

# ステッピングモータのマイクロステップ駆動におけるミス ステップの防止

## Prevention of Missteps in Microstep Drive of a Stepping Motor

○大岩宏和\*, 秋山宜万\*, 松尾健史\*, 三浦 武\*, 谷口敏幸\*

○Hirokazu Oiwa\*, Yoshikazu Akiyama\*, Kenshi Matsuo\*, Takeshi Miura\*, Toshiyuki Taniguchi\*

\*秋田大学

\*Akita University

キーワード：ステッピングモータ(steping motor), マイクロステップ駆動(microstep drive),  
前置補償要素(pre-compensator), 目標値波形(waveform of reference signal)  
ミスステップ(misstep)

連絡先：〒010-0852 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回転角が入力パルス数に、回転速度が入力パルス周波数に比例するモータである。また、システムを開ループで構築することができるので FA, OA 機器やコンピュータの周辺機器など幅広く利用されている<sup>1)</sup>。

ステッピングモータを駆動した際、回転子の停止位置であるトルク平衡点は励磁の切換毎に移動し、停止する。このとき、慣性の影響からトルク平衡点付近で回転子に振動を生じる。この回転子の振動が整定時間の増大やミスステップといった問題の要因となる。振動の抑制

法のひとつとして、マイクロステップ駆動がある<sup>1)</sup>。マイクロステップ駆動は、各相巻線に流れる電流の微細な調整を行い、基本ステップを細分化するものである。しかし、マイクロステップ駆動を用いても起動や停止を行う速度変動を生じる領域においての振動抑制は十分ではない。他のシステムと連結されるなどし、前もって停止信号の入力されるときがわからない場合、モータは高速駆動時から急停止する。そのときトルク平衡点と回転子角度にズレが生じ、ミスステップを起こしてしまう。ミスステップを防止する手法として、文献(2)では、前置補償要素として低域通過フィルタを用いて、

速度変動を生じる過渡領域においてトルク平衡点と回転子角度にズレが生じる周波数成分を除去する方法が挙げられている。しかし、前置補償要素として低域通過フィルタを用いるとフィルタの位相遅れのためにステッピングモータの目標追従性が悪化してしまうという問題がある。その対処法として、停止信号入力後に前置補償要素を適用し、目標角度波形を修正し、停止させる手法が提案されている。

文献(2)では、負荷慣性の値の変動に対するロバスト性に関して検討がなされている。しかし、前置補償要素として用いる低域通過フィルタのカットオフ周波数の変化による慣性負荷の変動に対するロバスト性の変動に関しては検討されていない。

そこで本研究では、文献(2)の手法を用い低域通過フィルタのカットオフ周波数の変化による慣性負荷の値の変動に対するロバスト性の変動について検討を行う。

## 2. 実験装置

本章では、本研究で使用した実験システムについて説明をする。使用したステッピングモータは2相ハイブリッド形、定格電圧6[V]、定格電流0.8[A]でオリエンタルモーター社製のPK244-02Bである。

本実験システムでは、モータの駆動方法としてマイクロステップ駆動を用いる。ここでは基本ステップ角を16分割とした0.1125[deg.]ごとにトルク平衡点を移動させている。本研究の実験システムを図1に示す。

パーソナルコンピュータ(以下 PC)から各相の励磁電流の指令値がD/A変換器を介して駆動回路へ出力される。この指令値に従って、ステッピングモータの各相に励磁電流が流され、モータ駆動される。そのとき、回転角度は3600[pulse/rev.]のインクリメンタル形ロータリエンコーダの2相の信号をアップダウンカウン

タにおいて4通倍されることで14400[pulse/rev.]の精度で検出され、PCへ入力される。

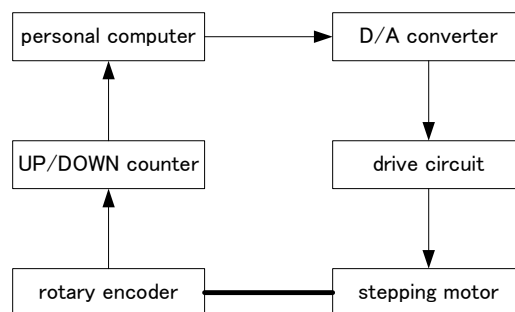


図1 実験システム

Fig. 1 Experimental system

表1 ステッピングモータの仕様

Table 1 Specification of a 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.]

## 3. 目標値波形整形用前置補償要素

### 3.1 ステッピングモータの周波数特性

前章で示したように、本研究で使用したステッピングモータは2相ハイブリッド形である。前置補償要素を設計するにあたって、このモータの周波数特性を知る必要がある。そのため、ステッピングモータのモデル<sup>3)</sup>を用い、周波数特性を導いた。

本研究では、文献(3)より、トルク分布を正負のピークを通る直線で近似して線形化を行っているモデルを使用した。このとき外部より任意の値を与えることのできる量であるトルク平衡点を入力、回転子角度を出力とみなした場合の伝達関数の式を(1)式に示す。

$$P_1(s) = \frac{c/(J + J_1)}{s^2 + \{D/(J + J_1)\}s + c/(J + J_1)} \quad (1)$$

ただし、 $c$  は定数で

$$c = \frac{K_T I_m}{\pi / (2N_r)}$$

である。ここで、 $J$ : 回転子モーメント、 $J_1$ : 慣性負荷の慣性モーメント、 $D$ : 制動係数、 $K_T$ : トルク定数、 $I_m$ : 定格励磁電流、 $N_r$ : 回転子歯数である。

モデルを用いた計算には、実際のシステムに合わせた以下のパラメータを代入した。

$$J = 3.7 \times 10^{-6} [\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 / \text{rad}]$$

$$D = 0.022 [\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}]$$

$$K_T = 0.23 [\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}]$$

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

$$N_r = 50$$

本研究に用いたステッピングモータの周波数応答を図2に示す。また、今回用いた負荷慣性の値を表2に示す。

図2のゲイン特性は、表2に示した負荷慣性の値を負荷した場合のそれぞれのゲイン特性を示している。

ミスステップは、トルク平衡点から回転子角度が大きく離れたとき同期を失ってしまうために生じる。そのため、ミスステップを防止するためにはゲインの値が 0[dB]付近を保ち続ける周波数領域を保持しなければならない。よって、ゲインが 0[dB]を保てない周波数領域を除去すればいいので、低域通過フィルタのカットオフ周波数は図2においてゲインの値が 0[dB]を負荷慣性の最大値を用いる場合でも 0[dB]を保っている値を選択する。本研究では no load, load1, load2 のゲインの値が 0[dB]を保っている 20[Hz]とした。また、低域通過フィルタのカットオフ周波数の値の変化による慣性負荷の変動に対するロバスト性の変動の検討を行うため、20[Hz]より前後 5[Hz]の値をとり、15[Hz]、25[Hz]の3つの値とした。

表2 負荷慣性の値

Table 2 Values of load inertia

no load	0.0 [N·m·s <sup>2</sup> /rad]
load1	20.0 × 10 <sup>-6</sup> [N·m·s <sup>2</sup> /rad]
load2	30.0 × 10 <sup>-6</sup> [N·m·s <sup>2</sup> /rad]

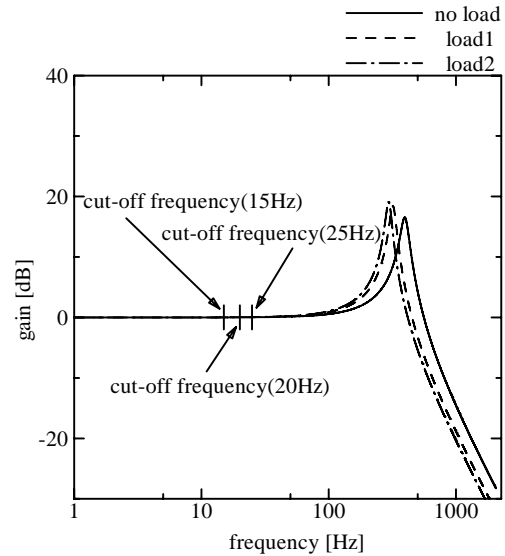


図2 制御対象のゲイン特性

Fig. 2 Gain characteristics of controlled system

### 3.2 前置補償要素の設計

ステッピングモータの回転子振動は、速度変動を生じる起動時や停止時といった過渡的な領域において生じる。すなわち、これまでに提案されてきたような通常の低域通過フィルタとは異なり、速度変動を生じる過渡領域においてのみカットオフ周波数を下げる低域通過フィルタを前置補償要素として使用すればミスステップを防止できる<sup>3)</sup>。

本研究では、低域通過フィルタとして IIR 形デジタルフィルタを用いた。また、フィルタの種類は最大平坦特性を持つことで知られているバターワースフィルタ<sup>4)</sup>を用い、2次系とした。デジタルフィルタを設計する手法としては、アナログフィルタを設計し、双1次変換<sup>5)</sup>を用いた。

本研究では、前置補償要素として低域通過フィルタによって、角度目標値を整形してミス

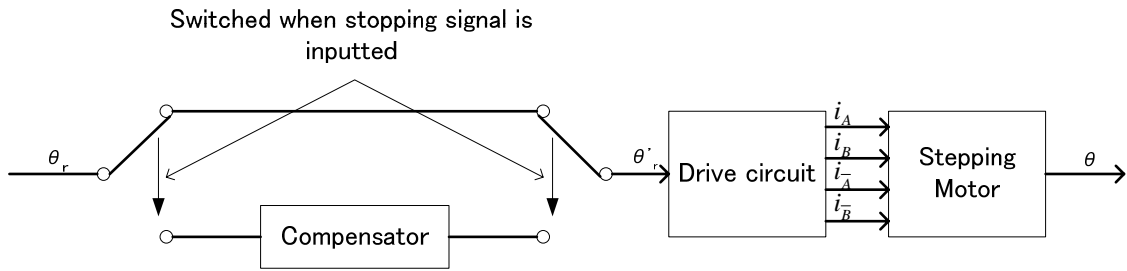


図3 制御システム

Fig. 3 Control system

トップを防止する。ミスステップを生じるのは急停止といった速度変動を伴った過渡領域においてのトルク平衡点と回転子角度にズレが生じる周波数成分であるので、低域通過フィルタをその領域のみに適用すれば良い。しかし、始動時から低域通過フィルタを用いるとステッピングモータの目標追従性が悪化してしまう。そこで、図3に示すような制御システムで、目標角度は停止信号が入力される前までマイクロステップ駆動に直接入力と

する。そのときの目標角度と前置補償要素によって修正された角度を図4に示す。

#### 4.実験結果

本章では、実験結果を示す。

実験結果を図5と図6に示す。図5は、フルステップ駆動の速度に換算すると1000[pps]で停止信号入力前まで駆動したときの結果であり、図6は、1200[pps]の回転子角度の時間変化である。実験結果より、(a)本来の目標角度の場合、図5、図6ともに無負荷時は目標停止位置に停止したが、負荷慣性を装着した場合は目標角度値に停止せず、ミスステップを生じているのがわかる。停止信号入力後に前置補償要素を用いた場合、低域通過フィルタのカットオフ周波数(以下 $f_c$ とする)を $f_c=15[\text{Hz}]$ 、 $20[\text{Hz}]$ としたときには負荷慣性を装着した場合でも目標停止位置に停止することができており、ミスステップを防止することができたが、 $f_c=25[\text{Hz}]$ とした場合には、load2の負荷慣性を装着したときにミスステップが生じた。

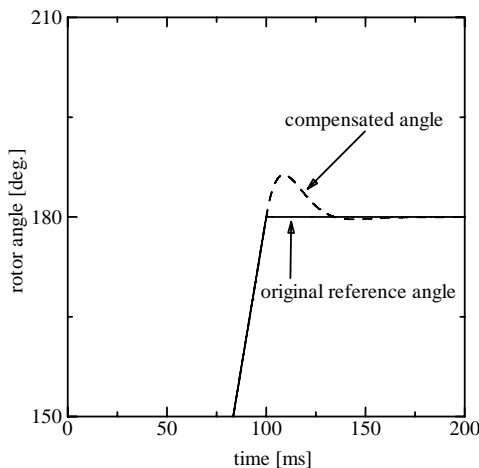


図4 目標角度波形

Fig. 4 Waveform of reference angle

して用いられる。停止信号入力後、補償要素を用い、修正された値を入力として使用

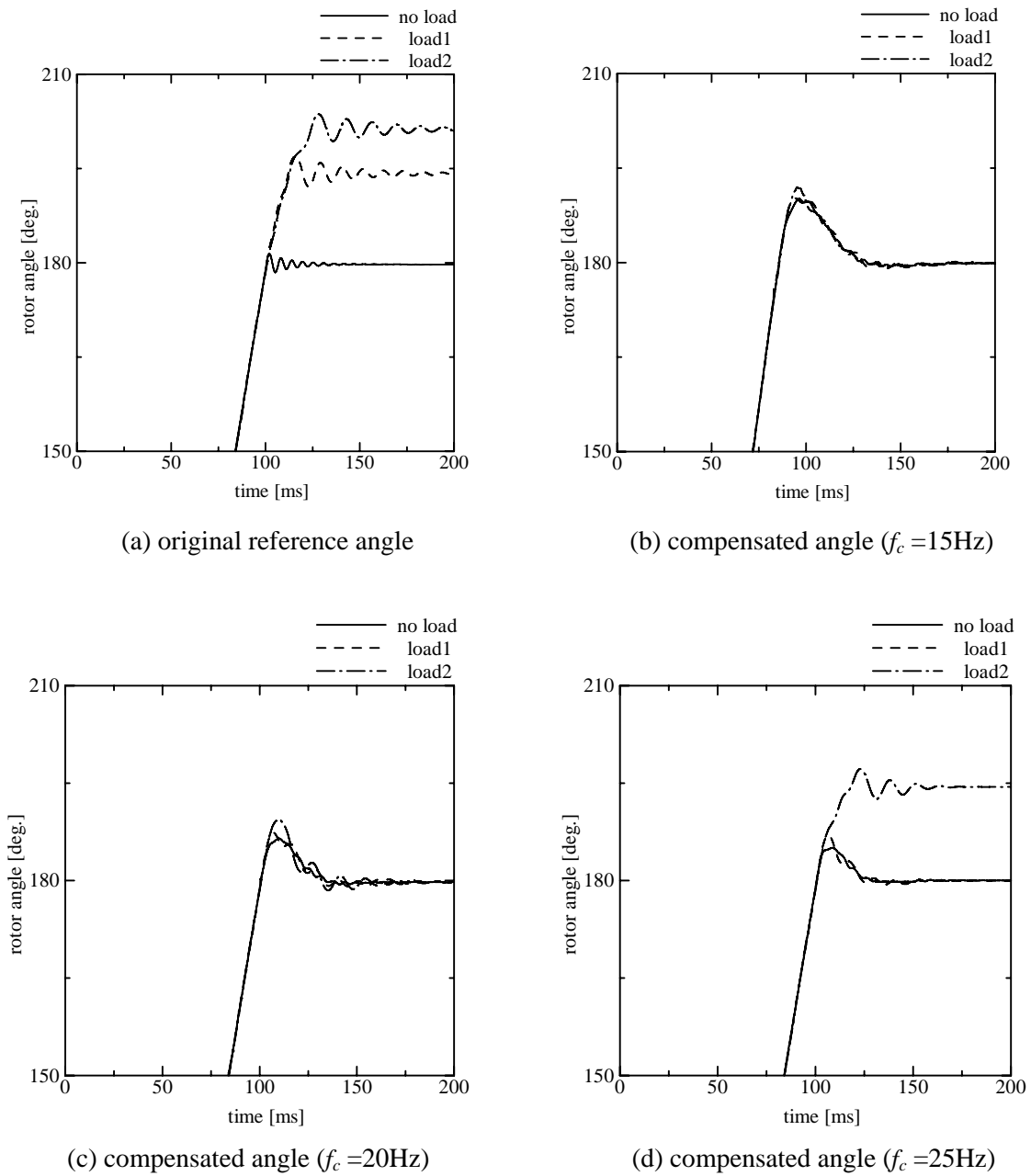


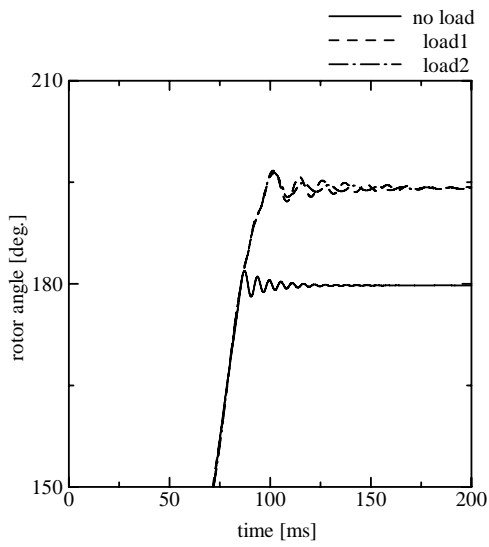
図 5 回転子角度の時間変化 (1000pps)

Fig. 5 Temporal variations of the rotor angle (1000pps)

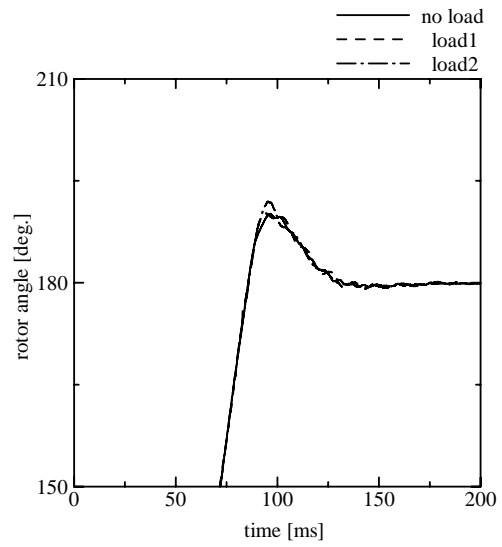
## 5. 考察

本研究では、低域通過フィルタのカットオフ周波数を no load, load1, load2 を

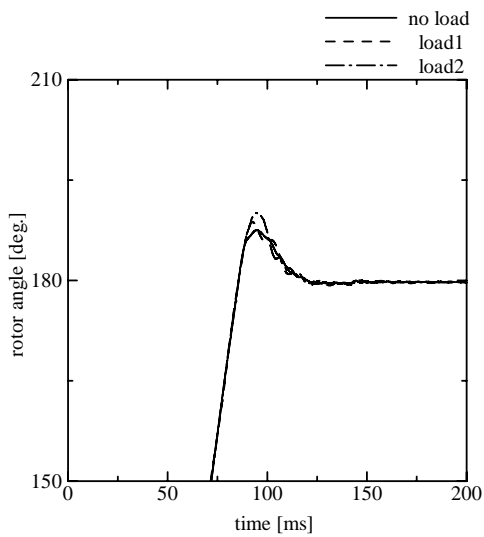
装着したときのゲインの値が 0 [dB]を保っている 20[Hz]を基準として、その後  $\pm 5\text{[Hz]}$ である 15[Hz], 20[Hz]の3つとし



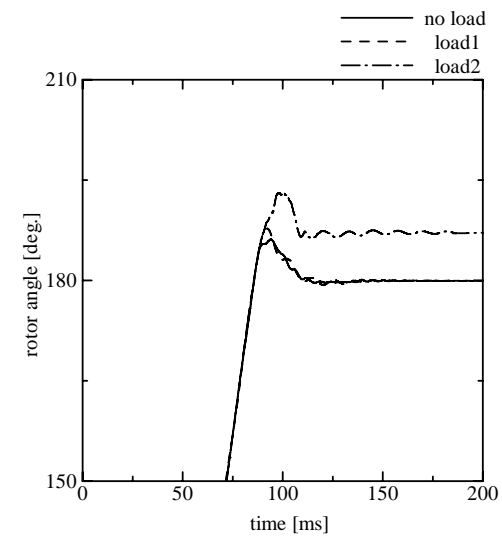
(a) original reference angle



(b) compensated angle ( $f_c = 15\text{Hz}$ )



(c) compensated angle ( $f_c = 20\text{Hz}$ )



(d) compensated angle ( $f_c = 25\text{Hz}$ )

図 6 回転子角度の時間変化 (1200pps)

Fig. 6 Temporal variations of the rotor angle (1200pps)

た. フルステップ駆動に換算した回転速度 1000[pps]の場合について,  $f_c = 15, 20, 25[\text{Hz}]$ を比較する. load1 のとき,  $f_c = 15, 20, 25[\text{Hz}]$ でミスステップを防止することができた. しかし, load2 のとき,  $f_c = 25[\text{Hz}]$ では

ミスステップが生じた. 同様に回転速度 1200[pps]とした場合でも, load2 の  $f_c = 25[\text{Hz}]$ のときにミスステップが生じた.

1000[pps], 1200[pps]の load2 のときにミスステップを生じたのは,  $f_c = 25[\text{Hz}]$ ではゲ

インの値が 0[dB]を保っていなかったためと思われる。

4章の結果より、 $f_c = 15, 20$ [Hz]とした場合には、ロバスト性を保つことができたが  $f_c = 25$ [Hz]のとき、ロバスト性を保つことができなかった。

$f_c$  の値を決定する際は慣性負荷の最大値を考慮するのが良いと言える。

## 6. おわりに

本研究では、低域通過フィルタのカットオフ周波数の変化による慣性負荷変動に対するロバスト性の変動の検討をおこなった。カットオフ周波数を低い値に設定した場合、ロバスト性を保つことができたが、高く設定した場合はロバスト性を保つことはできなかった。今回の結果から、カットオフ周波数は慣性負荷の最大値の値を考慮して決定することが良いと考えられる。

## 参考文献

- 1) 百目鬼英雄：ステッピングモータの使い方，95/108，工業調査会（1993）
- 2) T. Miura, K. Matsuo, and T. Taniguchi : Prevention of Missteps in Stopping Process of a Stepping Motor on High-Speed Drive, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **4-4**, 581/583 (2009)
- 3) 柴田真生，秋山宜万，松尾健史，三浦 武，谷口敏幸：ステッピングモータの開ループ制御における目標値波形整形用前置補償要素，計測自

動制御学会東北支部第 230 回研究集会，230-6 (2006)

- 4) 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)
- 5) 中村尚五：ビギナーズデジタルフィルタ，88/132，東京電機大学出版局（1989）