

補助事業番号 2023M-323

補助事業名 2023年度 二重推進式VTOLドローンによる高機動飛行制御系構築 補助事業

補助事業者名 神戸大学大学院システム情報学研究科 浦久保孝光

1 研究の概要

本研究では、二重推進式などのVTOLドローンを対象として、搭載されたロータ等のアクチュエータを最大限に生かした高機動飛行の可能性を探求します。機体の力学モデルにもとづき機動性を評価して、可能な急旋回、急上昇などの高機動運動を明らかにし、それらの実現に向けた制御系を構築します。

2 研究の目的と背景

物資輸送などへのドローンの活用が始められています。普及の進むマルチコプタでは航続距離が短く、固定翼機モードによる長距離高速飛行性能と回転翼機モードによる垂直離着陸性能を併せ持つVTOL (Vertical Take-Off and Landing) ドローンの活用が期待されています。しかし、VTOL ドローンは幅広い速度域を飛行し、機体に加わる空気力が複雑に変化することから、その飛行特性の解明や飛行制御系設計がVTOLドローン活用に向けた課題となっています。

一方で、VTOLドローンにおいては、二つの飛行モードを実現するためにロータ等のアクチュエータが冗長に搭載されていることが多いです。固定翼機モード、回転翼機モードにとらわれずに、これらを最大限活用すれば、従来にない高機動な飛行が行える可能性があります。機体の飛行性能を十分に把握し活用することは、運用を容易にし、緊急回避などで安全性を高めることにもつながります。本研究では、VTOLドローンの飛行性能を機動性の観点から解析し、急旋回、急上昇等の高機動飛行のための制御系構築を行うことを目的としています。

3 研究内容

(1) VTOLドローンによる高機動飛行制御系構築

本研究では、飛行力学モデルの構築、機体の機動性解析、高機動飛行制御系構築の3つの課題に取り組みました。各課題の具体的な内容を以下に示します。

① 飛行力学モデルの構築

高機動飛行においては、大きな迎え角、横滑り角などで飛行することが考えられます。図1に示す二重推進式VTOLドローンを対象として、このような飛行状態で機体に加わる空気力を、数値流体力学(CFD)計算結果や飛行実験結果の解析、文献調査などを通してモデル化しました。CFD計算は計算条件や計算例が限られ、飛行実験結果についても飛行状態の制限や搭載センサ



図1 二重推進式 VTOL ドローン

の精度の問題があります。今後さらに精度検証が必要ですが、ある程度実験結果を再現する空気力モデルを構築しました。これに以前から構築を進めていたロータ推力モデル、機体の剛体としての力学モデルを組み合わせ、対象機体の飛行力学モデルとしました。

② 機体の機動性 (Maneuverability) 解析

①で得られた飛行力学モデルをもとに、搭載アクチュエータを最大限利用した場合の急旋回、急上昇飛行について解析を行いました。二重推進式VTOLドローンでは通常の高速飛行中は、回転翼機モード用ロータを使用しません。しかし、これらを高速飛行中も使用することで、旋回中のバンク角を大きくし、最小旋回半径を小さくすることができます。解析の結果として得られたのが図2になります。通常の飛行方法(A)に比べて、本研究で解析を行った飛行方法(B)では、バンク角 ϕ_0 を大きくすることで、最小旋回半径が約82[m]から約34[m]まで小さくなることが期待されます。また、高速飛行中に定常上昇する場合の上昇率についても解析を行いました。この場合にも、わずかではありますが、上昇率が向上することが期待され、予備的な実験結果でもその傾向が確認されました。

さらに、急旋回については、従来研究で飛行力学モデルを得ていたティルトロータ式VTOLドローン(図3)に対しても、回転翼機モード用ロータ使用による旋回半径低減の可能性を調べました。この場合も旋回半径が大幅に低減されるという結果が得られ、本研究で提案する高機動飛行が他の形態のVTOLドローンでも成立する可能性を示すことができました。

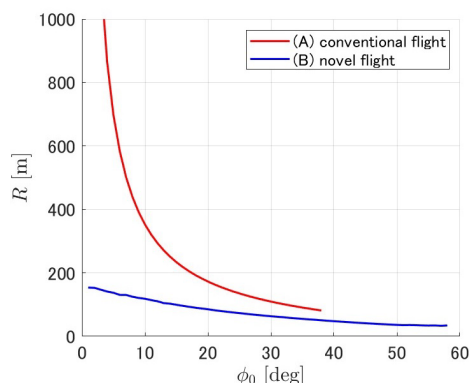


図2 最小旋回半径の解析結果



図3 ティルトロータ式 VTOL ドローン

③ 高機動飛行制御系構築

②で得られた高機動飛行を実現するための飛行制御系について検討を行いました。急旋回については、一定の外乱の下でもフィードバック制御により定常旋回飛行が可能であることを数値シミュレーションで確認しました(図4)。ただし、目標旋回半径を小さくするとアクチュエータの余力も少なくなるため、想定する外乱と目標旋回半径の関係については今後さらに研究を進める必要があります。直線飛行から旋回に移行する際の制御系については、モデル予測制御などの適用を検討し、現在も研究を進めています。

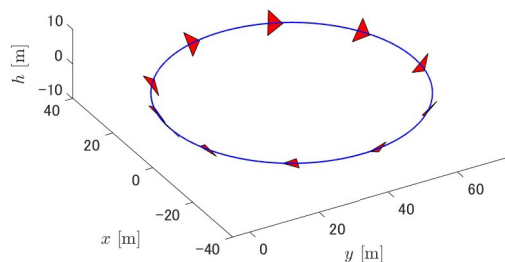


図4 旋回飛行シミュレーションの例

上昇飛行については、飛行実験での検証のため、現行の搭載制御系を微調整する形での制御

を行いました。ある程度の効果が確認できましたが、他の搭載プログラムとの整合性を取りながら、実機搭載可能な高機動飛行制御系を構築することが今後の課題となります。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

2の目的と背景に述べた通り、VTOLドローンは物資輸送等での活用が期待されています。本研究の成果およびその発展は、VTOLドローンの本来持つ飛行性能を引き出し、その利便性を大きく高めるものとなります。山間部など狭隘地での運用が容易になり、物資輸送や情報収集等でVTOLドローンの活用が進み、より快適な社会の実現に貢献すると考えられます。また、高機動飛行は緊急回避にも有用であり、安全なドローン活用にもつながります。

5 本研究にかかわる発表論文

以下の3件の学会発表を行いました。

1. T. Urakubo, R. Nakamura, C. Kikumoto, K. Sabe and Y. Hazama: Minimum Turning Radius Analysis for Quad-plane UAVs in High-speed Flights, Proc. of the 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON23-001115, 2023
2. T. Urakubo, R. Nakamura, C. Kikumoto, K. Sabe and S. Hirai: Steep Turn of a Tilt-rotor UAV with Redundancy in Control Inputs, Proc. of the 2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 3406–3411, 2023
3. 浦久保, 中村, 菊本, 佐部, 平井: Tilt-rotor UAVの高速旋回飛行に関する考察, ロボティクス・メカトロニクス講演会2023講演論文集, 2A2-C18, 2023