

ステッピングモータのマイクロステップ駆動における高速域振動の特性解析
Oscillation Characteristics of a Microstepped Stepping Motor in High-Speed Region

○朝香佑太*, 松尾健史*, 三浦 武*, 田島克文*, 米田 真**

○Yuta Asaka*, 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)
マイクロステップ駆動 (microstep 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 (500~1500

pps) 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により、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、励磁電流の変動を位相の操作量に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ることにより、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し、マイクロステップ駆動時における

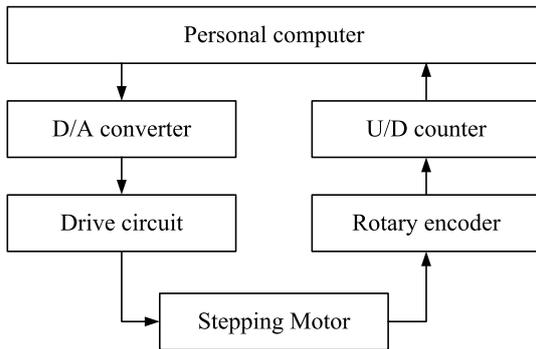


図1 実験システム

Fig. 1 Experimental system.

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たが、位相の操作量を決定する比例ゲインとなるパラメータは、試行錯誤的に決定されており、体系的な決定方法が考案されていない。そこで、本研究では、比例ゲインを体系的に決定する方法を考案し、マイクロステップ駆動時における振動を抑制することが可能であるか検討する。文献4)では、中速域での振動抑制が行われたが、本研究では、高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PK244-02B（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、使用したロータリーエンコーダはE6D-CWZ1E（OMRON社製）である。その分解能は6000pulses/rev.であり、Up/Downカウンタで4通倍されるため、最終的に24000pulses/rev.の分解能で出力される。本実験システムで

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	5.4×10^{-6} [N・m・s ² /rad]
Step angle	1.8 [deg.]

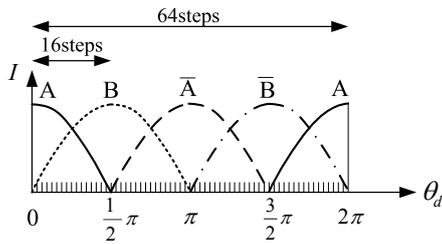
は、モータの駆動方法としてマイクロステップ駆動を用いる。ここでは基本ステップ角を16分割した0.1125deg.ごとにトルク平衡点を移動させている。

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。そのとき、回転子角度は回転子にカップリングを介して直結されたロータリーエンコーダによって取得され、Up/Downカウンタを介して、パーソナルコンピュータに出力される。また、回転速度は、回転角度の差分信号を低域通過フィルタに通すことにより求められる。

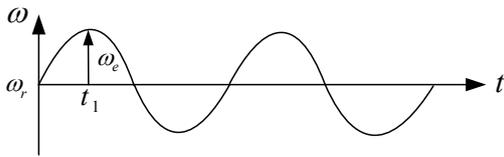
3. 制御システム

3.1 制御ゲインの設定法

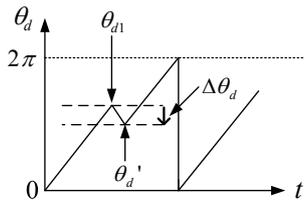
本研究では、第1章で述べたようにマイクロステップにおける定速駆動時の制御を扱う。制御法を図2に概説する。モータ回転時の目標角度 θ_d （電気角）に対して、励磁電流波形を図2(a)のように変化させる。また駆動時における回転速度 ω は、一定の目標値で駆動した場合にも、高速度振動により図2(b)のように変動する。この振動を



(a) Waveform of exciting current



(b) Example of rotor speed



(c) Temporal variation of electric angle

図 2 振動抑制法

Fig. 2 Oscillation damping control.

抑制するために、文献4)では次のような制御法が提案されている。

時間 t_1 における目標角度が θ_{d1} であった場合を考える。このとき、図 2(b)に示されるように、時間 t_1 における回転速度が目標速度 ω_r より ω_e だけ速くなっているとす。その場合、回転速度を目標値に追従させるために、図 2(c)のように励磁電流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_{d1} から $\theta_{d'}$ まで $\Delta\theta_d$ だけ遅らせる。逆に回転角度が目標速度より遅くなっている場合には、電気角の位相を進める制御を行う。

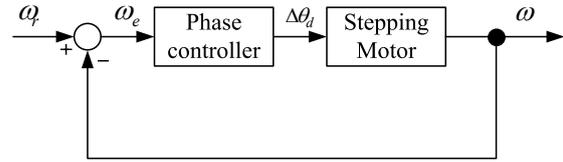


図 3 制御システム

Fig. 3 Control system.

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。

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

ここで、 K_p は比例ゲインであり、 ω_e は目標速度と実測値との偏差である。

文献4)では、この制御法を図3に示される制御システムに組み込むことにより、振動抑制がなされた。

(1)式に示されるように、この制御法では、励磁電流の電気角の位相を変動させるので、結果として、トルクが変動し、それに伴って回転速度が変動する。そこで、本研究では、回転子に加えられるトルクの変動に着目し、角度-トルク特性に基づいて比例ゲイン K_p を求める。

比例ゲインの設定法を図4に示す。最初に、マイクロステップ駆動時の回転子角度を実測し、図4(a)のように目標角度との偏差の時間変化 θ_e のデータを得る。モータ駆動用のトルクを発生させるため、偏差は常に負の値を取っているが、通常は若干の振動を伴う。このときの目標角度と実測値の偏差の平均値を θ_{em} とする。

次に、マイクロステップ駆動時の回転子速度を実測し、図4(b)のように目標速度との偏差 ω_e の時間変化のデータを得る。図4(b)のように目標速度が一定の場合でも一般に速度が変動する。この速度変動は、ト

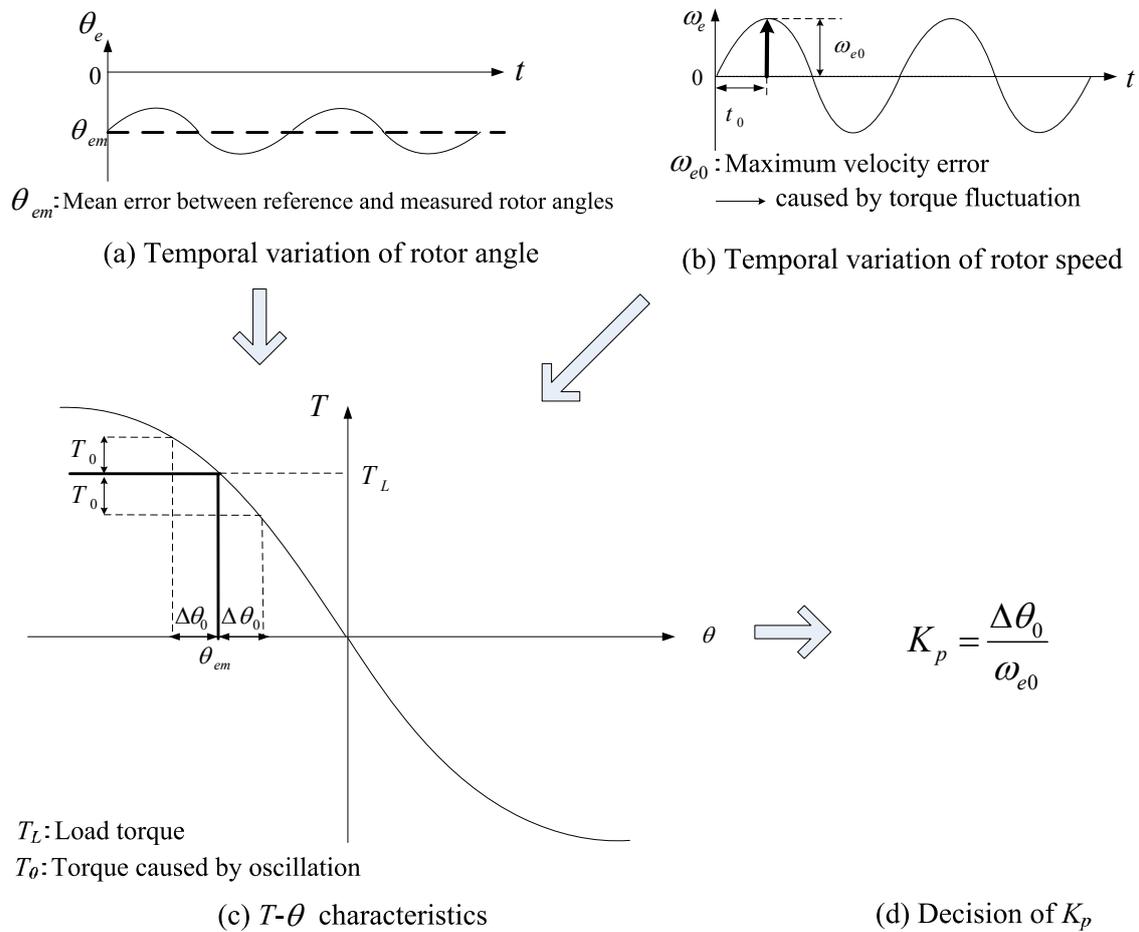


図4 比例ゲインの決定法

Fig. 4 Procedure to determine the proportional gain value.

トルク変動に起因しているものと考えられる。速度偏差の最大値を ω_{e0} とし、速度偏差が零点を通過してから ω_{e0} に達するまでの時間を t_0 とすると、このときの加速度は ω_{e0}/t_0 によって近似できるので、トルク変動分 T_0 は、次式によって表される回転子の運動方程式の差分近似によって求められる。

$$T_0 = J \frac{\omega_{e0}}{t_0} \quad (2)$$

(2)式において、 J はモータ回転子の慣性モーメントである。

次に、角度-トルク特性曲線上での動作

をみる。図4(c)のように、まず図4(a)の手順で得られた θ_{em} に対応する負荷トルク T_L を求める。発生トルクは、この T_L を中心として、図4(b)の手順で得た T_0 の分だけ変動していることになる。この変動分は、図4(c)中の $\Delta\theta_0$ で表される角度変動として現れる。

最後に、(1)式の $\Delta\theta_d$ を $\Delta\theta_0$ で置き換え、 ω_e として ω_{e0} を与えると、次式のようにして K_p が得られる。

$$K_p = \frac{\Delta\theta_0}{\omega_{e0}} \quad (3)$$

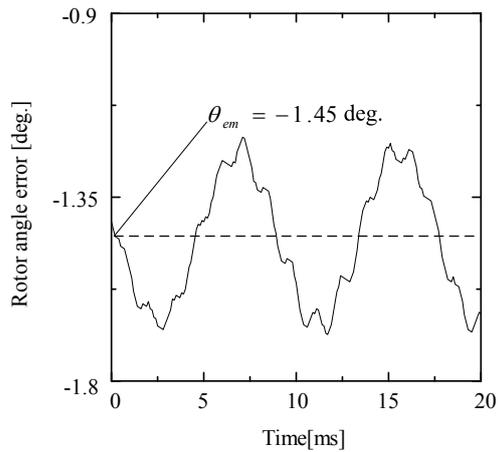


図5 角度データにおける θ_{em} の決定手順
 Fig. 5 Procedure to determine θ_{em} in angle data.

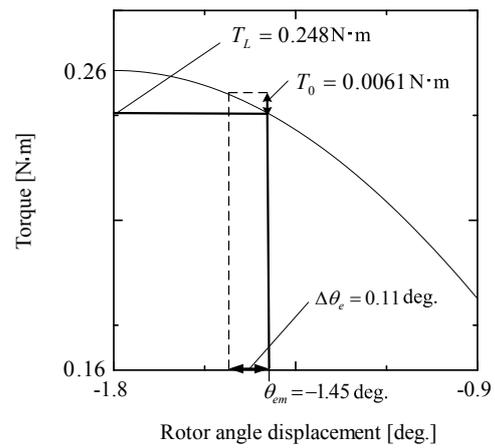


図7 角度-トルク特性における T_0 , T_L および $\Delta\theta_d$ の決定手順
 Fig. 7 Procedure to determine T_0 , T_L and $\Delta\theta_d$ in T - θ characteristics.

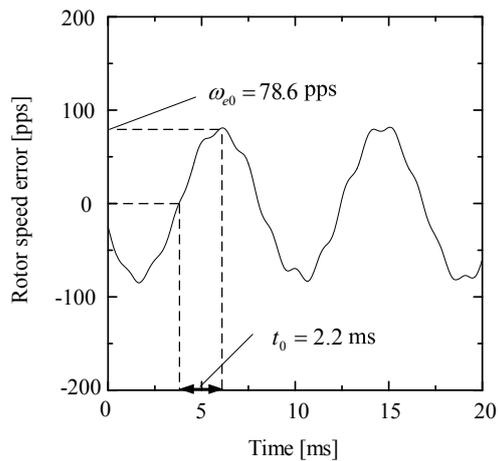


図6 速度データにおける ω_{e0} および t_0 の決定手順
 Fig. 6 Procedure to determine ω_{e0} and t_0 in speed data.

3.2 実際のシステムにおける K_p の設定

実際の駆動時においては、目標回転速度ごとに振動発生の様相が大きく異なるため、文献5)ではその対処法として回転速度ごとに比例ゲインを変更するという手順を取り入れ、それにより高い振動抑制効果が示された。

他方で、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ことはよく知られている。

よって、本実験では、無負荷の場合と、慣性負荷として load1 ($20.0 \times 10^{-6} \text{ [N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}]$) を用いた場合について、顕著な速度振動が見られた速度ごとに、前節の手法を適用して比例ゲイン K_p を求め、速度領域全体にわたって最小二乗法でフィッティングさせることにより調整した。

ここでは、無負荷において目標速度を 3100pps とした場合を例として説明する。pps 値はフルステップ駆動に換算した場合の値であり、以下においても同様である。

まず、図5に示される目標角度と回転角度の実測値との偏差の時間変化のデータを取得。この角度偏差の平均値 θ_{em} は -1.45 deg. であった。

次に、目標速度と回転速度の実測値との偏差のデータを図6に示す。速度偏差の最大値となる ω_{e0} は 78.6 pps (ラジアンの場合

2.47rad/s) であり、速度が零点を通過してから ω_{e0} の値に達するまでの時間 t_0 は、2.2ms であった。また、使用したモータの慣性モーメント J は $5.4 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$ であるので、(2)式からトルク T_0 は、 $0.0061 \text{N} \cdot \text{m}$ と求められた。

今回使用したモータの発生トルクは図 7 のように与えられるので、図 5 において得られた θ_{em} に対応する負荷トルク T_L は $0.248 \text{N} \cdot \text{m}$ となる。トルクは、この T_L を中心として図 6 の手順により得たトルク T_0 だけ変動していることになる。この T_0 の変動分として現れる電気角 $\Delta\theta_0$ は、 0.11deg であった。

求められた $\Delta\theta_0$, ω_{e0} を(3)式に代入することにより、 K_p を 1.3×10^{-3} と設定した。

上記の手順を全ての速度領域に適用することによって求められた K_p を、最小二乗法によりフィッティングした。無負荷の場合の値を K_{p1} 、負荷を取り付けた場合の値を K_{p2} とするとそれぞれ、

$$K_{p1} = 7.5 \times 10^{-7} \times \omega_r - 1.1 \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$K_{p2} = 1.4 \times 10^{-6} \times \omega_r - 1.4 \times 10^{-3} \quad (5)$$

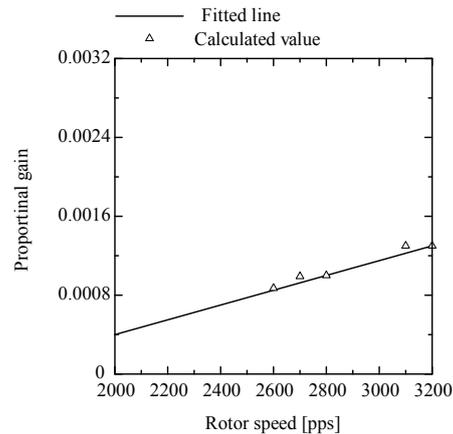
のように与えられる。ただし、 ω_r は目標回転速度である。

各目標速度および負荷条件に関する K_p を図 8 に示す。

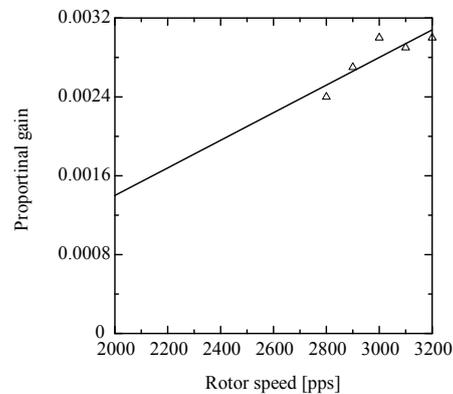
4. 実験

4.1 実験条件

文献4)では、中速域 500~1500pps について実験を行ったが、本実験では、無負荷の場合と負荷 load1 ($20.0 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$) 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 3200pps



(a) no load



(b) load1

図 8 各目標速度における比例ゲイン K_p

Fig. 8 Proportional gain K_p at each reference rotor speed.

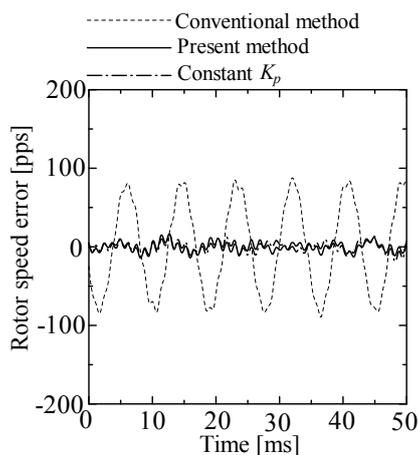
までの速度領域で実験を行う。また、ここでは、回転速度の目標値からの偏差の peak-to-peak (P-P 値) を評価指標として用いる。さらに、提案手法と比較するために、目標速度や負荷条件の変動にかかわらず比例ゲインの値を一定とした実験も行った。そこでは、無負荷において図 2 の制御法を使用した場合に、全速度領域である程度振動抑制効果がみられた値である 5.5×10^{-4} を用いた。

4.2 実験結果

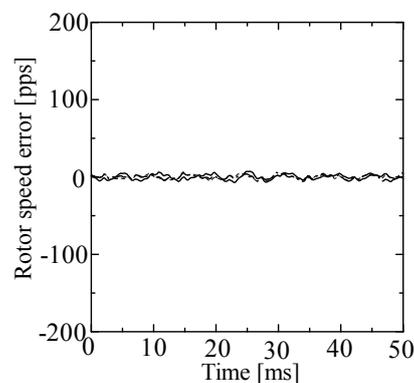
各制御法を用いて駆動した結果得られた回転速度偏差の時間変化を図9に示す。ここでは、破線が通常のマイクロステップ駆動、一点鎖線が比例ゲインを定数とした場合、実線が提案手法を用いた場合を示す。(a)は通常のマイクロステップ駆動において無負荷時にP-P値が増大した場合、(b)は無負荷時に通常のマイクロステップ駆動でも振動がほとんど見られなかった場合、(c)は負荷を取り付けた場合にP-P値が増大した場合である。(a)をみると、提案手法および比例ゲインを一定とした場合の双方において、全体として振動が抑えられた良好な結果となっている。(b)の場合には、提案手法を適用しない場合の振動がそもそも小さく、適用した場合でも振動はそれほど悪化しなかった。比例ゲインを一定とした場合でも同様の結果となった。(c)では、比例ゲインを一定とした場合には振動抑制の効果が十分ではないが、提案手法では良好に抑制されている。

図10に各目標速度におけるP-P値を示す。(a)は無負荷の場合であるが、通常のマイクロステップ駆動時にはP-P値が増大する2つのピークが確認できる。これに対して、提案手法および比例ゲインを一定とした場合の双方において、ピーク付近の振動が大きく抑制されている。

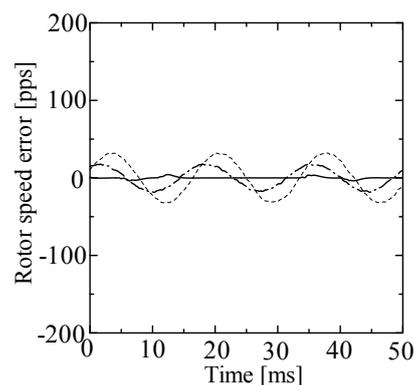
一方、負荷を取り付けた(b)においても、通常のマイクロステップ駆動では3000ppsにおいて大きなピークを確認できる。提案手法を用いた場合には、振動が大きく抑制されているが、比例ゲインを一定とした場合には、振動の抑制が十分でないことが分かる。



(a) 3100pps (no load)



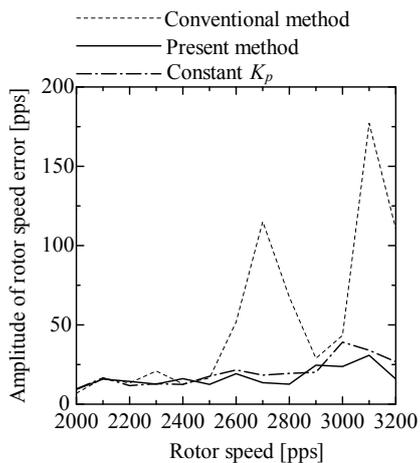
(b) 2200pps (no load)



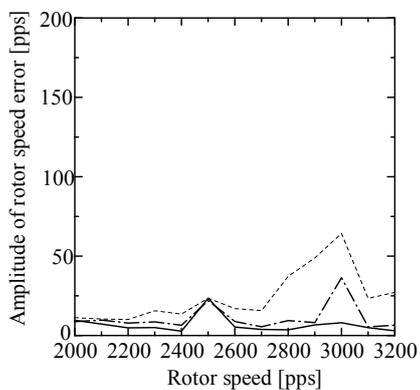
(c) 3000pps (load1)

図9 回転速度偏差の時間変化

Fig. 9 Temporal variation of rotor speed error.



(a) no load



(b) load 1

図 10 各目標回転速度における速度偏差 P-P 値

Fig. 10 P-P value at each reference rotor speed error.

5. おわりに

本研究では，ステッピングモータの高速域駆動において発生する振動を抑制する制御法に関して，体系的に比例ゲインを設定する方法を提案した。

提案手法を比例ゲインを一定値とした場合と比較した結果，提案手法ではより高い振動抑制効果がみられた。そのことから，本制御法において比例ゲインを試行錯誤的

に決定する過程を省略できる可能性が示されたといえる。

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，計測自動制御学会東北支部 第 267 回研究集会 267-9 (2011)
- 5) 中川正貴：ステッピングモータの高速域における振動抑制に関する研究，秋田大学修士論文 (2013)