

令和 2 年 6 月 1 2 日現在

機関番号： 8 2 6 4 5

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2017 ~ 2019

課題番号： 1 7 K 1 4 6 3 4

研究課題名（和文）位置姿勢を独立して制御可能な冗長系無人航空機による高精度空中マニピュレーション

研究課題名（英文）Aerial manipulation by an omnidirectional unmanned aerial vehicle with a robot hand

研究代表者

大瀬戸 篤司（Osedo, Atsushi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号： 1 0 7 7 5 7 0 3

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、位置と姿勢を任意に選択可能な無人航空機とロボットハンドにより、無人機全体をマニピュレータ化し、広い作業範囲を持つ空中マニピュレータを実現することである。まず推進器が支持軸周りに回転可能な機構を持った無指向性無人機と、着陸脚を兼用した多指ロボットハンドを組み合わせた空中マニピュレータの機体を開発した。さらに空中マニピュレータに適用可能な、位置と姿勢を独立して選択可能な制御理論を構築した。そして、空中マニピュレータの作業動作を生成するアルゴリズムを開発し、飛行試験により理論が有効であることを実証した。本研究によって、作業範囲の広い空中マニピュレータシステムが実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地上マニピュレータは製造業で広く使われているが、構造的な制約で作業範囲に制限があり、天井などの高所作業には向かなかった。本研究では、空中で静止したまま自由な方向へ姿勢を回転できる無指向性無人航空機とロボットハンドを組み合わせ、構造的な制約を受けずに地上マニピュレータより広い範囲での作業が可能な空中マニピュレータを実現した。これにより航空機でしか到達できない高所での作業が可能になるなど、マニピュレータ技術の適用領域を拡大し、産業界にとっても有益な成果が得られた。また空中マニピュレータのための空気力と多体動力学を組み合わせた航空工学とロボット工学の横断的な制御理論の構築など、学術的成果も得られた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is the development of an aerial manipulator which is convened the omnidirectional UAV(unmanned aerial vehicle) and the robot hand. Since the developed manipulator can control both position and attitude independently, there is no limit to the work range and it is possible to work in all directions of the UAV in the air. First, the aerial manipulator hardware was developed. This manipulator is consisted of the omnidirectional UAV with the tilt mechanism in which the propulsion device can rotate around the support axis and the multi-fingered robot hand that also serves as the landing leg. Second, the control theory that can independently control position and attitude applicable to aerial manipulators was constructed. Lastly, an algorithm to generate the working motion of an aerial manipulator was developed, and the effectiveness of these theory was verified by flight experiments. In conclusion, an aerial manipulator system with wide work range was developed.

研究分野： ロボット工学

キーワード： 無人航空機 マニピュレータ 制御理論 飛行制御 最適化 産業用ロボット 動作生成

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ロボットマニピュレータは製造業分野で広く使われており、その技術は様々な分野に応用されている。一般的なマニピュレータは、ロボットアームにロボットハンドを取り付けた構造であるため、移動に制限があり、高所作業にはアームの長大化を招くといった問題がある。この問題に対して、無人航空機（以下、無人機）にロボットアームを取り付けた空中マニピュレータの研究が始まっているが、作業精度やロボットアームによる重量増加等に課題があった。さらに近年広く使われているマルチロータ型の無人機は、推進器の方向が全て同じ方向に固定されているため、6自由度（位置と姿勢）のうち4自由度（高度と姿勢）しか、独立して制御することができない劣駆動系であり、並進移動のためには機体を傾ける必要があるなど、精密なマニピュレーション作業には不向きな点があった。この課題解決に向けて、アクチュエータ等により推力方向を変化させることで、位置と姿勢を独立して制御可能な無指向性無人機の研究開発が行われており[1]、実施者を含む研究グループや海外の研究機関でも90度ピッチアップホバリングなど大規模な姿勢変化を伴うホバリング飛行に成功している[2]。

2. 研究の目的

本研究の目的は、位置と姿勢を任意に決定可能な無指向性無人機による空中マニピュレーションの実現である。無指向性無人機とロボットハンドの組み合わせにより、無人機全体をマニピュレータ化し、図1のような作業範囲に制限がないマニピュレータを実現することが目的である。これによってリンク位置や作業空間の制限を受けにくい、マニピュレータ作業の適用範囲を拡大し、空中マニピュレーションという発展分野を構築する。また、これまで無人機が使われてこなかった製造業分野においても、無人機が活躍できるようにすることで、日本の製造業の競争力強化への貢献を目指す。

この目的達成に向けて、本研究は主に以下の三つの研究要素で実施する。

(1) 空中マニピュレータシステムの開発

無指向性無人機とロボットハンドを組み合わせた空中マニピュレータと地上の計測・管制システムで構成された、空中マニピュレータシステムのハードウェア、ソフトのウェアを開発する。

(2) 空気力を考慮した冗長系無人航空機の制御理論の構築

空中マニピュレータは、制御すべき6自由度よりも制御入力が多い冗長系となる。さらに、航空機であるため空気力に大きな影響を受ける。そこで、空気力を考慮した冗長系無人機に適用可能な制御理論を構築する。

(3) 作業動作を空中マニピュレータの手先軌道に変換するアルゴリズムの構築

産業用マニピュレータと同様の作業を実現するため、作業動作から空中マニピュレータの位置・姿勢・速度を生成する手先軌道生成アルゴリズムを構築する。

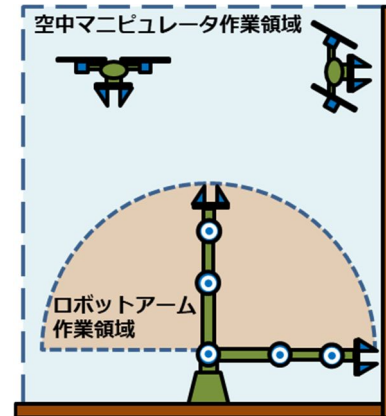


図1. 研究の目的

3. 研究の方法

(1) 空中マニピュレータシステムの開発

空中マニピュレータの構成要素である無指向性無人機、ロボットハンドは先行研究で様々な方式が実現されている。本研究では実現を目指す作業から設計要求を明確化し、設計要求に対して適切な方式を選択したうえで、ハードウェア開発を行う。またマニピュレーションには手先位置を正確に取得することが必要になる。本研究では、空中マニピュレータを屋内作業に適用することを想定し、飛行環境を屋内空間に限定することで、位置計測に3Dモーションキャプチャシステムを用いる地上管制システムを構築する。そして空中マニピュレータと地上システムを連携させた空中マニピュレータシステムの構築を行う。

(2) 空気力を考慮した冗長系無人航空機の制御理論の構築

地上マニピュレータの場合、発生する空気力の影響は小さいため無視される。しかし、地上マニピュレータと同様の手先精度・速度を空中マニピュレータで実現するためには、空気力やシステムの遅れは無視できない。そこで、機体に掛かる空気力と無人機を含むシステム全体をモデル化する。特に推進器は風洞試験により、空気流入量に対する正確なモデルを構築する。その上で多体動力学と空気力学の連成解析により、空気力を考慮した汎用的な空中マニピュレータの三次元運動方程式を導出する。そして導出された運動方程式から冗長系である特徴を活かし、最も効率が良い飛行状態で任意の手先位置を決定する制御理論を構築する。

(3) 作業動作を空中マニピュレータの手先軌道に変換するアルゴリズム

産業用マニピュレータと同様の作業を行うためには、位置と姿勢を制御するだけでなく、適切な手先状態で任意の力とトルクを生成しなければならない。そこで目的の作業動作を実現するために、空中マニピュレータの位置・姿勢・速度を生成する手先軌道生成アルゴリズムを構築する。そして作業中に発生する空気力、システムの遅れを考慮したうえで、空中マニピュレータ特有の問題（特異姿勢、推力限界など）を解決した適切な手先軌道に変換する。本アルゴリズムと

3(2)を組み合わせることで、作業のためのアクチュエータ出力を決定する。

4．研究成果

本研究の取り組みによって、無指向性無人機をベースとした機体の全周囲で作業が可能な空中マニピュレータのソフトウェアとハードウェアが開発された。さらに空中マニピュレータに適用可能な、空気力を考慮した冗長系無人機の制御理論と、作業動作を生成するアルゴリズムが構築された。これらの理論を実装し、飛行試験を通して理論の有効性を実証するとともに、空中マニピュレータによって地上マニピュレーション作業を代替することへの可能性を示した。本研究の成果の一部は既に学会で発表され、これまでに第 19 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優秀講演賞、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優秀講演賞を受賞した。以下に、得られた主な成果を示す。

(1)空中マニピュレータシステムの開発

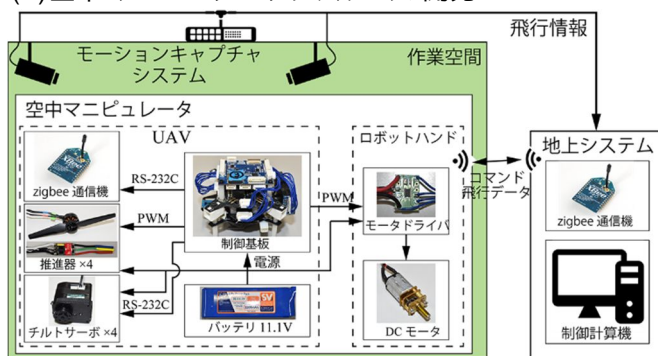


図 4-1. 空中マニピュレータシステムの構成

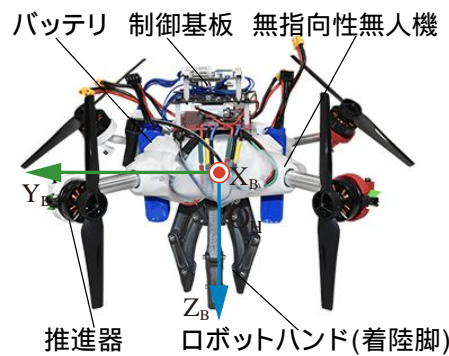


図 4-2. 開発した空中マニピュレータ

開発した空中マニピュレータのシステム構成を図 4-1 に示す。空中マニピュレータシステムは、作業を行う空中マニピュレータ本体、飛行状態（位置、速度など）を計測するモーションキャプチャシステム、地上の制御用計算機で構成される。まず空中マニピュレータに取り付けられたマーカーをモーションキャプチャで読みとり、位置情報等を取得する。次に取得した情報、飛行計画に基づいて地上の計算機によりマニピュレーション動作を生成する。そして無線通信により地上から空中マニピュレータに指令を送り、空中マニピュレータは指令に基づいて動作を実現する構成である。

空中マニピュレータを構成する無指向性無人機とロボットハンドについて以下に詳細を示す。

無指向性無人航空機

一般的なマルチロータは、推進器の推力の発生方向が全て同方向に固定されているため、独立で制御できるのは高度、姿勢の 4 自由度のみの劣駆動系である。劣駆動系の問題を解決するために、先行研究においては推力の方向を様々な方法（チルトロータ、可変ピッチプロペラなど）により偏向し、6 自由度で飛行を目指す取り組みが行われてきた。本研究では、機体の全周 360 度において精密な作業の実現を目指すこと、高速での動作を必要としないという理由からチルトロータ方式の無指向性無人機をベースとして開発した。

図 4-2 の上部が無指向性無人機である。チルト機構は、推進器を支持ロッドごとサーボで 1 軸回転させる機構になっている。ロッドの長手方向がサーボ回転軸に一致するため、サーボの回転角度がそのままチルト角度となる。チルト用のサーボには、ロボット用サーボ（KRS-3301、近藤科学株式会社）を用いることで、360 度の回転角と、高精度での位置決めを実現した。制御基板は、過去に JAXA で開発された小型無人航空機用マイコンボード MB03u を用いた。制御基板からのチルト角度指令は、ICS 変換器を通してシリアル通信にてサーボに送信される。推進器にはブラシレス DC モーター（Snail Racing Drone Propulsion System、DJI JAPAN 株式会社）と固定ピッチのプロペラ（直径:0.1524 [m]、ピッチ:0.0762 [m]）を用いており、PWM 信号によって制御される。結果としてロボットハンドを含めた機体重量は 0.89 [kg]、90 度ピッチアップ状態での推力重量比は 1.6 となった。

ロボットハンド

開発したロボットハンドは図 4-2 の下部の部分であり、寸法は図 4-3 のようになっている。以下のような要求を設定し開発した。1) . 着陸脚として使用可能、2) . 軽量、3) . 90 度ピッチアップ状態で壁面作業が可能、4) . 物体を把持したまま姿勢を大きく変動させても把持力を維持する。

これらの要求を満たすため、着陸時の安定性を

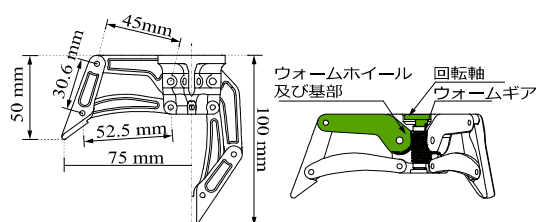


図 4-3. ロボットハンドの詳細

増すため三指のハンドとし、ハンドを開状態で着陸するようにした。さらに 90 度ピッチアップ状態でもプロペラが接触せず壁面作業が行えるように、手先位置は閉状態で機体から十分離れている。また常に十分な把持力を維持するため、開閉機構にはウォームギアを用いた。これによりサーボ一個で多指の開閉が可能となり、かつコンパクトな構造となった。ウォームホイールは軽量化のため、ハンド基部とウォームホイールを一体化している。ロボットハンドの指部品は 3D プリンター (Multi Jet Fusion、HP Inc.) によりポリアミド 12 を用いて製造することで、剛性を保ったまま軽量化した。ロボットハンドの開閉は DC ギャードモータを用いて行い、開閉角度はロボットハンドの駆動をモデル化し、モーターの駆動時間により調整する。

(2) 空中マニピュレータの制御理論の構築

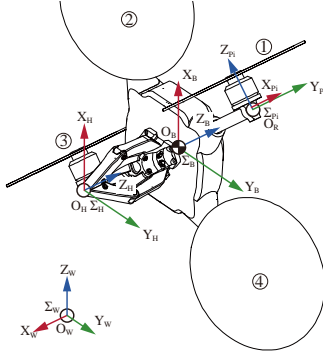


図 4-4. 座標系

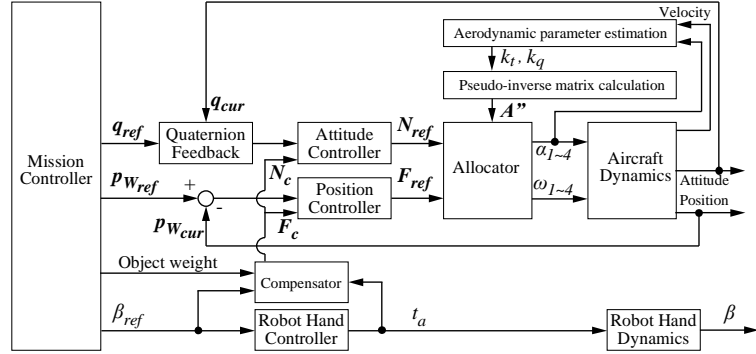


図 4-5 制御系

モデリング

空中マニピュレータの制御則を構築するため、空中マニピュレータの座標系を図 4-4 のように定め、(1) 式の運動方程式を導出した。

$$\begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix} = A\omega = \begin{bmatrix} -k_t s(\eta) s(\alpha_1) & k_t s(\eta) s(\alpha_2) & k_t s(\eta) s(\alpha_3) & -k_t s(\eta) s(\alpha_4) \\ -k_t s(\eta) s(\alpha_1) & -k_t s(\eta) s(\alpha_2) & k_t s(\eta) s(\alpha_3) & k_t s(\eta) s(\alpha_4) \\ k_t c(\alpha_1) & k_t c(\alpha_2) & k_t c(\alpha_3) & k_t c(\alpha_4) \\ k_q s(\eta) s(\alpha_1) - k_t l c(\alpha_1) & k_q s(\eta) s(\alpha_2) + k_t l c(\alpha_2) & -k_q s(\eta) s(\alpha_3) + k_t l c(\alpha_3) & -k_q s(\eta) s(\alpha_4) - k_t l c(\alpha_4) \\ k_q s(\eta) s(\alpha_1) - k_t l c(\alpha_1) & -k_q s(\eta) s(\alpha_2) - k_t l c(\alpha_2) & -k_q s(\eta) s(\alpha_3) + k_t l c(\alpha_3) & k_q s(\eta) s(\alpha_4) + k_t l c(\alpha_4) \\ -k_q c(\alpha_1) - l s(\alpha_1) & k_q c(\alpha_2) - l s(\alpha_2) & -k_q c(\alpha_3) - l s(\alpha_3) & k_q c(\alpha_4) - l s(\alpha_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 F は機体座標系の力、 M は機体座標系のトルク、 s は \sin 、 c は \cos 、 i は推進器番号、 k_t は推力係数、 k_q はトルク係数、 ω はプロペラ回転数、 α はチルト角、 η は機体座標系と支持ロッドのなす角、 l は機体重心から推進器まで長さである。推進器の発生させる推力とトルクはプロペラへの空気流入量（進行率）に影響を受ける非線形な空力パラメータであるため、実験により空気流入量に対する値を取得した。ここで、推力： $k_t \omega_i^2$ 、トルク： $k_q \omega_i^2$ として表される。

位置姿勢制御則の構築

空中マニピュレータは 8 制御入力（4 個の推力、4 個のチルト角度）を持つ冗長系であり、力とトルク（位置と姿勢）を独立して制御することができる。このため、8 制御入力に対して適切な割り当てを行う必要がある。本研究では、この問題に対して先行研究[3]を参考に、変数変換を通じて非線形の割り当て問題を線形問題に変換することで解決を行った。

構築した制御則を図 4-5 に示す。まず位置制御のための力 F_{ref} 、姿勢制御のためのトルク N_{ref} をフィードバック計算によって求める。次に、この制御力を得るための推力とチルト角を導出する。このとき、ある推進器が機体に対して生成する力は推進器の推力とチルト角から、縦軸と横軸の力（ $F_{vi} = k_t \omega_i^2 \cos \alpha_i$ 、 $F_{li} = k_t \omega_i^2 \sin \alpha_i$ ）に分解できる。これを 8×1 のベクトル U とする。さらに (1) 式の A をチルト角に依存しない 6×8 の行列 A' に変換し、 A' に対してムーア-ペンローズの擬似逆行列 A'' を求める。この A'' に F_{ref} と N_{ref} を乗算し、各推進器が生成する力 F_{vi} 、 F_{li} を得ることができる。そして、この力を実現するプロペラ回転数とチルト角を決定する。これ

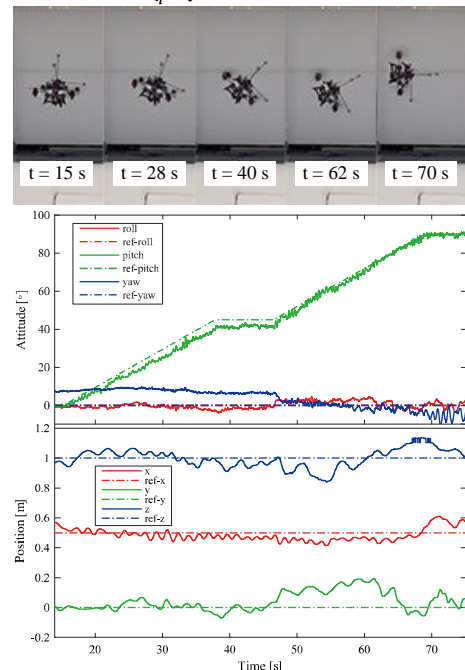


図 4-6. 試験の様子（上）、姿勢の変化（中）、位置変化（下）

によって最小ノルム解が得られ、低コストでの飛行が実現した。この時、式(1)の A の要素である k_v 、 k_a が空力パラメータであるため、機体が運動すると、推進器への空気流入量の変化により A が変化し、現在の空気状況下での制御量が正確に計算できなくなる問題があった。そこで本研究では、地上の計算機を用いて、制御周期毎に機体速度とチルト角から各推進器への空気流入量を推定し、 A を更新し続けることで、空気状況に適した制御力を計算するようにした。

この制御則を実装し、定点を維持した状態で機体の Y_B 軸の姿勢を 0-90 度までシームレスに変化させる試験を行った。結果として図 4-6 のように、構築した制御則で位置と姿勢を独立して制御させることに成功した。将来的には、複雑なプロペラ後流内での推進器の性能についてもモデル化し、制御に反映することで、より精密な制御が実現できると考えられる。

把持物の影響の補償

空中マニピュレータが物体を把持することで、機体重心が Z_B 軸負方向へ移動する。本研究では、把持物の有無による飛行性能変化について補償を行った。把持物の重量、把持物の有無によって補正項を決定し、(2) の位置姿勢制御則に追加で与えている。補正力 F_c 、補正トルク N_c は把持物の重量によって変化するため、今回は把持物の重量は既知として F_c 、 N_c を一意に決めた。また把持物の有無によって重心位置が急激に変化するため、常にロボットハンドの開閉角度 β を推定し、把持物の有無によって補正項の値を変化させている。将来的には、飛行中の消費電力から把持物の特性を推定することで、未知重量の物体の把持も可能になると考えられる。

(3) 空中マニピュレータの作業動作の生成アルゴリズムの構築

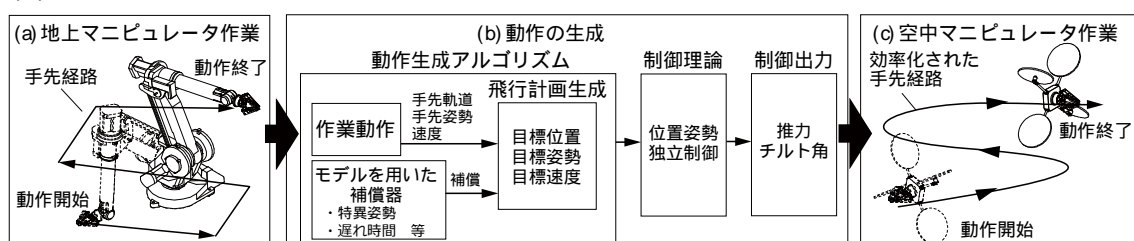


図 4-7. 動作生成アルゴリズムの概念

地上マニピュレータの作業動作を、空中マニピュレータの飛行計画へ変換するアルゴリズムを構築した。アルゴリズムの概念を図 4-7 に示す。このアルゴリズムは、地上マニピュレータの作業動作（手先の位置・姿勢・速度）を入力すると、空中マニピュレータシステムの問題（特異姿勢、遅れ時間、手先位置と機体重心の差異など）を解決し、無指向性無人機の時系列の飛行計画（目標位置、目標姿勢）として生成する。この飛行計画を空中マニピュレータに目標値として入力し、飛行中の誤差は 4(2)の制御則により吸収することで作業を実現する。

本アルゴリズムの生成した飛行計画を用いて作業動作の模擬を行い、生成された飛行計画の妥当性を評価した。実験中の飛行の様子、位置と姿勢の変化を図 4-8 に示す。今回の作業では、軌道に沿った飛行中にロボットハンドの Z_H 軸が常に一点を向く方ようにしている。図 4-8 から目標位置の追従を行いながら、手先が常に一点を向いていることが分かる。この結果から、空中マニピュレータの特性を考慮した作業動作を実現する飛行計画を生成することに成功したと考えられる。今後は、本アルゴリズムを高速回転やインパクト動作など複雑なものに拡張していく。

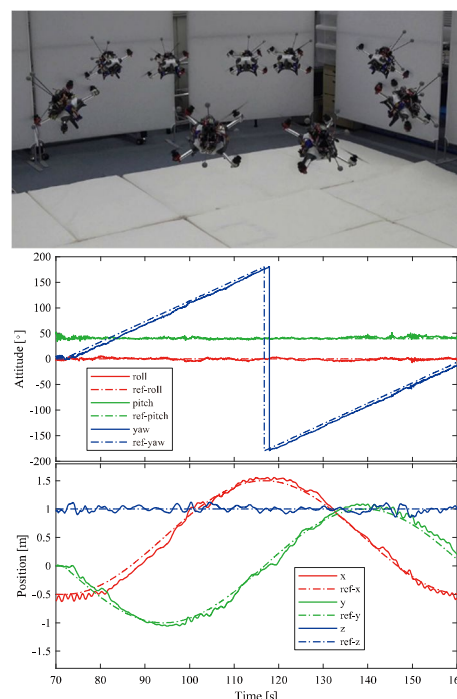


図 4-8. 実験中の連続写真（上）
姿勢の変化（中）位置変化（下）

参考文献

- [1] M. Ryll, et al., "First Flight Tests for a Quadrotor UAV with Tilting Propeller," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 295-302, 2013.
- [2] A. Oosedo, et al., "Large attitude change flight of a quad tilt rotor unmanned aerial vehicle," Advanced Robotics, Vol.30, Issue 5, pp. 326-337, 2016.
- [3] Mina Kamel, et al., "Voliro: An Omnidirectional Hexacopter With Tilttable Rotors" CoRR, vol. 1801.04581, 2018.

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1．発表者名 大瀬戸篤司
2．発表標題 空中マニピュレータの飛行制御
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
4．発表年 2019年

1．発表者名 大瀬戸篤司
2．発表標題 無人航空機の運航管理システムとその運航管理コンセプトのシミュレーション評価
3．学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4．発表年 2019年

1．発表者名 大瀬戸篤司
2．発表標題 鳥の生体模倣によるモーフィング翼の設計と開発
3．学会等名 第37回 日本ロボット学会 学術講演会
4．発表年 2019年

1．発表者名 大瀬戸篤司
2．発表標題 無人航空機運航管理システムに共有された運航情報を用いた多数の無人機の衝突回避経路の生成
3．学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2019
4．発表年 2019年

1．発表者名 大瀬戸篤司
2．発表標題 チルトプロペラ機構を持つマルチロータ無人航空機を用いた空中マニピュレータの開発
3．学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2019
4．発表年 2019年

1．発表者名 大瀬戸篤司
2．発表標題 空中マニピュレータのための着陸脚を兼用した作業用ロボットハンドの開発
3．学会等名 第19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 2018年

1．発表者名 大瀬戸篤司
2．発表標題 合成開口レーダーを搭載した二機の無人航空機による干渉計測実現のための協調飛行制御実験
3．学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4．発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>第19回公益社団法人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において優秀講演賞を受賞 第20回公益社団法人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において優秀講演賞を受賞</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
--	---------------------------	-----------------------	----