

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：14101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13929

研究課題名(和文)球体マルチロータヘリコプタのバイラテラル遠隔操作

研究課題名(英文)Bilateral Teleoperation of Spherical Multi-rotor Helicopter

研究代表者

矢代 大祐 (Yashiro, Daisuke)

三重大学・工学研究科・助教

研究者番号：60607323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：プロペラ推進システムのバイラテラル制御に関して以下の知見が得られた：1) プロペラ推進システムの動力学は、地面からの距離に大きく依存するため、地面効果のモデルを用いたゲインスケジューリング制御器が有効である。2) プロペラ推進力の大きさの制御にはプロペラ角速度のフィードバック制御が有効である。3) プロペラ推進力の方向の制御には、プロペラ回転軸のティルト角のフィードバック制御が有効である。

研究成果の概要(英文)：Following knowledge related to bilateral control of a propeller-driven system is obtained: 1) Because dynamics of a propeller-driven system depends on a distance from a ground, a gain-scheduling controller which utilizes a model of ground effect is useful. 2) Feedback control of a propeller's angle velocity is effective to control an amplitude of a propeller's thrust force. 3) Feedback control of a tilt angle of a propeller's rotating shaft is effective to control a direction of a propeller's thrust force.

研究分野：モーションコントロール

キーワード：動力学 運動学 制御理論 メカトロニクス ロボティクス 制御システム 自動制御 電気機器

## 1. 研究開始当初の背景

近年、小型無人ヘリコプタに注目が集まっている。その中でも、マルチロータヘリコプタは、近年のモータ性能、センサシステムの性能向上によって現実的になったシステムであり、運動性能が高い、機構が単純である、機体重量に対して可搬能力が大きいなどの利点がある。そのため、マルチロータヘリコプタは空撮、非接触センサを用いた調査、荷物の運搬、トンネル・河川ダムなどのインフラの維持管理、土砂災害・火山火災・トンネル崩壊時の災害対応への活躍が期待されている。しかしながら、狭い空間では壁や障害物との接触により機体が墜落する可能性が高い。そこで、ヘリコプタをプロテクトフレームで囲うことで、安全な接触を可能にした研究がある。しかしながら、周囲環境への接触力を制御できないため、なぞり動作や複数台のヘリコプタによる協調把持・操り動作のような高度なタスクには対応できない。

この課題に対してヘリコプタに加わる環境からの外力を遠隔地にいる操作者にフィードバックするバイラテラル遠隔操作の研究が行われている。例えば文献(“Generalized Bilateral MIMO Control by States Convergence with time delay and application for the teleoperation of a 2-DOF helicopter”, IEEE ICRA, 2010)では、マスタシステムの姿勢角と、ヘリコプタの姿勢角を対応づけたバイラテラル制御を行っているが、力制御を用いないバイラテラル制御を行っているため、力応答が悪い。それに対し、文献(“Bilateral teleoperation control of a quadrotor system with a haptic device: Experimental studies”, IEEE ICRA, 2014)や文献(“A force-based bilateral teleoperation framework for aerial robots in contact with the environment”, IEEE ICRA, 2015)では、力制御を用いたバイラテラル制御を行っているが、モータへの入力電圧とプロペラの推力が比例するとみなして、制御器設計しており、プロペラの過渡特性を無視しているため、推力制御性能が低い。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記の背景を踏まえヘリコプタを用いたバイラテラル制御系の性能を上げるために、課題A～課題Cに取り組んだ。

### 課題A

2次元空間上で任意の推力を発揮できる2自由度マルチロータヘリコプタの開発

### 課題B

3次元空間上で任意の推力を発揮できる4自由度球体マルチロータヘリコプタの開発

### 課題C

多自由度マニピュレータによる球体マルチロータヘリコプタのバイラテラル制御

## 3. 研究の方法

### 課題A

2次元空間においてXZ軸方向に任意の推力

を発揮できるマルチロータヘリコプタを開発する。機体にはZ軸方向を向いた2枚のロータを搭載する。推力の大きさは、それぞれのロータの回転速度の2乗の和に比例する。一方で、機体の重心周りの回転モーメントはそれぞれのロータの回転速度の2乗の差に比例する。回転モーメントによって機体の姿勢を制御することで、XZ平面上の任意の方向に推力を出すことができる。なお、機体の速度・姿勢・推力は加速度センサ、ジャイロセンサ、力センサなどで計測する。ロータが発生する推力は回転速度の2乗に比例する。そのため、片側のロータの回転速度が、もう一方のロータの回転速度より大きいと、ヘリコプタの重心周りに反時計回りの回転モーメントが発生し、姿勢が変化する。ヘリコプタの発生する推力(プロテクトフレームが発生する推力)は、2つのロータが発生する推力と重力の合成になるため、姿勢が左に傾いている時には、左方向に推力が発生する。

### 課題B

3次元空間においてXYZ軸方向に任意の推力を発揮できるマルチロータヘリコプタを開発する。機体にはZ軸方向を向いた4枚のロータを搭載する。推力の大きさは、4枚のロータの回転速度の2乗の和により制御する。一方で推力の向きは機体の姿勢によって決まる。また、機体のピッチ角とヨー角は4枚のロータの回転速度の2乗の差によって制御する。機体の速度・姿勢・推力は、課題Aと同様に加速度センサ、ジャイロセンサ、力センサなどで計測する。

### 課題C

研究代表者が現有する多自由度マニピュレータをマスタロボット、課題Bで開発したマルチロータヘリコプタをスレーブロボットに用いたバイラテラル制御系を構築する。マスタロボットには、3次元空間上で位置制御と力制御ができるパラレルメカニズムを用いる。スレーブロボットには課題Bで開発した3次元空間上で任意の推力を発揮できるマルチロータヘリコプタを用いる。動作としては、マスタロボットを操作すると、ロボットの原点位置からの変位に比例した速度をスレーブロボットが発生する。また、スレーブロボットが未知物体と接触すると、その時の接触力と同じ力をマスタロボットが発生する。

## 4. 研究成果

### 課題A

2次元空間においてXZ軸方向に任意の推力を発揮できるティルトロータヘリコプタを開発し、接触力制御の実験を行った(図1)。機体にはZ軸方向を向いた2枚のロータ、片方のロータのティルト角を制御するサーボモータ、力センサが取り付けられている。ヘリコプタの重心を機体の中心付近に設定するため、ティルト角制御用のサーボモータは機体

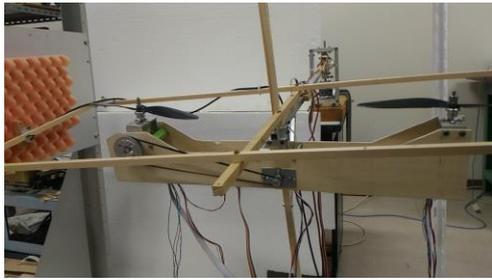


図1 開発したティルトロータ

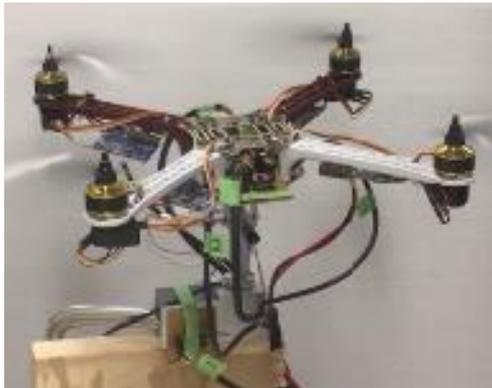


図2 開発したクワッドロータ

の中心に配置し、ベルトを介して回転を伝えた。実験結果より推進力方向の制御に、プロペラ回転軸のティルト角の制御が有効であることが示された。ヘリコプタ全体の姿勢を変化させることで推進力方向を制御する従来手法に比べ、推進力方向の制御に必要なモーメントが少ないためと考えられる。

### 課題B

3次元空間においてXYZ軸方向に任意の推力を発揮できるマルチロータヘリコプタを開発し、力制御の実験を行った(図2)。機体にはZ軸方向を向いた4枚のロータ、力センサが取り付けられている。実験結果より推進力の大きさの制御には、プロペラ角速度のフィードバック制御が有効であることが示された。プロペラ角速度を計測しない従来のフィードフォワード制御に比べ、プロペラ回転軸周りの外乱トルクに対する外乱抑圧特性が高いためと考えられる。外乱トルクとしては、ロータの角速度に依存して生じる逆起電力や逆トルクが挙げられる。

### 課題C

マニピュレータをマスターロボット、ヘリコプタをスレーブロボットに用いたバイラテラル制御系を構築した。動作としては、マスターロボットを人が操作すると、スレーブロボットがマスターロボットに位置追従する。また、スレーブロボットが未知物体と接触すると、その時の接触力と同じ力をマスターロボットが発生し、操作者が接触物体の硬さを知覚できる。図3に接触動作時の様子、図4に自由

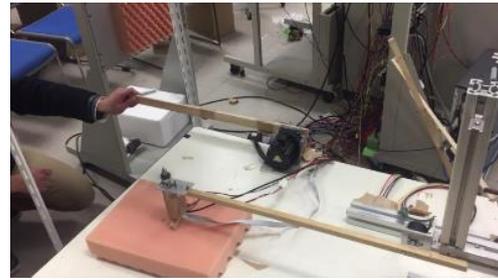


図3 バイラテラル制御(接触動作)

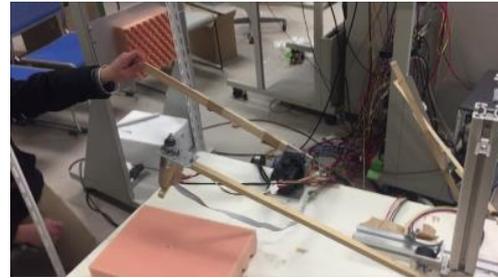


図4 バイラテラル制御(自由動作)

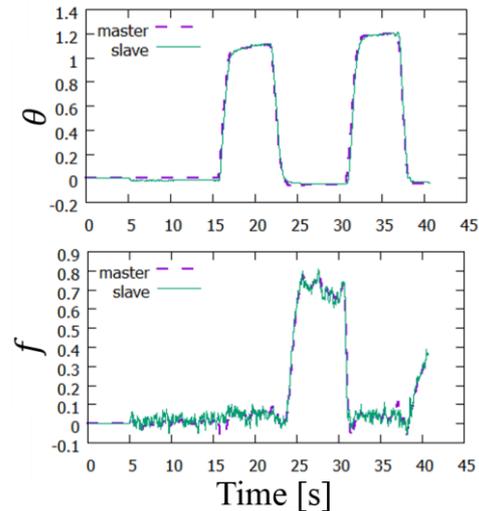


図5 位置応答と力応答

動作時の様子を示す。図5に実験結果を示す。 $\theta$ は位置応答を示し、 $\theta$ の破線と実線が一致していることは、マスターとスレーブの位置が一致していることを意味する。また、 $f$ は力応答を示し、 $f$ の破線と実線が一致していることは、操作者がマスターに加えた力と接触物体がスレーブに加えた力が一致していることを意味する。

一般的に、ヘリコプタのロータが発生する揚力はロータ角速度の2乗に比例するとされている。研究者代表者らは実験の過程で、ロータ推力とロータ角速度を結びつける比例定数がロータと接触物体の距離の関数になっていることに気がついた。そこで、対物距離を引数としたゲインスケジューリング制御器を設計したところ、制御性能に著しい改善が見られた。

## 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)

[雑誌論文] (計 1 件)

山際創太, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "地面効果を考慮したプロペラ推進システムのバイラテラル制御", 電気学会論文誌産業応用部門誌, Vol. 138-D, No. 7, Jul. 2018, 査読有(掲載決定)

[学会発表] (計 10 件)

1. 林佑樹, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "ロータ角加速度制御に基づくクワッドロータの接触力制御", 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会演論文集, 北九州, May. 2nd-5th, 2018(発表決定)

2. Yosuke Tsuchiya, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai and Satoshi Komada, "Contact Force Control of Tilt-Rotor Helicopter in 2-dimensional Space", Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology, Lyon, Feb. 19th-22th, 2018

3. 山際創太, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "地面効果を考慮したプロペラ推進システムのバイラテラル制御", 平成 29 年電気学会産業応用部門大会論文集, 函館, Aug. 29th, 2017

4. 山際創太, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "地面効果を考慮したプロペラ推進システムのバイラテラル制御", 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会演論文集, 郡山, May. 10th-13th, 2017

5. Yosuke Tsuchiya, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Contact Force Control of Dual-Rotor Helicopter with Protect Frame", Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology, Tronto, Mar. 22nd-25th, 2017

6. Daisuke Yashiro, Masato Adachi, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Sliding Mode Control Based Force Control of Single-rotor Helicopter", Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Firenze, Oct. 23-26, 2016

7. 土屋洋輔, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "デュアルロータヘリコプタの接触力制御", 電気学会メカトロニクス制御研究会資料, 東京, Vol. MEC-16, No. 2-17, pp. 79-84, Sep. 3rd, 2016

8. 土屋洋輔, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "デュアルロータヘリコプタの力制御", 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会演論文集, 横浜, Jun. 9th, 2016

9. Daisuke Yashiro, "Bilateral Control of Single-Rotor Helicopter", Proceedings of 2nd IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, Tokyo, Mar. 7th-8th, 2016

10. Masato Adachi, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Feedback

Linearization Based Force Controller for 1-DOF Electric Helicopter", Proceedings of 2nd IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, Tokyo, Mar. 7th-8th, 2016

[図書] (計 1 件)

野波健蔵, 赤坂剛史, 矢代大祐, 他, "飛躍するドローン", エヌ・ティー・エス, Jan. 2016, 380(p93-101)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

ホームページ等

<http://www.cc.mie-u.ac.jp/~yashiro/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

矢代 大祐 (YASHIRO, Daisuke)

三重大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号 : 60607323

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし