

## ステッピングモータの高トルク高精度形マイクロステップ駆動

### High-Torque and High-Precision Microstep Drive of a Stepping Motor

藤田武\*, 秋山宜万\*, 松尾健史\*, 三浦武\*, 谷口敏幸\*

Takeshi Fujita\*, 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(stepping motor), 高トルク(high torque), 高精度(high precision),  
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速度の制御と位置の制御を開ループによって行うことができるモータである<sup>1)</sup>。また, デジタル制御にも適しており, 工作機器などの FA 機器やコピー機, FAX などの OA 機器などにも幅広く用いられている。

ステッピングモータを駆動する手法の一つとして, ステップ角を細分化できるマイクロステップ駆動という手法がある。マイクロステップ駆動では, 通常トルクリプルの少ない正弦波状の励磁電流波形が用いられるが, この波形ではモータが発生するトルクを使い切ることができない。そのためトルクを最大限に使い切る方法として, 励磁電流波形を台形波とする手法が提案された<sup>2)</sup>。しかし, 台形波での励磁電流の変化は直線状となるため, トルク曲線の非線形性により各マイク

ロステップの停止位置が等間隔でなくなるという問題が生じてしまう。そこで, この台形波状電流波形での高トルクを維持したまま, 電流の変化部分を調整することによって角度精度を向上させるという手法が提案された<sup>3)</sup>。しかし, その研究での電流波形は, トルク曲線の正弦波近似に基づいて構築されていたため, トルクリップルが生じる実際の駆動では, 誤差が生じてしまう。

そこで, 本研究で使用する励磁電流波形は高トルクを維持するために台形波状の波形とし, なおかつ, 上記の欠点を改善するために電流の変化する部分を, トルク曲線のデータを用いずに誤差を低減できる電流の調整方法を用いて決定した。また, 得られた電流波形でモータを実際に駆動し, 諸特性を測定することによってその有効性を検討した。

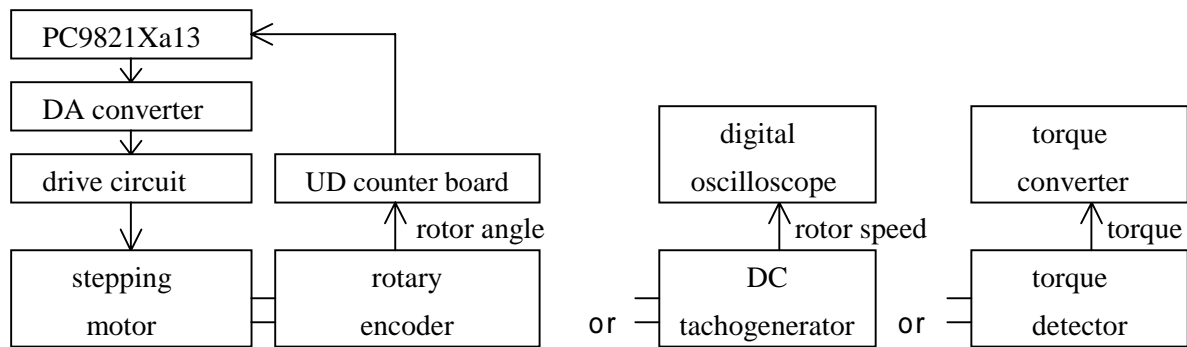


Fig.1. Experimental system.

## 2. 実験装置

本研究で使用したモータは、2相ハイブリッド形の PK244-02B(オリエンタルモーター、基本ステップ角  $1.8\text{deg}$ 、定格  $6\text{V}$ 、 $0.8\text{A}$ )である。

本研究での実験システムを Fig.1 に示す。駆動回路にはユニポーラ方式の電流制御形駆動回路を用いた。パソコンからの励磁指令が DA 変換機を介し駆動回路に与えることでステッピングモータが駆動される。回転子角度は、分解能  $6000\text{pulses/rev}$  のロータリーエンコーダ(2相出力)によって検出され、アップダウン(UD)カウンタボードで4逓倍することによって、最終的に  $24000\text{pulses/rev}$  の信号として測定される。回転子速度を測定する場合には、出力  $3\text{V}/1000\text{min}^{-1}$  の DC タコジェネレータに接続し、その出力信号がデジタルオシロスコープにて測定される。トルクを測定する場合には、トルク検出器により位相差信号が検出され、トルクコンバータによりトルク値に変換され測定される。

## 3. マイクロステップ駆動

ステッピングモータの基本ステップ角を小さなステップに分割する方法にマイクロステップ駆動という手法がある<sup>4)</sup>。本来の1ステップを分割するには、電流波形を Fig.2

のような階段状にする。この図の波形は、1ステップを8つのマイクロステップに分割する場合である。マイクロステップ駆動は、フルステップ駆動やハーフステップ駆動よりもステップ精度と分解能を向上させることが可能であり、ノイズや共振問題を低減することが可能であるなどの特徴を有する。

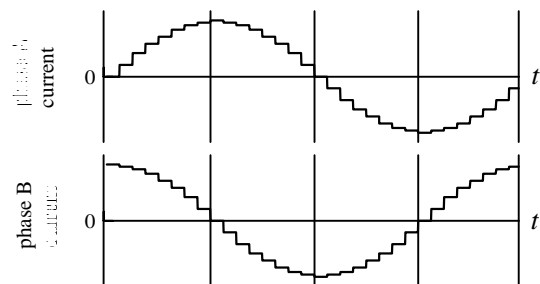
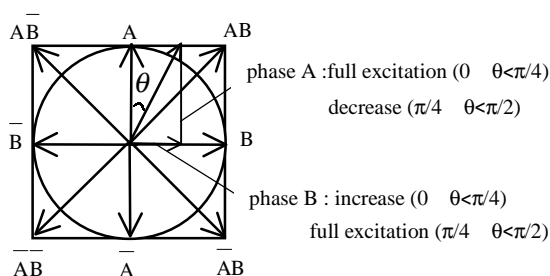


Fig.2. Waveforms of exciting current for microstep drive.

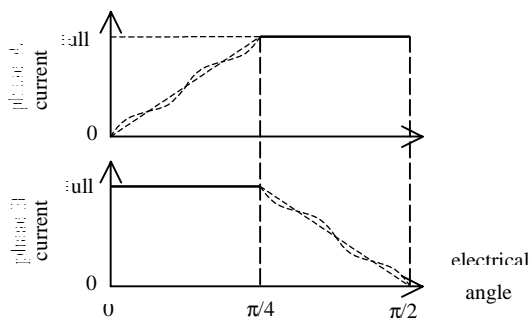
## 4. 高トルク発生用励磁電流波形の原理

Fig.3 (a)に、2相ステッピングモータのトルクベクトル図を示す<sup>5)</sup>。通常のマイクロステップ駆動では、トルクリプルを防ぐために各相の電流波形を正弦波とし、トルクベクトルが図中の円軌跡となるので、発生トルクは、最大限に使い切る正方形軌跡に比べて最大で  $1/\sqrt{2}$  までトルクが減少してしまう。トルクを最大限に使い切る正方形軌跡を実現するためには、台形波状の電流波形となる必要

がある。例えば A 相 - B 相間においては，回転子角度 $\theta$ (電気角で表示)が  $0 \sim \pi/4$  の範囲では A 相をフル励磁し B 相電流を次第に増加させ  $\pi/4 \sim \pi/2$  の範囲では B 相をフル励磁し A 相を減少させる必要がある。つまり，Fig.3(b)に示したように，片方の相がフル励磁の状態でもう片方の相の電流値が 0 とフル励磁の間を変化するのであれば，その経緯を問わずにトルクベクトルは正方形軌跡を描く。



(a) Torque Vector diagram.



(b) current waveform.

Fig.3. reference of torque and current.

台形波電流波形では Fig.3(b)の点線の部分が直線状となるので，トルク曲線の非線形性により各マイクロステップの停止位置間隔が等間隔でなくなってしまう。そのため高トルクであっても，精度が低下してしまう。そこで台形波状のトルクを維持したままで角度精度を上げるために，電流の変化する部分を変化させて各マイクロステップの停止位置間隔を等間隔にする方法が提案された<sup>3)</sup>。その手法ではトルク曲線を次のような正弦

波状と仮定し，

$$T = -K_r i_A \sin \theta + K_r i_B \cos \theta \dots\dots(1)$$

ただし， $T$  : 発生トルク， $K_r$  : トルク定数

$i_A$  : A 相励磁電流， $i_B$  : B 相励磁電流

回転子の停止位置となるトルク平衡点 $\theta_c$ では  $T = 0$  となるということから，(1)から次の関数を得て，

$$i_A = i_B (\tan \theta_c)^{-1} \text{ または } i_B = i_A \tan \theta_c \dots(2)$$

この関数を Fig.3.(b)の点線の部分に使うことによって誤差を低減した。(これ以降，この手法で得られた波形を台形波修正形と呼ぶ。)しかし，この手法はトルク曲線が理想の正弦波状を描くという仮定の下に成り立っており，コギングトルクなどによりトルクリプルが生じてしまう実際のトルク曲線とは誤差が生じるため，回転角度にも誤差が生じてしまう。

そこで本研究では，正方形軌跡のトルクベクトルを維持するために台形波状の電流波形を使用し，なおかつ上記の欠点を改善するために，トルク曲線のデータを用いずに，励磁電流を調整することによって回転子の停止位置間隔を等間隔とすることのできる手法を用いて，Fig.3.(b)の部分の電流波形を決定した。

## 5. 電流を調整する方法

台形波状の電流波形でモータを励磁した場合の回転角度誤差を減少させるために，励磁電流の変化する部分を決定する手法として，本実験では以下の手法を用いた。この手法は実際のモータの回転角度から角度誤差を低減する新たな電流波形を構築する手法であり，調整前よりも角度誤差を低減できるという利点をもつ。ここではその手法について例を挙げて簡単に説明する。

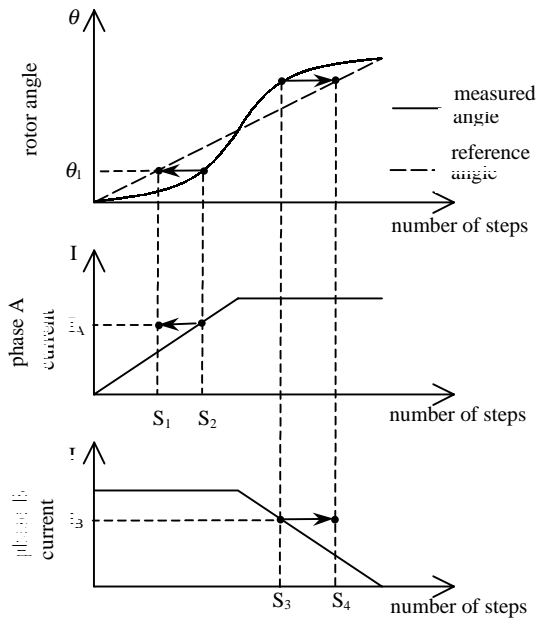


Fig.4. technique of current transform.

今,台形波でステッピングモータを駆動した場合の回転角度の測定結果が Fig.4 のような関係にあるとする.この回転角の測定波形は目標波形と誤差があるので,その差を縮めるように電流の調整を行う.あるステップ  $S_1$  を例にとってみると,実際の回転角度は理想角度の  $\theta_1$  には達しておらず,誤差が生じている.しかし,ステップ  $S_2$  での実際の回転角度は  $\theta_1$  であり,  $S_1$  での理想の角度と一致している.そこで,ステップ  $S_2$  での励磁電流を  $S_1$  で励磁してやることによってステップ  $S_1$  での回転角が  $\theta_1$  となり,理想の角度と一致する.励磁電流の変化が減少の場合でも同様の操作を行い,例えば  $S_4$  での励磁電流は  $S_3$  での値となる.

これが今回の実験に使用した方法であり,これをマイクロステップ駆動のすべてのステップにおいて行うことにより,誤差を低減する電流波形が得られた.本実験では最初の回転に 64 分割の台形波を用いて回転角度を検出し,その測定結果から新たな電流波形を構築した.

## 6. 実験結果

5章の手法を用いて,台形波から新たな電流波形を得た結果を Fig.5 として示した.

Fig.6 に,静止角度誤差を測定した結果を示す.提案手法を用いた場合には,その値が全ての波形の中で一番小さくなるという結果となった.

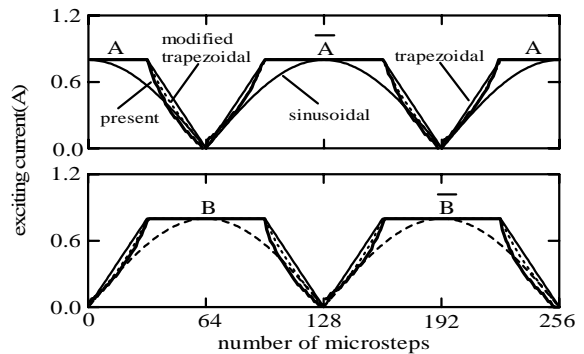


Fig.5. Waveforms of exciting current.

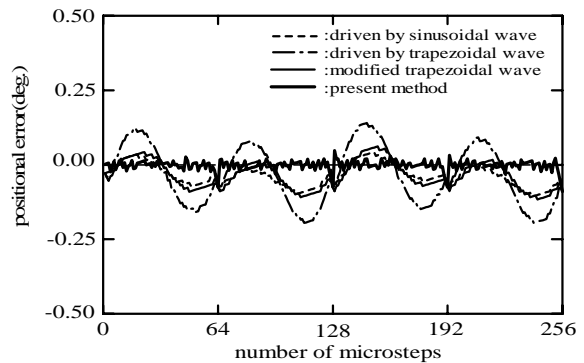


Fig.6. Positional errors.

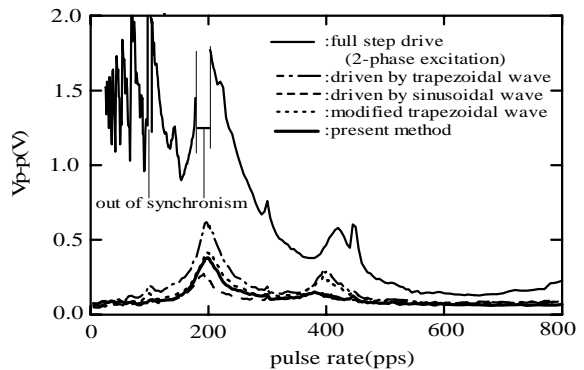


Fig.7. Speed-resonance characteristics.

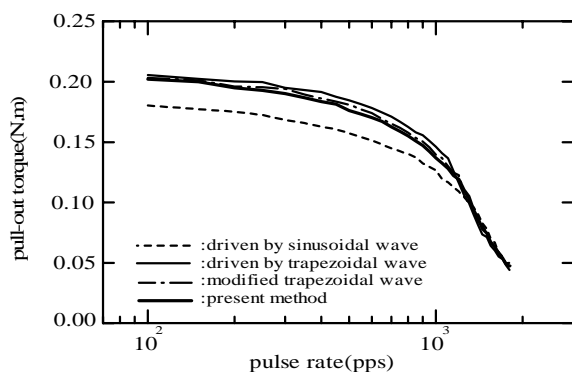


Fig.8. Speed-torque characteristics.

Fig.7 に、DC タコジェネレータの出力電圧のリプル分の peak to peak で表した速度振動特性<sup>2,5)</sup>を示す。横軸のパルス周波数はフルステップ駆動に換算した値である(以下すべて同様)。マイクロステップ駆動を行った場合にはいずれもフルステップ駆動において現れる不安定現象が抑制されている。提案手法を用いた場合には 200pps 付近の共振点における振幅が正弦波駆動の場合より増加しているものの、それ以外の点ではほぼ正弦波と変わりのない結果となった。

Fig.8 に、トルクコンバータを用いて測定した速度トルク特性を示す。提案手法を用いた場合には、台形波駆動の場合とほぼ同等のトルクが得られ、1000pps 以下の領域では正弦波駆動の場合に比べてその値が約 10%程度増加している。

## 7. おわりに

ステッピングモータの高トルクで高精度なマイクロステップ駆動を行うために電流を調整し、新たに得られた電流波形でモータを駆動した。

6章に示した実験結果により、この電流波形での静止角度誤差は、これまでの手法に比べ低減されることが示された。また速度振動特性においても共振の 200pps 以外では、台

形波や台形波修正形よりも改善されており、ほぼ正弦波の特性に等しいものとなっている。トルク特性では、台形波駆動の場合のトルク曲線とほぼ等しく、正弦波よりもトルクが増大していることがわかる。これらのことから、本手法は高トルクで高精度なマイクロステップ駆動の手法として以前の台形波修正形よりもより有効な手法であるということが実証された。

以上のことから、本手法の適用により簡易な駆動回路を持つ 2 相機のシステムの単純・低コストという特徴を損なうことなく特性の改善が可能であり、2 相機の利用の拡大に繋がると考えられる。

## 参考文献

- 1) 見城尚志：小形モータの基礎とマイコン制御，96/99，総合電子出版社（1983）
- 2) 百目鬼英雄：5 相ステッピングモータのマイクロステップ新駆動法の提案，電学論 D，112-8，771/772（1992）
- 3) 三浦武，谷口敏幸：2 相ステッピングモータの高トルク形マイクロステップ駆動，電学論 D，121-12，1297/1298（2001）
- 4) 見城尚志，菅原晟：ステッピングモータとマイコン制御，69/71，総合電子出版社（1994）
- 5) 百目鬼英雄：ステッピングモータの使い方，15/56，工業調査会（1993）