

2021 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] プロペラ推進システム評価装置の開発

申請書に記載した図 1 に示す概念図に従い、図 2 に示すプロペラ推進システム評価装置を開発した。本評価装置は、風洞、2 次元風向風速計、プロペラ、エンコーダ付モータ、力センサ、エンコーダ付リニアモータで構成される。プロペラ推進システムをリニアステージ上に固定し、高速移動させることで、対地速度が 0 でない条件下での対地速度、対気速度、プロペラ角速度、プロペラ推力の関係を同定することが可能になった。今後、対地速度が 0 でない条件下でのプロペラ推力制御を試みる。

この成果の一部は、査読付国際会議への近日中の投稿を予定している。

成果[2] 追い風状態における高精度プロペラ推力制御

プロペラ後流と風洞が発生させる追い風の衝突により乱流が発生していることを 2 次元風向風速計により確認した。また、プロペラ近傍の風速の計測値を用いることで、追い風状態であっても高精度に推力を制御できる制御器を設計した。図 3 に推力係数(縦軸)・対気速度(横軸、正の値は向かい風を意味する)・プロペラ角速度(ω)の関係を表すマップを表す。リアルタイムにマップを参照し、制御器を変更することで、プロペラ後流と追い風が衝突する条件下においても高精度にプロペラ推力を制御できることが実験的に示された(図 4)。図 4 中で、細実線(Ref.)、細点線(Conv. 2)、太実線(Conv. 1)、太点線(Prop)はそれぞれ、推力指令値、推力応答値(従来法 2)、推力応答値(従来法 1)、推力応答値(提案法)を意味する。

この成果は、査読付国際会議(論文[3])において発表され、一定の評価を受けている。

成果[3] プロペラ推進システムの高精度接触力制御

プロペラ推進システムと周辺環境との間の接触力を高精度制御することに成功した。本研究では、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実現することを目指しており、この成果はそのための基盤技術になり得る。

この成果は、査読付国際学術論文(論文[1])や査読付国際会議(論文[2])において発表され、一定の評価を受けている。

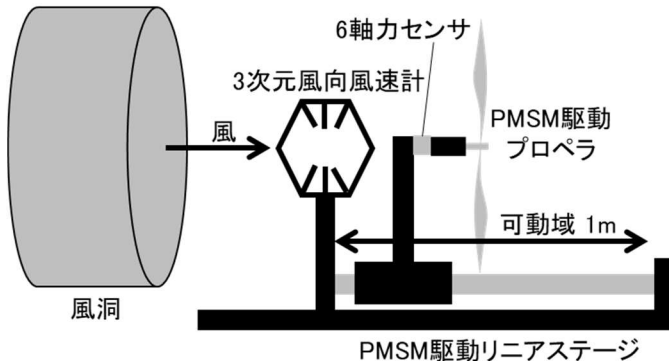


図 1. 申請書に記載した実験装置の概念図



図 2. 助成金により開発した評価装置

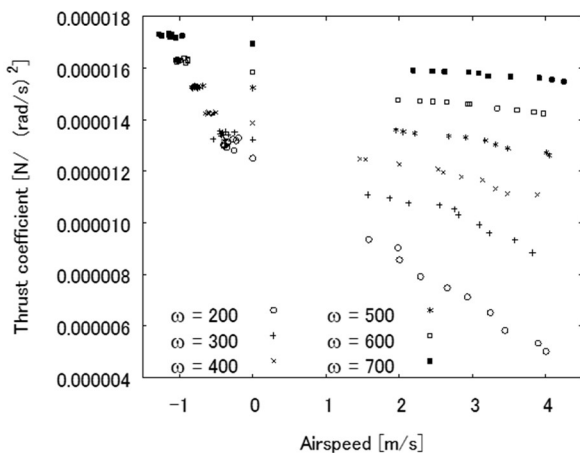


図 3. 推力係数－対気速度特性

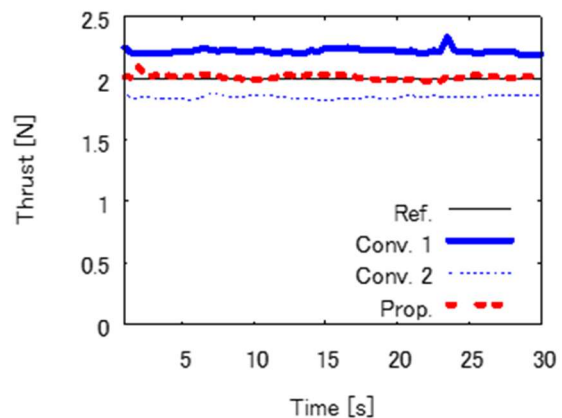


図 4. 追い風時のプロペラ推力の時間応答

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 5 のスケジュールに沿って課題 A-E に取り組む：

課題 A：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、機体推進力を正確に制御するためには、プロペラ推力のモデルに加え、空気抵抗力のモデルを把握し、制御器設計に反映することが望ましい。

課題 B：図 2 の装置を用いた実験から、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たとの知見を得た。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。

課題 C：工具を搭載したマルチロータ機が環境との接触を伴う作業をおこなう際、プロペラ推力が大きく変化することがある。この現象は、プロペラ後流と周辺環境の衝突に起因し、地面効果や天井効果として知られている。周辺環境の状態によらず、正確にプロペラ推力を制御する仕組みが望まれる。

課題 D：プロペラ角速度制御のために角度センサを用いることは機体の重量化を招き、バッテリーを消耗する。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することが望ましい。

課題 E：モータ電流飽和は推力飽和を引き起こし、制御性能を劣化させるだけでなく、バッテリーを著しく消耗させる。電流飽和を補償できるだけでなく消費電力を最小限に抑える制御器が望まれる。

課題 A～E に関わる検証実験を進めるにあたり、プロペラ前後の風向風速を実時間計測できるようにするため、2次元超音波風向風速計を 1 台追加し、報告者が有する風向風速計 1 台と併用したい。また、報告者が現有するインバータでは、UVW 相の電流、線間電圧、バッテリー電流、バッテリー電圧をリアルタイムに計測・制御できないため、これらを計測・制御できるインバータ等を 1 式用意したい。

課題A	リニアステージ及び 計測系の開発		空気抵抗のモデル化		状態推定器及び 制御器の設計
課題B			プロペラ後流のモデル化		
課題C	接触環境の開発		地面効果のモデル化		
課題D	インバータの導入		モータのモデル化		
課題E			電流制御系の設計		
	10月～12月	1月～3月	4月～6月	7月～9月	

図 5. 2022 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

国際学術論文(査読付)

論文[1] Yuki Nishii, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Design of a contact-force controller including airframe's velocity and acceleration feedback controllers for one-degree-of-freedom propeller-driven systems", Electrical Engineering in Japan, Vol. 215, No. 2, Jun. 2022(10.1002/eej.23379)

国際会議(査読付)

論文[2] Masaya Inukai, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Design of Feedforward Controller using Airframe's Velocity for Contact Force Control of Propeller Driven System", Proceedings of the IEEE 17th International Workshop on Advanced Motion Control, Padova, Italy(online), Feb. 18th-20th, 2022(10.1109/AMC51637.2022.9729260)

論文[3] Yuki Kato, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Performance Evaluation of a Gain-scheduled Propeller Thrust Controller Using Wind Velocity and Rotor Angular Velocity Under Fluctuating Wind", Proceedings of the IEEE 17th International Workshop on Advanced Motion Control, Padova, Italy(online), Feb. 18th-20th, 2022(10.1109/AMC51637.2022.9729317)