

ステッピングモータの開ループ制御における 制御特性改善法の検討

Improvement of Control Performance in Open-Loop Control of a Stepping Motor

三浦 武*, 秋山宜万*, 松尾健史*, 谷口敏幸*

Takeshi Miura*, Yoshikazu Akiyama*, Kenshi Matsuo*, Toshiyuki Taniguchi*

*秋田大学

*Akita University

キーワード: ステッピングモータ (stepping motor), 開ループ制御(open-loop control)

連絡先: 〒010-8502 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

制御用小形モータの中でも特にステッピングモータは、デジタル的なパルス列信号によって制御指令を与えることができるので、コンピュータ関係機器において数多く用いられている。特に、センサ等からのフィードバック信号を用いずに開ループで速度および位置制御が可能であるという点で、低コストなサーボモータとして大きな利点を持っていると言える。

ただし、その駆動は、フルステップ駆動時においては、パルス信号が入力されるごとにステップ状に回転するスタイルとなる。このときステップごとに生じる回転子振動が、ステッピングモータの駆動において大きな問題となっていることはよく知られている¹⁾。

本報告では、著者らが取り組んできたステッピングモータの開ループ制御のスタイルを維持した

形での制御特性の改善法に関して、特に回転子振動の抑制を観点にしてその有効性や問題点をまとめ、今後の展望を検討・考察する。

2. フルステップ駆動における基本 ステップ角の細分化

ステッピングモータの回転子停止角度は、フルステップ駆動において基本ステップ角単位で離散化され、その中間位置では停止できない。その改善のための方法として、励磁電流値をアナログ的に微小に変化させるマイクロステップ駆動法がある²⁾。この方法によれば、回転子角度をほぼ連続的に変化させることができ、よってステップごとに現れる回転子振動も抑制できることが知られている²⁾。ただし、マイクロステップ駆動の実現のためには、励磁電流の精密な制御が必要であり、よって駆動回路は高価なものになってしまう。

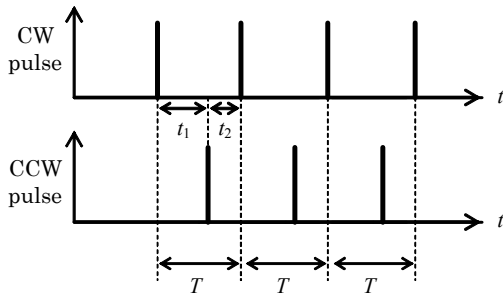


Fig. 1 Switching sequence for division of fundamental step angle.

このような状況の中、近年では、フルステップ駆動形のシステムにおいても、駆動時に与える制御用パルス列信号の数やタイミングを調整することによって、マイクロステップ駆動とほぼ同様な性能を持つ制御システムを構築する方法が提案され始めている^{3, 4)}。それらの方法においては、基本的にFig. 1のようなパルス列信号が用いられる。

ステッピングモータのフルステップ駆動においては、指令パルスを1個加えることによって1基本ステップ角分だけ回転子が回転する。Fig. 1では正逆それぞれの方向のパルスを交互に加えているが、その周期である図中の T をモータの機械的時定数に比べて十分小さい値とすると、回転子は正転・逆転を繰り返さずに、正転方向の相が励磁されている時間である t_1 と逆転方向の励磁時間である t_2 のうち時間比率の高い方向へ滑らかに回ることになる。 t_1 と t_2 の決定法としては、現在まで以下に述べる2つの方法が提案されている。

第1の方法は、PWM形スイッチングシーケンスである³⁾。この方法の概要をFig. 2に示す。この方法においては、モータの基本ステップ角と等しいpeak to peak値を持つ搬送波が生成されるが、その周期は前述の T となっている。搬送波の値と目標回転子角度の各時刻における値を比較し、前者より後者が大きくなった時刻に逆転パルスを加え、

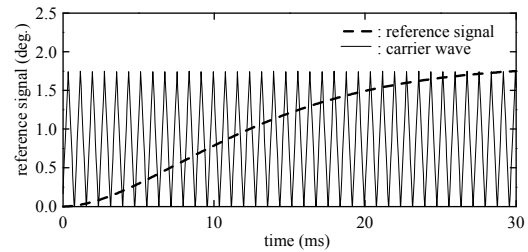


Fig. 2 PWM type switching sequence.

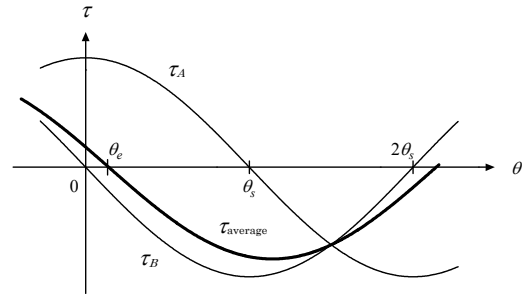


Fig. 3 Characteristics of produced torque.

後者より前者が大きくなった時刻には正転パルスを加える。

この方法においては、モータの構造等に関する情報は機械的時定数以外には使用されないことから、比較的容易に実装することが可能となっている。

第2の方法は、チョップ形スイッチングシーケンスである⁴⁾。この方法では、モータのトルク特性を考慮した処理がなされる。このとき用いられる角度 - トルク特性の概要をFig. 3に示す。この図は2相モータを1相励磁駆動した場合の例である。正転パルスが入力されると、図のトルク τ_B が発生し、逆転パルスが入力されると τ_A が発生する。スイッチングの周期 T が機械的時定数より十分小さい場合に、実際に回転子に影響を与えるトルクは、Fig. 1における正転励磁時間 t_1 と逆転励磁時間 t_2 に比例する重みを τ_B および τ_A に課して得られる重み付き平均値 $\tau_{average}$ となり、回転子の停止角度と

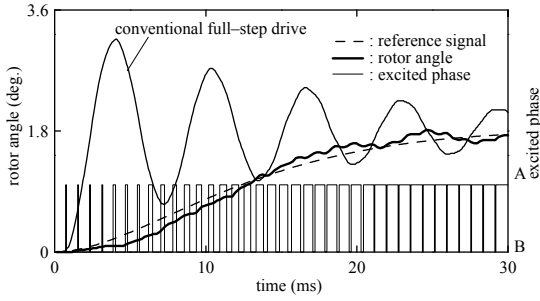


Fig. 4 Example of driving with PWM type switching sequence.

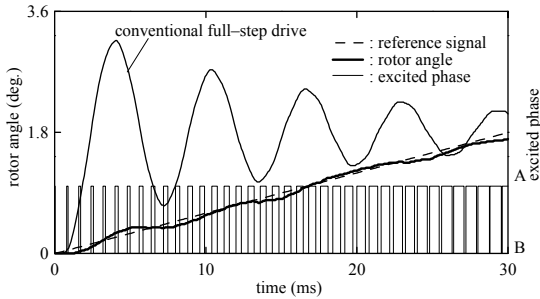


Fig. 5 Example of driving with chopper type switching sequence.

なるトルク平衡点 θ_e を図のように基本ステップ角 θ_s の中間位置に設定することができる。

このとき、 θ_e に対して目標停止角度である θ_r を与えると、 t_1 と t_2 は次のように得られる⁴⁾。

$$t_1 = \frac{T \tan(N_r \theta_r)}{1 + \tan(N_r \theta_r)} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{T}{1 + \tan(N_r \theta_r)} \quad (2)$$

上記2つの方法でステッピングモータを駆動した例をFig. 4およびFig. 5に示す。ここでは、供試モータとしてPK244-02B(オリエンタルモータ、2相、定格電流0.8A、基本ステップ角1.8deg.、回転子の歯数50)が使用されており、スイッチングの周期はモータの機械的時定数(数ms程度)より十分小さい10.8msである。回転角度は光学式ロータリーエンコーダ(6000p/r)の信号を4通倍した24000p/r

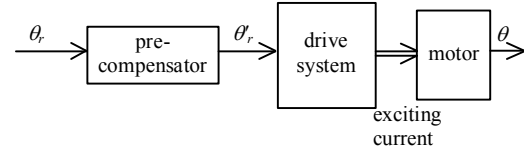


Fig. 6 Control system of a stepping motor with a pre-compensator.

の分解能で検出されている。

両者とも、通常のフルステップ駆動には見られない滑らかな角度変化が生じている。ただし、Fig. 4を見ると、回転開始時直後および基本ステップ角到達時直前付近で回転子角度は目標値から若干ずれているのがわかる。これは、PWM形スイッチングシーケンスを用いる駆動法においてモータの特性を考慮せずに励磁タイミングを決定しているためであり、モータのトルク特性を考慮したチョッパ形駆動を行っているFig. 5の場合には、回転開始時および基本ステップ角到達時の双方において大きなずれは見られない。

3. 前置補償要素の適用による回転子振動抑制

前章で紹介した駆動法を用いると、フルステップ駆動形システムを用いた場合でもマイクロステップ駆動と同様に回転子を滑らかに回転させることが可能になる。それらの駆動法を他の制御要素と組み合わせることにより、更なる制御特性の改善が期待できることになる。

特に今回注目している回転子の振動抑制に関しては、開ループ制御のスタイルを維持したものとして、Fig. 6のように前置補償要素を用いるタイプのものが提案されている⁵⁾。これは、始動時や停止時のような過渡時において発生する振動を抑制するために考案されたものである。

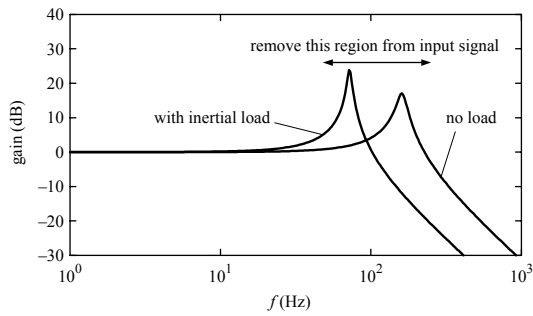
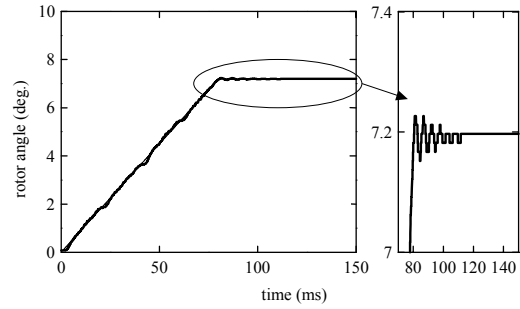


Fig. 7 Gain characteristics of 2-order models.

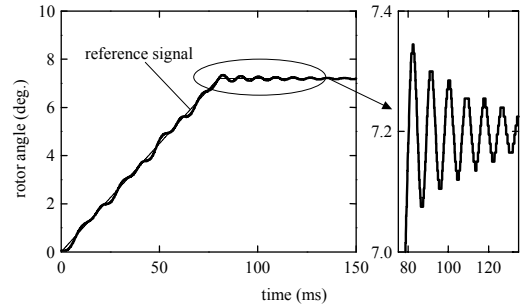
前章の駆動法を用いた場合には、ステッピングモータ駆動システムを、入力を回転子停止角度の目標値、出力を実際の回転子角度とした制御対象としてモデリングできる。これを2次要素として扱うと³⁾、そのゲイン特性はFig. 7のようになる。入力信号の周波数がゲイン特性のピークを与える固有周波数になると回転子振動は最も大きくなるが、回転子に負荷が取り付けられて慣性モーメントが増大すると、固有周波数は図のように低い方向にシフトする。

よって、Fig. 6の前置補償要素として低域通過フィルタを取り付け、入力信号からある周波数以上の成分をカットすると、ある値より小さな慣性モーメントを持つ負荷に対してはロバストに振動が抑制されることになる。

Fig. 8に、前置補償要素を用いない場合の回転子角度の時間変化を示す。ここでは、チョッパ形駆動法を用いて4基本ステップ角分(1.8deg.×4=7.2deg.)回転させている。無負荷である(a)および慣性負荷を取り付けた(b)の双方において、特に停止時に振動が現れていることがわかる。これに対し、前置補償要素として低域通過パワースフィルタ⁶⁾(カットオフ周波数:30Hz)を用いた場合の例をFig. 9に示す。無負荷である(a)と負荷付きの(b)の双方とも振動は良好に抑制されているが、全体的に目標値波形に対する遅れが見られる。これは、フィル



(a) no load



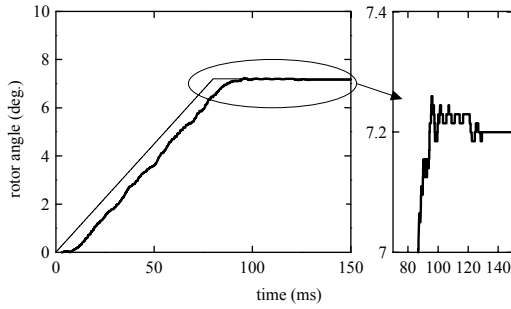
(b) with inertial load ($15 \times 10^{-6} \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$)

Fig. 8 Temporal variation of rotor angle (by chopper-type method, no compensator).

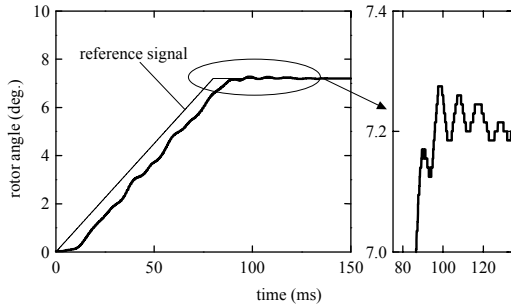
タの位相遅れによって生じたものである。

上記のような遅れを解消する方法として、低域通過フィルタのカットオフ周波数をリアルタイムで変化させるものが提案されている⁷⁾。この方法では、始動時や停止時のような過渡時のみカットオフ周波数を低い値に下げて固有周波数付近の周波数成分を入力信号からカットし、それ以外の場合にはカットオフ周波数を上げて位相遅れが生じないように操作される。その制御系のブロック線図をFig. 10に示す。

この方法では、目標角度信号から得られる回転子目標速度を低域通過フィルタに入力し、その出力との差から速度変動分を検出している。大きな速度変動が発生した場合を過渡的な状態であると判定して、前置補償用フィルタのカットオフ周波数を下げている。



(a) no load



(b) with inertial load ($15 \times 10^{-6} \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$)

Fig. 9 Temporal variation of rotor angle (by chop-per-type method, with a compensator).

上記の方法によって駆動された例をFig. 11に示す。無負荷である(a) および慣性負荷を取り付けた(b)の双方において、定速駆動時には遅れがほとんど生じていないが、特に(a)においては振動の抑制が十分ではない。また、Fig. 10に示した速度変動検出部において用いられているカットオフ周波数調整式⁷⁾

$$f_c(t) = A \exp\{-B|\omega_r(t) - \omega''(t)|\} \quad (3)$$

の係数 A および B の値は、予備実験における試行錯誤的なプロセスで決定されており、体系的な決定法は未だ構築されていない。

4. 現段階における問題点

ここまで紹介してきたステッピングモータの駆動特性の改善法は、このモータの利点である開ル

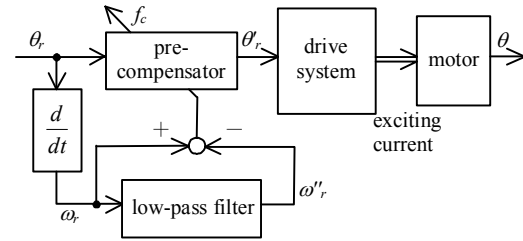


Fig. 10 Control system of a stepping motor with a pre-compensator (variable cut-off-frequency type).

ブ制御系のスタイルを維持したままで適用可能である。よって、新たなセンサの追加といったハードウェア的な変更をせずに、ソフトウェアの改良のみで実装できることになる。

ただし、次の2点で問題が残っている。

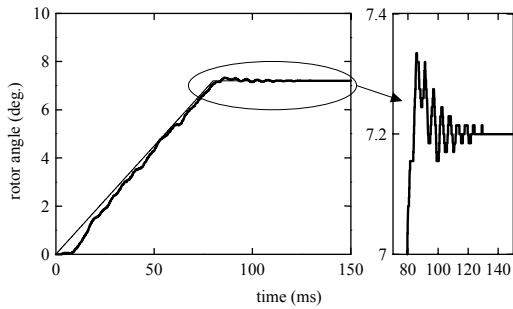
- 1) 複数の性能改善指標を設定した場合、それらはトレードオフの関係になってしまう。
- 2) 体系的な設計指針が得られず、試行錯誤的な調整が必要になる部分を含む。

前者は、前章で見られた振動抑制と目標時追従性の間に見られた現象である。この問題に対する解決法の指針は現段階では得られておらず、今後も継続した検討が必要である。

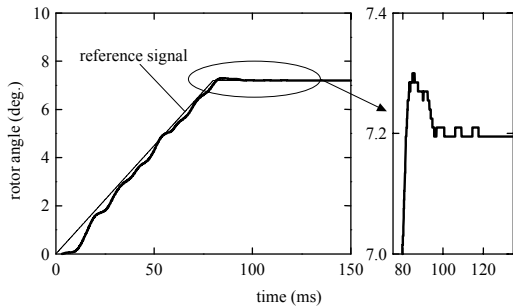
後者に関しては、(3)式のように用いる式の形やパラメータ数を明確にし、それらの調整過程を最適化問題のようなモデルで記述すれば、種々のアルゴリズム⁸⁾を適用できる可能性が開けることから、今後の改善の見通しは比較的得られやすくなると思われる。

5. おわりに

本報告では、開ループ制御が可能な制御用モータであるステッピングモータに関して、その制御系のスタイルを維持しつつ制御特性を改善する方法について、特に回転子振動の抑制に着目して現



(a) no load



(b) with inertial load ($15 \times 10^{-6} \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$)

Fig. 11 Temporal variation of rotor angle (by chopper-type method, with a variable cut-off-frequency type compensator).

在提案されている方法をまとめ、今後の指針を考察している。

前章で示されたように、現段階では、設計仕様に複数の性能改善指標が含まれた場合にそれらの間でトレードオフの関係が生じるといった問題や、体系的な指針に基づかずに試行錯誤的な作業を要する部分があるといった問題がまだ残っている。ただし、後者の問題に関しては、種々のアルゴリズム適用による改善の可能性は残されていると考えられる。

近年では、制御用に用いられるマイクロプロセッサの性能が上がり続けており、その使用時の扱いやすさも、ソフトウェア実装時におけるパソコンの利用などによりかなり向上している。これらの環境上の変化と、モータ本体の小形化・高出力化

との組み合わせにより、今後もシステムの性能向上は続くと思われる。フィードバックを持たずに速度および位置の双方を制御できるという大きな利点を生かした形でのステッピングモータ制御法への新たなアプローチを期待したい。

参考文献

- 1) 見城尚志, 菅原 晟: ステッピングモータとマイコン制御, 76/132, 総合電子出版社(1994)
- 2) 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)
- 3) 三浦 武, 谷口敏幸: PWM形スイッチングシーケンスを用いたステッピングモータの回転子振動抑制, 電気学会論文誌D, 121-10, 1093/1094 (2001)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 中村尚五: ビギナーズデジタルフィルタ, 87/132, 東京電機大学出版局(1989)
- 7) 三浦 武, 柴田真生, 松尾健史, 谷口敏幸: 回転子振動抑制補償要素を用いたフルステップ駆動形ステッピングモータ駆動システム, 電気学会論文誌D, 127-5, 536/537 (2007)
- 8) R. E. Miller: Optimization, John Wiley & Sons (2000)