

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04196

研究課題名（和文）風洞実験に基づいた車輪型ドローンのモデリングと適応最適制御系設計と飛行実験実証

研究課題名（英文）Modeling of Two-Wheeled Multi-Copters Based on Wind Tunnel Experiment, Adaptive Optimal Control System Design, and Flight Experiment

研究代表者

山田 学（Yamada, Manabu）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40242903

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）：本研究の目的は、構造物に接触しながら目標値に高精度で追従飛行できる車輪型ドローンの自動制御システムの開発である。本研究では、まず、小型で軽量な車輪型ドローンの試作機を製作し、風洞実験などで、構造物に接触飛行する場合の車輪型ドローンの運動学モデルを導出した。つぎに、そのモデルに基づいて、車輪型ドローンを空中だけでなく、地上や壁面や天井を接触飛行しながら、目標値に高精度で追従できる自動制御系を開発し、実機に基づいたシミュレーションや実機による飛行実験で性能を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

車輪型ドローンは申請者独自の特許技術であり、今後の成功のカギは自動操縦技術の蓄積である。まず、本研究の学術的意義は、風洞実験などで、運動学モデルを初めて導出したことと、車輪型ドローンを空中だけでなく、地上や壁面や天井を接触飛行しながら、目標値に高精度で追従できる自動制御系を開発し、数多くの知見が得られたことである。一方、社会的意義として、本研究の成果は、生活に密接した様々な分野に応用ができ社会的効果が高いことである。例えば、建物の屋内外の無人飛行パトロールシステムやビルの外壁検査システムなど、多方面への事業展開も可能であり、本研究が「日本発の国産ドローン開発」につながる研究成果である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop automatic control systems for two-wheeled multi-copters that can follow desired outputs with high accuracy while contacting a structure. In this research, first, we produced a prototype of small and lightweight two-wheeled multi-copters, and derived a kinematic model of the two-wheeled multi-copters when flying in contact with a structure in wind tunnel experiments. Next, we developed automatic control system that can follow the desired outputs with high accuracy not only in the air, but also on the ground, walls, and ceilings while contact flying. Excellent performance of the proposed control system was verified in flight tests using actual two-wheeled multi-copters

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 飛行ロボット 自動制御 壁面走行 天井走行 地上走行 接触飛行

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 申請者は2013年に2輪型ドローン(マルチコプタ)を発明した。これは、マルチコプタに車軸を取り付け、その左右にそれぞれ軽量で回転可能かつ機体を保護する車輪を取り付けることで、地上や壁面や天井面を接触しながら全方位飛行できる新しい飛行体であり、これまでに特許10件を登録した。この発明は、飛行体を、空中飛行だけでなく、地上・階段の転がり走行や壁面・天井の接触飛行も可能にし、「ルンバ」のように自動充電も可能にするため、実用性が高い。この車輪型ドローンは、内閣府SIP(戦略的イノベーションプログラム、2014~2018年度)に採択され、NEDO(独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)委託事業として、富士通株式会社・東京大学・北海道大学と共同で橋梁点検支援飛行ロボットの大型プロジェクトを実施した。その結果、橋梁点検ロボットとしての実用性が認められ、岐阜県各務ヶ原市など、数多くの市町村からの要請もあり、実際の橋梁などの点検現場で活躍している。車輪型ドローンは、現在、熟練の操縦者が手で操縦しているが、今後の普及の観点から、操縦を容易にする制御システムの開発が産業界から要請されており、社会的ニーズが高い。

(2) 車輪型ドローンの操縦法は通常のドローンとは大きく異なる。通常のドローンは機体を水平にして飛行するが、車輪型ドローンは、飛行体のピッチ角を10度程度傾けることで、推力Fの横方向成分($F \times \sin$)の力で構造物に押付け、壁面のような構造物に接触しながら、推力の縦方向成分($F \times \cos$)の力で上下に飛行移動する。その際の空力学的な特性は、通常の広く障害のない空間を空中飛行するドローンと大きく異なる。例えば、構造物に接触飛行する場合、構造物に近いプロペラは、構造物により吸い込み可能な空気の流量が制限され、推力が低下する。その他に、壁面特有の特性として、下降流や上昇流や壁面付近の境界層や渦などによる推力変動や、横風に対してプロペラ横の車輪により渦などが発生し、推力が低下するなど、通常の空中飛行するドローンにはない特有の外乱が発生する。しかし、これまで、上記の独特な飛行操作を必要とする車輪型ドローンの運動学モデルの構築や上記の特殊な外乱を考慮した自動制御系の設計法に関する研究はほとんどされておらず、学術的な観点から、車輪型ドローンの自動制御に関する研究が必要とされている。

(3) 車輪型ドローンの自動制御に関する研究は、生活に密接した様々な分野に応用が可能であり社会的効果が高い。例えば、建物の屋内外の無人飛行パトロールシステムやビルの外壁検査システムなど、多方面への事業展開も可能であり、本研究の成果が「日本発の国産ドローン開発」につながる研究である

2. 研究の目的

(1) 風洞実験などを利用して、車輪型ドローンの運動学モデルを検討し、構造物などに接触飛行する場合の車輪型ドローンの動的モデルを構築する。

(2) 車輪型ドローン特有の外乱を解析し、そのような外乱が発生しても、壁面や天井や地上を接触飛行しながら、目標値に高い精度で追従できる、車輪型ドローンの位置および姿勢制御システムを開発する。

(3) 試作機に基づいた実験やシミュレーションにより、開発した制御系の性能実証を行い、自動制御性能を評価する。

3. 研究の方法

(1) 研究課題 【小型・軽量、墜落しても壊れにくい車輪型ドローンの試作機製作】

これまで、内閣SIPで製作してきた車輪型ドローンは全長60~80cmとやや大型であり、今後の応用やモデリング実験(本学の風洞実験室のサイズは80cm×80cm)の観点から、小型化と軽量化が必要である。機体製作の数値目標は、全長30cm、重量2kg程度で、姿勢角センサとレーザー測距センサを搭載し、フィードバック制御により自動制御可能な小型軽量な車輪型ドローンを試作する。

(2) 研究課題 【風洞実験などに基づいた車輪型ドローンのモデリング】

本学の風洞実験室を利用して、様々な風速の下で車輪型ドローンの推力実験や機体まわりの流れの可視化実験を実施する。研究方法は、風洞に壁面や天井を想定したセットを作り、下降流や上昇流や横風の下で実験データを収集、解析し、オイラー・ラグランジェ方程式から導出したモデルと比較しながらモデリングの精度を向上させる。

(3) 研究課題 【空中を安定・安全かつ高精度に飛行できる自動制御系の開発】

課題の成果を応用して、空中で安定に静止でき、3次元の目標値に高精度で追従する車輪型ドローンの自動制御系を設計・開発する。研究方法は、厳密な線形化手法を応用した制御法を検討し、外乱に対してロバストな自動制御系を設計する。最終目標は、半径20cm球内での空中静止(無風時)と位置追従精度20cm以内の目標値追従性能の実現と実験実証である。

(4) 研究課題 【地上を安定・安全かつ高精度に走行できる自動制御系の開発】

課題の成果を応用して、地上で目標値に高精度で追従走行できるドローンの自動制御系を設計・開発する。研究方法は、厳密な線形化手法を応用した制御法(適応制御法など)を検討し、外乱に対してロバストな自動制御系を設計する。研究の最終目標は、位置追従精度10cm以内の高精度追従性能の実現と実験実証である。

(5) 研究課題 【壁や天井などに接触し安定かつ高精度に飛行できる自動制御系の開発】

課題の成果を応用して、壁や天井に接触しながら、目標値に高精度で追従飛行できるドローンの自動制御系を設計・開発する。研究方法は、厳密な線形化手法を応用した制御法（適応制御法など）を検討し、外乱に対してロバストな自動制御系を設計する。研究の最終目標は、位置偏差 20cm 以内の高精度追従性能の実現と実験実証である。

4. 研究成果

(1) 研究課題の観点から、小型で軽量の車輪型ドローンの試作機を製作した。機体の高さと同様に車輪径は 25cm、幅は 30cm（車輪を含む）であり、重量は 0.7~1.6kg である。図 1 は試作した機体の例であり、左図の機体は、プロペラ径が 4inch で、自動制御のため、姿勢角センサ（Xsens 社 MTi-1）とレーザーセンサ（Lider Lite v3）とフライトコントローラ（Pixhawk）を実装している。機体や車輪は軽量化のため、CFRP を用いて製作した。

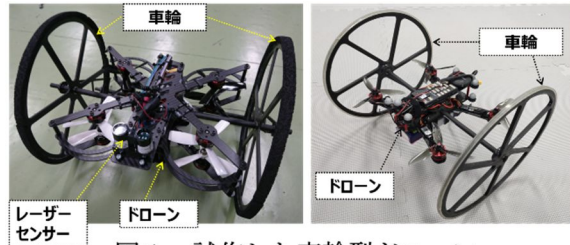


図 1 試作した車輪型ドローン

(2) 研究課題の観点から、車輪型ドローンのモデリングを行った。モデリングの際、本学の風洞実験室を利用して、様々な風速の下で車輪型ドローンの推力実験などを実施した。図 2 のように、風洞に壁面や天井を想定したセットを作り、下降流や上昇流や横風の下で実験データを収集した。そして、オイラー・ラグランジェ方程式から導出したモデルと比較しながら、高精度な運動学モデルを構築した。これまでのモデルにない特徴は、接触飛行時の構造物からの反力や劣駆動性などの拘束条件も陽に表現できることである。さらに、風洞実験などで得られたデータを利用して、風外乱下での車輪型ドローンの 3 次元運動を模擬でき、自動制御性能も評価できる、図 3 のシミュレータも作成した。



図 2 風洞実験の様子

(3) 研究課題の観点から、図 4 のように、車輪型ドローンの自動制御実験および飛行性能評価を実施できる環境を構築した。自動制御は機体を実装したフライトコントローラ（Pixhawk）などで行う。フライトコントローラに書き込まれた制御プログラムに基づき、各モータへの PWM 制御の信号を送信することで、車輪型ドローンを自動制御する。機体の位置・姿勢の情報は、機体搭載のセンサやモーションキャプチャなどによって取得され、飛行性能を正確に評価できる。同時に、モーションキャプチャによって取得された情報はコンピュータから Bluetooth シリアル通信によって機体に搭載されているマイコンを経由して Pixhawk にリアルタイムで送信し、フィードバックすることもできる。なお、マイコンは ArduinoIDE で開発可能な ESP32 を使用し、Pixhawk との通信は I2C 通信を用いる。また RC 送信機によってモータの起動・停止信号を送ることもできる。

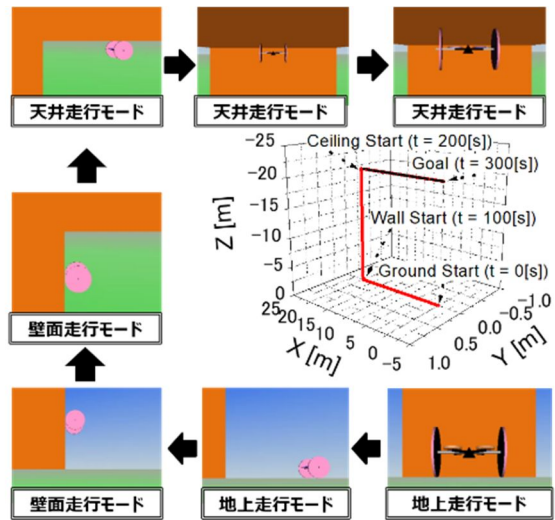


図 3 車輪型ドローンのシミュレータ

(4) 研究課題の観点から、空中飛行だけでなく、壁面接触した状態で、空中で安定に静止でき、壁面上に指定させた任意の目標軌跡に高精度で追従できる車輪型ドローンの新しい実用的な自動制御系を開発した。開発した制御系の構成は図 5 であり、以下の特徴をもつ。第一に、

従来のオイラー角表現による特異点などの問題点を解決するため、姿勢表現に特殊直交群 $SO(3)$ を導入し、3次元位置ベクトルも含めた集合 $SE(3)$ に基づき、車輪付きドローンの空中飛行時および壁面走行時の新しい軌道追従制御システムの設計法を提案したことである。第二に、図5の制御系は、機体の重心ではなく、機体の運動方向前方の一定距離離れた点を制御基準点とすることで、劣駆動性などの拘束条件をもつ非線形系を、座標変換を含む「線形化変換器」でシステム全体の

入出力を線形化することのできるため、最適な目標値追従制御を達成できる。第三に、風などの外乱を、ガウス過程回帰に基づく機械学習によりオンラインで推定し、外乱抑制信号を速度制御器から入力する適応学習型制御系を提案した。そして、車輪型ドローンの入出力データだけでなく、風洞実験で得られたデータを用いることにより、風外乱に対して、よりロバスト性が向上することをシミュレーションにより確認した。その結果、空中飛行では、半径 20cm 球内での空中静止や位置偏差 20cm 以内の目標値追従性能を達成できることをシミュレーションおよび実機実験検証により確認した。また、図6に示すように、壁面走行時においても、位置偏差 20cm 以内の目標値追従性能を達成できることをシミュレーションおよび実機実験検証により確認した。

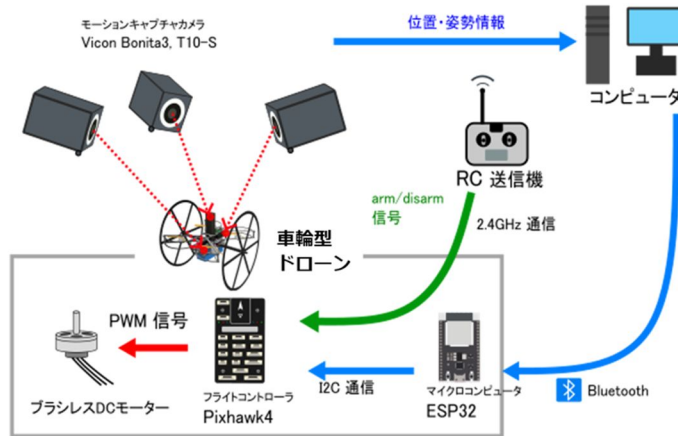


図4 車輪型ドローンの飛行性能評価環境の構築

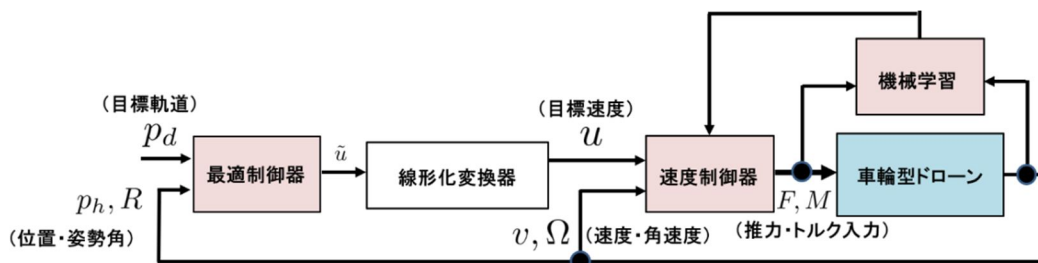


図5 提案する自動制御系

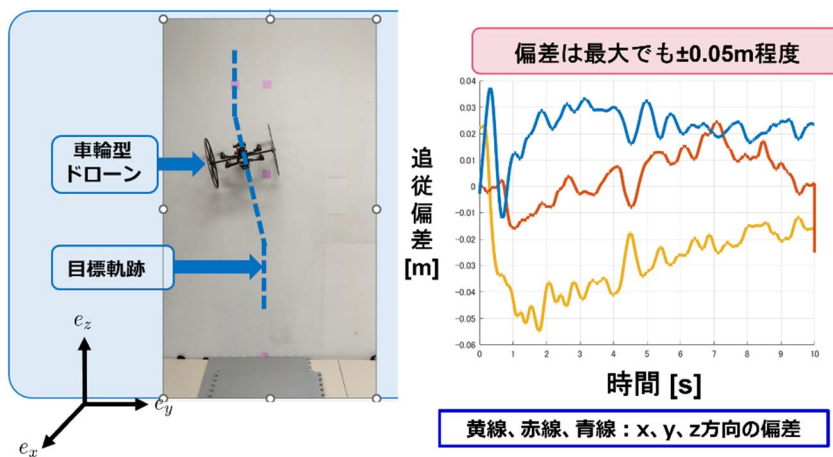


図6 車輪型ドローンの飛行実験（壁面上での目標値追従制御）

(5) 研究課題 ~ の観点から、地上および天井で目標値に高精度で追従走行できる車輪型ドローンの自動制御系について研究した。壁面走行時との違いは、地上や天井の場合、一定速度で走行させることや、希望の場所で停止させることが難しい点にある。例えば壁面を一定速度で上昇させることや、希望の高さで停止させることは、機体の重力を利用すれば比較的容易である。一方、地上や天井の場合、機体を傾けて走行させると、車輪は自由に回転し、重力のようなブレーキになるものがないため、定加速度運動となり、速度は増加してしまうので、速度制御が難しい。そこで、図7のような駆動輪切り替え機構を開発し、図1の試作機に実装した。製作した駆動輪機構は、車輪駆動用アクチュエータ（モータ）と切り替え装置で構成され、車輪の軸に取り付けることができる。駆動用モータは無線操作可能で、ギヤによって車輪に駆動力を伝える。切り替え装置により、駆動車輪と受動車輪の機能を無線で選択できる。両輪での重量は260gであり、つぎの特徴をもつ。第一に、駆動車輪と受動車輪の両方の機能を無線で切り替えることができるため、例えば、空中から天井に接触するときや天井から脱出するときは、車輪がロックしていると、機体の姿勢を制御することが困難かつ危険であるため、自由に車輪が回転できる受動車輪を使用し、天井接触後、機体の姿勢が安定したら、駆動車輪に切り替えることで、プロペラで天井に押し付けながら駆動車輪で天井を一定速度で移動できる。第二に、駆動車輪は機体を素早く停止させるブレーキとしても利用できる。第三に、天井や地上での数度程度の斜面や段差に対して、駆動車輪であれば乗り越えが容易になる。その結果、図5の提案する制御系に図7の駆動輪機構を加えることで、地上や天井において、希望の目標速度で定速移動でき、地上走行時では、研究目標の位置偏差10cm以内、天井走行時では、研究目標の位置偏差20cm以内の目標値追従性能を達成できることをシミュレーションおよび実機実験検証により確認した。

(6) 上記の車輪型ドローンの自動制御に関する研究成果は、建物の屋内外の無人飛行パトロールシステムやビルの外壁検査システムなど、生活に密接した産業など、多方面への応用が可能であり、社会的インパクトも大きいため、今後の展望として、本研究成果の社会実装に関する研究が望まれる。

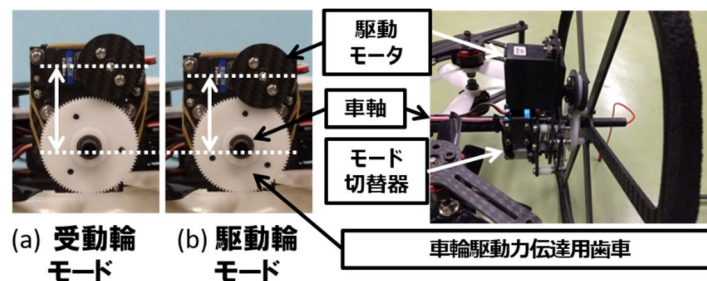


図7 車輪型ドローン用駆動輪切り替え機構

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 塚田大貴、尾崎耕平、山田学	4. 巻 54
2. 論文標題 地上および天井移動する2輪型4ロータヘリコプタの追従制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 776-784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.54.776	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 山田学、仲野聡史	4. 巻 30
2. 論文標題 2輪型マルチコプタを用いた橋梁支承部点検システムの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 297-302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14243/jsaem.30.297	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 波田侑也、仲野聡史、山田学
2. 発表標題 SE(3)上での車輪付きマルチコプタの壁面走行位置制御
3. 学会等名 第9回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田朱梨、高木航平、仲野聡史、山田学
2. 発表標題 バックステッピング法とCLF-CBF-QPに基づいたクアドロータの壁面衝突回避制御
3. 学会等名 第21回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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川口、仲野、山田学
2. 発表標題 2輪型マルチコプタを用いた橋梁点検システムと天井面走行への応用
3. 学会等名 第20回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 SI2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木、福田、仲野、山田学
2. 発表標題 天井裏点検を目的としたマルチコプタの開発
3. 学会等名 第20回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 SI2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田、丹羽、山田学、仲野
2. 発表標題 壁面打音検査を目的とした2輪型マルチコプタの開発
3. 学会等名 第20回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 SI2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤、出島、仲野、大羽、山田学
2. 発表標題 2輪型マルチコプタを用いた橋梁の支承部点検のための自動制御システム
3. 学会等名 第20回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 SI2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤正隆、仲野聡史、山田学
2. 発表標題 受動性に基づく車輪付きマルチコプタの位置制御の外乱抑制評価
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河村創太郎、仲野聡史、山田学
2. 発表標題 制御バリア関数とヨー角非干渉化に基づくテザードローンの障害物回避制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島豪介、仲野聡史、山田学
2. 発表標題 入出力線形化に基づくSE(3)上での車輪付きドローンの壁面走行制御と実験検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>打音による壁面検査の動画 http://mcontrol.web.nitech.ac.jp</p>
--

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	仲野 聡史 (Nakano Satoshi) (30847893)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教 (13903)	

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