

氏名	いとう ゆうと 伊藤 優人
本籍（国籍）	岐 阜 県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第334号
学位授与年月日	令和3年9月24日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科機械・社会環境システム工学専攻
学位論文 題目	回転アームを用いた低進行率領域におけるプロペラの空力特性の解析
学位審査委員	主査 准教授 佐藤 淳 副査 教授 上野 和之 副査 教授 船崎 健一

論 文 内 容 の 要 旨

プロペラの空力特性（本論文では、進行率、推力特性、トルク特性、推進効率のことを指す）の解析は、大型の回転翼機の設計において最も重要な工程の一つとなっている一方で、マルチロータ UAV (Unmanned Aerial Vehicle) に使用される小型のプロペラの特性は、現代においても十分に解析されていない。プロペラの特性は、プロペラ回転面に流入する気流の軸方向速度とブレード翼端速度との比である、プロペラの進行率に関して変化することが知られている。とりわけ、マルチロータ UAV は、低速度で飛行すること、ホバー飛行を多用することから、低い進行率領域での特性の解析が重要となる。

小型のプロペラの特性は、風洞実験によって計測されることが多い一方で、低進行率領域におけるプロペラの特性を風洞実験によって計測することは、風洞装置が出力できる最低風速の限界、出力気流の不安定化によって困難となる。著者は、この課題に対処する方策として、回転アームの利用を提案する。回転アームでプロペラの特性を計測する場合、回転することができる水平のアームの一端に計測対象のプロペラを取り付け、プロペラを作動させながらアームを回転させることで、ロータが上昇・降下する時の特性を計測することができる。プロペラとアームの角速度は、ブラシレスサーボモータを用いてそれぞれ独立して制御することができるので、プロペラの任意の作動状態を実現することができる。この機能によって、風洞実験に比べて、低進行率領域におけるプロペラの特性の計測を容易に実施することができる。

回転アームは、以上の特徴を有する一方で、過去に回転アームを用いたプロペ

ラの特性解析を行った事例は、非常に少ない。これは、回転アームで得られる特性が周回するプロペラの特性であり、直進するプロペラの特性と異なるためである。この問題を解決するためには、周回するプロペラの特性を適切に修正し、直進するプロペラの特性を明らかにする手法が必要となる。この問題を解決することで、低進行率領域におけるプロペラの特性を解析するための新たな手法を確立することができる。

本論文では、回転アームを用いる場合の低進行率領域におけるプロペラの特性の解析手法を示す。本論文で示される手法は、理論的な手法と実験的な手法に大別される。

理論的な解析手法では、周囲の渦の誘導速度場を考慮して、回転アーム上で周回するプロペラの特性のモデリングを行った。さらに、提案するモデルの妥当性を検証するために、数値シミュレーションを行った。プロペラの後流渦・アームの旋回流の誘導速度場のモデリングは、渦法に基づいて解析的に行われた。さらに、提案されたモデルを用いて、周回するプロペラの特性を計算する手法と手順を示した。周囲の渦を考慮した場合の適切なプロペラの特性は、ハイブリッド翼素運動量理論に基づいて決定した。導出されたモデルの妥当性を評価するために、提案されたモデルを用いて周回するプロペラの特性を計算するシミュレーションを行った。その結果として、提案されたモデルが回転アーム実験から得られるデータを適切に修正し、プロペラの旋回に起因する無視できない空気力学的な影響を補償するのに有用であることが分かった。

実験的な解析手法では、回転アームを用いたプロペラの特性の計測手法を示す。計測された特性は、周回時の特性であるため、得られた特性データを修正して直進する特性を求めることを考える。本論文では、特性データから後流渦の誘導速度場を計算し、実験時の見かけの進行率を修正することで、直進時の特性を計算する。

プロペラの特性データの補正手法を示した後に、実際の計測試験の結果を用いた妥当性の検証を行った。回転アーム実験で得られたプロペラの特性は、既存の結果や提案モデルに基づく理論的な解析結果と良く一致し、低進行率領域における特性を精確に計測することができることを確認した。

本論文は、7つの章によって構成される。第1章では、既存の研究の主結果と課題に触れ、本研究の目的、本研究に取り組むに至った背景と位置づけ、学術的な価値を示す。第2章では、回転アーム上で周回するプロペラの特性のモデリングについて述べる。回転アーム実験は、風洞実験と比べて、実験装置由来の問題を考慮する必要がない一方で、プロペラから生じる後流渦やアームの回転に起因する旋回流がブレードに及ぼす影響を考慮して、ブレードの進行率を適切に決定する必要がある。そのために、上記の渦によって誘導される速度場のモデルを示す。次に、提案される誘導速度場モデルに基づいて、周回するプロペラの進行率・定常特性のモデリングを行う。さらに、得られたモデルを用いて、周回するプロ

ペラの特性を数値的に解析する手法・手順を示す。周回するプロペラの特性は、ハイブリッド翼素運動量理論を用いて決定する。第3章では、第2章で示されたモデルを用いて、アーム上で周回するプロペラの定常的な特性を得るために数値計算を行った。提案する後流渦の誘導速度場モデルに基づいて周回するプロペラの進行率を補正することで、周回するプロペラの特性から直進時の特性を計算した。さらに、数値計算によって得られる特性を既存の風洞実験のデータと比較し、整合性を検証した。第4章では、低進行率領域におけるプロペラの特性を計測する手法を述べる。計測のために開発した回転アーム装置と計測理論、計測手順を示す。第5章では、回転アーム試験によって得られる特性データの補正手法を示す。実験によって計測される推力と空力トルクの計測データから、後流渦の誘導速度場を計算するモデルを導出し、ブレードの進行率を再計算する手法を示す。第6章では、回転アーム試験例および実験データの補正例を示す。さらに、補正された進行率に関するプロペラの特性を風洞実験のデータと比較し、補正手法の妥当性を検証する。第7章では、本論文の結論を述べる。

論文審査結果の要旨

マルチロータ機が飛行するために必要な揚力、推力、操舵力は機体上のプロペラで発生する推力及び抵抗トルクに基づいている。マルチロータ機は固有の安定性を持たない航空機であるため飛行にはフィードバック制御による姿勢角の安定化が必須であり、そのための飛行制御系の設計に際してはプロペラ特性のモデルが必要となる。通常マルチロータ機の飛行制御系は、計測が容易なホバリング時のプロペラ特性にもとづいて設計されるが、実機では対気速度がゼロではない状態で飛行することが普通であり、機体運動の安定化はフィードバック系のロバスト性により結果的に達成されていると考えられる。したがってより優れた制御性能を発揮する飛行制御系の設計には対気速度の変化（すなわちプロペラの進行率の変化）を考慮したプロペラ特性の情報が必要である。

プロペラ特性の計測において、進行率がゼロの状態（ホバリング時に相当）での計測は容易に行えるが、本論文では進行率がゼロでは無い状態での計測を行うための手段として回転アーム装置（Whirling Arm）の利用を提案している点に独自性がある。回転アーム装置とはサーボモーターで回転する片持ちアームの先端にプロペラなどの計測対象を取付け、アーム先端を周回させることにより相対風を発生させ、計測対象に生じる空気力等の計測を行うことができる装置である。風洞装置では安定した流れが得られる流速の下限が存在するのに対して回転アーム装置にはそのような制限が無く、ゼロ風速から装置の限界まで連続的に風速を変化させられる利点がある。そのため風洞装置と相補的に利用することで既存の知見を補うデータが得られることが期待される。

一方、回転アーム装置上の計測対象はアームおよび計測対象自身が周回する際

に誘導する速度場の中に置かれることから、風洞試験と整合する計測を行うためには誘導速度場の影響を推定し、回転アーム装置を用いて計測された特性に適切な補正を行うことが重要である。

そこで本論文ではプロペラ後流渦とアームの旋回流のモデル化を行い、提案したモデルに基づき誘導速度を計算するための手法を新たに提案した。さらに提案したモデルを利用して回転アーム装置による計測結果を補正する方法を新たに提案した。この補正により、風洞試験のように誘導速度場の影響がない計測方法と整合するプロペラ特性を、回転アーム装置を用いた試験によって得ることが可能になる。これらの結果は回転アーム装置を用いたプロペラ特性計測の妥当性を保証するために必要な重要な結果であり、学術的新規性が認められる。

プロペラ後流渦のモデル化においてはまずプロペラの周回軌道の外側へ広がるらせん状の後流渦を離散化した直線渦の集まりとして近似することを提案した。また後流渦自体もプロペラ軸周りに回転する螺旋渦であると考えられるため、本研究ではパネル法に類似した着想によってブレードの各翼素から伸張する螺旋状の半無限長の渦糸の集まりを考え、プロペラ後流を各翼素に対応する複数の円柱状の後流としてモデル化することを新たに提案した。周回するプロペラの翼素ごとの進行率は誘導速度場及び周回半径の周期的変動により一定値にはならないため、本論文では代表翼素における進行率の時間平均値を進行率の代表値として採用することを提案した。またプロペラの局所空気力及び局所進行率をハイブリッド翼素運動量理論 (HBEMT) にもとづき計算する手法を提案した。アームの旋回流については回転円板近傍の境界層流れとしてモデル化することを提案した。

さらに上記のモデル化の着想に基づき、プロペラの幾何形状及び作動条件から周回時の誘導速度係数を計算する手法を提案し、繰り返し計算の過程においてプロペラの定常特性が求まったことを保証するための収束条件を、弱定常性解析の手法により導いた。また実際の回転アーム装置の計測データに対して進行率の補正を行い、既存の風洞試験結果と比較してよく整合する特性が得られることを確認し、本論文で提案する誘導速度場のモデル及び計算手法の妥当性を明らかにした。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編を記載）

Modeling and Numerical Investigation of Aerodynamic Characteristics of a Propeller Circling on a Whirling Arm, Yuto ITOH and Atsushi SATOH, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, in press.