

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14119

研究課題名（和文）高圧噴射を駆動源とする機敏なドローンとその制御技術の研究開発

研究課題名（英文）Research and development of high-pressure jet-actuated agile drones and their controllers

研究代表者

安部 祐一（Ambe, Yuichi）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：90778622

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、高圧噴射を駆動源とする機敏な噴射ドローンの実現を目指し、(1)軽量で高応答に噴射方向を制御できるアクチュエータと、(2)ドローンの位置・姿勢を安定化可能な制御系の研究開発に取り組んだ。(1)：軽量で低摩擦な高圧回転流路を開発し（従来比重量1/3、回転抵抗1/2程度）、これを用いて噴射方向を制御できる軽量の能動ノズルを設計開発、噴射反力の方向を制御できることを実証した。(2)：少ない制御入力でドローンの位置と姿勢を安定化することを目指して、ホースを含んだドローンの3次元動力学シミュレーションを開発、提案した制御で2軸回りの姿勢を安定化できることを数式と数値計算により基礎検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、高圧流体の噴射方向を制御できる軽量アクチュエータを初めて実現し、これを用いて浮上する噴射ドローンの制御法の基礎検証を行った。本アクチュエータは大きな並進力を小さな力で素早く制御できるこれまでにない技術であり、既存の浮上移動体の課題である、荒天時の機敏な浮上移動の実現につながる学術的に意義のある成果である。また、噴射ドローンは、強風時の情報収集や、荒天時の空飛ぶ人命救助ロープ、自ら火元へ水を運ぶ消火ロボットなどに応用でき、社会的意義も少なくないと考える。

研究成果の概要（英文）：This research developed fundamental technologies for an agile jet-actuated drone powered by high-pressure injections.

(1) We developed a lightweight, low-friction, high-pressure swivel joint (approximately one-third the weight and half the rotational resistance compared to a conventional design). Using this, we developed a lightweight active nozzle capable of controlling the injection direction. The ability to control the direction of the jet reaction force was validated experimentally.

2. To stabilize the position and attitude of the drone with minimal control inputs, we developed a three-dimensional dynamic simulation of the drone, including the hose. We verified that the proposed controller could stabilize the attitude around two axes through mathematical and numerical calculations.

研究分野：ロボティクス

キーワード：流体アクチュエータ 流体噴射 ドローン 索状体 噴射ドローン 高圧流体

1. 研究開始当初の背景

浮上移動体は、目的地に直接到達することが可能であるため、移動手段、物資運搬、情報収集手段として有用である。しかし、既存の浮上体は、強風などの荒天時には風に流されるため、荒天時に浮上してホバリング、機敏な運動を行うのが難しい。災害の起こりうる荒天時こそ迅速移動や情報収集が重要であり、本研究では「荒天時でも機敏な浮上移動を実現する」ことを大きな目標とした。

機敏な浮上移動機構の候補として、プロペラ回転により推力を得るドローンが候補に挙がる。近年ではドローンレースも活発となり、機敏な運動を行う制御法なども研究されている(D. Hanover et al., *IEEE Transaction on Robotics*, 2024)。しかし、ドローンはモータの特性上、推力を大きくするにはプロペラの面積を増やさなければならず、風の影響を受けやすい欠点がある。

研究代表者は、「流体噴射の方向制御による浮上機構」を1つの解法として考えている。噴射方向を制御可能なノズルを複数搭載し、合力を制御して浮上する“ドローン”である(図1)。根本には高圧ポンプを配置し、ホースを通してドローンに高圧流体を供給する。本ドローンは、連結された流体ホースに運動が拘束されるデメリットがあるが、流体を高圧にすることで噴射力あたりのホース質量は大きく減らすことができる。一方、流体噴射の方向制御によるアクチュエーションのおかげで、「外部で生成した大きな並進力(流体噴射力)を、小さな力(噴射方向を変える際に、噴射力は仕事をしない)で制御することができる」強みを持つ。これは、これまでのアクチュエータにないコンセプトである。送水ホースの影響を考慮しつつ、大きな推力を高応答で制御すれば、風などの外乱下でも機敏な運動が期待できる。

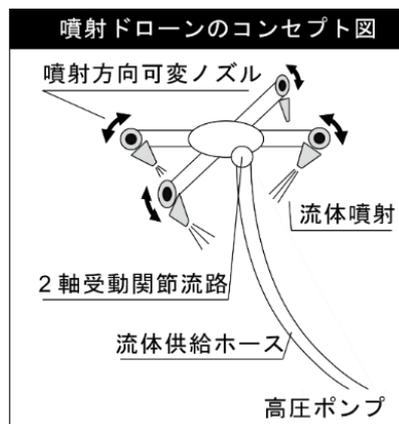


図1 噴射ドローンのコンセプト

2. 研究の目的

本研究では、荒天下での機敏な浮上移動の実現を目指して、高圧噴射を駆動源とする機敏なドローンの基礎技術の研究開発を目的とし、具体的には以下に取り組む

- (1) 軽量で高応答な噴射方向可変アクチュエータの研究開発
低摩擦の回転流路の開発や、適切な流路設計を行い、大きな反力を生む高圧噴射ノズルの方向を高応答で制御することを目指す。
- (2) 噴射方向の制御による、ドローンの位置・姿勢の安定化制御手法開発
噴射ノズルの幾何配置と制御方法を同時に工夫することで、ドローンの位置と姿勢を同時に安定化する単純な制御方法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 軽量で高応答な噴射方向可変アクチュエータの研究開発

(1)-1 軽量で低摩擦な回転流路の開発と回転抵抗の評価

高圧流体の噴射方向を軽量で高応答に制御するためには、軽量で低摩擦な回転流路を実現することが重要である。しかし、既存の高圧回転流路はいずれも重くかつ回転抵抗が大きいものがほとんどであり、本目的にはそぐわない。

本研究では関連会社に協力いただき、高圧用の回転流路を新しく開発する。材質をアルミ材にして軽量化するとともに、水密のためのパッキン材ならびにその配置について試行錯誤を繰り返すことで低摩擦化に取り組んだ。合わせて、回転抵抗を評価するための試験機を試作、製作した回転ジョイントの回転抵抗を評価した。

(1)-2 噴射方向を制御できるノズルの研究開発と評価

(1)-1 で開発した低摩擦な回転流路を用いて、噴射方向を制御できる軽量な能動回転ノズルを開発、実験機を用いて検証した。

(2) 噴射方向の制御による、ドローンの位置・姿勢の安定化制御手法開発

ドローンの位置・姿勢を安定化可能な制御系の開発を目指して、3次元動力学シミュレーションを開発した。また、位置制御のための並進力を実現しながら、ドローンの2軸周りの姿勢を安定化できる制御系の検討を行った。

4. 研究成果

(1)-1 軽量で低摩擦な回転流路の開発と回転抵抗の評価

最終的に開発された軽量で低摩擦な回転流路を図2Aに示す。図矢印の向きに高圧流体が流れており、補助線の回転軸まわりに回転する。図2B-Cは、本回転流路の回転抵抗を試験する際のシステム構成ならびにその試験結果を示している。本実験では、水圧ポンプを使って回転流路内部に静圧を加え、モータを使って回転流路を定速回転させ、回転に必要なトルクを計測した。

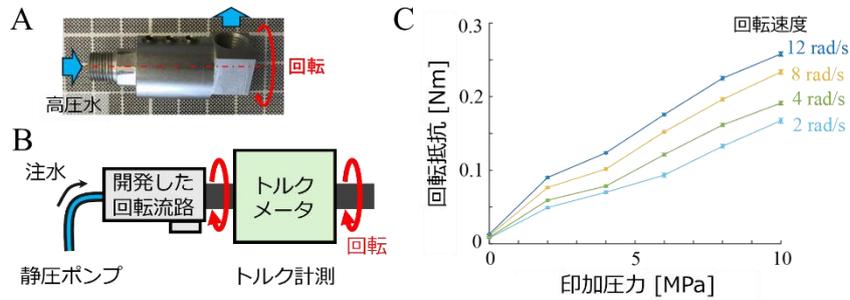


図2 開発した回転流路(A)ならびにその回転抵抗の計測試験の模式図(B)と結果(C)

図2Cでは、印加圧力に対する回転抵抗の平均値を回転速度ごとにプロットしている。開発したスィベルジョイントは、静圧10MPa、回転速度12rad/sにて0.25Nm程度の回転抵抗を実現できていることが分かる。また、本回転流路の重量は28gであった。既存回転流路(SuperSwivels社のカタログを参照)と比較すると、重量1/3、回転抵抗1/2程度のスペックが実現できており、低摩擦で軽量な回転流路の開発に成功した。

(1)-2 噴射方向を制御できるノズルの研究開発と評価

(1)-1で開発した低摩擦な回転流路を用いて、図3のような噴射方向を制御できる軽量な能動回転ノズルを開発した。回転流路先端にノズルを取り付け、モータを用いて回転流路を回転させることで噴射方向を制御できる。開発した能動回転ノズルの重量は150g程度であり、本ノズルを4つ搭載した噴射ドローンが十分浮上できる程度に軽量である(流路計算で確認)。

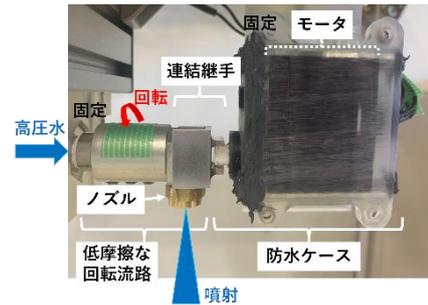


図3 能動回転ノズル

本ノズルで流体噴射方向を変えることで、噴射反力の方向を制御できるかを実験により検証した。図4Aには用いた実験機の概要を示す。エンジン式の高圧ポンプと能動回転ノズルを連結し、噴射方向を変えた際の噴射反力を力センサで計測する。

図4B-Cには、ポンプで8MPa印加した際の、ノズル噴射方向に対する噴射反力の大きさや方向を一例として示す。点線は流路計算により得られる理論値を示している。得られた反力の大きさは理論値と誤差1割程度で一致しており、また噴射反力の方向も噴射方向とおおむね一致していることが確認できた。

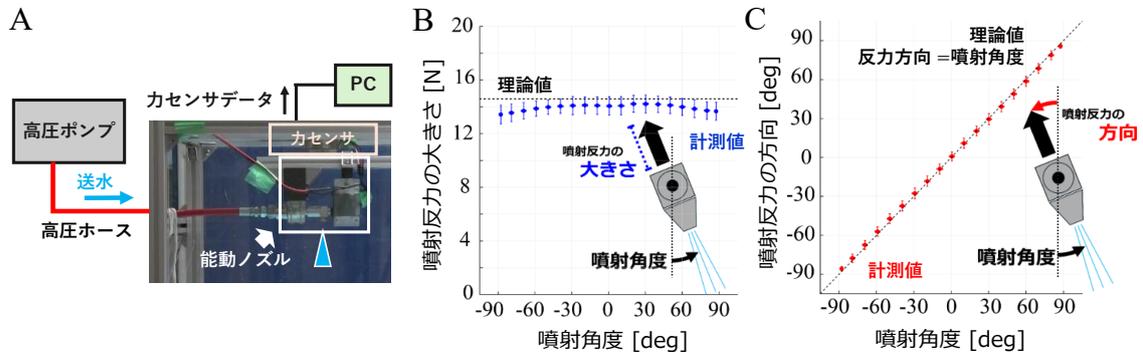


図4 実験機(A)を用いて計測した、ノズル噴射角度に対する噴射反力の大きさ(B)と方向(C)の関係

一方、本実験を行うことで新しい技術課題も発見された。具体的には、エンジンポンプを使って高圧を与えると、回転流路の回転抵抗が(1)-1の静圧時の場合に比べて劇的に増加する。この問題の主原因は、内部流れやエンジンポンプの圧力脈動に起因した振動により、回転流路の摺動部がかじったことと特定できており、今後これらの問題の解決を進める。

(2) 噴射方向の制御による、ドローンの位置・姿勢の安定化制御手法開発

ドローンの位置・姿勢を安定化可能な制御系の開発を目指して、剛体多リンク系で構成されたホース部を含んだ3次元動力学シミュレーションを開発した。また、4つの噴射ノズルが重心を中心とする正方形になるように配置された噴射ドローン(図1)を対象として、ノズルの噴射を内向きにして、浮上を安定化させるために地面に対して一定の合力を実現(H.Ando et. al., *IEEE RA-Letter*, 2018)させると、ドローンの2軸周りの姿勢が線形安定化できることを数式と数値計算で確認できた。

当初の計画では、噴射ドローンのプロトタイプを実現することを目指していた。しかし、(1)-1並びに(1)-2において複数の問題が発生し、その解決を優先した。今後はこれらを基盤にして噴射ドローンのプロトタイプ実現に取り組み、成果をまとめて学術論文として発表することを予定している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ambe Yuichi, Kamio Shuta, Yamauchi Yu, Konyo Masashi, Tadakuma Kenjiro, Maruyama Shigenao, Tadokoro Satoshi	4. 巻 109
2. 論文標題 Air-Jet Levitation of Continuum Robots: Stable Head Floating by Passive Thrust Vectoring for Enhancing Mobility	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent & Robotic Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10846-023-01964-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Maezawa Yukihiro, Ambe Yuichi, Yamauchi Yu, Konyo Masashi, Tadakuma Kenjiro, Tadokoro Satoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Translational Disturbance Rejection for Jet-Actuated Flying Continuum Robots on Mobile Bases	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 7456 ~ 7463
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2023.3318189	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 安部 祐一, 昆陽 雅司, 多田隈 建二郎, 田所 諭	4. 巻 40
2. 論文標題 流体噴射で浮上する柔軟索状ロボット	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 310 ~ 314
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.40.310	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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