

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630083

研究課題名(和文) 群飛行ロボットによる線状柔軟物の空中マニピュレーション技術

研究課題名(英文) Manipulation of a Deformable Linear Object by Multiple Aerial Robots

研究代表者

内山 勝 (Uchiyama, Masaru)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30125504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、複数の無人飛行ロボットによる線状柔軟物の空中マニピュレーション技術の獲得である。研究目的に向け、よりダイナミックな飛行を可能とする可変ピッチ搭載型クワッドロータ UAV の設計・開発と飛行制御則の構築および線状柔軟物の数値モデルに基づく障害物回避飛行戦略の構築を行った。線状柔軟物の数値モデルでは、端点を原点とするカテナリー曲線を導出し、このモデルを元に、拘束条件を伴う環境下での障害物回避飛行戦略を構築した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish a technology of aerial manipulation of a deformable linear object (DLO) by multiple unmanned aerial vehicles (UAVs). To this goal, we carried out mainly two tasks. The first task is to design and develop a quad rotor UAV with variable pitch propellers in order to obtain a capability of more dynamic flight compared to a conventional quad rotor UAV. The second task is to develop a flight strategy for obstacle avoidance of a DLO transferred by multi-UAVs. To achieve the obstacle avoidance, we derived a mathematical model of the deformable linear object, namely catenary curve whose origin is set on the one edge of the DLO on the assumption that the UAV flies in quasi-static conditions. Based on the derived model, we constructed the obstacle avoidance strategy under the conditions of some environmental constraints such as altitude limitation etc. The validation of the developed strategy is verified by flight experiments.

研究分野：ロボティクス

キーワード：飛行ロボット 線状柔軟物 カテナリー曲線 形状推定 障害物回避 可変ピッチプロペラ

### 1. 研究開始当初の背景

研究開発当初において、飛行ロボットの利用の多くは、飛行ロボットの類型を問わず、災害監視や自然調査等の上空からの情報収集を目的としている[文献 1, 2]. 群飛行ロボットによる組立作業があるが、ロボット同士は独立した飛行が可能であり、物理的な拘束は無い[文献 3]. また、昨今の無人航空機による輸送技術では、有人回転翼機の輸送技術の応用の域を越え、未だ発展途上の分野である[文献 4, 5]. そのような中、複数の飛行ロボットを用い、積極的に空中にてワイヤーケーブルのような線状柔軟物をマニピュレーションするという技術への挑戦は未だ前例がない. 空中にて群ロボット同士が柔軟物により拘束を伴う状況下において、柔軟物と環境へ仕事を行う作業は、墜落を伴う極めて困難な作業であり、これまで実現されたことはない.

### 2. 研究の目的

本研究では、線状柔軟物のマニピュレーションとして、狭隘空間にて線状柔軟物を含めた移動システムが障害物を回避することをタスク対象とし、線状柔軟物の形状変化のモデリングとそれに基づく飛行ロボットの軌道生成方法の提案と共に、将来のよりダイナミックな空中マニピュレーションを目指し、機動性に富む飛行ロボットとして、可変ピッチプロペラ搭載型クワッドロータ UAV の設計と飛行制御の提案を行う.

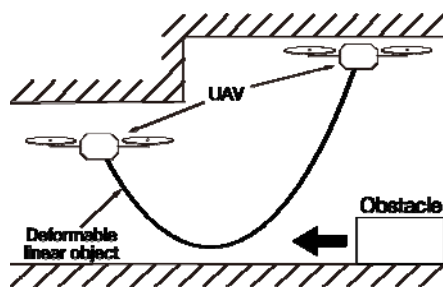


図1 狭隘空間での障害物回避

### 3. 研究の方法

本研究では、まず、線状柔軟物を取回すために十分な機動性と推力を有する飛行ロボットを設計・開発する. ここでは、反転飛行も可能とする可変ピッチプロペラ搭載型クワッドロータ UAV を作成する. これ

は、将来的に空中でより多彩なマニピュレーションを可能とすることを目指して開発する. 可変ピッチプロペラを搭載することで、推力方向を上下方向に変化させることが可能となるため、外乱に対して即応性が高くなると期待される. 高機動性の検証としては、プロペラ回転数と可変ピッチ調整サーボの合計 8 入力 の最適制御配分法を提案し、ハーフフリップと呼ばれる反転飛行の実現とその際のいくつかの制御法の比較検証を実施し、よりエネルギー効率の高い飛

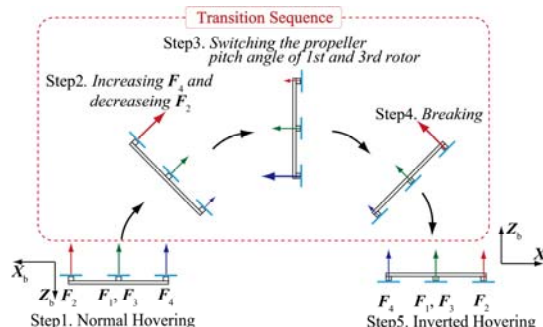


図2 ハーフフリップ飛行

行方法を検証する.

また、線状柔軟物を取り扱うために、その数理モデルの導出を行う. ここでは、飛行ロボットが準静的に飛行すると仮定し、実作業に適用できる線状柔軟物の数理モデルを導出する. その結果をもとに、障害物回避軌道生成とその検証実験を実施する.

### 4. 研究成果

可変ピッチプロペラ搭載型 UAV は、まず、可変ピッチプロペラの性能評価を実施した. その結果、ピッチプロペラ角度事の推力と消費エネルギーの関係を得ることができた. また、開発した機体パラメータをもとに、動力学シミュレータによって、ハーフフリップ飛行時の入力コマンドの分配方法の検証を実施した. 分配方法としては、①従来のプロペラ回転数のみを変化させた場合の制御 (プロペラ回転数制御)、②ピッチ角のみを変化させた場合 (ピッチ角制御)、③プロペラ回転数とピッチ角両方を変化させた場合 (分配制御) の 3 つの方法を検証した. シミュレーション検証と飛行実験の結果、応答性の早いピッチ角制御のみを用いた場合がハーフフリップ飛行実施時に、姿勢収束が早い結果を得ることができた.

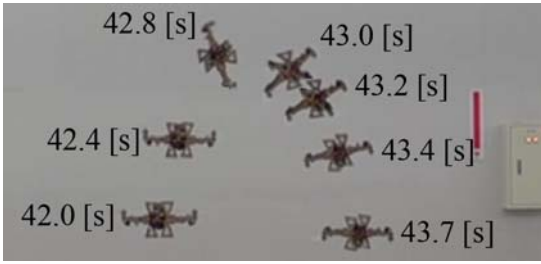


図3 ハーフフリップ実験

つぎに、線状柔軟物の数理モデル構築について述べる。本研究では、準静的な運動を伴う線状柔軟物の形状をカタナリー曲線を用いて推定するアルゴリズムを構築した。一般に、端点が静的に固定されたチェーンのような伸長のない線状柔軟物の形状は下式Cに示すカタナリー曲線で表現できる。

$$C: z = a \left( \cosh \frac{x}{a} - 1 \right)$$

本研究では、飛行ロボットの動作速度を準静的な運動をする動作範囲に限定し、両端が飛行ロボットによって固定された線状柔軟物の形状をカタナリー曲線によって表現することとした。その際、一般的なカタナリー曲線は線状柔軟物の最下点を原点とした数理モデルであるため、本研究のように最下点の位置が変動する問題に対して、適切ではない。そこで、本研究ではまずカタナリー曲線を一端を原点とする数理モデルとして下式C<sub>Base</sub>を導出した。

$$C_{Base}: z = a \left\{ \cosh \left( \frac{x}{a} + \tanh^{-1} \frac{v}{l} - \frac{s}{2a} \right) - \cosh \left( \tanh^{-1} \frac{v}{l} - \frac{s}{2a} \right) \right\}$$

また、カタナリー曲線を導出する際に必要となるカタナリー数は、理論的には端点に働く張力とその向きにより導出される。しかし、重量の比較的軽い線状柔軟物を対象とした場合、張力の正確な計測が困難となる。そこで、本研究では、カタナリー数の導出には関数  $f(t) = 0$  となる条件を満たすようなカタナリー数  $a$  を数値解析により導出した。

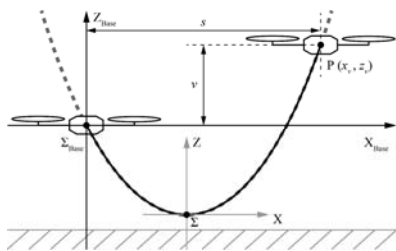


図4 カテナリー曲線の導出

$$f(t) = 2 \sinh \frac{st}{2} - \sqrt{l^2 - v^2} \cdot t \quad t = \frac{1}{a}$$

開発した形状推定アルゴリズムを用いた線状柔軟物の形状と実験による実形状を飛行試験を実施して比較検討を行った。実験結果より、提案するアルゴリズムによる形状推定が有効であるということが確認された。また、線状柔軟物の形状推定を用いて、障害物が近づいてきた場合に、飛行ロボットのみならず、線状柔軟物との接触を回避する飛行アルゴリズムを開発し、その飛行検証実験を実施した。

障害物回避飛行のためには、①水平飛行による障害物回避、②鉛直飛行による障害物回避の拘束条件を伴う2パターンの飛行方法により、線状柔軟物と障害物が干渉しない飛行軌道生成手法を提案した。検証実験より開発した飛行アルゴリズムの有用性が示された。

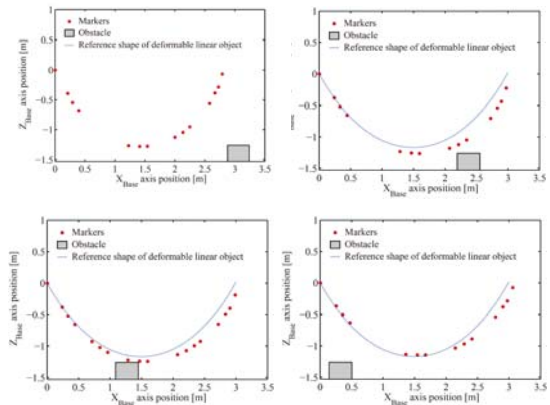
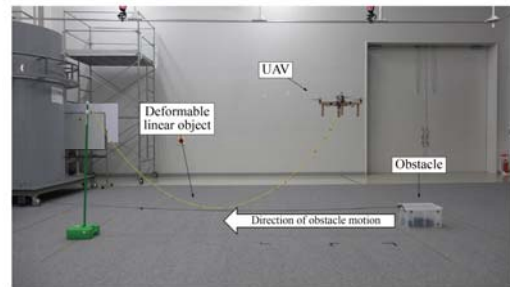


図5 障害物回避飛行実験

研究初期の目標であった可変ピッチプロペラ搭載型クワッドロータ UAV の特性を活かしたマニピュレーションまでは本研究期間では達しなかった。しかしながら、世界ではあまり例のない機体の設計と制御に成功したと同時に、UAV による線状柔軟物搬送時の障害物回避手法の提案と実験検証をすることができた。今後、これらを組み合わせ合わせた研究発展につながる一步となる重

要な成果が得られた。

<引用文献>

- ① <http://mec2.tm.chiba-u.jp/~nonami/research/mav/home.html> (千葉大・野波教授ら, 東日本大震災被災地の空撮)
- ② S. Higashino et. al., "Development and Flights of Ant-Plane UAVs for Aerial Filming and Geomagnetic Survey in Antarctica," Proc. of 8th Int. Conf. on Intelligent Unmanned Systems 2012, Oct. 2012.
- ③ Q. Lindsey et. al., "Construction with Quadrotor Teams," Autonomous Robots, vol. 33, pp. 323-336, 2012.
- ④ K. Kondak et. al., "Cooperative Autonomous Helicopters for Load Transportation and Environment Perception," Advances in Robotics Research, pp.299-310, 2009.
- ⑤ N. Michael et. al., "Cooperative Manipulation and Transportation with Aerial Robots," Autonomous Robots, vol. 30, no.1, pp.73-86, 2011.

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 久野温, 安孫子聡子, 大瀬戸篤司, 榎崎翔太, 國分祥平, 近野敦, 内山勝, 「形状推定に基づいた UAV による線状柔軟物のマニピュレーション」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2A2-F01, 京都勧業館「みやこめっせ」, 京都, 5月17日-19日, 2015.
- ② 榎崎翔太, 安孫子聡子, 久野温, 大瀬戸篤司, 姜欣, 内山勝, 「可変ピッチプロペラ搭載型 4 ロータ UAV の飛行シミュレーション」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2A2-A04, 富山国際会議場, 富山, 5月

25日-29日, 2014.

6. 研究組織

(1)研究代表者

内山 勝 (UCHIYAMA, Masaru)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30125504

(2)研究分担者

姜 欣 (JIANG, Xin)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 30451537

安孫子 聡子 (ABIKO, Satoko)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 40560660

辻田 哲平 (TSUJITA, Teppei)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 40554473