

2023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	准教授
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: 機体の位置制御性能と力制御性能を両立させるためには、機体加速度を正確に推定・制御するのが効果的である。しかしながら、剛性の低い機械部品が含まれる場合、機械振動が起りやすい。そこで、2種類のセンサ値(モータ側角度と負荷側角度)に基づき負荷側角加速度とねじれトルクを推定し、ねじれに起因する機械振動を抑えつつ負荷側角加速度を制御するアルゴリズムを提案し、その有効性をシミュレーションと実験により確認した(図 1, 論文[2])。

成果 2: プロペラ推力は基本的にはプロペラ角速度の 2 乗に比例するが、しばしば発生するプロペラ角速度の振動が原因でプロペラ推力も振動する。プロペラ角速度の振動の原因は、モータの構造と回転軸受の構造にあり、この微小な振動がプロペラ自体の機械共振を引き起こすことがある。そこでまず、本助成金で導入したワークステーションを用いてシミュレーションをおこない、実験結果との対比により数理モデルを作成した。次に、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した。軸ねじれ(図 2)に起因する振動に対しては、軸ねじれトルク推定値を周波数整形した値の状態フィードバックが有効との知見を得た(論文[1])。また、特定の角速度で振動が顕著に増大することが分かったため(図 3), リファレンスガバナを適用したところ、振動抑制効果がみられた(図 4, 論文[3])。

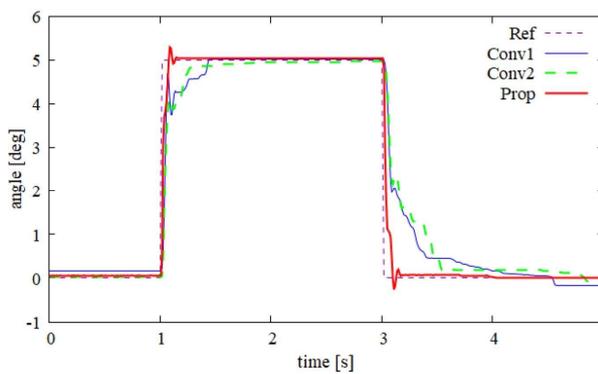


図 1. 角加速度制御に基づく 2 慣性系の角度制御の実験結果。ねじれトルクを用いない手法 (conv1), 負荷側角加速度を用いない手法 (conv2) に比べて提案手法 (prop) の方が目標値追従特性に優れている。

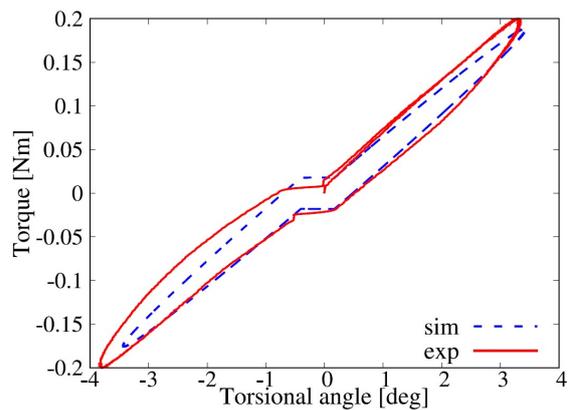


図 2. 低剛性部品を含む減速機付きモータのねじれトルク-ねじれ角度線図。数理モデルに基づくシミュレーション結果は概ね実験結果と一致している。

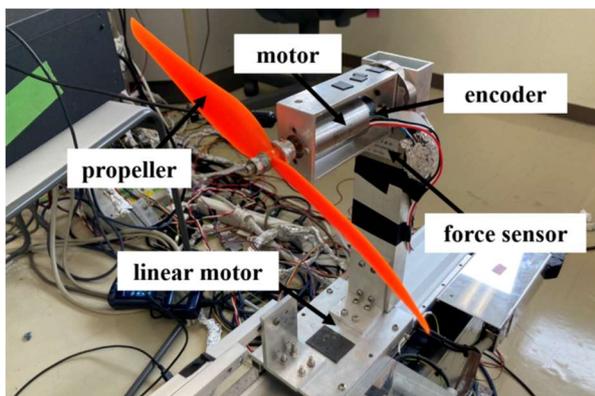


図 3. リニアモータに固定されたプロペラ推進システム。角度計測用のエンコーダとプロペラ推力・反トルク計測用の力センサを搭載。

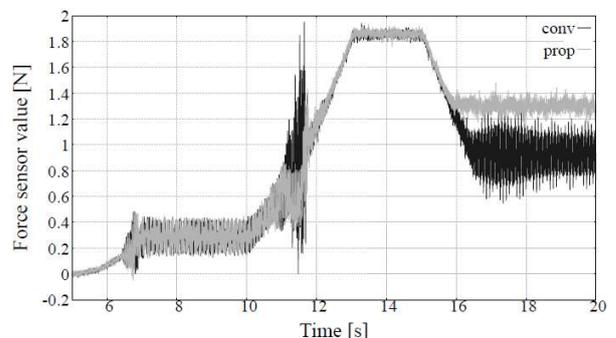


図 4. プロペラ角速度制御時の力センサ値の時間応答。conv はリファレンスガバナを用いない場合の実験結果, prop はリファレンスガバナを用いた場合の実験結果。

4. 今後の研究の見通し

上記の成果 1 と成果 2 を発展させる形で、引き続きプロペラ駆動システムを含む高速回転機械の状態推定と制御に取り組む予定である：

成果 1 により、機体の位置制御性能と力制御性能を両立させるためには、機体加速度と振動モードを正確に推定・制御するのが効果的であることが分かった。しかしながら、機体の位置・加速度計測にしばしば用いられる GNSS や加速度センサは離散化誤差や雑音の影響を受けやすい。また、コストの観点でしばしばセンサレス化が求められる。これらのことから、豊富なセンサ情報が得られない条件下で高精度に状態量を推定するアルゴリズムの確立が求められる。

成果 2 により、①プロペラ推力の振動を抑制するためには、角速度指令値に対するリファレンスガバナが有効であること、が分かった。また、②固定ピッチプロペラはプロペラ推力を一方向にしか発揮できないこと、③プロペラは高速回転時にモータ電流がしばしば飽和すること、が知られている。①～③の事実は、プロペラ推進システムには制御入力に対して非線形な制約が数多く課されていることを意味する。この非線形な制約下で高い性能を達成するアルゴリズムの確立が求められる。

これらの課題に取り組むにあたっては、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) を活用してモータ・プロペラ・機体の動力学モデルを作成し、このモデルを状態推定器あるいは制御器の設計開発に使いやすい形 (例えば線形行列不等式や漸近級数) に近似するテクニックが求められる。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付, 下線部は責任著者)

論文[1] Yuto Ikeda, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Angle Controller for Motor with Reduction Gear that utilizes Torsional Torque Estimator including Backlash Model and High-Pass Filter", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 13, No. 3, May 2024 (IF:1.7)

国際会議(査読付, 下線部は責任著者)

論文[2] Ryota Okano, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Position Control of Articulated Robots Using Frequency-Shaped Shaft Torsional Torque with Low-Rigidity Couplings and Double Encoders", Proceedings of the 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Chicago, Nov. 3rd-6th, 2024

論文[3] Hitoshi Nishimura, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Design of Reference Governor Based on Elastic Body Model for Angular Velocity Control of Motor-driven Axial-flow Impeller", Proceedings of the 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Chicago, Nov. 3rd-6th, 2024