

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12501

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H05752

研究課題名（和文）ドローンを用いた微気象の能動的観測技術の創出

研究課題名（英文）Creation of active observation technology for micro-meteorology using drones

研究代表者

鈴木 智（Suzuki, Satoshi）

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90571274

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 27,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、「ドローンを用いた、超高密度かつ安全な微気象の能動的観測技術の創出と体系化」を目指し、生物規範型ナノドローンの開発、マイクロドローンの情報機能化、多階層制御技術、外乱オブザーバを用いた風外乱推定とロバスト制御に関する研究を実施した。各研究グループの成果統合を目的とした合同実験を実施し、複数ドローンを用いた風速計測、外乱オブザーバによる外乱推定、協調風外乱推定に関して初期的な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果によって、本研究領域の中核を成す技術の一つである微気象の能動的観測の実現が可能となった。また、安全性・信頼性の高いナノドローンの開発によって、屋外のビル街区などの従来のドローンの飛行が難しい空間での情報収集（気象情報に限らない）のさらなる高密度化が見込まれる。したがって、自然科学的・社会的なインパクトが非常に大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Aiming to "create and systematize active observation technology of micro-meteorology using drones with ultra-high density and safety," this study conducted research on the development of bio-mimetic nano-drones, information functionalization of micro-drones, multi-level control technology, and wind disturbance estimation and robust control using disturbance observers. Joint experiments were conducted to integrate the results of each research group, and initial findings were obtained regarding wind speed measurement using multiple drones, disturbance estimation using disturbance observers, and cooperative wind disturbance estimation.

研究分野：ロボティクス

キーワード：微気象 能動的観測 ドローン

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

微気象の予測に向けて、密集ビル街区内の微気象の観測は不可欠であるが、現状、微気象を空間的に観測した例はない。安価なセンサを大量に用いたとしても、街区の3次元空間を網羅することは難しい。従来の空間計測として、レーダを用いた観測が挙げられるが、高空間分解能を謳うドップラーライダーであってもその分解能は100m程度であり、また、レーザ光が建物に遮られてしまうため、十分に解像することができない。

このような、レーダや地上での測定ではカバーできない中間的な領域では、近年発展が目覚ましいドローンが非常に有用である。現在、特に大型の産業用のドローンなどは、災害時の情報収集や、インフラの点検、農薬の散布などで、既に実用化されており、ドローン技術の応用により、より高密度で有用性の高い気象情報の取得が可能となると考えられる。

ビル街区での観測にはこのような大型のドローンは、安全性・機動性などの観点から適さず、より小型でかつ安定性・機動性の高い、人と万が一衝突しても負傷の危険性を極力減らすことのできる生物規範型ナノドローンが必要である。このような生物規範型ナノドローンを複数用いることで、より高密度な気象情報の取得が可能となると考えられる。しかし、生物規範型ナノドローンは、その制御の困難さから、自律飛行の実現に至っていない。

ドローンの持つ機動性は大きな強みであるが、それだけでは微気象予測の実現に必要な要件を満たさないと考える。ドローンを取り囲む微気象状態だけでなく、社会サービスが要求する時空間スケールや精度は時々刻々と変化し、それに対応するためには観測システムには適応性も要求される。例えば、複数のドローンを用いて微気象を観測する場合、個々の機体の安定飛行、障害物や機体同士の衝突回避、より価値のあるデータを取得するための各機体の絶対・相対位置・軌道・地域の選定など、必要となるタスクに階層性がある。このような階層的な制御目標が与えられたシステムに対して、階層的に分散した最適制御系設計法が必要となる。

微気象予測の実現には機動性と適応性を兼ね備えた能動的観測が必要であり、本研究ではその微気象の観測に特有の制約を、ドローン技術と多階層制御技術を融合するという学際的なアプローチで解決する。

2. 研究の目的

本研究では、「ドローンを用いた、超高密度かつ安全な微気象の能動的観測技術の創出と体系化」を目指す。

産業用の大型(メートルスケール)のドローンを用いた観測は近年進展が目覚ましく、地形の観測やインフラの点検等のための実用化が進んでいる。しかし、ビル街区での観測にはこのような産業用のドローンは、安全性・機動性などの観点から適さない。マイクロドローンは、ホビーや撮影などの用途のために広く利用されているが、特に予測できない外乱の存在する屋外での飛行の信頼性は低く、観測のためのセンサ等の搭載は進んでいない。

本研究では、代表者らが産業用ドローンで実証してきた制御理論を、生物規範型ナノドローンに統合することで、自然界での生物の軽量で安全かつロバストな飛行を規範とした生物規範型ナノドローンの自律飛行を実現し、ドローンの安全性・信頼性・機動性の向上を目指すという点に独自性がある。

また、マイクロ・ナノドローンを用いた気象観測には、種々のセンサシステムの小型化が必要であるが、本研究では、MEMS技術を活用した小型センサを用いて、マイクロ・ナノドローンを用いた微気象情報の取得を目指す点に独自性がある。

さらに単一のドローンによる観測技術の確立だけでなく、複数のドローンを用いた分散的な微気象の適応性を持った観測システムの確立を目指す。各ドローンの姿勢制御、相対運動制御、軌道追従、観測軌道設計、観測地域の選定など階層的なタスクを考慮して全体を捉え、階層化分散最適制御技術を用いることで観測システムを洗練させる点に独自性がある。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために以下の4つの研究を遂行した。

- (i) 生物規範型ナノドローンの開発
- (ii) マイクロドローンの情報機能化
- (iii) 多階層制御技術の開発
- (iv) 外乱オブザーバを用いた風外乱推定とロバスト制御

各項目の具体的な内容は以下に示す。

(i) 生物規範型ナノドローンの開発

羽ばたき飛行に着想を得たデュアルロータ型ドローンの開発を実施した。本年度はMATLABを用いたダイナミクスシミュレーションによって当該ドローンの実現可能性を検討するとともに、シミュレーション結果に基づいて実機製作を実施した。つづいて、制御システムを構築し、構築した制御システムに基づいた飛行シミュレーションを行った。

(ii) マイクロドローンの情報機能化

市販のマイクロドローンおよび既に研究室で保有している各種小型ドローンに対して小型風速センサを搭載し、風速測定の実験及び評価を実施した。屋内に小型風洞設備を構築し、その環境下で小型センサを搭載したドローンを飛行させながら風速測定を実施した。ドローンの位置や姿勢情報は光学式モーションキャプチャシステムによって計測し、計測された風速情報、風洞で発生させた風速情報、およびドローンの正確な位置・姿勢情報を利用して、精度等について評価を行った。つづいて、無線計測システムの開発を実施し、ドローンが自由に飛行する中での計測を可能とした。最終的にMEMS風速センサを用いた小型ドローン、また超音波風速計による風速測定と温度、湿度、気圧の微気象に関する必要データを無線計測により行える中型ドローンに対して、名古屋大学に設置されている飛行性能評価風洞を用いた妥当性検証を行った。

(iii) 多階層制御技術の開発

姿勢、相対運動の二層を考慮した群制御について研究を進めるとともに機動的観測に向けた検討を実施した。機動的観測に向け、観測軌道設計の層を新たに考慮する。各ドローンの局所的な観測情報をフィードバックした観測軌道の最適化について検討を行った。つづいて、非一様なグループに対する階層化分散最適制御に関する研究と、複数エージェントによる協調Kalmanフィルタの設計に関する研究を実施した。前者では制御ループの階層性と最適性が両立する制御系の設計を行い、後者では複数の計測を複合することで全体システムの理論的な誤差分散の低減が可能であることを示した。最後に、多階層最適制御技術と協調推定技術をベースに、複数ドローンによる協調風外乱推定技術について考察を行った。将来的な外乱オブザーバを用いた風外乱推定技術との統合も視野に入れつつ、独自の初期検討を行った。

(iv) 外乱オブザーバを用いた風外乱推定とロバスト制御

はじめに、非線形外乱オブザーバを用いた外乱推定器の開発を行った。T-S Fuzzy オブザーバとドローンのダイナミクスを基礎として外乱オブザーバを設計し、シミュレーションおよび実機実験によって有効性を示した。最終的に外乱オブザーバによる外乱推定と非線形制御手法の1種である STSM 制御を統合したロバスト制御系を提案し、その有効性を検証した。

4. 研究成果

(i) 生物規範型ナノドローンの開発

構築した制御システムを用いたシミュレーションの結果からデュアルロータ型ドローンの冗長性を活かした自由姿勢での飛行や斜面への安定した着陸などが可能であることを確認した。具体的な研究成果を図1にまとめる。

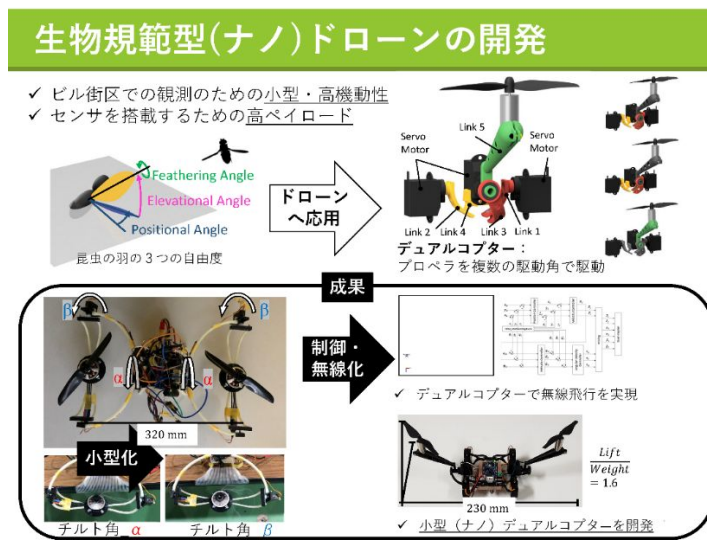


図1

(ii) マイクロドローンの情報機能化

名古屋大学で実施した風洞試験の結果として事前測定データと1%以内の誤差で一致する計測が可能であることを確認した。具体的な研究成果を図2にまとめる。

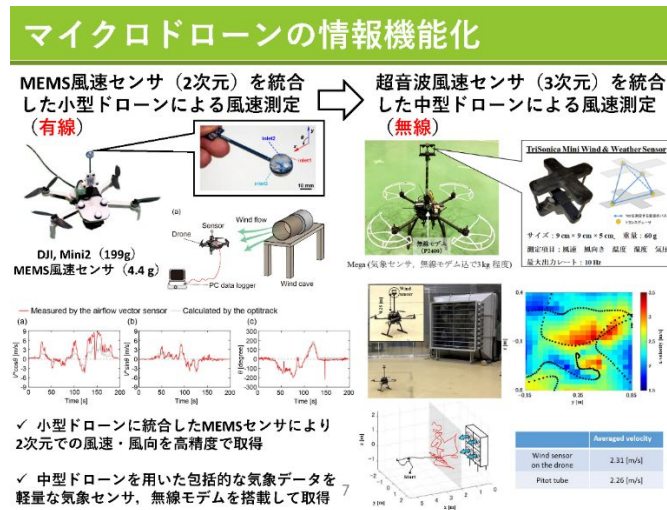


図2

(iii) 多階層制御技術の開発

ドローンの個別の運動制御と相対距離などの協調的な運動制御の2階層最適制御から得られる考え方をを用いて、定常的な外乱の推定則を導出し、数値シミュレーションによってその有効性を確認した。具体的な研究成果を図3にまとめる

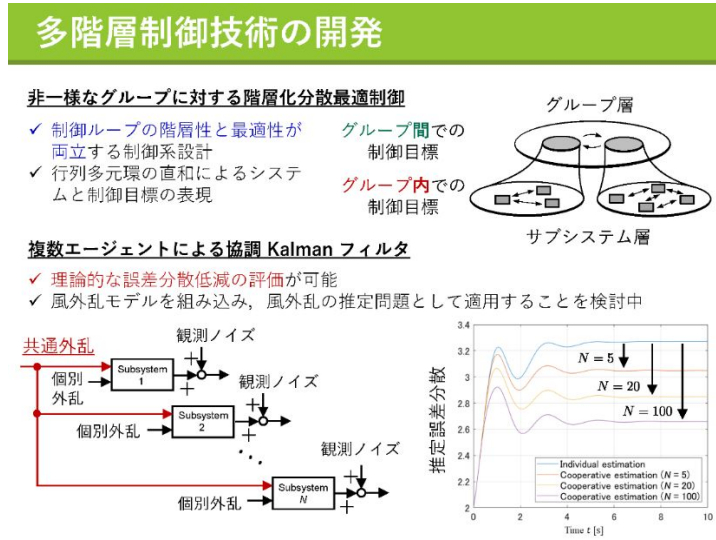


図 3

(iv) 外乱オブザーバを用いた風外乱推定とロバスト制御

周波数整形型の T-S Fuzzy オブザーバによって、風外乱推定とロバスト制御に有用な外乱推定を両立する外乱オブザーバを実現した。また、DOB と STSM 制御を組み合わせたロバスト制御系を提案した。外乱推定実験および飛行制御実験によって、提案するオブザーバおよび制御系の有効性が示された。具体的な研究成果を図4にまとめる。

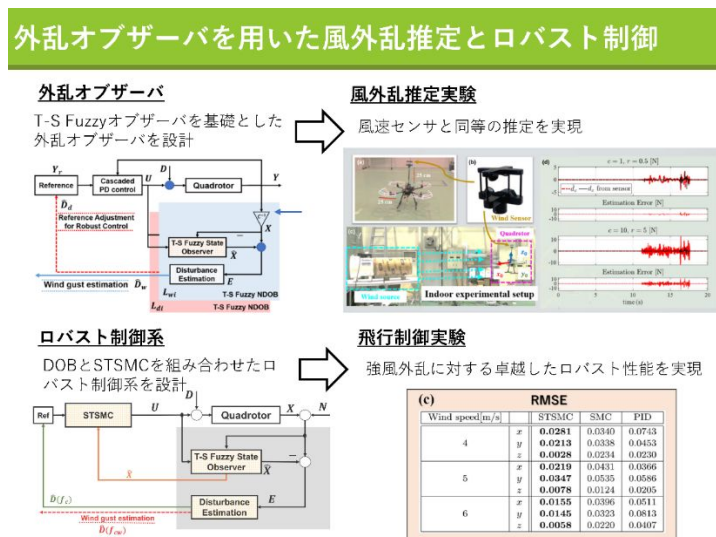


図 4

以上に加えて、(ii) ~ (iv) の成果統合を目的として名古屋大学の飛行性能評価風洞で合同実験を実施し、複数ドローンを用いた風速計測、外乱オブザーバによる外乱推定、協調風外乱推定に関して初期的な結果を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Shimamura Ryosuke, Suzuki Satoshi	4. 巻 40
2. 論文標題 Robust Attitude and Angular Rate Control of Multi-rotor UAV using Super Twisting Sliding Mode Control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 62～70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.40.62	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 Haneda Kotaro, Matsudaira Kenei, Noda Ryusuke, Nakata Toshiyuki, Suzuki Satoshi, Liu Hao, Takahashi Hidetoshi	4. 巻 22
2. 論文標題 Compact Sphere-Shaped Airflow Vector Sensor Based on MEMS Differential Pressure Sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1087～1087
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22031087	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 Noda Ryusuke, Ikeda Teruaki, Nakata Toshiyuki, Liu Hao	4. 巻 1
2. 論文標題 Characterization of the low-noise drone propeller with serrated Gurney flap	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 2813～2831
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpace.2022.1004828	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 Asignacion Abner, Suzuki Satoshi, Noda Ryusuke, Nakata Toshiyuki, Liu Hao	4. 巻 7
2. 論文標題 Frequency-Based Wind Gust Estimation for Quadrotors Using a Nonlinear Disturbance Observer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 9224～9231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2022.3190073	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 Kataoka Sakyō, Suzuki Satoshi	4. 巻 40
2. 論文標題 A Study on Path Planning for Autonomous Drones Considering Wind Risk	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 915 ~ 923
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.40.915	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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kento Fujita
2. 発表標題 Hierarchical optimal control with information aggregation for groups with different numbers of agents
3. 学会等名 ACC2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryusuke Noda
2. 発表標題 The Aerodynamics in Multiple Flight Modes of a Dragonfly
3. 学会等名 WCC-XV (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田 龍介
2. 発表標題 トンボの自由飛翔時におけるスパン効率
3. 学会等名 日本機械学会 第34回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sota Takeuchi
2. 発表標題 Performance improvement in Kalman filters Due to Cooperation for multi-agent systems under identical noise
3. 学会等名 CDC2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田 健人, 椿野 大輔
2. 発表標題 階層化最適制御則における情報集約が生じる条件について
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム (MSCS2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田 健人, 椿野 大輔
2. 発表標題 エージェント数が異なる複数グループからなるシステムに対する階層化最適制御
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原将太, 前沢優斗, 中田 敏是, 劉 浩
2. 発表標題 飛翔昆虫を規範としたデュアルコプターのモデリングと姿勢制御
3. 学会等名 Robomech 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryosuke Shimamura, Satoshi Suzuki
2. 発表標題 Robust Altitude Control of Multi-rotor UAV using Super Twisting Sliding Mode Control
3. 学会等名 The 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内 颯太, 椿野 大輔
2. 発表標題 同一ノイズ環境下の複数線形システムに対する Kalman フィルタによる協調状態推定
3. 学会等名 第64 回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原 将太, 中田 敏是, 劉 浩
2. 発表標題 昆虫規範型デュアルコプターの創製
3. 学会等名 日本機械学会 第31回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田 健人, 椿野 大輔
2. 発表標題 階層化最適制御則における情報集約が生じる条件について
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021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	椿野 大輔 (Tsubakino Daisuke) (00612813)	名古屋大学・工学研究科・講師 (13901)	
研究分担者	野田 龍介 (Noda Ryusuke) (00811267)	東京工科大学・工学部・講師 (32692)	
研究分担者	劉 浩 (Hiroshi Liu) (40303698)	千葉大学・大学院工学研究院・教授 (12501)	

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