旋回しており、各位置で推定した風向/風速を青い細い線で示している。青い細い線の方がほぼ風の方向を向いていること、風の強さ（青い細い線の長さ）もほぼ一定であり、風向/風速の実時間推定が良好に行われて

いる。

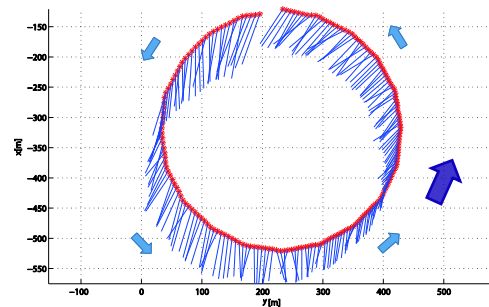


図1 非線形オブザーバによる小型飛行体の飛行中の風向/風速推定結果1

図2は緑色の3点を waypoint として設定した直線自動飛行中の風向/風速推定の結果である。図2の実験も図1同様、ほぼ一定風向/風速の状況下で行われた。

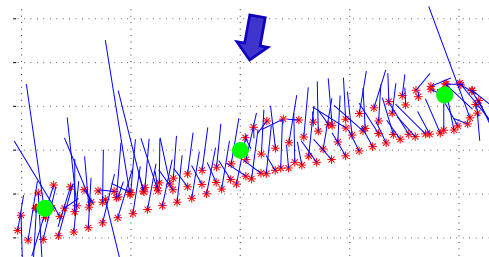


図2 非線形オブザーバによる小型飛行体の飛行中の風向/風速推定結果2

最左、最右の waypoint を通過した後、飛行体は 180 度方向転換する必要があるため、この部分の推定結果が乱れているものの定常に飛行しているときは青い細い線の方がほぼ風の方向を向いていること、風の強さ（青い細い線の長さ）もほぼ一定であり、風向/風速の実時間推定が良好に行われている。

- (5) 実機による実証実験を行い、本研究の有効性を明らかにした。図3は自動着陸制御実験の様子を示している。図3からわかるように、スムーズな着陸が実現されている。自動離陸については紙面の都合上省略する。

図4は災害時の情報収集ミッションを想定した飛行実験の様子を示している。図4は滑走路から離陸した小型飛行体が定められた waypoint を通過して、洋上まで飛行し、滑走路まで戻ってきた後、自動着陸の様子を示したものである。また、図中には飛行中に撮影した映像の静止画を示している。この図からもわかるように、災害時の情報収集ミッションを想定した飛行実験においても本研究の有効性を示すことができた。

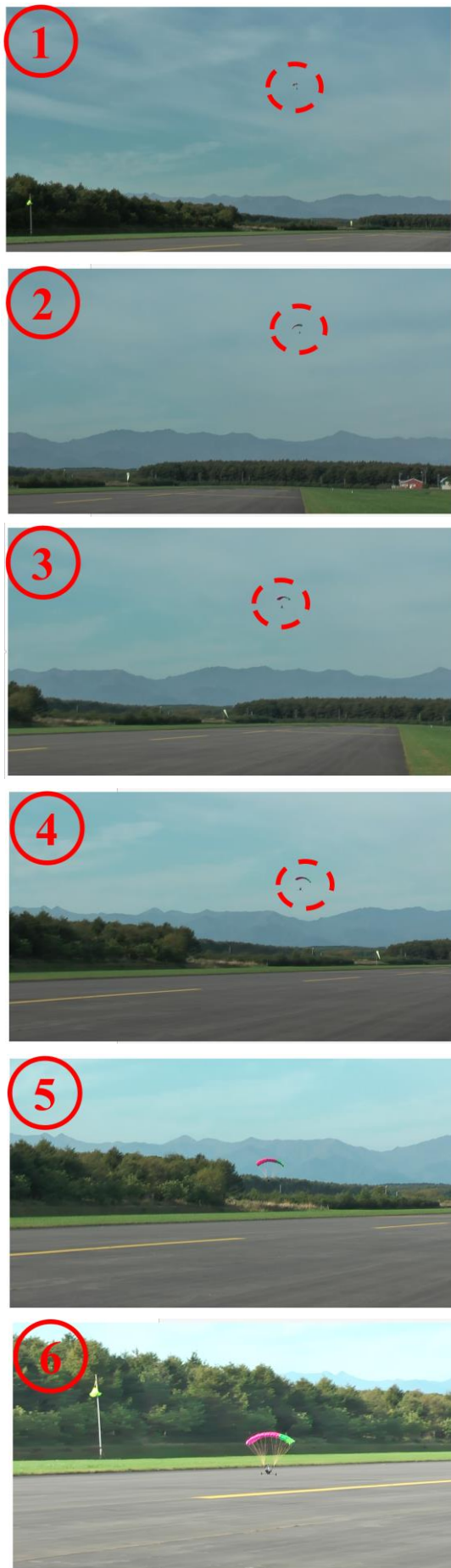


図3 自動着陸実験の様子

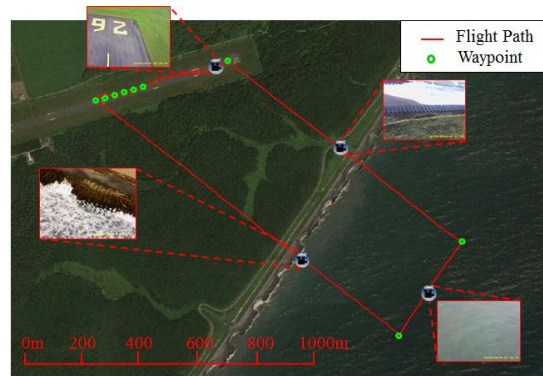


図4 災害時の情報収集ミッションを想定した飛行実験の様子

本飛行実証実験では、災害時の情報収集ミッションを想定しており、災害時の情報把握などは国民の生命や生活の安全確保に直結した研究でその社会的貢献（意義）は大きい。なお、国土交通省により2015年12月に施行された「無人航空機に係る航空法改正」に基づき、本研究に関するすべての飛行実験は国土交通省に申請し、事前に許可を得て行っている。

#### 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8件)

- ① Kazuo Tanaka, Motoyasu Tanaka, Ying-Jen Chen, and Hua O. Wang, A New Sum-of-Squares Design Framework for Robust Control of Polynomial Fuzzy Systems with Uncertainties, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 査読有, Vol. 24, No. 1, pp. 94-110, Feb. 2016. DOI: 10.1109/TFUZZ.2015.2426719
- ② Motoyasu Tanaka, Ying Jen Chen, Kazuo Tanaka, and Hua O. Wang, A Simple Passive Attitude Stabilizer for Palm-size Aerial Vehicles, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 査読有, Vol. 21, No. 1, pp. 591-597, Feb. 2016. DOI:10.1109/TMECH.2015.2432801
- ③ Thierry M. Guerra, Antonio Sala, Kazuo Tanaka, Fuzzy control turns 50: 10 years later, Fuzzy Sets and Systems, 査読有, Vol. 281, pp. 168-182, Dec. 2015 DOI:10.1016/j.fss.2015.05.005
- ④ Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Hua O. Wang, Stability Analysis and Region of Attraction Estimation Using Piecewise Polynomial Lyapunov Functions: Polynomial Fuzzy Model Approach, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 査読有, vol. 23, no. 4, pp. 1314-1322, August,

2015.

DOI:10.1109/TFUZZ.2014.2347993

- ⑤ Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Hua O. Wang, A Non-Monotonically Decreasing Relaxation Approach of Lyapunov Functions to Guaranteed Cost Control for Discrete Fuzzy Systems, IET Control Theory & Applications, 査読有, Vol. 8, No. 4, pp. 288-296, Nov. 2014.  
DOI:10.1049/iet-cta.2013.1132
- ⑥ Motoyasu Tanaka, Ken Yamaguchi, Daisuke Ogura, Ying-Jen Chen and Kazuo Tanaka, Nonlinear control of F16 aircraft via multiple nonlinear model generation for any trimmed equilibriums, International Journal of Fuzzy Systems, 査読有, Vol. 16, No. 2, pp. 140-152, June 2014.
- ⑦ Ying-Jen Chen, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake and Hua O. Wang, Discrete Polynomial Fuzzy Systems Control, IET Control Theory & Applications, 査読有, Vol. 8, No. 2, pp. 288-296, Feb. 2014.  
DOI:10.1049/iet-cta.2013.0645

[学会発表] (計 10 件)

- ① 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, 2016 年 6 月 9 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)
- ② 高橋 佑徳, 田中 基康, 田中一男, パラフォイル型飛行ロボットの特性を考慮した風向/風速推定, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A2-18a7, 2016 年 6 月 9 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)
- ③ 高橋 佑徳, 田中 基康, 田中一男, パラフォイルタイプ翼をもつ Unmanned Aerial Vehicle のファジィ制御, 第 31 回ファジィシステムシンポジウム, TE3-3, pp. 618-623, 2015 年 9 月 2 日, 電気通信大学 (東京都・調布市)
- ④ 高橋 佑徳, 田中 基康, 田中一男, 電動パラグライダー飛行制御系のロバスト安定性保証と空中からの映像撮影実験, ロボットメカトロニクス講演会 2015, 2A1-E09, 2015 年 5 月 19 日, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府・京都市)
- ⑤ 伊藤 唯, 田中 基康, 田中一男, 電動パラグライダーの自動離着陸制御の実現, ロボットメカトロニクス講演会 2014, 2A1-A01, 2014 年 5 月 27 日, 富山国際会議場 (富山県・富山市)
- ⑥ 關 靖史, 河合 大志, 倉持 信行, 田中 基康, 大竹 博, 田中一男, 飛行ロボット制

御用 HILS システムの開発とその制御系設計への適用, ロボットメカトロニクス講演会 2013, 1A2-F07, 2013 年 5 月 22 日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)

[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 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/tanaka21a/b/home>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

田中 基康 (TANAKA, Motoyasu)  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教  
研究者番号 : 50633442

(3) 連携研究者

大竹 博 (OHTAKE, Hiroshi)  
九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授  
研究者番号 : 60377017

(4) 研究協力者

Hua Wang (WANG, Hua)  
Boston 大学・工学部・准教授