

電源電圧の変化によるブラシレス DC モータのトルク特性変動 に対する補償方法

A compensation method for a torque property of brushless DC motors under supply voltage variation

○佐藤 大雅*, 佐藤 淳**

○ Taiga Sato*, Atsushi Satoh**

*岩手大学大学院, **岩手大学

Graduate School of Iwate University, **Iwate University

キーワード : ブラシレス DC モータ, トルク特性, モータ等価回路

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 E-mail: satsushi@iwate-u.ac.jp

1. 背景

岩手大学佐藤淳研究室では、ドローン等に用いられる小型プロペラのトルクの動的推定を行うために Fig. 1 の回転アーム装置を用いる実験装置を開発している。回転アームの先端には計測対象であるプロペラおよびプロペラ駆動用のブラシレスモータ系が搭載されており、モータ系はアーム上に置かれたリチウムポリマーバッテリーを電源としている。

前述のトルク推定実験を行うに当たっては実験中にモータのトルク特性が変動しないようにすることが重要である。しかし、モータの電源であるバッテリーの端子電圧は放電に伴い低下するため、本研究では電源電圧の変化に伴うトルク特性の変動をスロットル操作により補償することを考える。

ブラシレス DC モータのスロットルは、モータを駆動する ESC (Electric Speed Controller)

内でモータの各相を駆動する平均電圧を PWM 変調により変化させることで行われる。しかしモータのインダクタンス特性のため、トルク特性はスロットル値によって顕著な非線形性を示す。

そこで本研究ではトルク特性の非線形性を考慮した、電源電圧変動の影響を補償するスロットル値の決定方法を提案し、そのために必要なモータの特性パラメータを決定する。



Fig. 1 回転アーム装置

2. スロットル値の決定方法

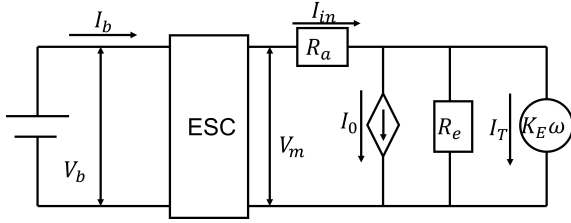


Fig. 2 ブラシレス DC モータの等価回路

Fig. 2 の等価回路において，ESC は電源側回路（左側）の電圧でスイッチングを行い，モータ側回路（右側）への平均印加電圧 V_m を PWM により変化させる．そのデューティ比はスロットル値 ($0 \leq T \leq 1$) に応じて決まり，線形なスロットル特性の場合 $V_m = TV_b$ となる．

またトルクの発生に寄与する電流成分 I_T と入力電流 I_{in} の間には次の関係が成り立つ．

$$I_T = I_{in} - I_0 - \frac{K_E}{R_e} \omega \quad (1)$$

ESC でのスイッチングによる電力損失を無視すれば，ESC の流入出電力の釣り合いから平均入力電流は次のように表せる．

$$I_{in} = \frac{I_b}{T} \quad (2)$$

スロットル値（すなわちデューティ比）が十分に大きくモータ系電流のリップルが小さい運転状態においては， I_T と角速度 ω は次の線形な関係（線形特性モデル）に従う¹⁾．

$$\omega_{lin}(I_T, V_b, T) = \frac{-R_a R_e}{K_E(R_a + R_e)} \left(I_T + I_0 - \frac{V_b}{R_a} T \right) \quad (3)$$

ここでシンク電流 $I_0 > 0$ ，巻線抵抗 $R_a > 0$ ，損失抵抗 $R_e > 0$ ，逆起電力定数 $K_E > 0$ である．

式(3)より，負荷トルク（すなわち I_T ）が一定であるとき ω は T に比例する．そのため線形なトルク特性を持つ運転領域においては，モータ印加電圧が $V_d (\leq V_b)$ であるときと同じ（線形な）特性を得るには，スロットル値

$$T_{lin} = \frac{V_d}{V_b} \quad (4)$$

と選べば良い．

一方，スロットル値が小さくモータ系電流のリップルが大きくなる運転状態では式(3)のような線形な関係は成立しなくなる．そこでそのような運転領域でのトルク特性を，非線形変動 $\Delta\omega$ を用いた加法的変動モデルとして表現する．

$$\omega_{nonlin}(I_T, V_b, T) = \Delta\omega(I_T, V_b, T) + \omega_{lin}(I_T, V_b, T) \quad (5)$$

本研究では式(5)のようなトルク特性を持つ運転領域において，適切なスロットル値の補正を行うことによりトルク特性を線形化することを考える．これにより V_b の変化による特性変動の補償が容易になる．

所望の線形化を達成するスロットル値 \hat{T} は $\omega_{lin}(I_T, V_d, 1) = \omega_{nonlin}(I_T, V_b, \hat{T})$ を満たすものである．これは式(3)，(5)より次式を解いて求まる．

$$\frac{R_e}{K_E(R_a + R_e)} (V_b \hat{T} - V_d) + \Delta\omega(I_T, V_b, \hat{T}) = 0 \quad (6)$$

そのため提案するスロットル値の補償を実現するためには，モータの特性パラメータ (R_a, R_e, I_0, K_E) および $\Delta\omega(I_T, V_b, T)$ の同定が必要になる．

3. 特性パラメータの決定

DC モータの等価回路モデルより以下の関係が成り立つ²⁾．

$$V_m = R_a I_{in} + K_E \omega \quad (7)$$

$$(I_{in} - I_0) R_e = K_E \omega \quad (8)$$

そこでモータを運転して V_m, I_{in}, ω を計測し，そのデータを用いて式(7)，(8)の関係から R_a, K_E, R_e, I_0 を決定する．なお計測の際には $I_{in} = I_b$ となるよう $T = 1$ で運転を行った．

3.1 モータ特性試験機

運転中のデータ取得には Fig. 3, 4 のモータ特性試験機を使用した。モータには渦電流ブレーキを接続することができ、ブレーキディスクと永久磁石の距離を調整することによりブレーキのトルク特性を変更できる。

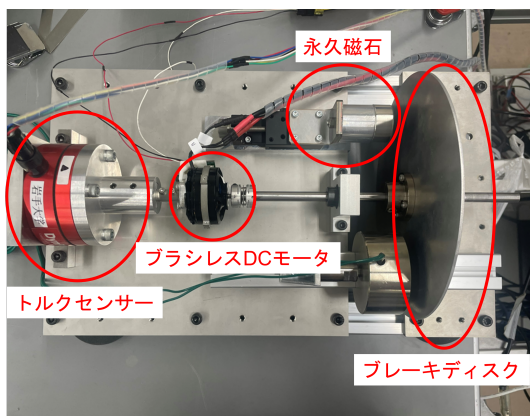


Fig. 3 モータ特性試験機

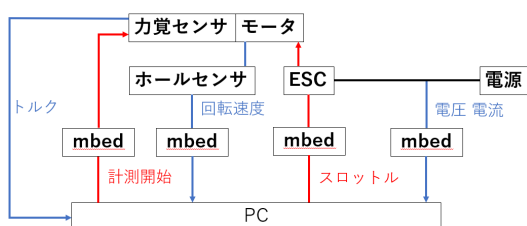


Fig. 4 モータ特性試験機模式図

今回使用したモータとその諸元を Fig. 5, Table 3.1 に示す。



Fig. 5 ブラシレス DC モータ enRoute Zion 4631-330KV

Table 1 Zion 4631-330KV 諸元

項目	数値
寸法	$\phi 46 \times H31$ [mm]
重量	149[g]
KV 値	330
極数	24

3.2 無負荷実験の計測データ

回転アーム上のプロペラ駆動用のモータのバッテリーが 6 セル公称電圧 22.2[V] であるから、バッテリーの電圧変動を考慮し、定電圧電源装置の設定電圧 (V_b) は表 2 のように決定した。

Table 2 計測結果

V_b [V]	V_m [V]	I_b [A]	ω [rad/s]
18.00	17.97	0.6898	624.3
20.33	20.29	0.7318	706.2
22.66	22.62	0.7575	787.2
25.00	24.96	0.7862	868.3

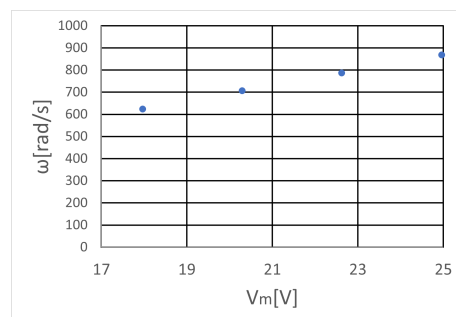


Fig. 6 モータ印加電圧と角速度

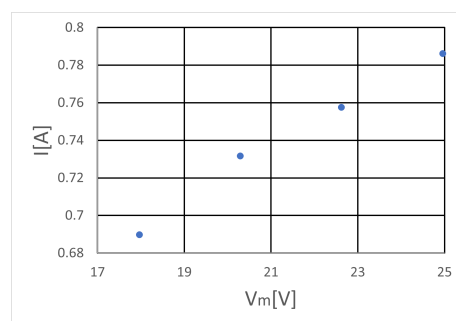


Fig. 7 モータ印加電圧と電流

3.3 巻線抵抗及び逆起電力定数の決定

式(9)を満たす定数 R_a , K_E を求めることを考える.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & \omega_1 \\ \vdots & \vdots \\ I_n & \omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_a \\ K_E \end{bmatrix} \quad (9)$$

$n > 2$ のとき式(9)が解を持つとは限らないが, その場合は最小二乗解を求める. 今回のデータからは R_a , K_E は以下のように決定された.

巻線抵抗 R_a [Ω]	逆起電力定数 K_E
0.0926	0.0287

3.4 損失抵抗及びシンク電流の決定

式(10)を満たす定数 R_e , I_0 を求めることを考える.

$$\begin{bmatrix} K_E \omega_1 \\ \vdots \\ K_E \omega_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & -1 \\ \vdots & \vdots \\ I_n & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_e \\ R_e I_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$n > 2$ のとき式(10)が解を持つとは限らないが, その場合は最小二乗解を求める. 今回のデータからは R_e , I_0 は以下のように決定された.

巻線抵抗 R_e [Ω]	シンク電流 I_0 [A]
73.14	0.4484

4. スロットルの校正

ESCへのスロットル信号のデューティ比とモータ駆動電圧のデューティ比は比例関係にあると思われるが, スロットル値を $0 \leq T \leq 1$ に正規化して取り扱うために $T = 1$ および $T = 0$ に対応するスロットル信号のパルス幅を決定する.

4.1 $T = 1$ に対応するパルス幅の決定

無負荷状態でパルス幅を1[ms]ずつ増やし, 角速度を計測した結果を Fig. 8 に示す. 角速度が

飽和している ω の平均と単調増加している点の近似直線との交点を求め, $T = 1$ に対応するパルス幅を求めた. 今回のモータ系ではパルス幅は1913.41[ms]と決定した.

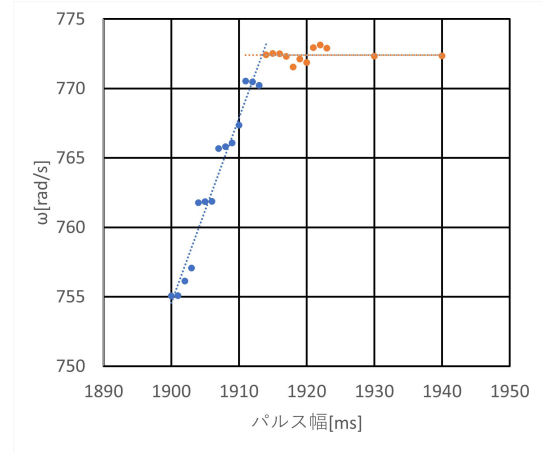


Fig. 8 $T = 1$ に対応するパルス幅の決定

4.2 $T = 0$ に対応するパルス幅の決定

磁石とディスクの距離を6[mm], 磁石の中心とディスクの軸との距離を12[mm]に設定し, パルス幅を1200[ms]から1900[ms]まで100[ms]ずつ増やしたときの角速度の計測結果を Fig. 9 に示す. 最小二乗近似直線と $\omega = 0$ の軸との交点から $T = 0$ に対応するパルス幅を求めた. 今回のモータ系ではパルス幅は1105.67[ms]と決定した.

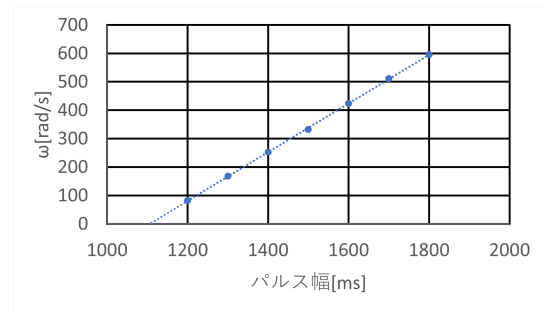


Fig. 9 $T = 0$ に対応するパルス幅の決定

4.3 校正スロットル値

$T = 1$, $T = 0$ のときのパルス幅の値から, 規格化されたスロットルの値を次のように決定

した.

$$T = \frac{\text{スロットル信号のパルス幅 [ms]} - 1105.67}{1913.41 - 1105.67} \quad (11)$$

5. 結言

本研究では、電源電圧の変化によるブラシレス DC モータのトルク特性変動に対する補償方法を提案した。また、モデリングに必要なパラメータを決定した。今後は様々な (I_T, V_b, T) における ω を計測データからモデリングし、 ω_{lin} との差から $\Delta\omega$ のモデリングをする。

参考文献

- 1) 見城尚志・佐渡友 繁, 「メカトロニクスのモーター技術」技術評論社 (2020)
- 2) 見城尚志, 「使いこなす DC モータ技術」, 日刊工業新聞社 (2008)