

## [研究助成 (A)]

## テイルトロータヘリコプタの接触力制御に関する研究

## Research on Contact Force Control of Tilt-rotor Helicopters

2191034



研究代表者

三重大学大学院 工学研究科

助教

矢代大祐

## [研究の目的]

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），早急な対策が望まれる。本研究ではその対策として，トンネルの打音検診，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ヘリコプタ（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を目指している。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，機体や作業対象物が破損したり，機体が激しく振動したりする課題が残っている。

そこで本研究では 3 次元空間上でのマルチロータの高精度な接触力制御を研究目的とし，課題 1～3 に取り組んだ：

### 課題 1：ロータ角速度情報を制御器にフィードバックしてはどうか？

既存のマルチロータの大半は，ロータ角速度を制御器にフィードバックしていない。しかし，ロータ角速度情報を制御器にフィードバックすることで，風などのロータ回転軸周りに加わる外乱に強くなるのではないかと？

### 課題 2：可変ゲイン制御器を用いてはどうか？

マルチロータは，対気速度や地面効果により，周辺環境の変化に応じて動特性が大きく変わることが知られている。周辺環境の変化に応じて制御器を変えれば，固定ゲイン制御器を用いる従来のマルチロータよりも接触力制御性能が高くなるのではないかと？

### 課題 3：テイルトロータ機を用いてはどうか？

テイルト角をリアルタイム調整することができるマルチロータ機をテイルトロータ機と呼ぶ。テイルトロータを用いることで接触力制御性能が高くなるのではないかと？例えば，テイルト角が固定された通常のマルチロータ機は，横方向に接触力を発生させるために機体を傾ける必要があるが，テイルトロータ機は機体を傾ける必要がないため，応答が速いのではないかと？

## [研究の内容，成果]

### 課題 1：ロータ角速度情報を制御器にフィードバックしてはどうか？

マルチロータ機を推力制御する手法としては，これまでにロータ角速度を用いない手法が多数提案されている（S. Park et. al., IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 23, No. 4, 2018）。この文献では推力制御器の中に電圧制御による

フィードフォワードロータ制御器を用いている。しかしながら、フィードフォワードロータ制御では入力電圧や逆起電力などの電気系のモデル化誤差、プロペラの反トルクや軸受けの摩擦などのロータ軸周りに加わる機械的外乱の影響を受けやすい。

そこで本研究ではロータ角速度を用いることで外乱オブザーバ、フィードバック線形化制御器、閉ループロータ角速度制御器を内包するロータ制御器を提案し、機体の推力制御に用いた。

図1に課題1の実機検証に用いたクワッドロータ機を示す。

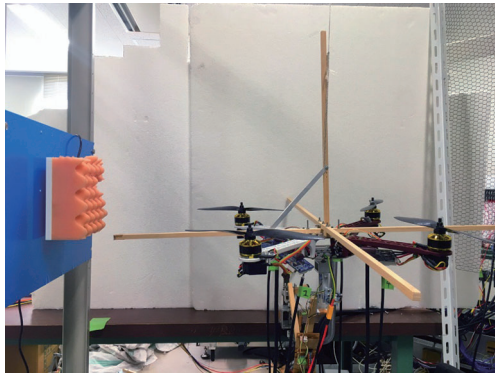


図1 課題1の実機検証に用いたクワッドロータ機

プロペラ回転用のモータには Scorpion 製 M-3011-760KV を使用し、角速度を計測するために、角度エンコーダ Broadcom 製 HEDS-5540 を取り付けた。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。

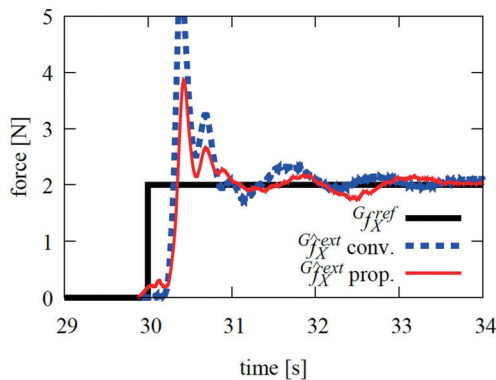


図2 クワッドロータ機の接触力制御の結果

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。

一方で、図3に接触時の上下方向の位置制御の結果を示す。太実線が位置指令値、太点線がロータ角速度を用いない場合（従来手法）の位置応答値、細実線がロータ角速度を用いる場合（提案手法）の位置応答値、に対応する。提案手法の方が従来手法に比べて位置決め精度が高いことが分かる。

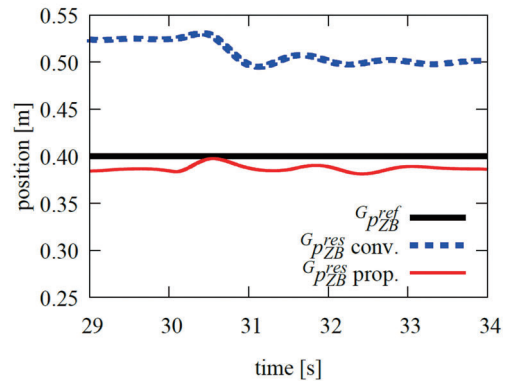


図3 クワッドロータ機の位置制御の結果

以上より、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。詳細は [2] [5] を参照。

## 課題2：可変ゲイン制御器を用いてはどうか？

プロペラの回転によって発生する推力  $f$  はプロペラ角速度  $\omega$  の2乗に概ね比例することが知られている。

$$f = c_f \omega^2 \quad (1)$$

ここで、 $c_f$  は推力係数を意味する。これまでに  $c_f$  を一定値とみなしプロペラ角速度を制御することでプロペラ推力を制御する手法が多数提案されている。一方で、 $c_f$  は対気速度  $v$  とプロペラ角速度  $\omega$  の関数であることも知られている。 $c_f$  を一定値とみなすと、 $c_f$  のモデル化誤差

により推力制御性能が劣化し、結果として接触力制御性能や位置制御性能にも影響を与える。そこで本研究では、 $c_t$ ,  $v$ ,  $\omega$  の関係を実験的に同定し、推力制御に用いることを検討した。図4にプロペラ駆動系の風洞試験の様子を示す。

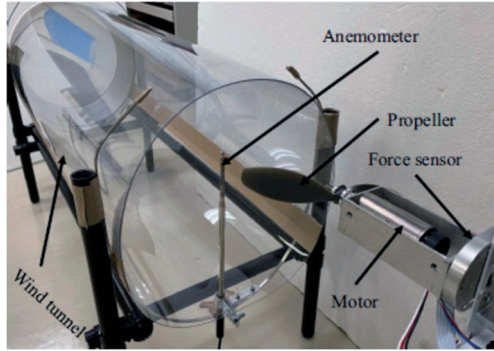


図4 プロペラ駆動系の風洞試験

プロペラに対して層流の向かい風をあてた。図5に風洞試験で取得した  $c_t$ - $v$  特性を示す。 $\omega$  が大きいほど  $c_t$  が大きくなった。また、 $v$  が大きいほど  $c_t$  が小さくなった。

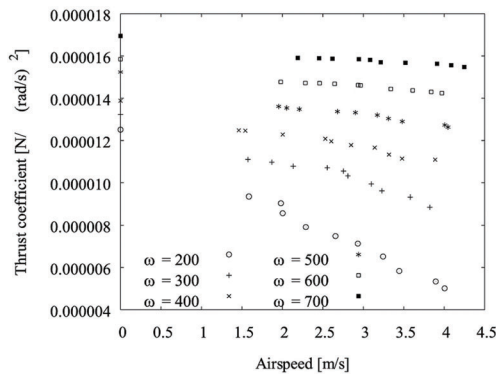


図5 風洞を用いて同定した  $c_t$ - $v$  特性

この性質は  $c_t$  を一定値とみなすことに無理があることを示す。そこで本研究では図5のグラフをリアルタイムに参照し、 $v$  と  $\omega$  の計測値に応じて  $c_t$  のモデルを変更するゲインスケジュード推力制御器を提案した。図6と図7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）

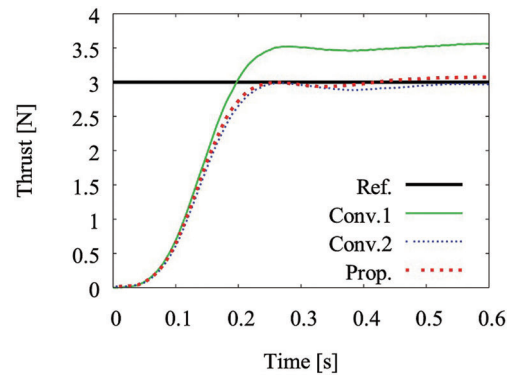


図6  $v=2$  m/s の時の推力応答

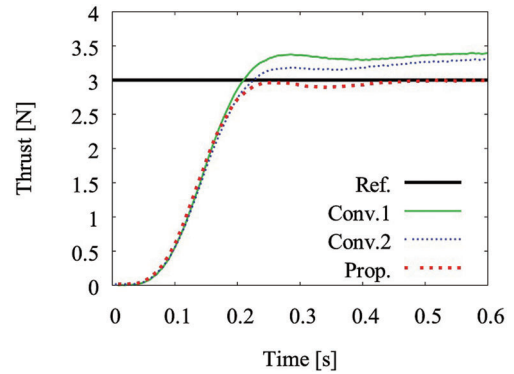


図7  $v=3.5$  m/s の時の推力応答

に対応する。従来手法1では  $c_t$  のモデルは一定値とした。

従来手法2では  $c_t$  のモデルを進行率の関数とした。これらの結果から提案手法を用いた場合が最も定常偏差が少ないことが分かる。

以上より可変ゲイン制御器を用いることの有効性が示された。詳細は [3] [4] を参照。

### 課題3：ティルトロータ機を用いてはどうか？

マルチロータ機は、プロペラの回転軸角度であるティルト角を固定する機構（非ティルトロータ機）とティルト角を可変にする機構（ティルトロータ機）に分けられる。しかしながら、ティルト角を固定する機構は劣駆動系であるため地面に対して水平な方向に推力を発揮するためには、機体の姿勢角を調整する必要がある。機体の姿勢角制御系は時定数が長い場合、結果として接触力制御系の応答も遅い。このような劣駆動系の抱える問題を避けるため、各ロータの回転軸を非平行にすることで、マルチ

ロータ制御系を全駆動系にする手法も提案されている (M. Ryll et. al., The International Journal of Robotics Research, Vol. 38, No. 9, 2019)。しかしながら、ロータ推力の一部が内力として相殺されるため、推力重量比が低いという問題を抱える。

そこで本研究では、ティルト角をオンライン調整可能なクワッドロータ機 (以下、クワッドティルトロータ機) を開発した (図8)。

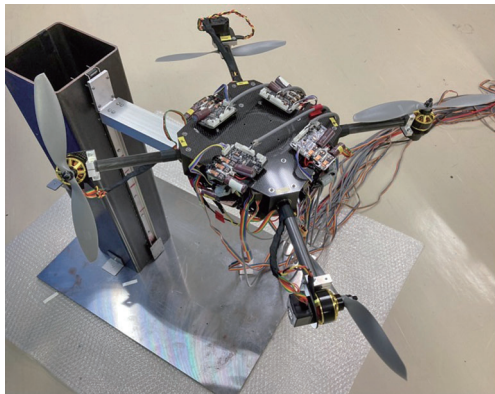


図8 開発したクワッドティルトロータ機

4本の細長い円柱状のアームが生えており、アーム先端部にプロペラが取り付けられている。サーボモータを用いて各円柱を円中心軸周りに任意に回転させることができる。これによりティルト角を制御できる。

図9に図8に示した装置のティルト角を制御した結果を示す。極太実線、極太破線、太実線、太破線、細実線はそれぞれ、ティルト角指令値、プロペラ1のティルト角応答値、プロペラ2の

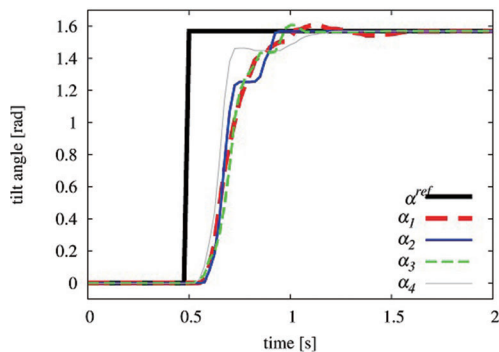


図9 ティルト角度応答 (実験)

ティルト角ティルト角応答値, プロペラ3のティルト角応答値, プロペラ4のティルト角応答値を意味する。通常のクワッドロータ機はティルト角度を変えることができない点が差分になる。

図10にクワッドロータ機と地面との接触力を制御した場合のシミュレーション結果を示す。太実線, 細実線, 細破線はそれぞれ, 接触力指令値, ティルトロータ機を用いた場合の接触力応答値, 非ティルトロータ機を用いた場合の接触力応答値を表す。ティルトロータ機を用いることで接触力制御性能が改善されることが分かる。

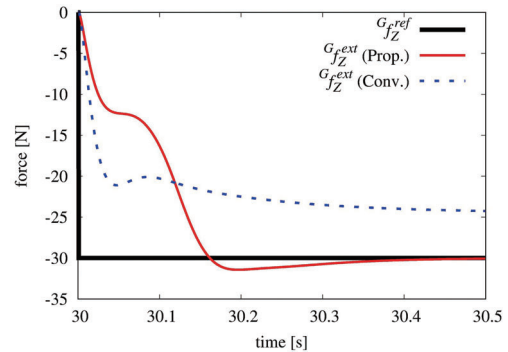


図10 接触力応答 (シミュレーション)

以上より、ティルトロータを用いることの有効性が示された。詳細は [1] を参照。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では非ティルトロータ機を用いて課題1の検証を行った。今後、図8のティルトロータ機を用いて検証を進める。

本研究では比較的低速な向かい風が推力係数に与える影響を検討した。今後は、強風、もしくは向かい風以外の風が推力係数に与える影響を検討する。

現時点では、ティルトロータ機が非ティルトロータ機よりも地面との接触力制御性能に優れることをシミュレーションにより検証することしかできていない。今後、図8の装置を用いて実機検証を進める。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 辻 裕介, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田 諭: “ク  
アドテイルトロータ機の接触力制御”, 機械学会  
ロボティクス・メカトロニクス講演会演論文集,  
Jun. 6th-8th, 2021
- [2] Daisuke Yashiro: “Force Control of Propeller-  
Driven Systems Using Rotor Angular Velocity”,  
Proceedings of 7th IEEEJ international workshop on  
Sensing, Actuation, Motion Control, and Opti-  
mization, Mar. 10th-12th, 2021
- [3] Yuki Kato, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and  
Satoshi Komada: “Design of a Gain-scheduled  
Rotor Thrust Controller Using Wind Velocity and  
Rotor Angular Velocity”, Proceedings of the 7th  
IEEEJ International Workshop on Sensing, Actuation,  
Motion Control, and Optimization, Mar. 10th-12th,  
2021
- [4] Yuki Kato, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and  
Satoshi Komada: “Design of Gain Scheduled Rotor  
Thrust Controller Using Airspeed and Rotor  
Angular Velocity”, Proceedings of the 46th Annual  
Conference of the IEEE Industrial Electronics  
Society, Oct. 18th-21th, 2020
- [5] 林 佑樹, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田 諭:  
“ロータ角速度を用いたクワッドロータの接触力制  
御”, 電気学会論文誌産業応用部門誌, Vol. 140-D,  
No. 9, pp. 662-672, Sep. 2020