

ステッピングモータの高速域における振動抑制法の検討

Investigation on Rotor Oscillation Damping of a Stepping Motor in High-speed Region

○中川正貴, *松尾健史*, 三浦 武*, 田島克文*, 米田 真**

○Masataka Nakagawa*, 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), 高速域振動(high-velocity-range oscillation)
ハーフステップ駆動(half-step drive)

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の総数・周波数によって回転角度・回転速度を制御することができるという特徴を持つ。開ループでの位置制御および速度制御が可能であり、また制御システムを低コストで簡易に構築できるため、コンピュータの周辺機器を始め FA(Factory Automation)機器や OA(Office Automation)機器などのアクチュエータとして幅広く用いられている¹⁾。

ステッピングモータには特定のパルス周波数において回転子振動が大きくなる共振という現象がある。共振には固有周波数の近くまたはその整数分の一のパルス周波数で運転する際に発生する低速域共振、固有周波数より高いパルス周波数(500~1500pps)での駆動において生じる中速域共振、それ

よりさらに高い周波数において現れる高速域共振がある²⁾。

文献 3)では、ステッピングモータに供給される励磁電流の変動に応じて励磁シーケンスの位相を操作することで、マイクロステップ駆動における中速域振動を抑制する方法が提案されている。しかし、励磁電流の変動をフィードバックさせるメカニズムが十分解明されていない。

そのため文献 4)ではステッピングモータの回転の様子を明確に示す機械系の物理量として回転速度をフィードバックに用いている。目標回転速度と実際の回転速度の偏差に応じて励磁シーケンスの位相を操作することで、マイクロステップ駆動時における中速域振動を抑制する手法を提案している。

文献 4)においては、比例制御による振動

抑制が行われ、ある程度体系的な制御構造が実現された。それに基づき、本研究では、文献 4)の手法において用いられていた速度信号のかわりに、駆動電流の変動をフィードバックする手法を提案する。これにより、速度センサは不用となり、低コスト性を維持できる。提案手法においては、駆動電流の基準値からの偏差に応じて励磁シーケンスの位相を操作することで、ハーフステップ駆動時における振動を抑制する。ここではさらに、より高い速度領域における振動抑制を試みる。

2. 実験システムの構成

本研究で用いた実験システムを図 1 に示す。使用したステッピングモータは、2 相ハイブリッド形、バイファイラ巻の PK244-01B(オリエンタルモーター社製)であり、その仕様を表 1 に示す。また、使用したタコジェネレータは TS680N1E3(多摩川精機社製)であり、その発生電圧係数は 3.0 V/kmin^{-1} である。本実験システムでは、モータの駆動方法としてハーフステップ駆動を用いる。

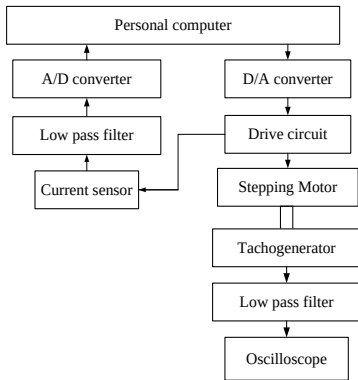


図 1 実験システム

Fig. 1 Experimental system.

パーソナルコンピュータ(PC)から各相の励磁電流の指令値が D/A 変換器を介して電流制御形駆動回路に送られる。この指令値に従って、電源からステッピングモータの各相に励磁電流が流され、モータが駆動される。モータの回転速度は回転子にカップリングを介して直結されたタコジェネレータによって取得され、低域通過フィルタを介して高周波成分を取り除いたのちオシロスコープによってその波形が記録される。回路に供給される駆動電流は電源と電流制御形駆動回路の間に図 2 のように接続された電流センサによって取得され、低域通過フィルタを介して高周波成分を取り除いたのち A/D 変換器を通して PC へ入力される。

表 1 ステッピングモータの仕様

Table 1 Specifications of the stepping motor.

Rated voltage	4.0 [V]
Rated current	1.2 [A]
Holding torque	0.26 [N · m]
Rotor inertia	5.4×10^{-6} [N · m · s ² /rad]
Step angle	1.8 [deg.]

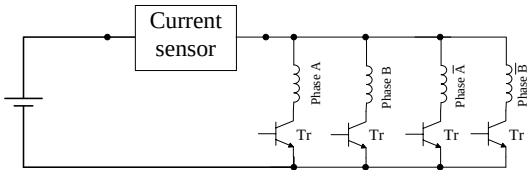


図 2 電流センサの接続図

Fig. 2 Connection diagram of current sensor.

3. 高速域における駆動電流振動

本研究では第 1 章で述べたように、高速域共振を抑制するために、駆動電流に現れる変動をフィードバックする。ここではま

ず、回転速度と駆動電流の振動の関係を調べるために予備実験を行った。

上記の予備実験においては、高速域で大きな振動が発生する速度領域(4000~5000pps, フルステップ換算)において回転速度と駆動電流の時間変化を測定した。

回転速度および駆動電流波形の一例を図3に示す。この例のように、回転速度に振動が生じた際には駆動電流にも同じような振動が生じ、その波形は正弦波状となった。いずれの駆動速度においても、表2に見られるように、駆動電流の振動周波数はステッピングモータの速度振動のそれとほぼ等しいという傾向が見られた。

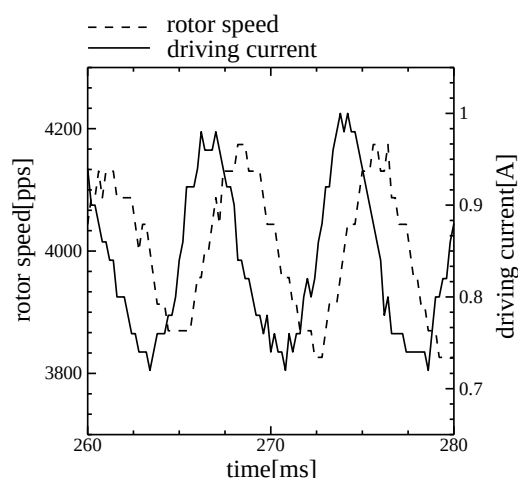


図3 回転速度と駆動電流波形
(4000pps)

Fig. 3 The rotor speed and the waveform of driving current(4000pps).

図3を見ると、駆動電流波形の位相は回転速度波形より進んでいることがわかる。その位相差は表3に示されるように、いずれの速度においてもほぼ等しく、その平均値は42deg.であった。制御時の遅れを考慮

表2 回転速度と駆動電流の振動周波数

Table 2 Vibrational frequency of rotor speed and driving current.

Reference Speed [pps]	Frequency (rotor speed) [Hz]	Frequency (driving current) [Hz]
4000	144.7	144.7
4100	145.4	146.1
4200	145.6	145.0
4300	146.2	146.2
4400	145.6	146.5
4500	146.6	147.1
4600	146.3	146.5
4700	146.1	146.4
4800	146.8	144.9
4900	144.0	143.6
5000	144.0	144.0

表3 回転速度と駆動電流の位相差

Table 3 Phase difference of rotor speed and driving current.

Reference Speed [pps]	Phase difference [deg]
4000	42.6
4100	43.1
4200	43.3
4300	43.2
4400	41.4
4500	41.7
4600	43.8
4700	42.6
4800	40.3
4900	42.3
5000	41.6

すると、一定の進みを持った電流値をフィードバックした制御を行うことにより、速度の制御が可能になると考えられる。

また、回転速度波形の振幅と駆動電流波形の振幅がほぼ比例することも確認された。このことから、速度振動の大きさを電流波形の振幅から予測することが可能となる。

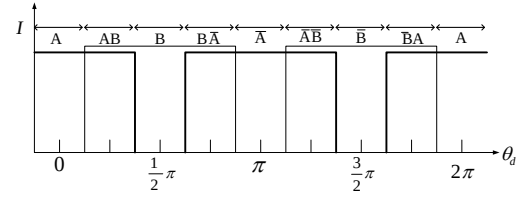
上記を考慮し、本研究では次章に示す制御法を提案する。

4. 制御システム

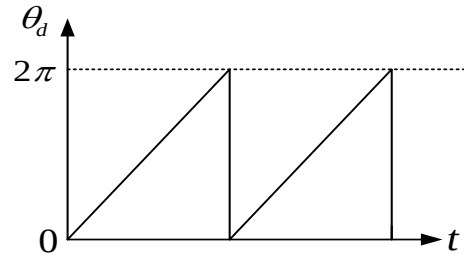
本研究では、第 1 章で述べたようにハーフステップにおける定速駆動時の制御を扱う。その場合の励磁電流波形は電気角 θ_d の変化に対して図 4(a)のように変化し、また駆動時における励磁電流の電気角の位相の時間変化は図 4(b)のようになる。

第 3 章で示したように、高速域で回転速度に振動が生じた場合には、駆動電流 I は図 5 のように正弦波状に変動する。図中の I_r は駆動電流の時間平均値であり、ここでは予備実験において取得された電流の平均値が用いられている。これ以降はこの電流値を基準値として用い、この値からのずれ ($I_e = I - I_r$) を電流値の偏差とみなす。

図 5 において第 N ステップを励磁している場合を考える。このとき、駆動電流が基準値より大きくなっていったとすると、第 3 章での予備実験からわかるように、回転速度もまた目標値より大きくなっていると考えられる。回転速度を目標値に追従させるために、文献 4) の制御法を用いれば、図 6(a) のように励磁電流の電気角の位相を本来の励磁シーケンスにおける電気角の位相 θ_d から θ_d' まで $\Delta\theta_d$ だけ遅らせる必要がある。



(a) Waveform of exciting current



(b) Temporal variation of electrical angle

図 4 励磁電流波形と電気角の関係

Fig. 4 Relationship between the waveform of exciting current and the electrical angle.

このとき電気角の位相の時間変化は図 6(b) のようになる。これにより、回転速度の増加が止まり、減少を始める。一方で、駆動電流が基準値より小さくなった場合には回転速度もまた目標値より小さくなっていると考えられる。この場合には電気角の位相を進める必要がある。これにより、回転速度の減少が止まり、増加をはじめる。

以上のような制御を実現するために、励磁電流の位相の操作量である $\Delta\theta_d$ の値が (1) 式のように与えられる。

$$\Delta\theta_d = K_p I_e \quad (1)$$

ここで、 K_p は比例ゲインである。 $\Delta\theta_d$ には $-\pi \leq \Delta\theta_d \leq \pi$ となるように制限が加えられている。

これより、新たに与えられたこの時刻における電気角 θ_d' は次式のようになる。

$$\theta_d' = \theta_d + \Delta\theta_d \quad (2)$$

この制御則を図 7 に示す制御システムに組み込むことでステッピングモータの回転速度の変動を抑えることが可能となる.

5. 実験

5.1 実験条件

モータの振動特性には回転軸の慣性モーメントの変化が大きな影響を与える. よってここでは, 慣性負荷を用いて慣性モーメントの増加によるステッピングモータの振動の変化を見る.

本実験では, 無負荷の場合と負荷 load1(20.0×10^{-6} [$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$])を取り付けた場合について, 2000pps から脱調せずに運転できる最大回転速度 3250pps までの速度領域(フルステップ換算値, 以下同様)で実験を行う. また, 制御則として与えられる(1)式の K_p は, 試行錯誤的な調整により 0.75 と決定された. また, ここでは, 回転速度の peak-to-peak(P-P 値)を評価指数として用いる.

5.2 実験結果

前章の手法を用いてステッピングモータを駆動し, その効果を検証した. 無負荷の場合の結果を図 8(a), 負荷を取り付けた場合の結果を図 8(b)に示す.

図 8(a)の無負荷の場合の速度-振動特性を見ると, 回転速度の P-P 値が急激に大きくなるピークを 2 つ確認できる. 図中で丸印で囲まれた部分がそれである. 2 つのピークのうち回転速度が小さい方を Peak1 とし, 大きい方を Peak2 とする. このとき,

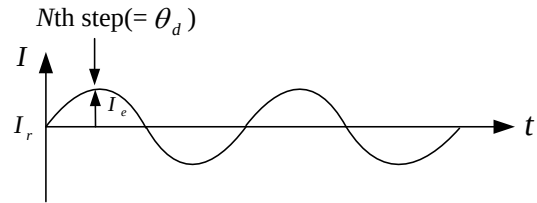
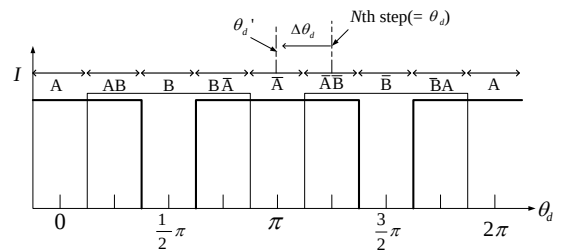
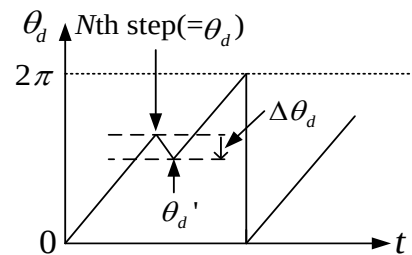


図 5 高速域における駆動電流の例

Fig. 5 Example of driving current in high-speed region.



(a)Waveform of exciting current



(b) Temporal variation of electrical angle

図 6 励磁電流波形と電気角の操作

Fig. 6 Manipulation of the waveform of driving current and the electrical angle.

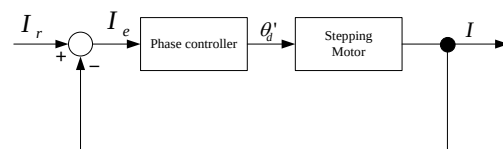


図 7 制御システム

Fig. 7 Control system.

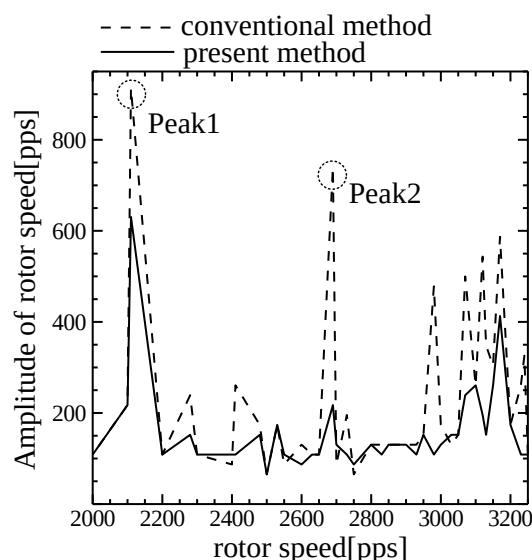
Peak1における目標回転速度は2110ppsであり，Peak2では2690ppsである．提案手法を用いた場合にはそれらの速度で P-P 値がいずれも減少しており，このことから振動が抑制されていることがわかる．また，上記の2つ以外のピークにおいても，提案手法によって振動が抑制された．

一方，負荷を取り付けた場合の図 8(b)でも大きな2つのピークを確認できる．このとき，Peak1は2070ppsであり，Peak2は3120ppsである．提案手法を用いた場合には，それらの速度において振動抑制の効果が見られた．

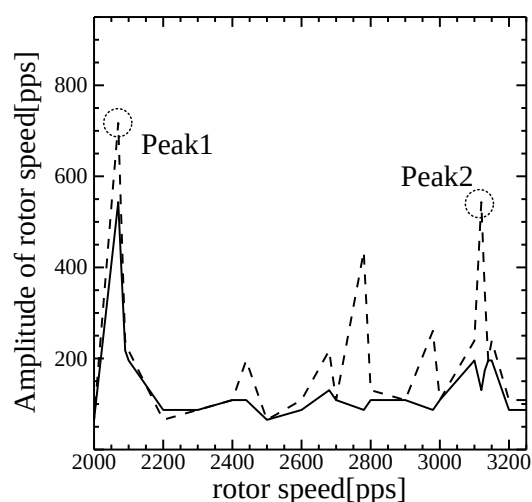
上記に示した速度近辺における提案手法の効果を検討する．具体的には図 8(a)の Peak1 および 2，図 8(b)の Peak1 および 2，さらに提案手法と従来の手法で大きな違いが見られなかった速度として，図 8(a)については2400pps，(b)については2200ppsを選択し，これらの目標速度における回転速度波形および駆動電流波形を検討する．

上記の目標回転速度における速度波形および駆動電流波形を図 9 および図 10 に示す．

無負荷時において振動抑制の効果が最も顕著に現れた図 8 (a)の Peak2 に対応する図 9(a)をみると，全体として振動が抑えられた良好な結果となっている．図 8 (a)の Peak1，2 以外の速度である図 9(b)の場合には振動の抑制効果は見られなかったが，提案手法を適用しない場合の振動がもともと小さく，適用した場合でも振動はそれほど悪化しなかった．図 8(a)の Peak1 に対応する図 9(c)では，提案手法を適用した場合でも振動は大きい，適用しない場合の振動より小さくなっているために抑制効果はあるといえる．



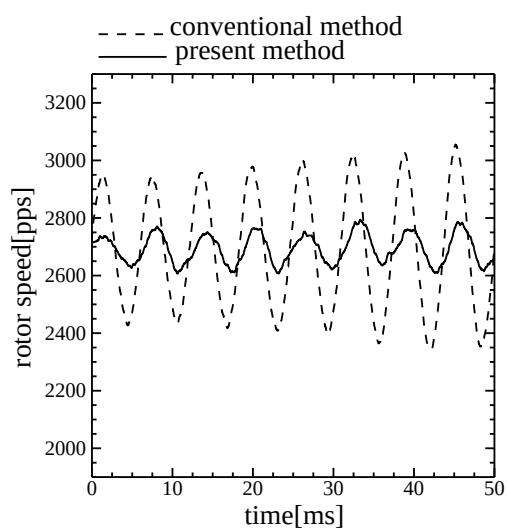
(a) no load



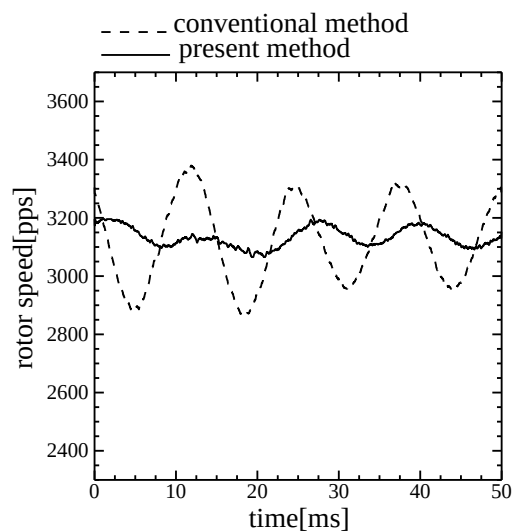
(b) load1

図 8 各目標回転速度における P-P 値
Fig. 8 P-P value at each reference rotor speed.

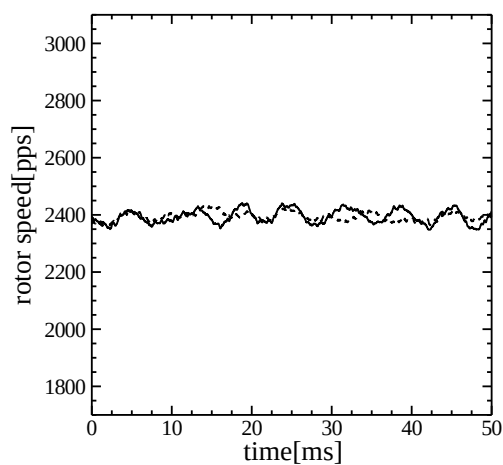
load1 を取り付けたときに振動抑制の効果が最も現れた図 8 (b)の Peak2 に対応する図 10(a)の場合は全体的に振動抑制の効果がみられる．図 8 (b)の Peak1，2 以外の速度である図 10(b)では図 9(b)の場合と同様にもともと振動が小さく，また提案手法を適用し



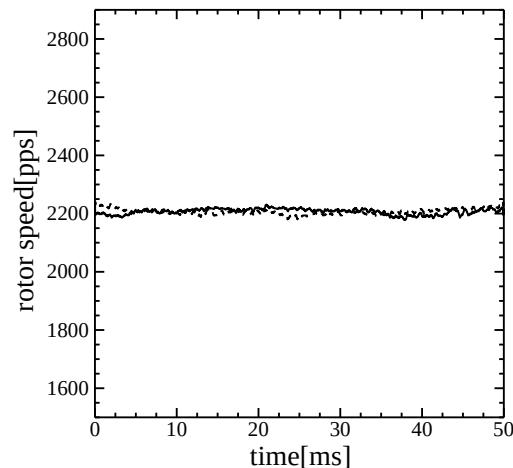
(a) 2690pps



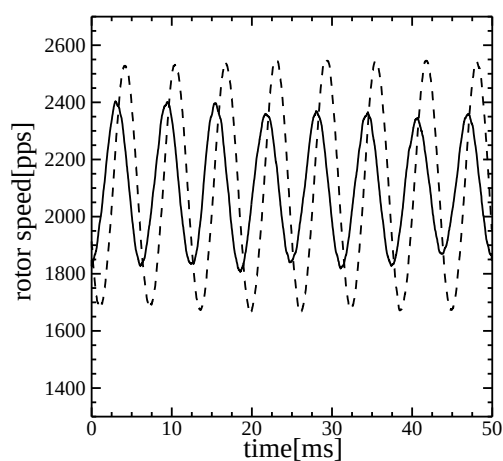
(a) 3120pps



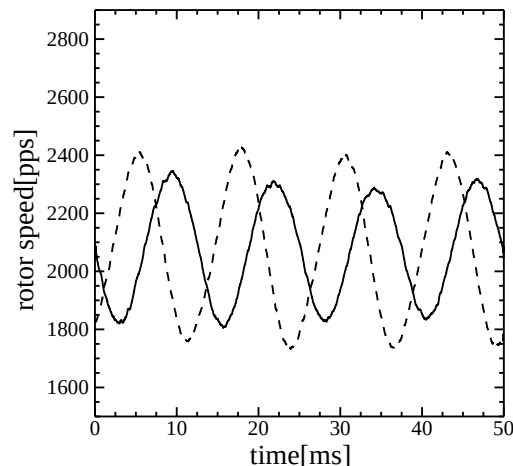
(b) 2400pps



(b) 2200pps



(c) 2110pps



(c) 2070pps

図 9 回転速度の時間変化(無負荷)

図 10 回転速度の時間変化(load1)

Fig. 9 Temporal variation of rotor speed (no load). Fig. 10 Temporal variation of rotor speed (load1).

でも特に振動は悪化しなかった．図 8(b)の Peak1 に対応する図 10(c)では，提案手法を適用した場合でも振動があまり小さくなっていないが，適用しない場合の振動よりは小さくなっているため抑制効果は見られる．

6. おわりに

本研究では，ステッピングモータの高速域における駆動時に発生する振動を抑制するため，駆動電流の偏差に応じて励磁シーケンスの位相を操作する制御システムの効果を検討した．

上記の手法により速度振動がピークを示す速度領域において，振動抑制に効果がみられた．また，それ以外の領域でも振動の悪化は見られなかった．

参考文献

- 1) 百目鬼英雄：ステッピングモータの使い方，7/13，工業調査会 (1993)
- 2) 見城尚志，菅原 晟：ステッピングモータとマイコン制御，123/127，総合電子出版社 (1994)
- 3) オリエンタルモーター株式会社，山本昭泰，長澤洋文：ステッピングモータ駆動装置，特開平 10-337096 (1998)
- 4) 千釜大和，松尾健史，三浦 武，田島克文，米田 真：ステッピングモータのマイクロステップ駆動における中速域振動の抑制に関する研究，計測自動制御学会東北支部 第 267 回研究集会 267-9 (2011)