

令和 4 年 5 月 4 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04327

研究課題名(和文) ティルトロータ機を用いた力覚フィードバックを伴うマスタ・スレーブ型遠隔操作

研究課題名(英文) Tilt-rotor Based Master-Slave Telemanipulation with Force Feedback

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：「マスタロボット(多関節マニピュレータ)の変位にスレーブロボット(マルチロータ：ロータを複数持つ回転翼機)の速度が比例し、かつ作業対象物からスレーブに加えられる反作用力とマスタに人が加える作用力が一致するマスタ・スレーブ型遠隔操作」を実現するため、マルチロータと多関節マニピュレータに加わる接触力を高精度制御する技術を研究開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

労働中の高所からの墜落・転落による死亡災害や死傷災害の防止策が望まれている。防止策として、外壁の窓ふき、鉄骨造の接合部のボルト固定、等の高所作業をマルチロータの遠隔操作によって実現することが挙げられる。しかしながら、現状の遠隔操作技術では、操作時にマルチロータが作業対象物に対して過度な力を加える結果、作業対象物が破損したり、機体が激しく振動したりしてしまう。今回の研究成果はこれらの問題を解決するための基盤技術になり得る。

研究成果の概要(英文)： We have developed techniques to control a contact force externally applied to a multi-rotor helicopter and a multi-degree-of-freedom robot arm. These techniques will be utilized to achieve a bilateral teleoperation between a robot arm and a helicopter. That is, a slave robot (helicopter) tracks a master robot (robot arm), and a contact force externally applied to the slave robot is fed back to the human operator that manipulates the master robot.

研究分野：電力工学関連、制御およびシステム工学関連

キーワード：モーションコントロール

## 1. 研究開始当初の背景

平成 29 年の労働中の高所からの墜落・転落による死亡災害は 258 件、死傷災害は 20374 件となっており（厚生労働省労働基準局）早急な対応が望まれる。災害防止案として、外壁の窓ふき、鉄骨造の接合部のボルト固定、等の高所作業をマルチロータ（ロータを複数持つ回転翼機）の遠隔操作によって実現することが挙げられる。

マルチロータは、高い運動性能、単純な機構、高い推力重量比などの利点があるため、空撮、農薬散布、搬送、等での活用が広まっている。しかしながら、トンネルの打音検診、外壁の塗装、鉄骨造の接合部のボルト固定、等の高所作業をマルチロータの遠隔操作で実現することはまだできていない。これは、遠隔操作時にマルチロータが作業対象物に対して過度な力を加える結果、作業対象物が破損したり、機体が激しく振動したりするためである。マルチロータに接触力制御が可能なロボットアームを取り付ける方法も提案されているが、構造が複雑化し、最大接触力も小さいため、用途が限られる。

## 2. 研究の目的

接触力の大きい作業を行うためにはマルチロータ自体の高精度な力制御が重要と言える。そこで「マスタロボット（多関節マニピュレータ）の変位にスレーブロボット（マルチロータ）の速度が比例し、かつ作業対象物からスレーブに加えられる反作用力とマスタに人が加える作用力が一致するマスタ・スレーブ型遠隔操作の実現」を本研究課題の目的とした。

## 3. 研究の方法

2 で提起した目的を達成するためには、課題 A と課題 B を解決する必要があり、以下の対立仮説を検証することでこれらの課題を解決できると考えた：

### **[課題 A] マルチロータの接触力制御**

#### **対立仮説 A-1: ロータ回転速度を制御に用いてはどうか？**

既存のマルチロータの大半は、ロータの回転速度を制御に用いていない。しかし、ロータの回転速度を制御に用いることでロータ回転軸周りに加わる外乱に強くなると予想される。

#### **対立仮説 A-2: 可変ゲイン制御器を用いてはどうか？**

マルチロータは、対気速度（マルチロータと風の相対速度）や対地距離（マルチロータと地面の距離）などの周辺環境の変化に応じて、動特性が変化する。研究代表者は既に、対地距離を考慮した可変ゲイン制御器を設計し、シングルロータヘリコプタに適用することで、接触力制御性能の向上に成功している（電気学会論文誌 D, Apr. 2018）。本研究ではこの手法をマルチロータの制御に拡張する。

### **[課題 B] 多関節マニピュレータの接触力制御**

#### **対立仮説 B-1: モータ側と負荷側の間に低剛性弾性体を挿入してはどうか？**

一般的に、減速機付モータは摩擦の影響で減速機無モータに比べてトルク制御性能が低い。この問題に対し、減速機付モータのモータ側と負荷側の間にあえて低剛性弾性体を挿入すれば（低剛性能動関節と呼ぶ）、摩擦の影響を受けにくくなると予想している。また、弾性体のねじり角度を計測することでトルクセンサを使わずにトルク計測が可能になる。

#### **対立仮説 B-2: 多関節マニピュレータに低剛性能動関節を用いてはどうか？**

一般的な多関節マニピュレータは減速機付モータを関節部に用いているが、摩擦の影響で接触力制御性能が悪い。この問題に対し、対立仮説 B-1 で提案した低剛性能動関節を関節部に用いることで、接触力制御性能が向上する可能性がある。結果として、マルチロータが作業対象物に加える接触力をマスタ操作者が鮮明に知覚できるようになると予想している。

## 4. 研究成果

3 で説明した対立仮説 A-1、A-2、B-1、B-2 の検証結果を以下に示す：

### **[課題 A] マルチロータの接触力制御**

#### **対立仮説 A-1: ロータ回転速度を制御に用いてはどうか？**

図 1 に検証に用いたクワッドロータ機を示す。プロペラ角速度を計測するために、角度エンコーダをプロペラ回転軸に取り付けた。接触環境にはスポンジを使用し、環境側に 6 軸力センサを取り付けることで接触力を計測した。図 2 に接触力制御の結果を示す。太実線が接触力指令値、太点線がロータ角速度を用いない場合（従来手法）の接触力応答値、細実線がロータ角速度を用いる場合（提案手法）の接触力応答値、に対応する。提案手法は立ち上がり時間を長くすることなくオーバーシュートを減らすことができている。よって、ロータ角速度情報を制御器にフィードバックすることの有効性が示された。

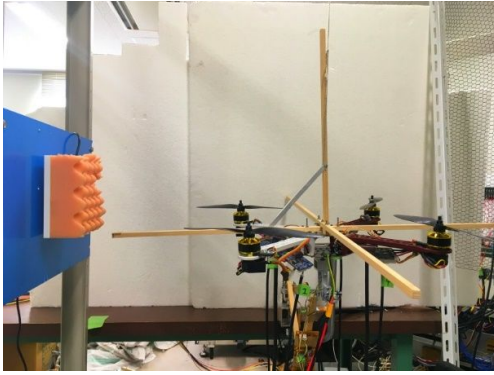


図 1. クワッドロータ機

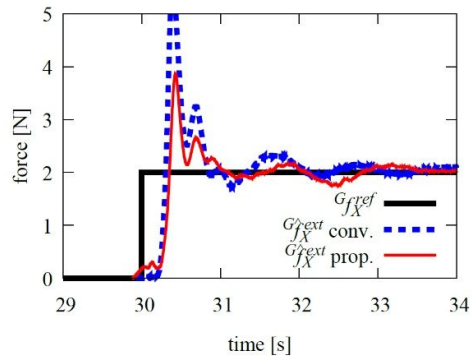


図 2. 接触力制御の実験結果

### 対立仮説 A-2: 可変ゲイン制御器を用いてはどうか?

図 3 にプロペラ駆動系の風洞試験の様子を示す。プロペラに対して層流の向かい風をあてた。

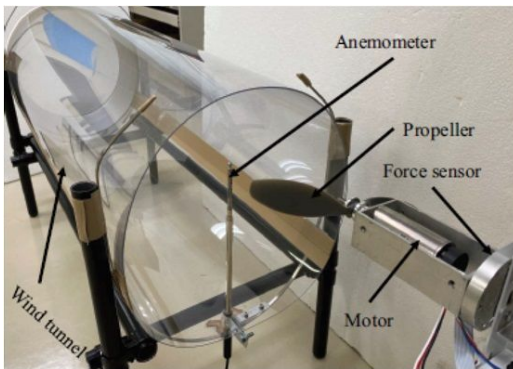


図 3. プロペラ駆動系の風洞試験

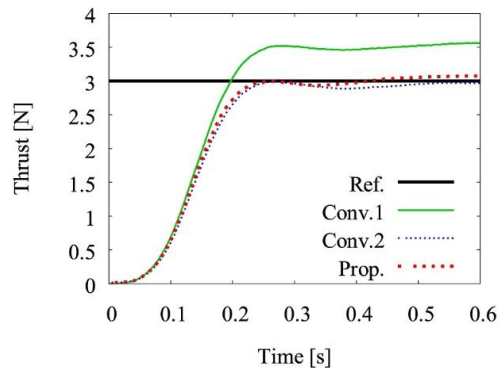


図 4. 対気速度 2 m/s の時の推力応答

対気速度とプロペラ角速度の計測値に応じて推力係数のモデルを変更するゲインスケジュールド推力制御器を提案した。図 4 に推力制御の実験結果を示す。太実線、太点線、細実線、細点線はそれぞれ推力指令値、推力応答値（提案手法）、推力応答値（従来手法 1）、推力応答値（従来手法 2）に対応する。従来手法 1 では推力係数は一定値とした。従来手法 2 では推力係数を進行率の関数とした。提案手法を用いた場合、対気速度が変化しても定常偏差が少なかった。よって、可変ゲイン制御器を用いることの有効性が示された。

### [課題 B] 多関節マニピュレータの接触力制御

#### 対立仮説 B-1: モータ側と負荷側の間に低剛性弾性体を挿入してはどうか?

図 5 に検証に用いた低剛性能動関節を示す。モータ出力軸と減速機出力軸の両方に角度エンコーダを取り付けている。軸間のカップリングの剛性値と負荷トルク制御性能の関係を検証した。図 6 に負荷トルク制御の実験結果を示す。剛性値が低い方が指令値に対する応答値の追従性が高い傾向がみられた。カップリングの剛性値が高い場合、軸間のバックラッシュのモデル化誤差の影響を受けやすいことが主要因である。

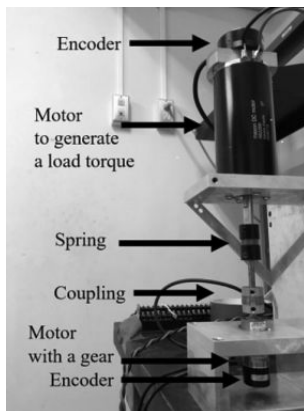


図 5. 低剛性能動関節

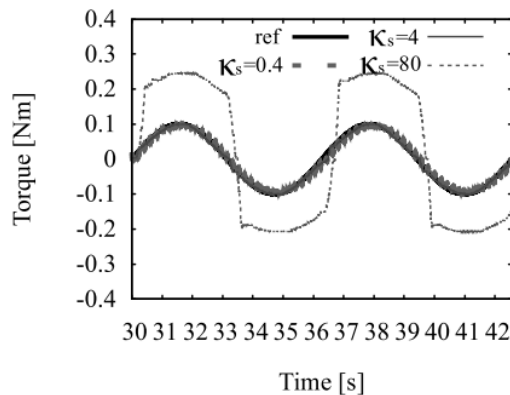


図 6. 負荷トルク制御の実験結果

### 対立仮説 B-2: 多関節マニピュレータに低剛性能動関節を用いてはどうか?

図 7 に低剛性能動関節を有する多関節マニピュレータを示す。モータ出力軸と減速機出力軸の両方に角度エンコーダを取り付けている。図 8 に手先位置制御の実験結果を示す。低剛性カップリングに起因する機械振動が予想されたが、軸間のねじれトルクを適切にフィードバックすることで振動を抑えつつ高速高精度な位置決めができた。今後、接触力制御の検証を進める。

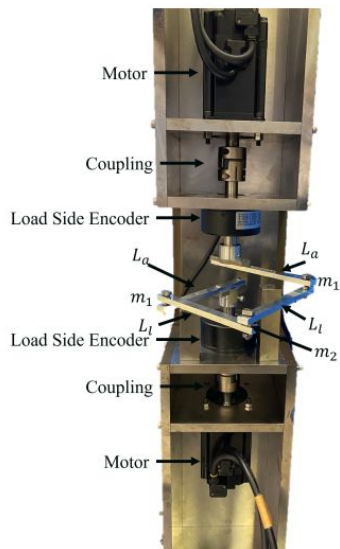


図 7. 多関節マニピュレータ

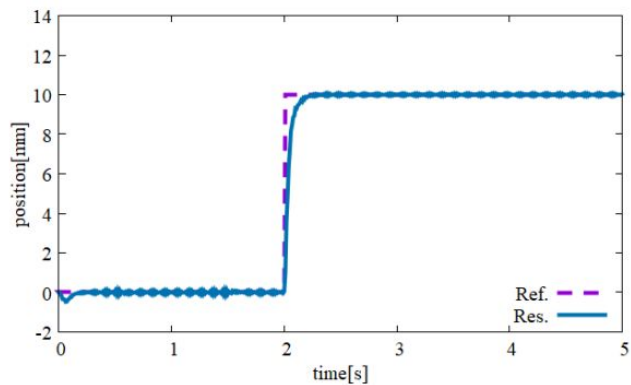


図 8. 手先位置制御の実験結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 Hayashi Yuki, Yashiro Daisuke, Yubai Kazuhiro, Komada Satoshi	4. 巻 140
2. 論文標題 Contact Force Control of Quadrotor using Rotor Angular Velocity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 662 ~ 672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.140.662	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 Yashiro Daisuke, Yubai Kazuhiro, Komada Satoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Design of Adaptive Controller using Object Position for Bilateral Control System with Communication Delay	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 149 ~ 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.9.149	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 Nakamura Toshiya, Yashiro Daisuke, Yubai Kazuhiro, Komada Satoshi	4. 巻 140
2. 論文標題 Torque Control of a Series Elastic Actuator Using an Ultrasonic Motor with Angular-Velocity Saturation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 378 ~ 386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.140.378	査読の有無 無
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 Kondo Daichi, Yashiro Daisuke, Yubai Kazuhiro, Komada Satoshi	4. 巻 141
2. 論文標題 Load Torque Control of an Electromagnetic Motor with a Reduction Gear and Motor/Load-side Encoders Using a Spring Model including a Dead Zone	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 700 ~ 708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.141.700	査読の有無 無
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 Nishii Yuki, Yashiro Daisuke, Yubai Kazuhiro, Komada Satoshi	4. 巻 142
2. 論文標題 Design of a Contact-force Controller Including Airframe's Velocity and Acceleration Feedback Controllers for One-degree-of-freedom Propeller-Driven Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 76 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.76	査読の有無 無
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16件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Daisuke Yashiro
2. 発表標題 Force Control of Propeller-Driven Systems Using Rotor Angular Velocity
3. 学会等名 Proceedings of 7th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki kato, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Design of Gain Scheduled Rotor Thrust Controller Using Airspeed and Rotor Angular Velocity
3. 学会等名 Proceedings of the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daichi Kondo, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Load Torque Control of Electromagnetic Motor with Reduction Gear and Motor/Load-Side Encoders
3. 学会等名 Proceedings of the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Nishii, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Design of a Contact Force Controller Including State Feedback Controllers for Propeller-Driven Systems
3. 学会等名 Proceedings of the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaya Inukai, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Design of Adaptive Controller for Bilateral Control Systems Including a Propeller Driven System
3. 学会等名 Proceedings of the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Nishii, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Estimation and Compensation of Airframe's Disturbance Force using Rotor Angular Velocity for Propeller-driven Systems
3. 学会等名 Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daichi Kondo, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Load Torque Control of an Electromagnetic Motor with a Reduction Gear, a Spring, and Motor/Load-Side Encoders
3. 学会等名 Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Kato, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Design of a Gain-scheduled Rotor Thrust Controller Using Wind Velocity and Rotor Angular Velocity
3. 学会等名 Proceedings of the 7th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiya Nakamura, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Design of Torque Controller for Ultrasonic Motor with Angular-Velocity Saturation
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Hayashi, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, Satoshi Komada
2. 発表標題 Design of Contact Force Controller for Quadrotor with Rotor Angular Encoder
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Nishii, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, Satoshi Komada
2. 発表標題 System identification of Thrust Control System using Tilt-rotor Aircraft with Propeller Angular Encoder
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Masaya Inukai, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Design of Feedforward Controller using Airframe's Velocity for Contact Force Control of Propeller Driven System
3. 学会等名 Proceedings of the IEEE 17th International Workshop on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Kato, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Performance Evaluation of a Gain-scheduled Propeller Thrust Controller Using Wind Velocity and Rotor Angular Velocity Under Fluctuating Wind
3. 学会等名 Proceedings of the IEEE 17th International Workshop on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsubasa Takahashi, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Position Control Using Link Bending Moment for a 6-Degree-Of-Freedom Parallel Robot
3. 学会等名 Proceedings of the 8th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion, Control and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Shinzaki, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Design of Disturbance Observer Including Delay Compensator for Full Closed Control System with Camera and Accelerometer
3. 学会等名 Proceedings of the 8th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion, Control and Optimization, Saitama (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daichi Kondo, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada
2. 発表標題 Optimization of Spring Constant of Load Torque Control System Using an Electromagnetic Motor with a Reduction Gear and Motor/Load-Side Encoders
3. 学会等名 Proceedings of the 8th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion, Control and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻モーションコントロール分野WEBページ  <a href="https://www.cc.mie-u.ac.jp/~yashiro/">https://www.cc.mie-u.ac.jp/~yashiro/</a></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	駒田 諭  (Komada Satoshi)  (10215387)	三重大学・工学研究科・教授    (14101)	

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