

5 相ステッピングモータの共振周波数自動推定システムの開発 Development of an Automatic Estimation System of Resonance Frequency for 5-phase Stepping Motor

○佐藤諒*, 松尾健史*, 三浦武*, 田島克文*, 佐藤靖雄**

○Ryo Sato*, Kenshi Matsuo*, Takeshi Miura*, Katsubumi Tajima*, Yasuo Sato**

*秋田大学, **オリエンタルモーター

*Akita University, **Oriental Motor Co., Ltd.

キーワード : 5 相ステッピングモータ(5-phase stepping motor), 共振周波数(resonance frequency)
自動推定システム(automatic estimation system)

連絡先 : 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1 秋田大学大学院 理工学研究科
松尾 健史, Tel. : (018)889-2332, Fax. : (018)837-0406, E-mail : matsuo@gipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

ステッピングモータはパルス信号によって回転角度や回転速度の制御が行える制御用モータである¹⁾. 現在は OA 機器や FA 機器を中心に, 様々な分野において広く使用されている²⁾.

しかし, ステッピングモータは駆動時に特定のパルス周波数(共振周波数)で振動が大きくなる共振現象¹⁾が存在し, 実用上の問題となっている. その対策のため, まず共振が発生する共振周波数を知ることが必要である.

先行研究として, 2 相ステッピングモータでは文献³⁾において, 固有周波数を 2 次系モデルに近似して推定している. さらに固有周波数は, 回転子に装着される慣性負荷の慣性

モーメントの大きさによって変化するため, それに対応した振動抑制法が提案されている³⁾. なお, この 2 次系モデルの共振周波数は, 固有周波数と減衰率から求めることができる.

一方, 5 相ステッピングモータでは低域振動を除去する駆動法の提案⁴⁾がなされているが, 共振周波数の発生傾向については十分な研究がなされていない. そのため, 5 相ステッピングモータにおいて共振周波数を推定するシステムの開発が求められている.

本研究では, 5 相ステッピングモータにおいて慣性負荷の慣性モーメントの大きさを与えた場合, 共振周波数を自動推定するシステムを開発し, その性能を検討する.

2. 共振の自動推定システム

2.1 システムの構成

提案する5相ステッピングモータの共振周波数自動推定システムの構成を図1に示す。これは、回転子に装着される負荷の慣性モーメント J_l の値を入力したとき、共振周波数の推定値 f_{re} が出力されるシステムである。また、共振周波数はモータの駆動法によって変化するため、フルステップ駆動時とマイクロステップ駆動時の推定システムの構築を行う。

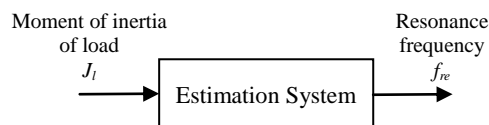


図1 共振周波数の自動推定システム

Fig. 1 Automatic estimation system for resonance frequency.

2.2 推定法

共振周波数を推定する方法を提案する。本研究では文献3)に従い、正弦波状の分布を持つ角度—トルク特性を正負のピーク付近を通る直線で近似して線形化⁵⁾した場合に、トルク平衡点 θ_e を入力、回転子角度 θ を出力とみなしたときの2次系伝達関数 $P(s)$ としてモデル化される。

$$P(s) = \frac{c/J}{s^2 + (D/J)s + c/J} \quad (1)$$

(1)式の J は回転子の慣性モーメント、 D は制動係数、 c は角度—トルク特性の傾きから得られる定数である。ここで、回転子に慣性負荷が装着される場合を想定した伝達関数 $P_l(s)$ は、次のように書ける。

$$P_l(s) = \frac{c/(J_0 + J_l)}{s^2 + \{D/(J_0 + J_l)\}s + c/(J_0 + J_l)} \quad (2)$$

(2)式の J_0 は無負荷時の慣性モーメント、 J_l は慣性負荷の慣性モーメントである。この(2)式と2次系の伝達関数の一般形⁶⁾を照らし合わせると、固有周波数 $\omega_{nl} = \sqrt{c/(J_0 + J_l)}$ 、および減衰率 $\zeta = D/2\omega_{nl}(J_0 + J_l)$ が求められる。これらから、2次系の一般形より求め

られる共振周波数 f_r は次の式で求められる。

$$f_r = \frac{\omega_{nl}}{2\pi} \sqrt{1 - 2\zeta^2}$$

すなわち、 f_r は次の(3)式となる。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{(J_0 + J_l)} \left\{ 1 - \frac{D^2}{2c(J_0 + J_l)} \right\}} \quad (3)$$

よって、(3)式は J_0 、 J_l 、 D 、 c という4つのパラメータから求めることができる。ここで J_l は慣性負荷の慣性モーメントの値であるため、回転子に装着される慣性負荷によって変化する値である。今回は無負荷の場合、すなわち $J_l = 0$ の場合において、システム同定により J_0 、 D 、 c の3つのパラメータの値を決定する。

次に、実際の回転子に装着される慣性負荷の慣性モーメント J_l より、(3)式の f_r からモータ駆動時に生じる共振周波数 f_{re} の推定法を提案する。ここで、駆動法により共振周波数の値が変化するため、本提案システムでは、フルステップ駆動時の共振周波数 f_{rel} は、 $f_{rel} = f_r$ として、

$$f_{rel} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{(J_0 + J_l)} \left\{ 1 - \frac{D^2}{2c(J_0 + J_l)} \right\}} \quad (4)$$

という式から推定し、マイクロステップ駆動

時の共振周波数 f_{re2} は, $f_{re2} = 5f_r$ として,

$$f_{re2} = \frac{5}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{(J_0 + J_l)} \left\{ 1 - \frac{D^2}{2c(J_0 + J_l)} \right\}} \quad (5)$$

という式から推定する. なお, f_{re1} および f_{re2} の推定値の妥当性については 3 章で述べる.

以上をまとめると, 図 1 の自動推定システムから, 共振周波数の推定値は, 以下のような手順で求められる.

- I. 回転子に慣性負荷が装着されていない場合, すなわち無負荷時 ($J_l = 0$) の慣性モーメント J_0 , 制動係数 D , 角度—トルク特性の傾きから得られる定数 c のパラメータ値を予め(2)式より同定しておく.
- II. 負荷の慣性モーメント J_l の値を入力する.
- III. I, II の値から共振周波数の推定値 f_{re} は, フルステップ駆動時は(4)式を用いて f_{re1} が, あるいはマイクロステップ駆動時は(5)式を用いて f_{re2} が求められ, 出力される.

2.3 自動推定システムの構築

前節の手順 I で述べたように, 自動推定システムを構築するためには予めパラメータを求める必要があるため, パラメータ J_0 , D , および c の値をシステム同定により決定する.

今回は無負荷時, すなわち $J_l = 0$ の場合の 5 相ステッピングモータをフルステップ駆動させた場合に得られる角度の時間変化(ステップ応答)からシステム同定を行う. 角度の時間変化の取得に用いたシステムを図 2 に示す.

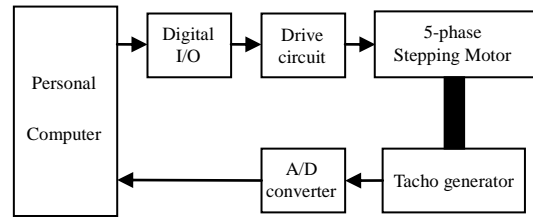


図 2 ステップ応答取得のための実験システム

Fig. 2 Experimental system for obtained step response.

ここではパーソナルコンピュータ(PC)から 1 パルス分の信号がデジタル I/O を介して駆動回路へと出力される. このパルス信号に従ってステッピングモータの各相に励磁電流が流され, モータが駆動する.

モータの回転速度は回転子に接続されたタコジェネレータによって取得され, 電圧値として A/D 変換器を介し, PC に出力される.

PC 内では得られた電圧値を回転速度に変換し, その累積値を計算することによって角度の時間変化を求めている.

使用したステッピングモータはオリエンタルモーター社製 PKP566N28B2 であり, 5 相ハイブリッド形ステッピングモータとなっている. その仕様を表 1 に示す. 使用したタコジェネレータは多摩川精機社製 TS680N1E3 であり, 出力電圧は $3V/1000\text{min}^{-1}$ となっている.

今回はフルステップ駆動時において, 1 基本ステップ角駆動した場合に実際のモータ駆動で得られるステップ応答波形に, (2)式から求められるステップ応答波形が最も近くなるように J_0 , D , c のパラメータの値を決定する. その結果を図 3, および表 2 に示す.

ここで計算値は、実測値に最も近い応答を最小二乗法によって導出したものであり、これは、Python Scipy `scipy.optimize.least_squares` ‘trf’:Trust Region Reflective algorithm⁷⁾を用いている。

以上のように、手順 I で予め必要であるパラメータが求められ、共振周波数の自動推定システムを構築した。このシステムを用いることで、慣性負荷の慣性モーメントの値、およびモータの駆動法を与えたときに共振周波数の推定値が出力される。

3. 検証実験

2 章で提案した自動推定システムの妥当性を検討する必要がある。そのため本章では、実際の速度振動特性を測定し、そこから共振周波数の実測値を求める。この実測値と推定値を比較することで、妥当であるかどうか検証する。

3.1 実験システムの構成

本章で用いた実験システムを図 4 に示す。ここでは発振器で入力パルスを設定することで、パルス信号が駆動回路へと出力される。このパルス信号に従ってステッピングモータの各相に励磁電流が流され、モータが駆動する。

モータの回転速度は回転子に接続されたタコジェネレータによって取得され、低域通過フィルタ(LPF)を介し、オシロスコープに振動成分電圧として出力される。

使用したステッピングモータ、およびタコジェネレータは 2.3 節で用いたものと同様である。また、使用した LPF のカットオフ周波

表 1 5 相ステッピングモータの仕様

Table 1 Specification of 5-phase stepping motor.

Rated current	2.8 A
Holding torque	0.81 N·m
Step angle	0.72 deg

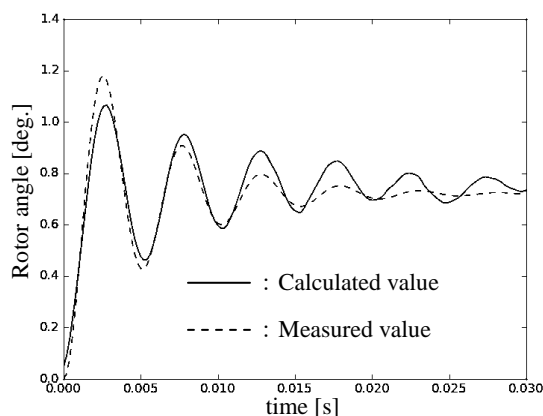


図 3 フルステップ駆動において測定されたステップ応答波形とモデルで計算された応答との比較

Fig. 3 Comparison of the actual step response and the response calculated from the model in full step drive.

表 2 システム同定によって求められたパラメータ

Table 2 Parameters obtained by system identification.

Moment of inertia at no load J_0	$2.22 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 / \text{rad}$
Damping coefficient D	$7.66 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$
Constant obtained from the slope of θ - T characteristic c	$33.8 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$

数は 7.2kHz となっている。

3.2 実験条件

モータをフルステップ駆動させた場合と、マイクロステップ駆動させた場合で速度振

動特性を測定する。マイクロステップ駆動時は基本ステップ角の分割数を 40 に設定して測定する。

速度振動特性の取得は図 4 の発振器で入力パルスの周波数を変化させ、モータの回転速度が変化した場合の振動成分電圧を測定し、その peak to peak 値を測定する。今回はパルス周波数の測定範囲を 0.01kHz から 2kHz まで変化させている。パルス周波数のサンプリング間隔は、共振点の±100Hz 範囲を 1Hz 刻み、それ以外の範囲を 10Hz ずつ変化させて測定する。

また、回転子に装着される慣性負荷の慣性モーメントの値を変化させた場合に得られる振動特性の変化について比較する。今回は表 3 に示されるように、無負荷の場合と 4 つの慣性負荷を装着した場合で振動特性を取得し、各振動特性を比較する。

3.3 実験結果

回転子に装着された慣性負荷の慣性モーメント J_l の値が変化した場合において、フルステップ駆動を行った場合に測定された速度振動特性を図 5 に示す。同様に、 J_l の値が変化した場合において、マイクロステップ駆動を行った場合に測定された速度振動特性を図 6 に示す。ここで、図 6 は図 5 よりも縦軸のレンジが小さくなっていることに注意されたい。図 5 および図 6 を比較すると、図 6 では図 5 で見られた低域での振動がほとんど見られず、図 5 よりも振幅の値が非常に小さくなっていることがわかる。これはマイクロステップ駆動による基本ステップ角の分割により、振動が抑制されているためである。

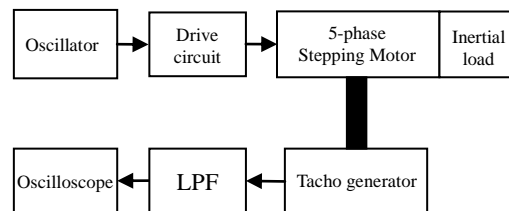


図 4 速度振動特性測定のための実験システム

Fig. 4 Experimental system for measuring speed-resonance characteristics.

表 3 慣性負荷の慣性モーメント J_l

Table 3 Moment of inertia J_l of inertial load.

Load	Moment of inertia J_l [$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$]
no Load	0
Load 1	341×10^{-7}
Load 2	693×10^{-7}
Load 3	1040×10^{-7}
Load 4	1740×10^{-7}

また、図 5 から求められたフルステップ駆動時の共振周波数の実測値 f_{nm1} 、および図 6 から求められたマイクロステップ駆動時の共振周波数の実測値 f_{nm2} の値を表 4 に示す。 f_{nm1} および f_{nm2} の値を比較すると、 f_{nm2} が f_{nm1} の約 5 倍の大きさになるという結果が得られた。こちらは 5 相ステッピングモータであるため、約 5 倍という数値が得られたものと考えられる。

次に前章の手順に従い、共振周波数の推定値を求める。今回は 2.3 節の表 2 において求められた J_0 、 D 、 c の 3 つのパラメータの値、および表 3 の J_l の値を用いて、フルステップ駆動時の推定値、およびマイクロステップ駆動時の推定値を計算によって求める。(4)式から求められるフルステップ駆動時の共振周波数の推定値 f_{re1} 、および(5)式から求められ

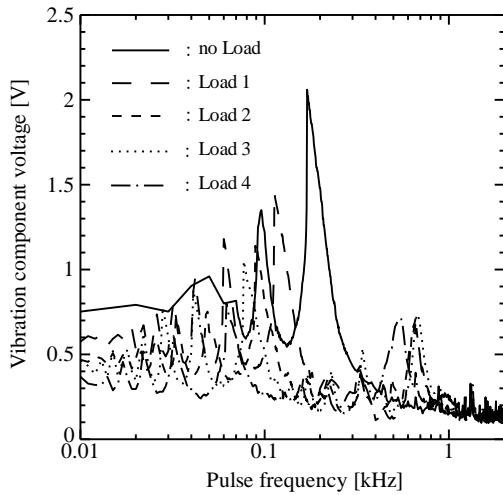


図5 フルステップ駆動における速度振動特性

Fig. 5 Speed-resonance characteristics in full-step drive.

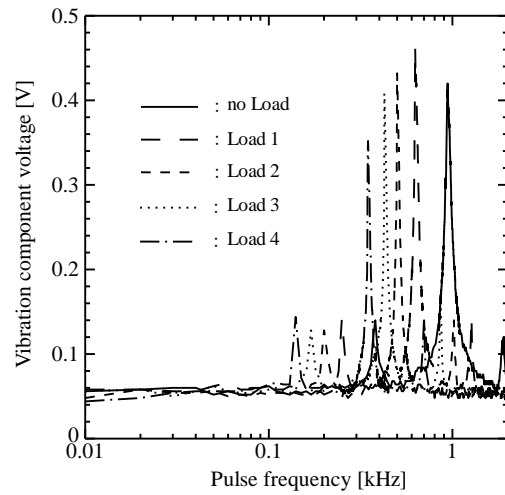


図6 マイクロステップ駆動における速度振動特性

Fig. 6 Speed-resonance characteristics in micro-step drive.

表4 慣性モーメント J_l と共振周波数 f_{rm} および f_{re} の関係

Table 4 Relation between moment of inertia J_l and resonance frequencies f_{rm} and f_{re} .

Moment of inertia J_l [$N \cdot m \cdot s^2 / rad$]	Measured value		Estimated value	
	Resonance frequency (full-step drive)	Resonance frequency (micro-step drive)	Resonance frequency (full-step drive)	Resonance frequency (micro-step drive)
	f_{rm1} [Hz]	f_{rm2} [Hz]	f_{re1} [Hz]	f_{re2} [Hz]
0	172	941	193	963
341×10^{-7}	113	627	122	612
693×10^{-7}	91.0	500	96.3	481
1040×10^{-7}	77.0	426	82.1	410
1740×10^{-7}	62.0	347	65.9	330

るマイクロステップ駆動時の共振周波数の推定値 f_{re2} の値を、実測値と同様に表 4 に示す。

表 4 より、共振周波数の実測値と推定値を比較する。最初は無負荷の場合を比較すると、 f_{rm1} は 172Hz, f_{rm2} は 941Hz, f_{re1} は 193Hz, f_{re2} は 965Hz となっており f_{rm1} と f_{re1} , f_{rm2} と f_{re2} が近い値になるという結果が得られた。

次に負荷が装着された場合も比較すると、無負荷の場合と同様の結果が得られた。

このことからフルステップ駆動時、およびマイクロステップ駆動時の推定値が実測値に近い値になるという結果が得られた。そのため、今回提案した自動推定システムは妥当であることが示された。

4. おわりに

本研究では、5 相ステップモータにおける慣性負荷の慣性モーメントの値から、共振周波数を自動推定するシステムを提案し、

その妥当性について実験で検討した。その結果、フルステップ駆動、およびマイクロステップ駆動のそれぞれにおいて、求められた推定値と実測値が近い値であったため、提案した自動推定システムが妥当であるということが示された。

今後の課題としては、今回は慣性負荷の慣性モーメント J_l の大きさが判明している場合の自動推定システムであったため、 J_l の大きさが明確でない場合における共振周波数の自動推定システムの開発が挙げられる。

参考文献

- 1) 百目鬼英雄：ステッピングモータの使い方，工業調査会，9/29 (1993)
- 2) 坂本正文：ステッピングモータの使い方，オーム社，1/7 (2003)
- 3) 三浦武，谷口敏幸，百目鬼英雄：前置補償要素の適用によるステッピングモータのマイクロステップ駆動時の回転子振動の抑制，電気学会論文誌 D, **120-12**, 1462/1470 (2000)
- 4) 百目鬼英雄：五相ステッピングモータのマイクロステップ新駆動法の提案，電気学会論文誌 D, **112-8**, 771/772 (1992)
- 5) 見城尚志，菅原晟：ステッピングモータとマイコン制御，総合電子出版社，106/111 (1994)
- 6) 樋口龍雄：自動制御理論，森北出版，101/110 (1989)
- 7) scipy.optimize.least_squares - SciPy v0.18.1
Reference Guide :
https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.18.1/reference/generated/scipy.optimize.least_squares.ht