

オブザーバーによるマルチコプター推進系の プロペラトルク推定

Observer based estimation of propeller torque on multicopter propulsion system

○高橋 渉, 佐藤 淳

○ Wataru Takahashi, Atsushi Satoh

岩手大学

Iwate University

キーワード： マルチコプター (Multi Copter),
オブザーバー (Observer), プロペラトルク (Propeller Torque)

連絡先： 〒 020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5
岩手大学大学院 総合科学研究科 理工学専攻 機械・航空宇宙コース
佐藤 淳, Tel: 019-621-6404, E-mail: satsushi@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 産業においてマルチコプターの需要が高まっている. マルチコプターとは無人航空機の一つであり, 3つ以上の独立したローターを用いて飛行する回転翼航空機である. マルチコプターは各ローターの回転速度を調整することで機体の操舵を行うため, 固定翼型の無人航空機に比べ低速移動が可能である. また, ロータで発生する推力と機体重量を等しくすることでホバリングができることも特徴の一つである. ヘリコプターもホバリングが可能であるが, 操舵方法に由来する振動が大きいため, センサーやカメラを搭載する場合防振対策が必要となる. またマルチコプターはヘリコプターに比べ構造が単純である. このような特徴からマルチコプターは他の無人航空機とは差別化されており, 産業への利用拡大が期待される.

飛行中のマルチコプターにおけるトルク特性は, 運転状態や風などの外乱に影響を受け変化する. また, トルク特性の変化により出力トルクが目標トルクに及ばなくなるなどの問題が発生する. これにより, 機体の不安定化が引き起こされると考えられる. よって飛行中の機体のプロペラトルクをリアルタイムで検出することで, 目標トルクに対するサーボ制御が可能となり, 機体の安定化が可能になると考えられる.

しかしながら, 飛行時のプロペラトルクをセンサによってリアルタイムで測定するのは難しい. なぜなら, プロペラトルクを測定するセンサは重量があり, また各ロータに取り付ける必要があるからである. よって, センサを使用せずにプロペラトルクを知ることができれば有用である.

そこで, 本研究ではオブザーバーを用いたプ

ロペラトルクの推定を目的とする。本研究では、推定対象のシステムのモデリング、およびシステムの未知パラメータ同定を行った。また、オブザーバーの設計を行い、MATLAB/Simulink®を用いてオフライン推定を行った。設計したオブザーバーはモータトルクと回転速度からプロペラトルクを推定する。

2. 関連する先行研究

オブザーバーを用いたプロペラトルク推定の先行研究として、Pivano ら¹⁾の船舶におけるプロペラトルク推定オブザーバーの設計が挙げられる。Pivano らは推定対象システムを、非線形な摩擦トルクを含む非線形システムとしてモデリングしている。また、推定対象のシステムに対するプロペラトルク推定オブザーバーを設計し、実機による推定実験によってオブザーバーの有効性を示している。

Pivano らの設計したオブザーバーは固定ピッチプロペラを持つ船舶の推進系を想定したものであるが、固定ピッチプロペラにより推力を得るマルチコプターにおいても応用が可能であると考えられる。

ここで、船舶とマルチコプターの推進系の相違点について次の2つが挙げられる。

- プロペラの逆転の有無
- モータの摩擦トルク特性

船舶においては後退運動を行うためにプロペラを逆転する必要があるが、マルチコプターにおいてその必要はない。また船舶で使用されるモータはマルチコプターで使用されるモータより大きいいため、摩擦トルクは回転速度に依る。それに対しマルチコプターのモータは船舶のモータに比べ小さいため、プロペラ回転速度に依らず、摩擦トルクは一定と考えられる。これらを考慮し、推定対象システムのモデリングを行う。

3. 問題設定

3.1 推定対象のマルチコプター

本研究では enRoute 社の Zion PG QuadCopter PG560 の研究用マルチコプター MACTech のプロペラトルクを推定することを想定する。表1、表2に MACTech に使用されているプロペラ、ブラシレスモータの規格を示す。



Fig. 1 研究用マルチコプター MACTech

Table 1 enRoute 社製 プロペラ

製品名	EXC044
寸法	直径 15× ピッチ 5.5[inch]
重量	20.0[g]

Table 2 enRoute 社製 ブラシレスモータ

製品名	Zion 4631-330KV
寸法	φ46×H31[mm]
重量	157.6[g]
KV 値	330

また、飛行時の運転状態として以下の条件を想定する。

- プロペラ回転速度
 $126 \leq \omega \leq 609[\text{rad/s}]$
- 進行率 0(ホバリング状態)

ω の範囲は、本研究で使用する推進系の最小回転速度および最大回転速度としている。

3.2 プロペラ推進系のダイナミクス

図2にプロペラ推進系のダイナミクスを図示する。モータは目標回転速度 ω_c に基づきプロペラシャフトに加えられるモータトルク Q_m を発生させる。モータ回転速度 ω はプロペラによるモータ負荷 Q_p により影響される。シャフトのダイナミクスはモータの軸受けで発生する摩擦を考慮し、式(1)のように表される。

$$J_a \dot{\omega} = Q_m - Q_p - Q_f \quad (1)$$

ここで、 J_a はプロペラおよびモータ回転系の慣性モーメントである。また、 Q_f は摩擦トルクである。

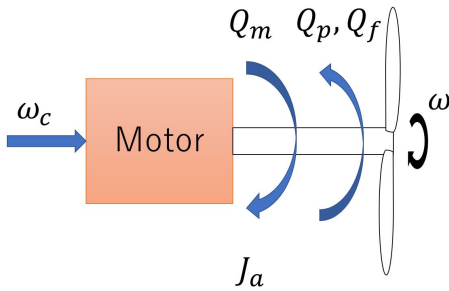


Fig. 2 プロペラ推進系のダイナミクス

4. 推定構造

本研究で用いるオブザーバーの推定構造について説明する。プロペラはシャフトとつながり、シャフトはモータから動力を得ている。モータは目標回転速度 ω_c に基づきモータトルク Q_m を発生する。モータトルク Q_m 、モータ回転速度 ω 、摩擦トルク Q_f が測定可能であるとし、オブザーバーに Q_m 、 ω 、 Q_f を与えることでプロペラトルク推定値 \hat{Q}_p と回転速度推定値 $\hat{\omega}$ を得る。推定対象のシステムは以下のように与えられる。

$$J_a \dot{\omega} = Q_m - Q_p - Q_f \quad (2)$$

$$\dot{Q}_p = -\frac{1}{T_p} Q_p \quad (3)$$

ここで、 T_p は時定数を表す。式(3)はオブザーバーにより Q_p を推定するために導入されたテクニカルなシステムであり、 Q_p を外乱とみなしダイナミクスを持つと仮定している²⁾。また、式(2)、(3)に対するオブザーバーがオブザーバーゲイン L_1 、 L_2 を使用し以下のように表される。

$$J_a \dot{\hat{\omega}} = Q_m - \hat{Q}_p - Q_f + L_1(\omega - \hat{\omega}) \quad (4)$$

$$\dot{\hat{Q}}_p = -\frac{1}{T_p} \hat{Q}_p + L_2(\omega - \hat{\omega}) \quad (5)$$

4.1 システムの状態空間表現

推定対象のシステムの線形性は摩擦トルクの線形性に依存する。ここで、摩擦トルク Q_f について以下のように仮定する。

- 摩擦トルク Q_f は線形であり、ステップ状の入力とする

上記の仮定により、式(2)、(3)の推定対象のシステムは線形システムとして扱うことができる。推定対象のシステムは入力を $u = [Q_m \ Q_f]^T$ として状態空間を用いて以下のように表される。

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx = \omega \quad (6)$$

各行列は以下ようになる。

$$x = \begin{bmatrix} \omega \\ Q_p \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & -1/J_a \\ 0 & -1/T_p \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/J_a & -1/J_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

また、オブザーバーが式(4)および式(5)より以下のように表現される。

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (7)$$

ここで L はゲインベクトルであり、以下のようになる。

$$L = \begin{bmatrix} L_1/J_a \\ L_2 \end{bmatrix}$$

以上よりオブザーバーの構造を図3に表す。

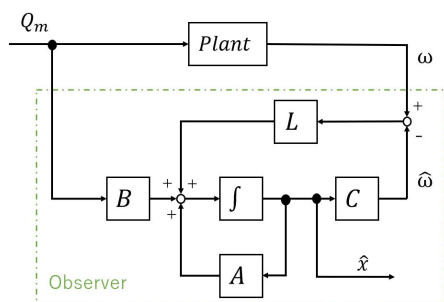


Fig. 3 プロペラトルク推定の構造

5. 推定に必要な情報

5.1 慣性モーメント J_a の同定

モータの回転部分およびプロペラの慣性モーメントを同定する。SOLID WORKS 2016®を使用しモータ回転部分およびプロペラをCADデータ化し、回転系慣性モーメントの同定を行った。回転系慣性モーメントを表3に示す。

Table 3 回転系慣性モーメント

$J_a[kgm^2]$	1.96×10^{-4}
--------------	-----------------------

5.2 摩擦トルク項測定

プロペラトルク推定のために、本研究で用いるモータ軸受けの摩擦特性を知る必要がある。摩擦特性を得るために以下の実験を行った。

5.2.1 摩擦トルク項測定方法

慣性のみでモータを回転させる。このとき、モータの軸受けの摩擦による反トルクにより回転速度は減少する。ここでは空気抵抗を無視する。このときの時間に対する回転速度を測定し、

摩擦トルクがした仕事量を中心差分法により計算することによって摩擦トルクのパラメータを測定する。

5.2.2 摩擦トルク項測定実験結果

実験によって得られた時間に対する回転速度の変化を図4に示す。本研究で扱うマルチコプターを飛行させる際のモータの回転速度を $126 \leq \omega \leq 609[rad/s]$ であるとし、その範囲で最小二乗法を用いて線形近似を行う。

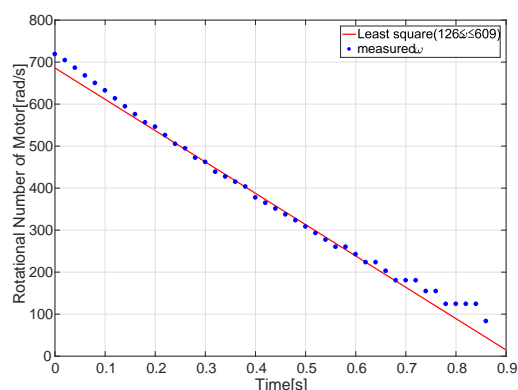


Fig. 4 回転速度の時間変化

以上の結果より、摩擦トルクを計算する。表4に $\omega = 300$ での計算結果を示す。計算結果より本研究で扱うモータは、回転速度が $126 \leq \omega \leq 609[rad/s]$ のときの摩擦トルクは一定であることとする。

Table 4 摩擦トルク計算結果

ω	Q_f
300	0.01260

5.3 オフライン推定の準備

オフライン推定を行うために、オブザーバーに与えられる信号である回転速度 ω 、およびモータトルク Q_m を事前に求める必要がある。また ω に対する Q_p を求め、プロペラトルク推定値 \hat{Q}_p との比較を行う。 ω と Q_m 、および Q_p を得

るために以下の実験を行った。

5.3.1 測定方法

モータが駆動しているとき、電源電圧装置からモータへ供給電圧を増減させると、それに応じ回転速度も増減する。本研究で使用するモータ、およびESCについては、モータへの供給電圧における回転数と軸トルク Q_{m_f} の関係が鈴木³⁾により測定されている。電圧の変化範囲を13～22Vに限定すると、式(8)により任意の電圧 V 、および回転速度 $\omega[\text{rad/s}]$ における軸トルク Q_{m_f} を求めることができる。これから前節で実験から求めた摩擦トルク Q_f を足し合わせた値がモータトルク Q_m となる。また、進行率が0のときのトルク係数 C_Q が鈴木³⁾によって求められており、 D をプロペラ直径、 ρ を気体密度とすると、式(9)より ω に対する Q_p を求められる⁴⁾。ここで得られた Q_p と推定プロペラトルク \hat{Q}_p の比較を行う。

$$\begin{aligned} Q_{m_f} &= Q_m - Q_f \\ &= -0.003537\omega \\ &\quad + 0.1175(V - 13.0) + 1.525 \end{aligned} \quad (8)$$

$$Q_p = \frac{1}{4\pi^2} \rho \omega^2 D^5 C_Q \quad (9)$$

Table 5 プロペラパラメータ

Parameter	Value	Parameter	Value
$\rho[\text{Kg/m}^3]$	1.205	$D[\text{m}]$	0.381
C_Q	5.2×10^{-3}		

5.4 入力値測定結果

13～22Vの範囲で電圧を正弦波状に変化させモータに供給した。そのときの $\omega[\text{rad/s}]$ および Q_m を図5に示す。得られた ω 、 Q_m をオブザーバーに与え、プロペラトルクの推定を行う。

6. オフライン推定

実機から得られたデータを使用して、プロペラトルクのオフライン推定を行う。シミュレー

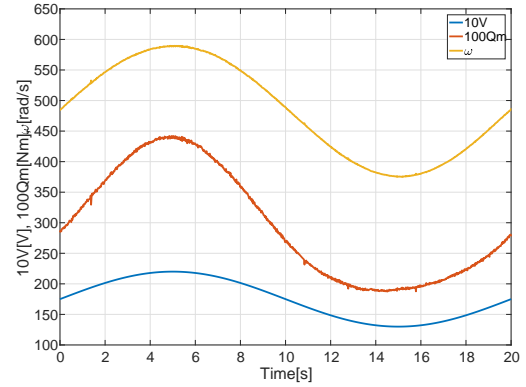


Fig. 5 供給電圧に対する回転速度とモータトルクの変化

ションで使用した各パラメータを表6に示す。

Table 6 オブザーバーパラメータ

Parameter	Value
$J_a[\text{kgm}^2]$	1.96×10^{-4}
$Q_f[\text{Nm}]$	1.26×10^{-2}
$T_p[\text{s}]$	10
$\text{sampletime}[\text{s}]$	0.020
L_1	5.08×10^{-3}
L_2	-3.75×10^{-2}

ここでオブザーバーゲイン L_1 、 L_2 については以下の条件を満たすように決定されている。

- 回転速度の推定において定常な回転速度に対する推定値の整定時間が0.45s以内

本研究で使用するモータ、プロペラ、ESCは回転速度の整定時間が0.45s程度である。よって、定常な回転速度の推定において、推定値の整定時間を0.45s以内にとすることとした。

図6および図7にそれぞれ回転速度とプロペラトルクの推定結果を示す。また、図8および図9にそれぞれ回転速度とプロペラトルクの推定誤差の時間変化を示す。オブザーバーはシミュレーション開始直後に起動している。各推定値の初期値は0に設定しているが、初期推定誤差が時間経過とともに0に収束していることが確認される。また推定値は発散していないため、オ

ブザーバーによる推定ができていると考えられる。

7. 結言

本研究では、オブザーバーを用いたプロペラトルクの推定を目的とした。また、推定に必要な各パラメータの同定実験を行った。さらにプロペラ回転速度が $126 \leq \omega \leq 609[\text{rad/s}]$ の範囲のとき摩擦トルクは一定であるとし、推定対象システムのモデリングを行った。また、オブザーバーへ与えるモータトルクと回転速度を事前に測定することで、オフライン推定を行い、オブザーバーの有効性を検証した。

本稿ではオフライン推定を行ったが、今後はリアルタイムでモータトルクと回転速度の測定を行い、オンライン推定ができるか検証を行う。

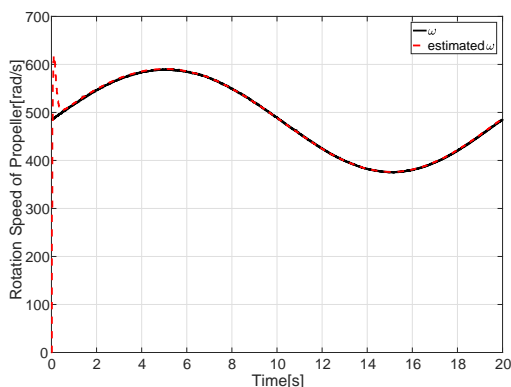


Fig. 6 回転速度の推定結果

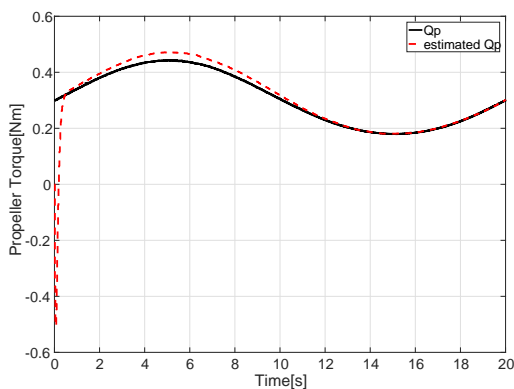


Fig. 7 プロペラトルクの推定結果

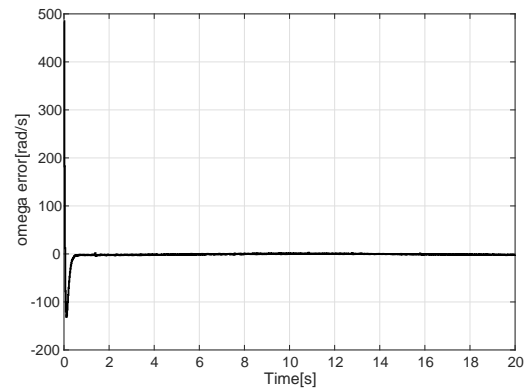


Fig. 8 回転速度の推定誤差

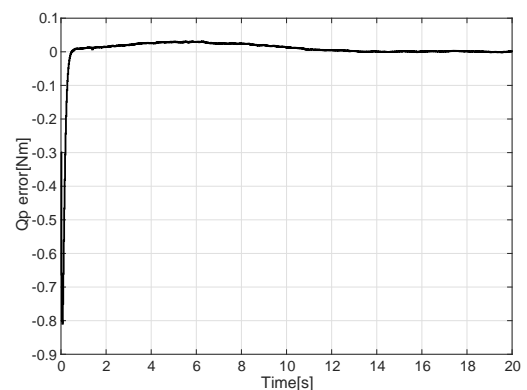


Fig. 9 プロペラトルクの推定誤差

参考文献

- 1) L.Pivano, O.N.Smogeli, "Marine Propeller Thrust Estimation in Four-Quadrant Operations", 45th IEEE Conference on Decision and Control, 2007
- 2) L.Pivano, T.A.Johansen, O.N.Smogeli "A Four-Quadrant Thrust Controller for Marine Propellers with Loss Estimation and Anti-Spin: Theory and Experiments", SNAME, Marine Technology, Volume 46, Number 4, 2009, 229-242
- 3) 岩手大学, 鈴木昌寛, "マルチコプター推進系の特性計測とホバリング効率解析", 卒業論文, 2017, 17-18, 21-23
- 4) John B. Brandt and Michael S. Selig, "Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers", 2011