

## 2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	三重大学 大学院工学研究科 電気電子工学専攻
職位または役職	助教
氏名	矢代 大祐

### 1. 研究題目

---

アウトロータ型 SPMSM を用いた高精度プロペラ推力制御に関する研究

### 2. 研究目的

---

電動航空機の一つであるマルチロータ機(ドローン)の市場規模の拡大が著しい。近年のモータ性能の向上, 計測技術の進歩, 半導体の小型化等により実現されたマルチロータ機は, ホバリング・垂直離着陸といった特徴的な飛行形態を持ち, 精密な作業をすることが可能である。これらの利点から, 空撮などによる調査, 農薬散布, 荷物の運搬といった作業に活用されている。また, マルチロータ機に工具を搭載し, 橋梁の打音点検やビルの窓拭きのような工作物・環境との接触を伴う作業を自動化する研究開発も盛んに行われている。環境との接触を伴う作業においては, 接触力が過大となって環境を破壊したり機体が不安定化したりすることを避けるために, 高い位置制御性能と接触力制御性能が要求される。厳しい要求仕様を満たすためにはプロペラ推力を高精度に調整する必要があるが, 十分な性能が得られているとは言い難い。よって, 電動航空機のための高精度プロペラ推力制御を本研究の目的とする。

## 3. 研究内容及び成果

表面磁石同期モータを用いた高精度プロペラ推力制御を研究目的とし、以下の成果を得た：

### 成果[1] 加速度センサと位置センサを併用した機体速度推定器を内蔵する推進力制御器の設計

機体推進力(機体慣性と機体加速度の積)は、プロペラ推力、重力、空気抵抗力の合力である。よって、機体の状態量を正確に制御するためには、プロペラ推力の数理モデルだけでなく、空気抵抗力の数理モデルを把握し、制御器設計に反映することが望ましい。本研究では、加速度センサと位置センサを併用することで、重力と空気抵抗力の合力をリアルタイムに推定及び補償できることをシミュレーションにより確認した(図 1(a)(d), 論文[3])。加速度センサのみを用いる場合には、速度推定誤差が原因で補償効果が低かった。また、位置センサのみを用いる場合には、位置の推定遅延や離散化誤差が原因で制御系の安定性が損なわれた。

### 成果[2] 風速とプロペラ角速度を用いたプロペラ推力制御器の設計

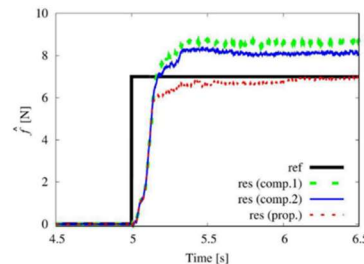
過去にプロペラが引き起こした風(プロペラ後流)が、未来のプロペラ推力に影響を与えるとの知見を得ている。例えば、プロペラ後流の中に機体が侵入することで推力係数がほぼゼロになり、不可制御になるケースがある。プロペラ後流のモデルを把握することが望まれる。自然風とプロペラ後流の合成値を風向風速計で実時間計測し、制御器に反映することでプロペラ推力の制御性能を向上させる実験に成功した(図 1(a)(b)(c), 論文[1] [2])。風速やプロペラ角速度が変化したとしても、高精度なプロペラ推力制御が達成された。

### 成果[3] 角度センサ及びトルクセンサを用いないセンサレス負荷トルク推定器の設計

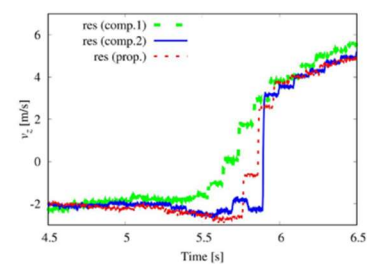
角度センサやトルクセンサを用いることは機体の重量化を招くため、モータ電流からプロペラ角速度やプロペラがモータに加える反トルクを推定できることが望ましい。UVW 相の電流と線間電圧から、表面型永久磁石同期モータ(SPMSM)に加わる反トルクをリアルタイムに推定できることをシミュレーションにより確認した。図 1(e)の実験装置を想定した制御対象モデルに対してセンサレスベクトル制御系を実装した上で、電気角速度推定値と  $q$  軸電流推定値に基づき負荷トルクを推定した(図 1(f))。過渡状態で生じるトルク推定誤差の主因は電気角推定誤差である。



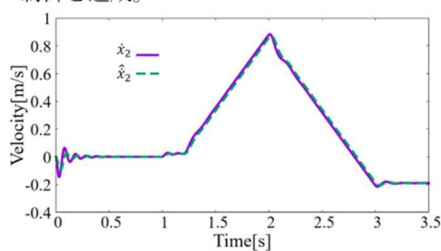
(a) 風速と外力を調整可能なプロペラ推力制御系。風速とプロペラ角速度に応じて制御器を調整することで高精度な推力制御を達成。



(b) プロペラ推力の時間応答。提案手法(prop)は、風速や角速度によらず比較手法(comp.1, comp.2)よりも定常偏差が少ない。



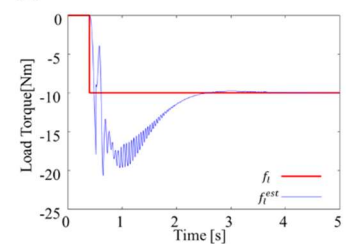
(c) (b)の結果に対応する風速の時間応答。追い風にプロペラ後流が衝突することで、風向が反転している。



(d) 機体推進力制御の結果。速度応答値(実線)に速度推定値(破線)が追従。加速度センサ値と位置センサ値に基づき機体外乱を補償。



(e) 助成金で導入したモータ駆動システム。インバータのスイッチングに基づきモータを制御。インバータ周りの電流や電圧を計測可能。



(f) センサレスベクトル制御中の状態量(電流や電圧)を用いて推定したモータ負荷トルク(細線)。応答値は太線。

図 1 (a)と(e)は助成金で導入した実験装置。(b)と(c)は実験結果。(d)と(f)はシミュレーション結果。

## 4. 今後の研究の見通し

上記の成果を発展させる形で、引き続き表面磁石同期モータを用いた高精度プロペラ推力制御を研究目的とし、図2のスケジュールに沿って課題A-Eに取り組む：

**課題A**：位置センサ値と加速度センサ値にフィルタ処理を施すことで高精度に機体加速度を推定するアルゴリズムを提案する。また、推定した機体加速度を用いて機体外乱を補償する。

**課題B**：モータのUVW相の電流と線間電圧から、電機子抵抗、電機子鎖交磁束、線間インダクタンス等のモータの特性を同定する。これらの同定値とモータ電流から、プロペラ角速度やプロペラ反トルクを推定する。モータの誘起電圧と突極性の両面に着目することで低速から高速までの幅広い速度域でプロペラ角速度と反トルクを推定できるアルゴリズムを提案する。

**課題C**：機体位置指令値、機体位置応答値、プロペラ角速度応答値から推力指令値を予測し、性能を犠牲にすることなく推力指令値が飽和しないように制御器をリアルタイム調整するアルゴリズムを提案する。

**課題D**：プロペラ角速度指令値、プロペラ角速度応答値、モータ電流応答からモータ電流・電圧指令値を予測し、性能を犠牲にすることなくモータ電流・電圧指令値が飽和しないように制御器をリアルタイム調整するアルゴリズムを提案する。

**課題E**：プロペラ角速度の振動の原因は、モータの構造、プロペラ及び回転軸受の構造、プロペラと空気の相互作用と予想している。これらの数理モデルに基づき、振動を抑制する制御器を作成する。

課題A-Eに関わる検証実験を進めるにあたり、構造、電磁場、流体等の解析をするためのマルチフィジックスCAE(Computer-Aided Engineering)を導入する。CAEを活用して作成したモータ・プロペラ・機体の動力学モデルを状態推定器に内蔵する。また、これらの動力学モデルを、計算コスト削減のために代数方程式に離散化し、離散化された代数方程式、物理量の飽和、機械振動に関わる安定制約、目的関数に基づき、最適制御器を設計する。

課題A	CAEを活用したモータ・プロペラ・機体の動力学モデルの作成	状態推定器の設計		
課題B		物理量の飽和を考慮した制御器の設計		
課題C				
課題D		機械振動を考慮した制御器の設計		
課題E				
	10月～12月	1月～3月	4月～6月	7月～9月

図2. 2023年10月以降の研究開発スケジュール

## 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

## 学術論文(査読付)

論文[1] Yusuke Tsuji, Daisuke Yashiro, Yuki Kato, Shinichiro Bando, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Design of a Thrust Controller for Propeller Driven Systems Operating at Multiple Wind Velocities and Propeller Angular Velocities", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 12, No. 6, Nov. 2023

## 国際会議(査読付)

論文[2] Yusuke Tsuji, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Performance Evaluation of Gain-Scheduled Thrust Controller Using Wind Velocity and Propeller Angular Velocity for Propeller Driven Systems Under Variable Wind Direction", Proceedings of the 9th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion, Control and Optimization, Nanjing, China, Mar. 24th--26th, 2023

## 国内会議(査読無)

論文[3] 伴藤信一郎, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "電動プロペラ機のための加速度センサと位置センサを用いたむだ時間モデルを含む速度推定器を内蔵した推進力制御器の設計", 第66回自動制御連合講演会論文集, Vol. 66, 仙台, Oct. 7th--8th, 2023