

## 2 形前置補償要素を用いたステッピングモータの回転子振動抑制

### Rotor Oscillation Damping of a Stepping Motor by Type-2 Pre-compensator

○金 柯\*, 松尾健史\*, 三浦 武\*, 田島克文\*, 米田 真\*\*

○Ke Jin\*, Kenshi Matsuo\*, Takeshi Miura\*, Katsubumi Tajima\*, Makoto Yoneda\*\*

\*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:** ステッピングモータ (stepping motor), 2 形前置補償要素 (type-2 pre-compensator)  
スイッチングシーケンス調整 (switching sequence adjustment)

**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 工学資源学研究科  
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指令パルスによって回転角度や回転速度を制御することができる制御モータである。現在、ステッピングモータは、しばしば位置制御システムに使用される。ただし、特定のパルス周波数において共振現象が生じる。特に、回転子の固有振動は、低速域共振や位置決め時における整定時間の増大の原因なり、その抑制法の開発は大きな課題となっている<sup>1)</sup>。

ステッピングモータの回転子振動を抑制する手段として、励磁電流値の微小変化によって、回転子停止位置となるトルク平衡点を滑らかに移動させるマイクロステップ駆動法はよく知られている<sup>1)</sup>。しかし、励磁電流値の微小変化を精密に制御できる高価な駆動回路が必要となる。文献(2)では、

上記のようなハードウェア的な変更を必要とせずに、連続駆動時の固有振動を抑制するスイッチングシーケンスのフルステップ駆動法が提案された。

上記のような駆動法を用いると、定速回転時の振動は抑制できるが、速度変動時の振動は十分に抑制されない。その対処法として、低域通過フィルタを前置補償要素として使用する方法が提案された<sup>3)</sup>。その提案手法により、回転子の振動は良好に抑制されたが、フィルタの位相遅れに起因する抑制遅れが生じるという問題があった。この問題を解決するためにランプ応答において定常偏差を生じない 2 形前置補償要素を用いる手法が提案された<sup>4)</sup>。しかし、その中では、マイクロステップ駆動法が用いられているので、低コスト化のためにはハードウェア的な変更が必要とされる。

本研究ではステッピングモータの回転子の振動を減少させるために、2 形前置補償要素を文献(2)のスイッチング法と組み合わせて、低速域における振動抑制を試みる。これにより、高精度な電流制御回路が不要になり、低コスト化が可能になる。

## 2. 実験システムの構成

本章では、実験システムについて述べる。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 PX244-02B で、2 相ハイブリッド形、バイファイラ巻である。その仕様を表 1 に示す。使用したロータリーエンコーダは OMRON 社製 E6D-CWZ1E である。その分解能は 6000pulses/rev. であり、2 相の信号を Up/Down カウンタにおいて 4 通倍することにより 24000pulses/rev. の精度で回転子角度が検出される。

本研究では、図 1 で示されるシステムを用いて実験を行った。各相への励磁指令はパーソナルコンピュータ (PC) から D/A 変換機を介してデジタル信号からアナログ信号へと変換される。変換された励磁信号は駆動回路へと出力される。この指令値に従って、電流からステッピングモータの各相に励磁電流が流され、モータを駆動する。

表 1 ステッピングモータの仕様

Table 1 Specifications of the stepping motor.

Rated voltage	6.0 [V]
Rated current	0.8 [A]
Holding torque	0.26 [N・m]
Rotor inertia	$5.4 \times 10^{-6}$ [N・m・s <sup>2</sup> /rad]
Step angle	1.8 [deg.]

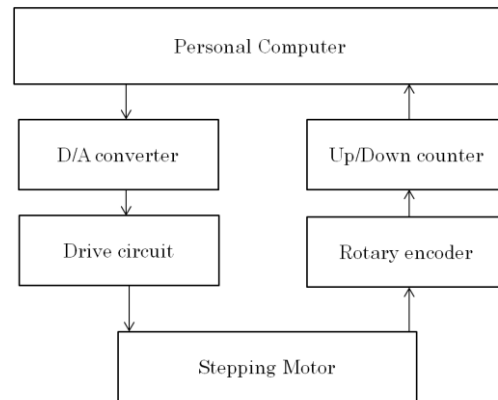


図 1 実験システム

Fig.1 Experimental system.

モータの回転角度は回転子に接続されたロータリーエンコーダによって取得され、Up/Down カウンタボードによりデジタル信号に変換されて、パーソナルコンピュータに出力される。

## 3. 制御システム

### 3.1 前置補償要素の設計

本研究では、2 相ハイブリッド形ステッピングモータが使用されている。この場合、そのモデルは、2 次システムとして近似である<sup>3)</sup>。

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

ただし、 $J$  : 回転子の慣性モーメント、 $D$  : 制動係数、 $c$  は定数であり、 $c = K_T I_m / \{\pi / (2N_r)\}$  である。また、 $K_T$  : トルク定数、 $I_m$  : 励磁電流、 $N_r$  : 回転子の歯数である。固有周波数  $\omega_n$  は  $\omega_n = \sqrt{c/J}$  となる。

図 2 に、本研究で用いる前置補償要素の

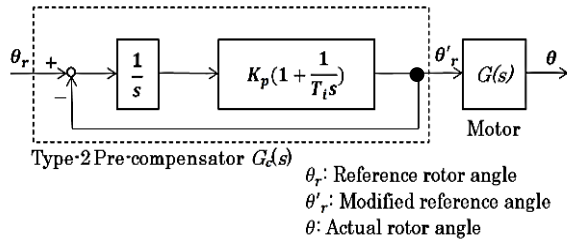


図2 2形前置補償要素の構成

Fig.2 Structure of the type-2 pre-compensator

構成を示す。前置補償要素自体は、閉ループ制御系の構造を有する。そのフォワード部は、積分器とPI制御器で構成されている。積分器は、2形前置補償要素を構成するために導入される。PI制御器は、周波数領域におけるゲイン特性を調整するために採用される。

前置補償要素の伝達関数は式(2)のように与えられる。

$$G_c(s) = \frac{K_p s + K_p / T_i}{s^2 + K_p s + K_p / T_i} \quad (2)$$

本研究で用いたステッピングモータのパラメータは以下である。

$$J = 3.5 \times 10^{-6} \text{ Nms}^2/\text{rad}$$

$$D = 0.0005 \text{ Nms/rad}$$

$$K_T = 0.14 \text{ Nm/A}$$

$$I_m = 0.8 \text{ A}$$

$$N_r = 50$$

この場合ステッピングモータのゲイン特性  $G(s)$  を図3に示す。  $G(s)$  のピーク付近の周波数成分が入力信号に含まれるとき、回転子の固有振動が誘起されると考えられる。よって振動を抑制するためには、このピーク付近の周波数成分を入力信号からカットすればよい。

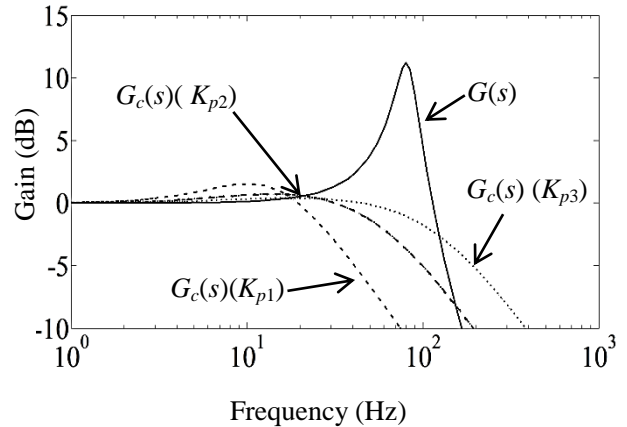


図3 ステッピングモータの伝達関数  $G(s)$  と2形前置補償要素  $G_c(s)$  のゲイン特性

Fig.3 Gain characteristics of the stepping motor transfer function  $G(s)$  and Type-2 Pre-compensator  $G_c(s)$

図3のゲイン特性は式(2)の  $K_p$  及び  $T_i$  を調整することにより決定される。具体的な調整過程は第3.3節において示す。

### 3.2 スイッチングシーケンスの調整法

次に、フルステップのスイッチングシーケンス調整法を説明する。その様子を図4に示す。まず時間軸を周期  $\tau$  で分割する。例えば、A相→B相に励磁を切り換える場合(図4中の Step A→B 期間)、周期  $\tau$  の前半の  $\tau_1$  はA相が励磁され、後半の  $\tau_2$  はB相が励磁される(ただし、 $\tau_1 + \tau_2 = \tau$ )。  $\tau$  がモータの機械的時定数に比べて十分小さい場合には  $\tau$  の間に発生するトルク  $T$  の時間平均値  $T_{average}$  が支配的に動くことになる<sup>3)</sup>。

$$T_{average} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} T dt = \frac{\tau_1}{\tau} T_A(I_m, \theta) + \frac{\tau_2}{\tau} T_B(I_m, \theta) \quad (3)$$

ただし、  $T_A$  および  $T_B$  : A相およびB相の発生トルク、  $I_m$  : 定格電流、  $\theta$  : 回転子角度である。

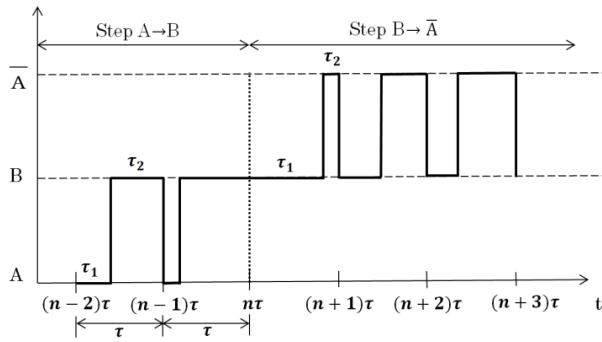


図 4 スイッチングシーケンス

Fig.4 Switching sequence

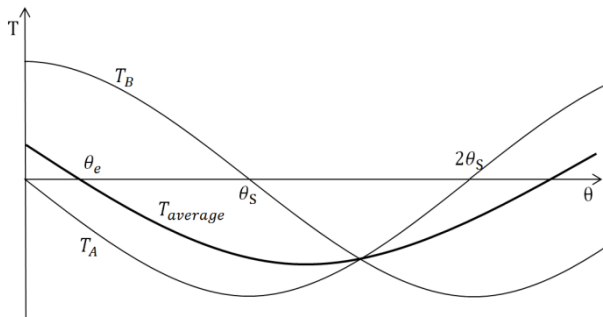


図 5 トルク曲線

Fig.5. Torque curve

$T_{average}$  のトルク曲線を図 5 に示す.  $T_{average}=0$  のトルク平衡点  $\theta_e$  において,  $T_A$  及び  $T_B$  は  $T_A = -K_T I_m \sin(N_r \theta_e)$ ,  $T_B = K_T I_m \cos(N_r \theta_e)$  となる. これらを式 (3) に代入して  $\tau_1 + \tau_2 = \tau$  と組み合わせて変形すると式 (4) が得られる.

$$\tau_1 = \frac{\tau}{1 + \tan(N_r \theta_e)}, \quad \tau_2 = \frac{\tau \tan(N_r \theta_e)}{1 + \tan(N_r \theta_e)} \quad (4)$$

目標値を  $\theta_e$  として式 (4) に代入すると励磁時間  $\tau_1$  および  $\tau_2$  を与えることができる.

### 3.3 実際のシステムにおける $K_p$ および $T_i$ の確定

ここでは, 第 3.1 節で示された補償要素

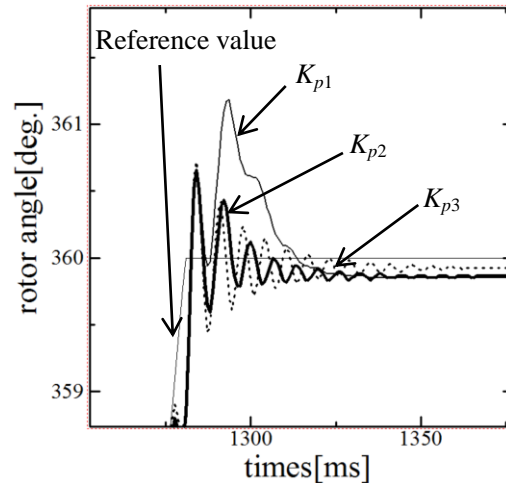


図 6 3つのゲイン特性における回転角度の時間変化

Fig.6 Temporal variation of rotor angle with three gain values

の  $K_p$ ,  $T_i$  の値を決定する. モータのゲイン特性のピーク付近の周波数成分を入力信号からカットするために, 本研究では, まず経験則に基づいて  $T_i=0.02\text{s/rad}$  と固定し,  $K_p$  については,  $K_{p1}=200\text{rad/s}$ ,  $K_{p2}=400\text{rad/s}$ ,  $K_{p3}=800\text{rad/s}$  の3つの値を試した(そのゲイン特性は図 3 に示されている). これらの値を用いてモータを実際に駆動したときの結果を図 6 に示す.

$K_{p1}$  を用いた場合には停止時振動が十分に抑制されるが, オーバーシュートは多い.  $K_{p3}$  を用いた場合のオーバーシュートは  $K_{p2}$  の場合とほぼ同じだが, 振動の抑制は  $K_{p2}$  のときに比べれば少し弱い. 従って本研究では  $K_{p2}=400\text{rad/s}$  を用いて実験を行う.

## 4. 実験

### 4.1 実験条件

本研究では, 補償要素なし, バタワース

表 2 負荷の慣性モーメント

Table 2 Moment of inertia of loads.

Load	moment of inertia [N·m·s <sup>2</sup> /rad]
no Load	/
Load1	20.0×10 <sup>-6</sup>
Load2	30.0×10 <sup>-6</sup>

フィルタ補償要素を用いた場合および 2 形前置補償要素を用いた場合の 3 つの条件で実験を行う。目標停止角度を 360deg.とし、無負荷あるいは 2 種類の負荷を実装して、回転速度 78pps, 312pps, 500pps において回転角度の時間変化を取得する。用いた負荷慣性の値を表 2 に示す。

#### 4.2 実験結果

図 7 は無負荷時の 3 つの速度条件(78pps, 312pps, 500pps)における回転角度の時間変化を示す。78pps 時には、定速回転時に振動が見られるが、速度を上げると定速回転時

の振動が抑制された、312pps 時を見ると、定速回転時の振動はほとんどない。しかし、速度を上げるとともにオーバーシュートは多くなった。また、3 つの速度条件において、2 形前置補償要素を用いた場合にはバタワースフィルタ補償要素を用いた場合のような遅れは発生していない、さらに、停止時の振動も抑制できることを示した。

図 8 は負荷条件 Load1 の場合の 3 つの速度条件(78pps, 312pps, 500pps)における回転角度の時間変化を示す。78pps の場合を見ると、負荷を取り付けた時でも定速回転時の振動を抑制できることが分かる。しかし、500pps の場合には、すべての場合において脱調を発生した。

図 9 は負荷条件 Load2 の場合の 3 つの速度条件(78pps, 312pps, 500pps)における回転角度の時間変化を示す。慣性負荷が大きくなると、312pps の場合でも、すべての場合において脱調を発生した、特に、脱調が最も大きいのは補償要素なしの場合であった。

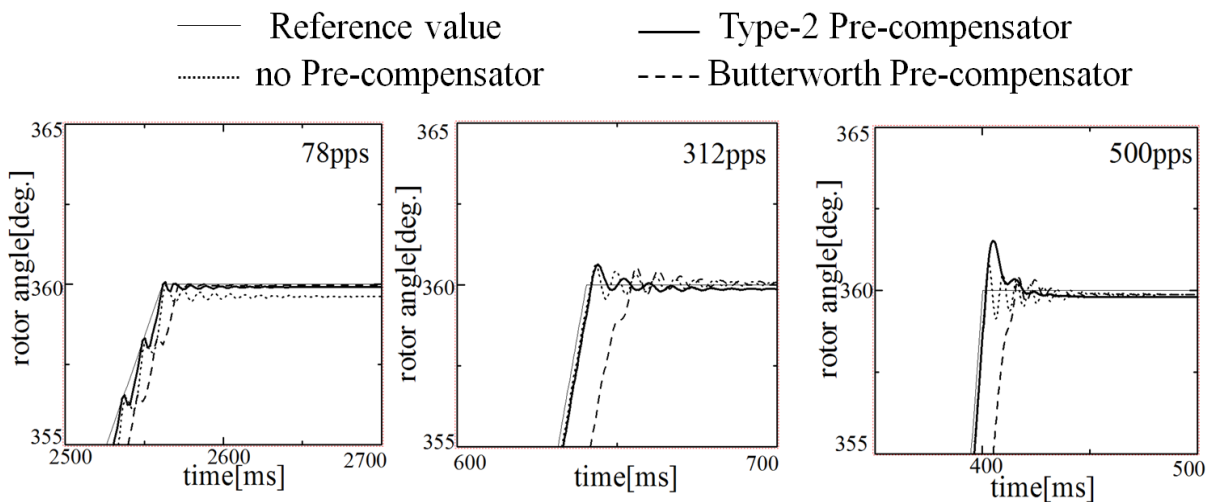


図 7 回転角度の時間変化(無負荷)

Fig.7 Temporal variation of rotor angle (no load)

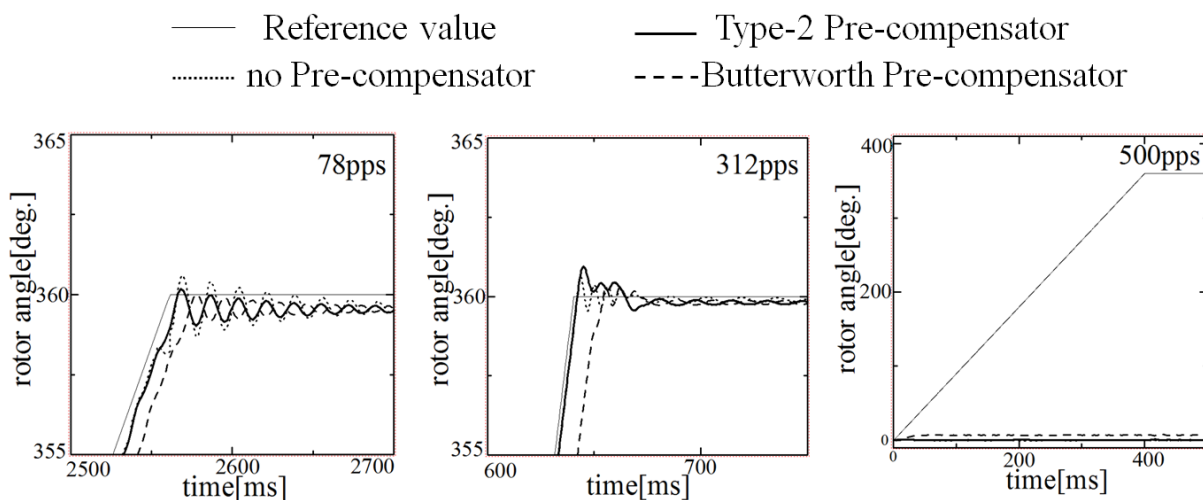


図 8 回転角度の時間変化(load1)

Fig.8 Temporal variation of rotor angle (load1)

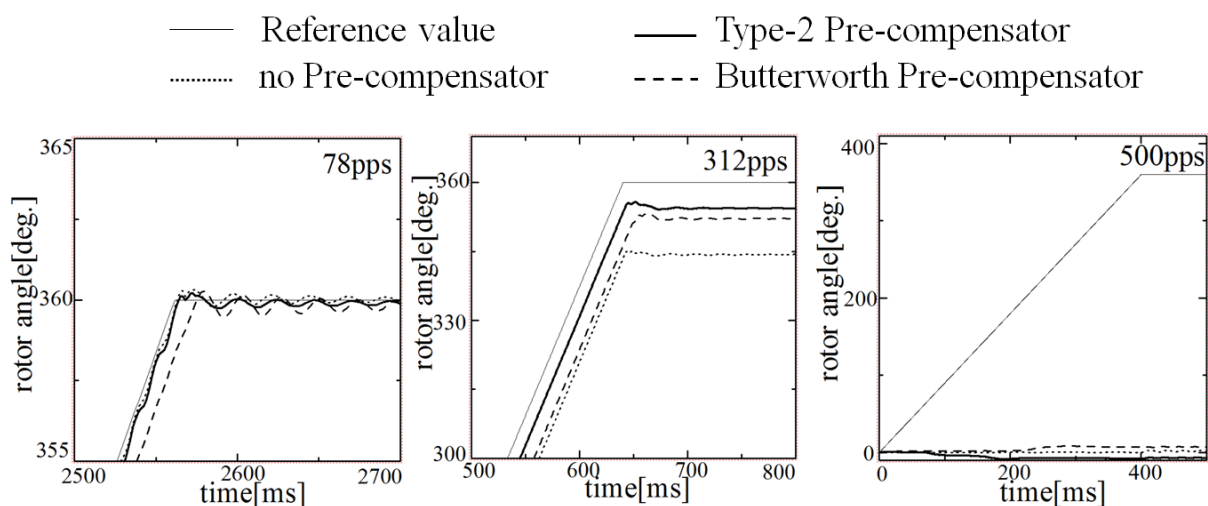


図 9 回転角度の時間変化(load2)

Fig.9 Temporal variation of rotor angle (load2)

全実験結果を見ると、バタワース前置補償要素と提案した2形前置補償要素は双方とも低速域(78pps, 312pps, 500pps)において停止時の振動抑制に対して一定の効果を示した。また、2形前置補償要素を用いた場合には、バタワースフィルタの場合のような位相遅れがほとんど発生していない。2形前置補償要素は停止時に若干のオーバシ

ュートが発生してもすぐに目標位置に復帰できる場合が多いことが示された。図9の312ppsの場合と図8および図9の500ppsの場合を見ると、高速域また高負荷時において脱調が発生しやすいことが分かる。このことから、本手法は高速域・高負荷時に効果が十分ではないことが示された。

## 5. おわりに

上記のように，提案した手法を用いることにより，通常のフルステップ駆動回路を用いているにも関わらず，位相遅れを発生させずに固有振動を抑制することが可能となる．しかし，低速回転は十分に滑らかではなく，また高速域や高負荷時においては脱調が生じるという欠点も見られた．その改善が今後の課題である．

### 参考文献

- 1) 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 (1994)
- 2) 三浦 武，谷口敏幸：ステッピングモータのフルステップ駆動における固有振動の抑制，電気学会論文誌 D，124 巻 5 号，519/520 (2004)
- 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抑制，電気学会論文誌 D，120 巻 12 号，1426/1470 (2000)
- 4) T. Miura, K. Matsuo, K. Tajima and M. Yoneda: Method to Reduce Stepping Motor Vibration Using Type-2 Pre-compensator, IEEJ Trans. IA(2015) (in press)