

ステッピングモータのフルステップ駆動における 基本ステップ角の細分化に関する検討

A Consideration on Subdivision of Basic Step Angle in Full-Step Drive of a Stepping Motor

○松尾 健史*, 三浦 武*, 田島 克文*,

○ Kenshi Matsuo*, Takeshi Miura*, Katsubumi Tajima*,

*秋田大学

*Akita University

キーワード：ステッピングモータ (stepping motor), フルステップ駆動 (full-step drive),
マイクロステップ駆動 (micro-step drive), 低速域振動 (low frequency resonance),
振動特性 (resonance characteristics),

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 理工学研究科
松尾 健史, Tel.: (018)889-2332, Fax.: (018)837-0406, E-mail: matsuo@gipc.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り、センサを必要とせず開ループで回転角度や回転速度を制御できるモータである。この簡易性から低コストでシステムを構築できる。このため、FA 機器や OA 機器などに幅広く採用されている。

しかし、特定の入力パルス周波数において、急に振動が大きくなる共振現象¹⁾が起これ、これが低速域振動および位置決め時の整定時間の増大の原因となる。この振動に対する一般的な抑制法として、基本ステップ角の細分化するマイクロステップ駆動がある。しかし、この駆動法は電流値を微細に制御できる回路が必要であり、駆動回路が高価になる問題がある。

そこで、2相ステッピングモータにおいて安価なフルステップ駆動回路でも、励磁スイッチングシーケンスの調整を行うことで、基本ステップ

角を細分化できる方法が提案され、さらに、この方法により振動が抑制される駆動結果が示されている²⁾。しかし、これは1相励磁駆動に基づいているため、正弦波の励磁電流により基本ステップ角を細分化する従来法のマイクロステップ駆動で発生するトルクより小さくなる。そこで、スイッチングシーケンスの調整で細分化する方法を、2相励磁駆動で実現した方法³⁾が、近年報告されている。この方法は、2相モータで発生されるトルクをすべて使い切ることができる。しかし、この方法はまだ振動性能を、まだ十分に評価されていない。

そこで本研究では、振動特性を評価するため、その2相励磁駆動のスイッチングシーケンス調整法³⁾と1相励磁駆動の調整法²⁾(以降本研究では、それぞれ2相励磁形調整法および1相励磁形調整法と呼ぶ)で駆動した場合の速度振動

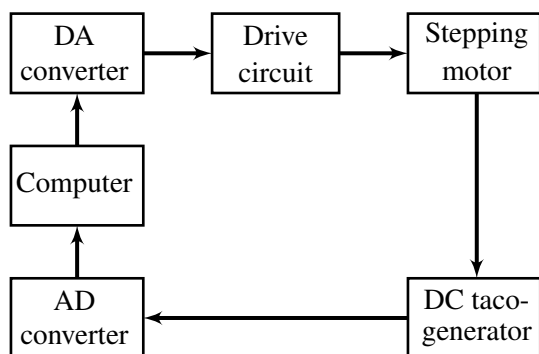


Fig. 1 ステッピングモータ駆動システムの概略図。A sketch diagram of a stepping motor drive system.

特性を取得し、他の駆動法と比較する。具体的には、従来法のフルステップ駆動である1相励磁駆動、2相励磁駆動の場合、および、(正弦波励磁電流で駆動した)従来法のマイクロステップ駆動における速度振動特性をそれぞれ取得する。さらに、1相および2相励磁形調整法を元に、これらで発生されるトルクと、それぞれ同じトルクが発生するように励磁電流を与えた変形のマイクロステップ駆動(以降、1相励磁形マイクロステップ駆動、2相励磁形マイクロステップ駆動⁴⁾と呼ぶ)で、速度振動特性を取る。最後に、これらの振動特性をスイッチングシーケンスの調整法の特性和比較する。

2. 駆動システム

本研究で使用するステッピングモータ駆動システムをFig. 1に示す。ここで使用するステッピングモータは、バイファイラ巻の2相ハイブリッドステッピングモータ(オリエンタルモーター社製PK244-01B)であり、Table 1にその仕様を示す。励磁指令はコンピュータからDA変換器を介して駆動回路へ伝送され、励磁電流がその指令に従って回路からモータの各相に流れることで駆動する。速度検出のため、使用するDCタコジェネレータ(多摩川精機社製TS680N1E3)は $3\text{ V} / 1000\text{ min}^{-1}$ であり、この速度情報はAD変換器を介してコンピュータで取得される。こ

Table 1 使用するステッピングモータの仕様。Specification of the stepping motor.

Rated voltage	4.0 V
Rated current	1.2 A
Holding torque	0.26 N·m
Rotor inertia	$5.4 \times 10^{-6}\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$
Step angle	1.8 deg

こで、タコジェネレータは速度検出するのみに使われ、制御のフィードバックとしては使われない。すなわち、モータ駆動自体は開ループ制御で行われている。本研究では、回転速度は1 secあたりの指令パルス数で表現し、pps (pulses per second) と表す。例えば10 ppsは1 secあたり10 pulses分回転することを意味し、1パルスで1.8 deg回転するモータであることから、18 deg/secを意味する。

3. 駆動方式

前半はフルステップ形駆動の紹介、後半はマイクロステップ形駆動の紹介をする。また、説明のため、Fig. 2で示される2相ステッピングモータのトルクベクトル図¹⁾を適宜用いる。

3.1 フルステップ形駆動

基本ステップ角ずつ回転するフルステップ駆動である1相励磁駆動および2相励磁駆動について説明し、次に励磁スイッチングシーケンスの調整により、基本ステップ角を細分化する1相励磁形調整法および2相励磁形調整法による駆動について説明する。

3.1.1 フルステップ駆動

基本ステップ角度ずつ回転する励磁方式としては、1相励磁方式と2相励磁方式があり、これによる駆動が1相励磁駆動および2相励磁駆動である。

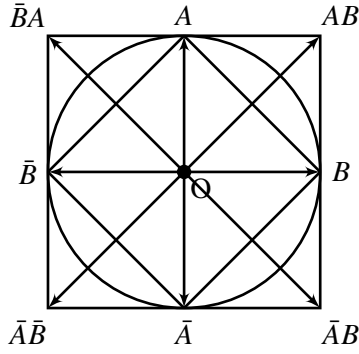


Fig. 2 トルクベクトル図. Torque vector diagram.

1相励磁駆動は、例えば時計回り方向に回転させるためには、Fig. 2で見ると、励磁シーケンスが $A, B, \bar{A}, \bar{B}, \dots$ のように相を切り替えればよい。また、2相励磁駆動は、同様に $AB, \bar{B}\bar{A}, \bar{A}\bar{B}, \bar{B}A, \dots$ のように切り替えて励磁をする。ここで、 AB は A および B 相の2相を同時に励磁することを表す。いずれも電気角で $\pi/2$ ずつ回転する。

このとき、モータで発生するトルクは以下の通りになる。

$$\begin{aligned}
 T_A(i_A, \theta) &= -K_T i_A \sin(N_r \theta) \\
 T_B(i_B, \theta) &= K_T i_B \cos(N_r \theta) \\
 T_{\bar{A}}(i_{\bar{A}}, \theta) &= K_T i_{\bar{A}} \sin(N_r \theta) \\
 T_{\bar{B}}(i_{\bar{B}}, \theta) &= -K_T i_{\bar{B}} \cos(N_r \theta)
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 θ は回転子角度、 $i_A, i_B, i_{\bar{A}}, i_{\bar{B}}$ は A 相、 B 相、 \bar{A} 相、 \bar{B} 相それぞれの励磁電流、 K_T はトルク定数、 N_r は回転子の歯数を表し、 T_X 標記は X 相で励磁した場合に発生するトルクを意味することにする。また、2相励磁方式で発生するトルクは、例えば A 相と B 相を同時に励磁すると、Fig. 2 の AB に停止し、トルクは $T_{AB} = T_A + T_B$ となるため、 $i_A = i_B = I_m$ のように定格電流 I_m を流すと、以下のようになる。

$$T_{AB}(I_m, \theta) = \sqrt{2} K_T I_m \cos(N_r \theta + \frac{\pi}{4}) \quad (2)$$

ここで、 T_{XY} 標記は X 相と Y 相が同時に励磁された場合に発生するトルクを表す。同様にして

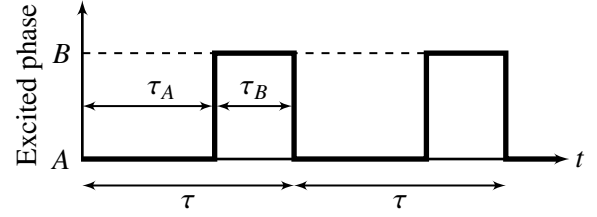


Fig. 3 1相励磁駆動におけるスイッチングシーケンス. Switching Sequence of 1-phase excitation drive²⁾.

$\bar{B}\bar{A}, \bar{A}\bar{B}, \bar{B}A$ の2相励磁においても求められる。このように、各相の励磁電流を定格値にした場合、2相励磁方式は1相励磁方式に比べ、高トルクを発生できる。この関係はFig. 2からも分かる。

3.1.2 スイッチングシーケンスの調整法

特定の入力パルス周波数により、共振が発生する場合、低速域振動の原因となる。その対策として、一般に基本ステップ角を細分化するマイクロステップ駆動を用いるが、微細な電流制御可能な回路が必要になる。そこで三浦らは、微細な制御回路を必要としないフルステップ駆動回路においても基本ステップ角度を細分化するため、励磁指令のタイミングを調整するスイッチングシーケンスの調整法²⁾ (1相励磁形調整法)を提案した。以下、この手法について説明する。 A 相から B 相へ移動する場合、Fig. 3のように、機械的時定数より充分小さい時間 τ において、時間 τ_A の間は A 相が励磁され、時間 τ_B の間は B 相が励磁されるものとする。そうすることで、平均のトルク T_{ave} は次のように表せる。

$$\begin{aligned}
 T_{ave}(\theta) &= \frac{\tau_A}{\tau} T_A(i_A, \theta) + \frac{\tau_B}{\tau} T_B(i_B, \theta) \\
 &\text{ただし, } \tau = \tau_A + \tau_B
 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 τ_A の間は $i_A = I_m, i_B = 0$ であり、 τ_B の間は $i_A = 0, i_B = I_m$ である。 $T_{ave}(\theta_e) = 0$ となるトルク平衡点 θ_e は、 A と B の間の任意の位置となる。よって、式(3)より整理すると、次の式

が成り立つ。

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

この励磁スイッチング調整法の場合、Fig. 2のトルクベクトル図において、トルクは一番内側の四角形 $AB\bar{A}\bar{B}$ となる。

次に、2相励磁のスイッチングシーケンス調整法³⁾(2相励磁形調整法)を考える。これは前述の1相励磁形調整法と同様であるが、Fig. 2において、1相励磁の A から B へ移動の代わりに、2相励磁して AB から $B\bar{A}$ へ移動する場合、時間 τ_{AB} の間は A 相と B 相を2相励磁、時間 $\tau_{B\bar{A}}$ の間は B 相と \bar{A} 相を2相励磁するものとする。具体的には、以下の時間それぞれ励磁する。

$$\tau_{AB} = \frac{\tau}{1 + \tan(N_r\theta_e)}, \quad \tau_{B\bar{A}} = \frac{\tau \tan(N_r\theta_e)}{1 + \tan(N_r\theta_e)} \quad (5)$$

ここで、 τ_{AB} 間は $i_A = i_B = I_m, i_{\bar{A}} = 0$ であり、 $\tau_{B\bar{A}}$ 間は $i_A = 0, i_B = i_{\bar{A}} = I_m$ である。例えば $B\bar{A}$ 相から $\bar{A}\bar{B}$ 相への移動のような他の相間移動においても、同様に励磁を行う。発生トルクはFig. 2の一番外側の四角形 $AB \rightarrow B\bar{A} \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{B}A$ の軌跡を描く。トルクベクトル図から明らかのように、1相励磁形調整法に比べ、最大トルクの比較で $\sqrt{2}$ 倍になる。

3.2 マイクロステップ形駆動

本節では、前節のスイッチングシーケンスの調整法における振動特性と、マイクロステップ駆動時の特性を比較するため、従来法とおよび1相および2相励磁形調整法による駆動で発生するトルクと、それぞれ同等のトルクを発生するように、励磁電流を調整したマイクロステップ駆動(1相励磁形マイクロステップ駆動、2相励磁形マイクロステップ駆動)について説明する。

3.2.1 従来法のマイクロステップ駆動

はじめに従来法のマイクロステップ駆動を紹介する。この駆動は、例えば A 相から B 相へ移

動する場合、励磁電流を正弦波で与えたとき、すなわち、

$$i_A = I_m \cos(N_r\theta_e), \quad i_B = I_m \sin(N_r\theta_e) \quad (6)$$

と与えたとき、これらを式(1)に代入し、合成トルクを計算すると、次のようになる。

$$T = T_A + T_B = -K_T I_m \sin\{N_r(\theta - \theta_e)\} \quad (7)$$

この式よりトルクは、Fig. 2において分かるように、1相励磁時の最大トルクと同じくなり、 $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$ のように円軌跡を描く。このため、トルクリップルを生じない利点がある。

3.2.2 変形のマイクロステップ駆動

前節で述べたスイッチングシーケンスの調整法は、従来法のマイクロステップと同じトルク発生しない。そこで、速度振動特性を比較するため、次のような変形のマイクロステップ駆動を考える。まず1相励磁形調整法と同じトルクになるように、次のような電流値を与え駆動する。

$$i_A = \frac{I_m}{1 + \tan(N_r\theta_e)}, \quad i_B = \frac{I_m \tan(N_r\theta_e)}{1 + \tan(N_r\theta_e)} \quad (8)$$

これは、 $i_A + i_B = I_m$ となる。これを1相励磁形マイクロステップ駆動とする。

同様に2相励磁形調整法においては、三浦らの高トルク形マイクロステップ駆動⁴⁾を用いる。この文献では、 A 相から B 相へ移動する場合の励磁法を提案しているが、本研究では AB 相から $B\bar{A}$ 相へ移動する場合のような2相励磁形に変更する。具体的には、次のように電流値を与えて駆動すればよい。Fig. 2において、 AB と B の間では、

$$i_A = \frac{I_m\{1 - \tan(N_r\theta_e)\}}{1 + \tan(N_r\theta_e)}, \quad i_B = I_m \quad (9)$$

とし、 B と $B\bar{A}$ の間では、

$$i_B = I_m, \quad i_{\bar{A}} = -\frac{I_m\{1 - \tan(N_r\theta_e)\}}{1 + \tan(N_r\theta_e)} \quad (10)$$

のように励磁する。本研究では、これを2相励磁形マイクロステップ駆動と呼ぶことにする。

以上のように電流値を与えると、1相および2相励磁形調整法と、それぞれ同じトルクが発生する駆動が可能になる。

4. 速度振動特性の実験

ステッピングモータを前章で説明した各駆動方式で定速駆動した場合、その速度の振動成分を計測する。これを低速から中低速域領域でそれぞれ計測した場合、その速度振動特性を取得し、各々を比較する。

4.1 実験方法

実験条件は、速度として入力パルスの周波数を10 ppsから5 pps毎で800 ppsまで、無負荷で駆動した場合、各速度の振動成分を測定する。ここでは、速度検出器であるDCタコジェネレータで発電される電圧値のpeak to peak値が、その速度振動成分 V_{p-p} となる。

このとき、前章は説明した次の方式で、それぞれ駆動する。

- a) スイッチングシーケンスの調整法の駆動(1相励磁形調整法²⁾、2相励磁形調整法³⁾)
- b) フルステップ駆動(1相励磁駆動、2相励磁駆動)
- c) 変形のマイクロステップ駆動(1相励磁形マイクロステップ駆動、2相励磁形マイクロステップ駆動⁴⁾)
- d) 従来法のマイクロステップ駆動

なお、方式a), b)はフルステップ形駆動、方式c), d)はマイクロステップ形駆動である。また、方式a)の調整法の駆動において、 τ を機械的および電氣的時定数の中間である0.8 msに設定する²⁾。

4.2 結果

4.2.1 1相励磁形駆動の場合

得られた速度振動特性を、1相励磁形の駆動はFig. 4に、2相励磁形の駆動はFig. 5に、それぞれまとめて示す。比較のため、双方に方式d)の従来法のマイクロステップ駆動で得られた振動特性も示す。Fig. 4で示されるように1相励磁形駆動の場合は、方式a), b), c)ともに175 pps付近で共振が見られる。方式b)のフルステップ駆動では脱調が起こり、指令通りの駆動ができない。一方、方式a)の調整法を用いた場合は脱調が起こらず400 pps以下の速度域では方式b)より振動が抑えられている。それ以上の速度域では、そもそも振動が少ない領域であることから、どちらも大きな差は見られない。この結果は、三浦らの文献²⁾と同様の結果である。

さて、方式c)の1相励磁形マイクロステップ駆動を行なった場合、フルステップ形駆動の方式a)およびb)に比べて、計測したすべての速度域で振動成分が小さくなった。微細な電流制御を行えることが大きな利点となり、結果として振動が抑制されたと考えられる。

この方式c)は、マイクロステップ形駆動同士を比較しても、従来法の方式d)より、振動が最大になる周波数付近を中心に概ねの速度域で振動成分は小さくなる。これは、発生トルクが小さいため、振動も小さくなったものと考えられる。

方式a)の調整法による振動特性の考察に戻れば、従来のフルステップ駆動である方式b)の1相励磁駆動と、方式c)の1相励磁形マイクロステップ駆動の丁度中間の性能を有することが分かる。

4.2.2 2相励磁形駆動の場合

2相励磁形駆動の場合は、Fig. 5で示されるように、従来のフルステップ駆動である方式b)の2相励磁駆動では、200 pps付近の共振点で1相励磁駆動と同様に脱調を起こすが、方式a)の

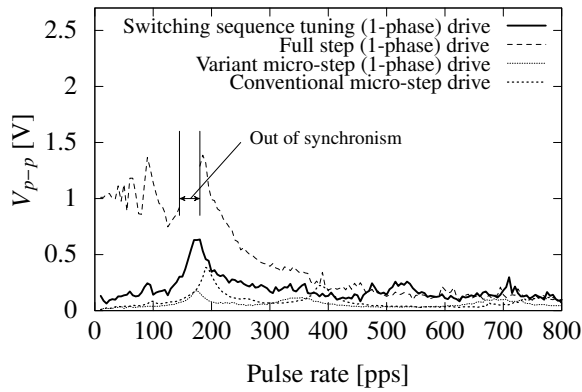


Fig. 4 1相励磁形駆動における速度振動特性. Speed-resonance characteristics in drives based on 1-phase excitation.

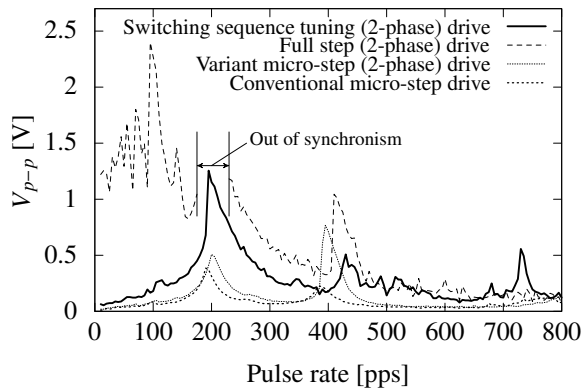


Fig. 5 2相励磁形駆動における速度振動特性. Speed-resonance characteristics in drives based on 2-phase excitation.

2相励磁形調整法および方式c)の2相励磁形マイクロステップ駆動では、脱調を起こさず振動が抑制されている。

また、2相励磁形駆動は、2相ステップモータが発生されるすべてのトルクが引き出されるため、1相励磁形駆動に比べ、高トルクになる。このため、振動成分が1相励磁に比べ大きくなる。Fig. 4および5で示されるように、方式a)の1相および2相励磁形調整法を比較すると、最大振動周波数付近は特に、2相励磁形の方が大きい振動になっていることが分かる。

方式c)の2相励磁形マイクロステップ駆動時は、方式a)の2相励磁形調整法による駆動より、微細な電流制御を行うため、さらに振動が小さくなるが、従来のマイクロステップ駆動よりは

振動が大きくなる。これも前述通り発生トルクが大きいためであり、方式d)の従来法のマイクロステップ駆動より最大で $\sqrt{2}$ 倍のトルクとなるためである。

次に特徴的な部分として挙げられるのは、2相励磁形駆動では400 pps付近で共振点がある。これは1相励磁形駆動では現れなかった部分であるが、方式a), b), c)の2相励磁形駆動すべてで現れている。しかし、1相励磁形駆動場合や、最大共振点付近の場合と異なり、方式a)の調整法の振動より、方式c)の変形のマイクロステップ駆動で発生する振動が大きくなり、これまでの場合と異なることが分かる。なお、2相励磁形マイクロステップ駆動の特性は、三浦らの文献⁴⁾で示されている振動特性と同様の特性を示している。

調整法による駆動の振動特性に戻ると、1相励磁形駆動時と同様に、方式b)の2相励磁駆動とc)の変形のマイクロステップ駆動との中間の振動性能を有している。ただし、前述の通り、400 pps付近では2相励磁形駆動の中では最も振動特性が良い。しかし、750 pps付近では、他の駆動では現れなかった共振が現れている。

5. おわりに

本研究は、1相および2相励磁方式に基づいてスイッチングシーケンスの調整法により、フルステップ駆動でも、マイクロステップ駆動のような基本ステップ角度を細分化できる手法で駆動した場合の速度振動特性を取得し、従来のフルステップ駆動および同じトルクを発生する変形のマイクロステップ駆動とで、振動特性の比較を行った。結果として、フルステップ駆動と変形のマイクロステップ駆動との中間の性能を有していることが分かったが、2相励磁形調整法の場合は、最大振動になる共振点以外の共振点付近で例外が見られた。また、2相励磁形調整法は1相励磁形調整法より、高トルクのため振動が大きくなることも分かった。今後の課

題として、共振のメカニズムの解明と抑制方法を検討していきたい。

参考文献

- 1) 百目鬼 英雄: ステッピングモータの使い方, 工業調査会 (1993)
- 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**-5, 519/520 (2004)
- 3) 金 柯: 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に関する研究, 秋田大学修士学位論文 (2016)
- 4) 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, 電気学会論文誌 D, **121**-12, 1297/1298 (2001)