

## 数値最適化手法を用いたステッピングモータの励磁タイミングの決定

### Adjustment of Exciting Period for a Stepping Motor Using Numerical Optimization

○蝶野 純也, 三浦 武, 秋山 宜万, 谷口 敏幸

○Junya Chono, Takeshi Miura, Yoshikazu Akiyama, Toshiyuki Taniguchi

秋田大学

Akita University

キーワード ステッピングモータ (stepping motor), 数値最適化 (numerical optimization), 励磁タイミング(exciting period), 回転子振動抑制 (rotor oscillation damping), シンプレックス法(simplex method)

連絡先:〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1 秋田大学工学資源学部 電気電子工学科  
三浦 武, TEL:(018)889-2329,FAX:(018)837-0406,E-mail:miura@ipc.akita-u.ac.jp

#### 1. はじめに

ステッピングモータは入力パルスに対応して一定角度ずつステップ状に回転するモータである<sup>1)</sup>。回転角は入力パルス数に比例し, 回転速度は入力のパルス周波数に比例するのでそのまま開ループで制御系を構築できる。これらの特徴を利用することにより, ステッピングモータはFA, OA 関係をはじめ, あらゆる制御システムに幅広く用いられている。

ステッピングモータを駆動させた場合, 励磁切り換えの度にトルク平衡点がステップ状に切り換わるので, 慣性により安定域付近で回転子が振動するという問題がある。この回転子の振動を抑制する方法として,

ダンパなどを用い振動を抑制する機械的制動方式や各相の励磁タイミングを変化させる電氣的制動方式がある<sup>2)</sup>。機械的制動方式には装置自体の寸法が大きくなってしまふことや負荷が大きくなることによって効率が悪くなってしまふ問題がある。

電氣的制動方式には立ち上がりにハーフステップ駆動を行い, ある期間においてフルステップ駆動に移行させる方法<sup>3)</sup> (以下ハーフステップ形駆動と呼ぶ) や逆相励磁ダンピング, 最終ステップ遅延ダンピングがある<sup>4)</sup>。逆相励磁ダンピングは, 回転子がオーバーシュートする前にブレーキとして駆動方向と逆方向に励磁をし, その後, 励磁を元に戻して振動を抑制する方法であ

る。この方法では、逆方向に励磁するタイミングと逆方向から励磁を元に戻すタイミングの2つのパラメータを調整しなければならない。最終ステップ遅延ダンピングはオーバーシュート時に回転速度が零となる時点で最終ステップに励磁を切り換える方法であり、最低でも2相の励磁タイミングを調整する必要がある。これに対して、ハーフステップ形駆動では、調整すべき値がハーフステップを行う期間だけであるので比較的容易に調整を行うことができる。

ハーフステップ形駆動の励磁タイミングを決定する方法はレギュレータを用いたもの<sup>9)</sup>やファジィ推論を用いたもの<sup>10)</sup>などが提案されている。レギュレータを用いた方法においてはステップごとの角度の変化量を微係数として扱っているのでノイズの影響を受けやすく、他方、ファジィ推論を用いた方法においては励磁タイミングを自動的に決定するためには、あらかじめファジィルールやメンバシップ関数を調整する必要があるなどの問題がある。

そこで本研究では、これらの問題を解決するため、広く用いられている数値最適化手法を用いることによって励磁タイミングを決定することを提案している。また、この手法によって決定された励磁タイミングでステッピングモータを駆動することによって、回転子振動抑制に対する本手法の有効性について検討した。数値最適化手法としてシンプレックス法を用いた。この手法は微係数を直接用いないのでノイズの影響を受けづらいという特徴が期待できる。

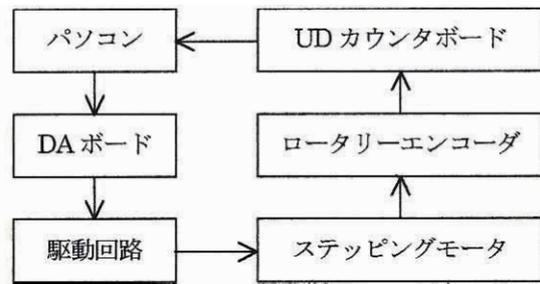
## 2. 実験装置

本研究で用いた実験装置を図1に示す。(a)は実験装置全体の構成であり、(b)は駆動回路である。駆動回路はトランジスタのスイッチングによる電圧制御形のものである。

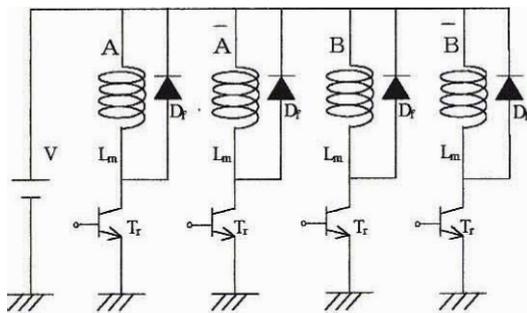
図1(a)に示されるように、パソコン(NEC社製PC-9821 Xa13)からの励磁指令をDAボードによってアナログ値に変換して駆動回路を動作させ、ステッピングモータを回転させる。ステッピングモータの回転角度はロータリーエンコーダ(3600パルス/1回転,出力2相)によって検出され、UDカウンタボードによって2通倍して最終的に14400パルス/1回転の信号としてパソコンに入力される。用いたステッピングモータはオリエンタルモーター社製、2相ハイブリッド形、バイファイラ巻のものを用いた。その仕様を表1に示す。

表1. ステッピングモータの仕様

機種	PX244-02B
励磁最大静止トルク	0.16 [N・m]
定格電圧	6.0 [V]
定格電流	0.8 [A]
巻線抵抗	7.5[Ω/相]
回転子の慣性モーメント	$2.4 \times 10^{-6}$ [kg・m <sup>2</sup> ]
回転子の歯数	50
基本ステップ角	1.8 [deg]



(a) 実験装置の構成



(b) 駆動回路

図 1. 実験装置

### 3. ステッピングモータの振動抑制

ステッピングモータの振動抑制のために用いる 1 相励磁ハーフステップ形駆動の励磁シーケンスを図 2 に示す. 通常の 1 相励磁の場合では, A 相励磁を切ると同時に B 相を励磁するが, ハーフステップ駆動形では  $t_d$  の期間だけ 1 - 2 相励磁のハーフステップ駆動を利用し回転子の振動を抑制する.  $t_d$  を操作することにより角度応答が変化する. このときの振動の変化の度合いを示すために, 何らかの評価指標を必要とする. 本研究では評価指標を  $\theta_{osc}$  とし, 以下のよう

$$\theta_{osc} = \max(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots) \quad (1)$$

ここで,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  はステップ応答において回転子の角変位の極大値, 極小値を

ペアとしたときの両者の差の値で,  $\theta_{osc}$  はこの最大値である.  $t_d$  を操作することによって, 回転子の応答が変化し, 結果として  $\theta_{osc}$  も変化するので,  $\theta_{osc}$  は  $t_d$  の関数とみなすことができる.

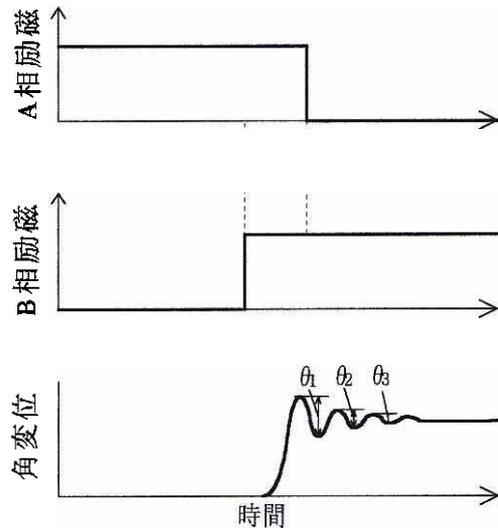


図 2. 励磁シーケンス

### 4. 数値最適化

本研究では, (1) の評価関数を目的関数とする. この目的関数  $\theta_{osc}$  は  $t_d$  の関数であるが, 一次式や二次式のような単純な形で表すことができないので  $\theta_{osc}$  を最小とする  $t_d$  を求めるのは非常に困難である.

そこで  $\theta_{osc}$  を最小とする最適な  $t_d$  を求めるのとして数値最適化手法を用いる. 数値最適化手法として, 非線形数値最適化で微係数を用いない直接探索法のシンプレックス法<sup>6),7)</sup>を用いた.

#### 4-1 シンプレックス法

シンプレックス法は基本的に、変数が  $n$  次元の場合、 $n+1$  個の頂点をもつシンプレックスの値を設定し、その頂点における目的関数の値を比較しながら、これを最適点へと動かしてゆく操作からなる。この操作は鏡映、拡張、収縮の3つの基本的操作とすべての頂点を縮小するという操作によって行われる。

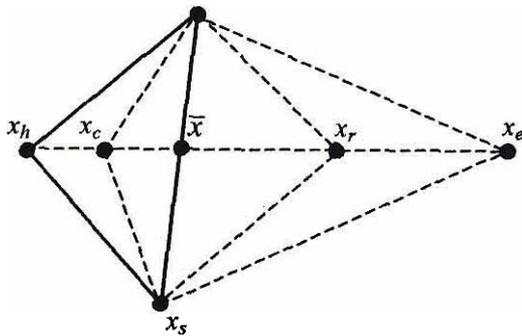


図3. シンプレックスの変換

初期値よりシンプレックスの各頂点を求める。  $x_h$  は1つのシンプレックスで目的関数が最大値をとる頂点、  $x_s$  は目的関数が2番目に大きい値をとる頂点、  $x_l$  は目的関数が最小値をとる頂点、  $\bar{x}$  は  $x_h$  を除くすべての頂点の重心である。

シンプレックス法の操作は以下の計算によって求められる。

$$\text{鏡映} : x_r = (1 + \alpha)\bar{x} - \alpha x_h \quad (2)$$

$$\text{拡張} : x_e = \gamma x_r + (1 - \gamma)\bar{x} \quad (3)$$

$$\text{収縮} : x_c = \beta x_h + (1 - \beta)\bar{x} \quad (4)$$

$$\text{縮小} : x_i = \frac{1}{2}(x_i + x_j), \quad i=1, \dots, n+1 \quad (5)$$

ここで、  $\alpha$  ,  $\beta$  ,  $\gamma$  の値はそれぞれ 1.0, 0.5, 2.0 とした。

#### 4-2. 励磁タイミングの決定

ハーフステップ形駆動では、変数が  $t_d$  の1つだけであるので  $n=1$  となり2つの頂点を持つシンプレックスが構成される。  $t_d$  を  $x_l$  に対応させ数値最適化を行う。実際に  $\theta_{osc}$  を目的関数とすると最適化問題は以下のようなになる。

$$\text{minimize} : \theta_{osc}$$

$$\text{subject to} : t_d \quad , t_d \geq 0$$

はじめに初期値の  $t_d[0]$  を与えると、  $x_1$  は

$$x_1 = t_d[0] \quad (6)$$

となり、もう1つ頂点  $x_2$  は

$$x_2 = \frac{1}{\sqrt{2n}}(\sqrt{n+1} + n - 1) + x_1 \quad (7)$$

となり、これら2つを頂点とするシンプレックスが完成する。次に  $x_1$  ,  $x_2$  の目的関数として  $M(x_1)$  ,  $M(x_2)$  を得るために、励磁タイミングを  $x_1$  ,  $x_2$  としてステップングモータを1ステップずつ駆動させる。このときの、それぞれの  $\theta_{osc}$  の値が  $M(x_1)$  ,  $M(x_2)$  に相当する。求めた  $M(x_1)$  ,  $M(x_2)$  の値を比較し  $x_h$  ,  $x_s$  ,  $x_l$  を決定していく。鏡映、拡張、収縮、縮小の4つの操作は文献6)のアルゴリズムにしたがって行われる。この過程の中で  $t_d < 0$  となった場合には  $t_d = 0$  と置き換えている。

最終的に、この最適化問題の解として得られる励磁タイミング  $t_d$  は  $x_l$  となり、このとき目的関数  $\theta_{osc}$  が最小となる。

## 5. 実験結果および考察

前章の手法を用いて1相励磁のハーフステップ形駆動の励磁タイミング  $t_d$  を調整した結果を以下に示す。

図4は無負荷の状態での  $t_d$  を調整したときの  $\theta_{osc}$  の変化である。数ステップで目的関数が小さな値となって  $t_d$  の値が収束していることがわかる。この最終ステップの  $t_d$  を  $t_f$  と定義しこの値を用いて振動抑制を行う。

図5は励磁タイミングを  $t_f$  として回転子の振動抑制させた結果である。このときの回転子の振動は、 $t_d=0$  とした通常の1相励磁の場合のステップ応答と比較して抑制されており、このことから本手法によって適切な励磁タイミングを決定することが確認された。

上記では無負荷の状態での励磁タイミングを決定したが、実際には、途中で負荷が変動する場合などがある。以下では、はじめは無負荷の状態での励磁タイミングを調整し、途中で負荷条件を変えた場合について考察していく。負荷としては、ステップモータの振動に大きな影響を与える慣性負荷 ( $9.8 \times 10^{-6} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ , 無負荷時の約4倍)を用いている。

図6は上記の場合の  $\theta_{osc}$  の変化である。途中で負荷を変動させた場合には、 $t_d$  の値が一度収束しているため、そこから抜け出せず目的関数の値が減少しない結果となった。この最終ステップの  $t_d$  を  $t_f$  として振動抑制を行う。

図7は励磁タイミング  $t_f$  によって回転子振動を抑制させた結果である。このとき、回転子の振動はほとんど抑制されず、負荷変動時には良好な励磁タイミングを得られないことが確認された。

以上のことより、励磁タイミングを決定する方法として数値最適化手法のシンプレックス法を用いた場合、無負荷や負荷変動のない状態で励磁タイミングを決定するときには有効であることが確認できた。

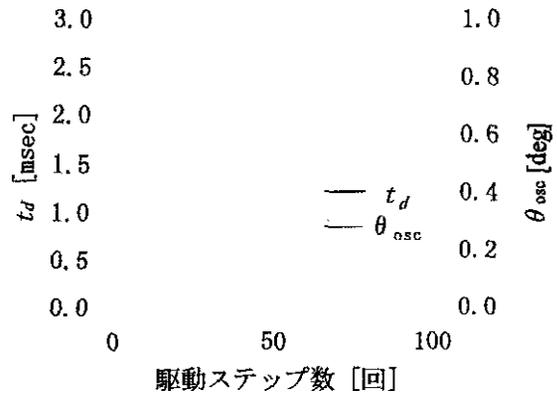


図4. 無負荷時の  $t_d$  および  $\theta_{osc}$  の収束過程

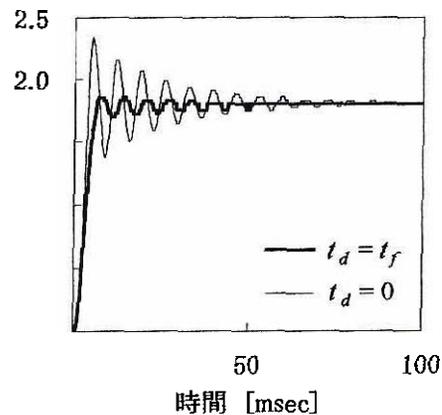


図5. 無負荷時のステップ応答

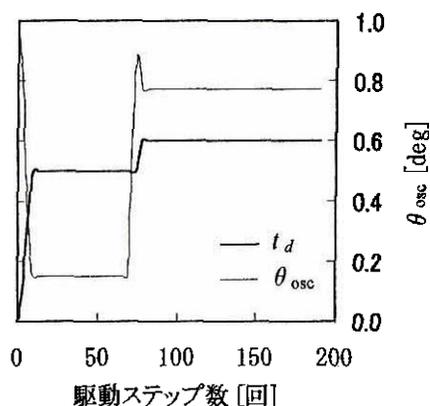


図6. 負荷変動時の  $t_d$  および  $\theta_{osc}$  の収束過程

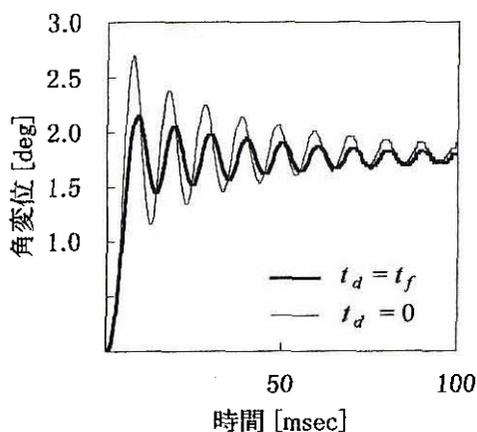


図7. 負荷取り付け時のステップ応答

## 6. おわりに

ステップモータの振動抑制法の1つである、ハーフステップ形駆動の励磁タイミングを決定する方法として数値最適化手法を用いた。

数値最適化手法として用いたシンプレックス法は無負荷状態や負荷変動のないときには、良好な励磁タイミングを求めることが可能な手法である。しかし、負荷変動時

においては良好な励磁タイミングを得ることができないことがわかった。

励磁タイミングを数値最適化手法によって決定する方法は、ファジィ推論などを用いたものに比べると、あらかじめメンバーシップ関数やファジィルールなどのデータの調整を必要としない。本手法は、試行錯誤的な要素を含まず自動的に励磁タイミングを決定することが可能であるため有効である。

## 参考文献

- 1) 見城尚志：電子機器用精密小型モータ，96/138，総合電子出版社(1977)
- 2) 大木創：ステップモータの理論と応用，75/88，実教出版株式会社(1984)
- 3) 三浦武，谷口敏幸：レギュレータによるステッピングモータの励磁タイミングの決定，電学論D，116-7，800/801，(1996)
- 4) 百目鬼英雄：ステッピングモータの使い方，123/131，工業調査会(1993)
- 5) 千住智信，仲濱政毅，上里勝実：ファジィ推論を用いたステッピングモータの回転子振動抑制，日本ファジィ学会誌，7-2，442/450，(1995)
- 6) 今野浩，山下浩：非線形計画法，284/288，日科技連(1978)
- 7) S.L.S.ジャコビ，J.S.コワリク，J.T.ピゾ，関根智明訳：非線形最適化問題の反復解法，81/84，培風館(1976)