計測自動制御学会東北支部 第 210 回研究集会(2003.7.16)
資料番号 210-10

ステッピングモータの振動抑制スイッチングシーケンスの自動調整

Self Tuning of Switching Sequence for Oscillation Damping of a Stepping Motor

○亀井　澄人*，三浦　武*，谷口　敏幸*
○Sumito Kamei*，Takeshi Miura*，Toshiyuki Taniguchi*

*秋田大学
*Akita University

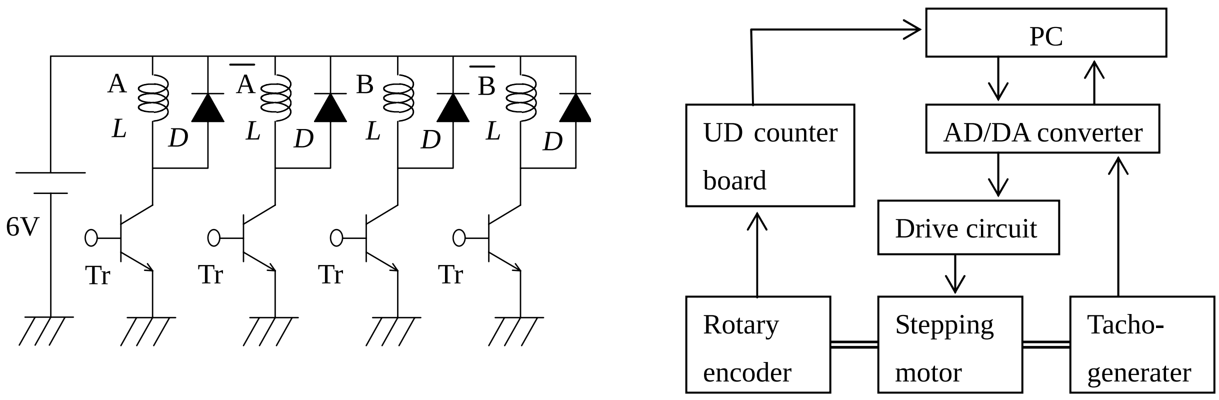
キーワード：ステッピングモータ(stepping motor)，振動抑制(oscillation damping)，スイッチングシーケンス(switching sequence)，自動調整(self tuning)，黄金分割法(golden section method)

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位置決め用の小形アクチュエータとして用いられ，開ループで比較的高精度に角度制御の応用ができるモータである[1)]．ディジタル的な入力パルスに応じて回転角を制御できることから，ディジタル機器を用いた制御系との整合性が良く，OA 機器や FA 機器に応用されている．

ステッピングモータを駆動させた場合，回転子がステップ状の動作をするため，慣性により安定点付近で機械的振動を起こすという問題が生じる．この振動を抑制する方法として，振動が抑制される適切な励磁タイミングを与えるように調節されたスイッチングシーケンスを用いるものがある[2)]．各ステップの立ち上がり領域のある期間ハーフステップ駆動を行うという方法[2)]（以下ハーフステップ形駆動法と呼ぶ）において，各ステップにおいて得られた回転子角度情報をフィードバックし，次回のステップにおける励磁タイミングへと反映させることで，振動が抑制された駆動を可能にしている．このタイミング調整過程を最適化問題と捉え，数値最適化手法を適用することで最適なスイッチングシーケンスを得る方法[3)]が提案されているが，角度センサを用いずにシステムを構築できるという利点を持つものの，フィードバック要素を得るためのニューラルネットワーク構築に際し，試行錯誤的要素が必要であるという問題が存在する．また，文献 3）で用いられたシンプレックス法で調整されたパラメータは二つであったが，今回ハーフステップ形駆動法で調整するパラメータは一つであり，目的関数の演算量が多くなると考えられる．



(a) Drive circuit　　(b) System

Fig.1 Experimental system

そこで，本研究ではハーフステップ形駆動法における励磁タイミングを調整するスイッチングシーケンスを，数値最適化手法の一つである1次元最適化の黄金分割法により求め，角度センサに比べ安価な速度センサを用いて調整を行う手法を提案する．また，文献3）で用いられたシンプレックス法を適用した場合と本手法とを比較することで，その有効性を検討した．

Table1 Driving condition

Condition	Inertial load
case1	none
case2	1.5×10^{-5}[kg・m^2]
case3	none→1.5×10^{-5}[kg・m^2] (changed at 30th step)

2．実験システム

本研究で使用したモータは，2 相ハイブリッド形のPX244-02B（オリエンタルモーター，定格 6V，0.8A，基本ステップ角 1.8deg.）である．

本研究での実験システムを Fig.1 に示す．(a)は駆動回路であり，ユニポーラ駆動形の電圧スイッチング回路を用いた．(b)はシステム全体の構成である．パソコンからの励磁指令を DA 変換器を介し駆動回路に与えることでモータが駆動される．回転子角度は，分解能 6000pulses/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24000pulses/rev.の信号としてパソコンに入力することで測定される．回転子速度は，出力電圧 3V/1000min^{-1} の DC タコジェネレータによって検出され，AD 変換器を介してパソコンに入力することで測定される．なお，本実験システムにおける入出力データのサンプリング時間は 0.1ms である．

今回，Table1 に示す駆動条件において実験を行い，本手法の負荷条件の違いに対する有効性を検討している．case1，case2 は，タイミング調整中に負荷が変わらない場合で，case3 はタイミング調整中に負荷が変動する場合を想定している．なお，case1 は無負荷，case2 は無負荷時の約 6 倍の慣性モーメントをもつ慣性負荷を回転子に装着して実験を行う．また case3 における負荷変動のタイミングは第 30 ステップとした．

３．回転子振動抑制法

本研究で用いるハーフステップ形駆動法の励磁シーケンスを Fig.2 に示す．基本ステップにおける立ち上がりのある期間だけハーフステップ駆動を行うことで，安定点付近での振動を抑制する方法である．ここで，タイミング調整を行うパラメータは，t_d ただ一つとなる．t_d を変化させることで回転子の応答が変化するが，今回速度センサを用いたタイミング調整を試みるため，振動の度合いを示す評価指数 f_p を以下のようにした．

$$f_p = |\ \min(f(t))| \tag{1}$$

速度波形において f_p が最小となるように調整することで，振動が抑制された駆動が可能となる．また t_d を操作することで速度応答が変化し，結果として f_p も変化するので，f_p は t_d の関数とみなすことが出来る．

$$f_p = f(t_d) \tag{2}$$

本研究で用いるハーフステップ形駆動法は調整するパラメータは t_d ただ一つとなる．これを前述の内点 x に対応させ, Fig.2 のように回転子速度の負のピーク値の絶対値を目的関数 f_p とすると，本研究での最適化問題は以下のようになる．

minimize ： $f(t_d)$

subject to ： t_d

４．数値最適化[4)]

本研究では，励磁タイミングを調整するスイッチングシーケンスによって振動抑制を行う．ハーフステップ形駆動法では，調整すべきパラメータが一つであるとはいえ，最適なタイミングを試行錯誤によって求めるのは非常に困難である．

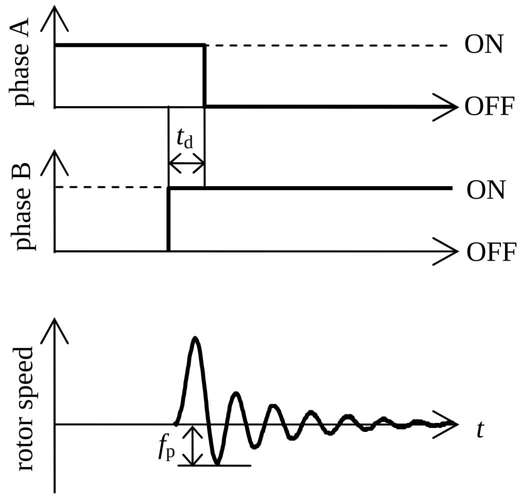


Fig.2 Exciting sequence

そこで，タイミング調整を行う過程を最適化問題として捉え，(2)式に示された関数を目的関数として数値最適手法を適用する．その手法として，本研究で調整すべきパラメータが一つであることから，直線に沿った最適化の方法の一つである黄金分割法を用いた．これは，目的関数が単峰である場合，最小点を含む部分空間を求めるためのフィボナッチ法を簡略化したもので，総反復回数を前もって決めておく必要が無いといった利点を持っている．

４－１．黄金分割法

黄金分割法は，目的関数が単峰であり，区間[b，u]内に最小点をもつ場合に，目的関数の値によって区間の幅を縮小する手続きを反復して行う方法である．

黄金分割によって区間の幅を縮小する方法は，Fig.3 における内点 x_1，x_2 を

$$x_1 = b + \frac{\tau - 1}{\tau}(u - b) \tag{3}$$

$$x_2 = b + \frac{1}{\tau}(u - b) \tag{4}$$

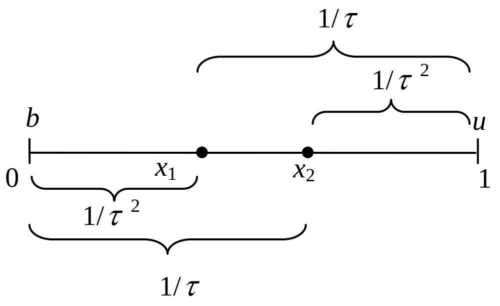


Fig.3 Golden section

とする．ここで，τ は,

$$\tau^2-\tau-1=0 \tag{5}$$

の正根で

$$\tau=\frac{1+\sqrt{5}}{2}\cong 1.618 \tag{6}$$

となり，黄金比と呼ばれる．このように内点を選ぶと，その結果得られる新しい区間の幅は元の区間幅に $1/\tau\cong 0.618$ を掛けたものになる．

新しい区間を[b，x_2]とすると

$$\begin{aligned} x_1&=b+\frac{\tau-1}{\tau}(u-b)\\ &=b+(\tau-1)(x_2-b)\\ &=b+\frac{1}{\tau}(x_2-b) \end{aligned}$$

だから，x_1 は新しい区間[b，x_2]に対して(4)式に相当する式を満たしている．従って，元の x_1 は新しい x_2 として使うことが出来る．このようにして区間の幅を縮小する操作を反復して行っていき，最小点へと近づけていく．

４－２　励磁タイミングの決定

3 章で設定された最適化問題を黄金分割法を用いて解いていく．黄金分割法では，最小点を含む区間を前もって決定しなければならない．今回用いるハーフステップ形駆動法は，t_d だけハーフステップ駆動を行うが，その範囲は基本ステップの立ち上がりと限定できる．そこで，タイミング調整されてないステップ応答の速度波形から，はじめて正値から負値へと切り替わる時間を範囲上限の初期値 u^0 とし, 下限として立ち上がり領域内で十分に小さい値として 1ms を設定し，これを初期値 b^0 とした. 次に内点 x_1^0, x_2^0 を式(3), (4)により求める．このときの目的関数 $f(x_1^0)$, $f(x_2^0)$を得るために, 励磁タイミング t_d をそれぞれ x_1^0，x_2^0 に対応させステッピングモータを 1 ステップずつ駆動させる．以降，第 k ステップにおいて得られた目的関数値を比較することで以下に示す操作を行う．

$f(x_1^k)$ ＜ $f(x_2^k)$のとき

$u^{k+1}=u^k$，$b^{k+1}=x_2^k$，$x_2^{k+1}=x_1^k$，

$$x_1^{k+1}=b^{k+1}+\frac{\tau-1}{\tau}(u^{k+1}-b^{k+1}) \tag{7}$$

とし，$f(x_1^{k+1})$だけを計算し, k=k+1 とする．

$f(x_1^k)$ ≥ $f(x_2^k)$のとき

$u^{k+1}=x_1^k$，$b^{k+1}=b^k$，$x_1^{k+1}=x_2^k$，

$$x_2^{k+1}=b^{k+1}+\frac{1}{\tau}(u^{k+1}-b^{k+1}) \tag{8}$$

とし，$f(x_2^{k+1})$だけを計算し, k=k+1 とする．

(k=0，1，2，･･･)

以上の操作を目的関数が十分小さくなるまで繰り返す．

なお，本研究では負荷の変動を想定するため，負荷変動を検知し，新たに探索を行う手続きが必要となる．黄金分割法は区間の幅を縮小することで最適解を探索する方法であるため，この区間の幅を収束判定値として用いることができる．そこで，負荷変動を検知する手続きを以下のように設定した．

$$\left|u^k-b^k\right|<0.1\mathrm{ms}\ \text{かつ}\ \ f^k>3f^{k-1} \tag{9}$$

ここで，f^k, f^{k-1} は最新ステップおよびその直前のステップにおける目的関数値である．この条件が満たされた場合，新たに初期値を設定しなおす．

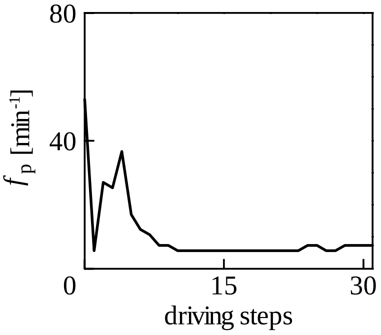


Fig.4 Variation of objective function (case 1)

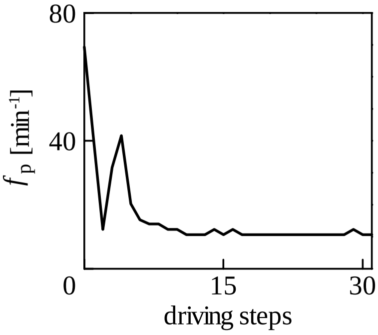


Fig.6 Variation of objective function (case 2)

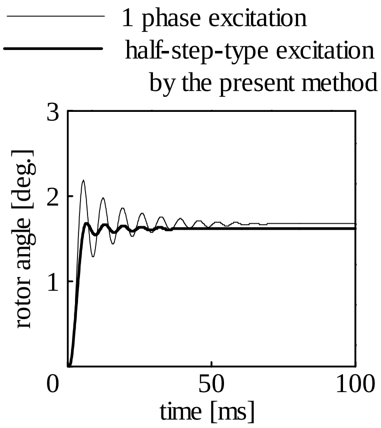


Fig.5 Step response (case 1)

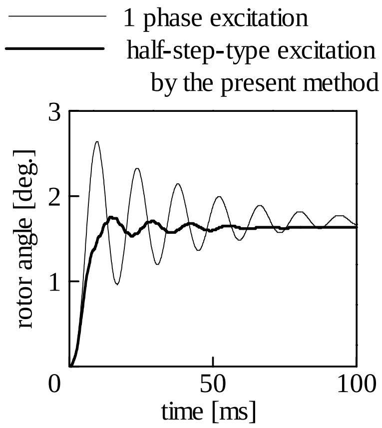


Fig.7 Step response (case 2)

この手続きにより，解が最適解付近に収束した後に生じる負荷変動に対して，目的関数の増加によって負荷変動を検知し，新たに最適解を探索することが可能になる．

５．実験結果

4 章の手法を用いて 1 相励磁のハーフステップ形駆動法における励磁タイミング t_d を調整した結果を以下に示す．なお，case1，case2 の反復回数は 30 回，case3 は 60 回とし，これを本手法の終了条件としている．また，初期値決定手順のため，駆動ステップは 1 ステップ多くなる．

Fig.4 は無負荷である case1 の場合においてタイミング調整を行った際の駆動ステップに対する目的関数の変化である．10 ステップ程で目的関数が小さい値へと抑えられていることがわかる．また，この時最終的に得られた励磁シーケンスで 1 ステップ駆動を行った場合のステップ応答を Fig.5 に示す．通常の 1 相励磁に比べ，振動が抑制されている．

Fig.6 は case1 より慣性モーメントが約 6 倍大きい慣性負荷を取り付けた case2 の場合においてタイミング調整を行った際の目的関数の変化である．case1 の場合と同様に 10 ステップ程で目的関数が小さい値へと抑えられていることがわかる．Fig.7 は Fig.6 において最終的に得られた励磁シーケンスで 1 ステップ駆動を行った場合のステップ応答である．慣性負荷装着時においても，通常の 1 相励磁に比べ，振動が抑制されている．これらの結果から本手法が負荷条件の違いに対し，有効であることが示された．

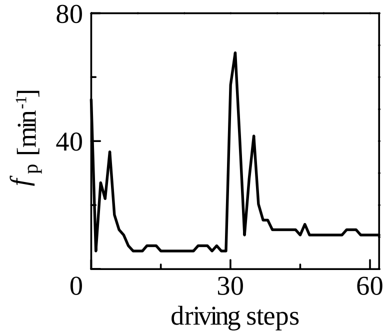


Fig.8 Variation of objective function (case 3)

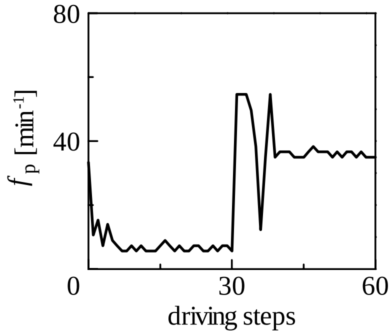
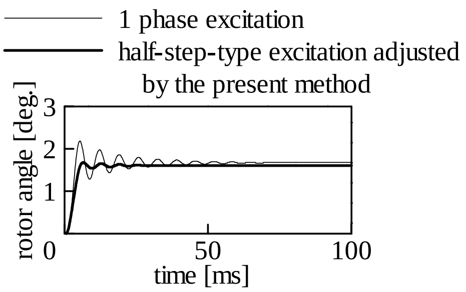
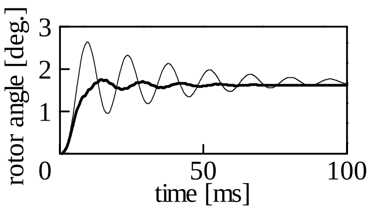


Fig.10 Variation of objective function

(simplex method： t_d=1.0, s=1.0)

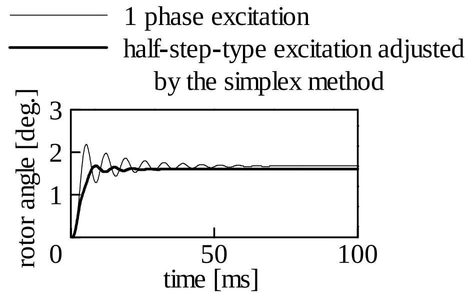


(a) 29th steps

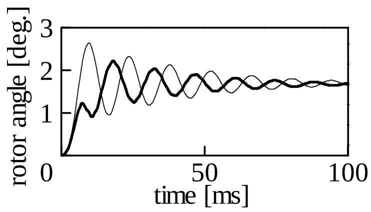


(b) 62nd steps

Fig.9 Step response (case 3)



(a) 29th steps



(b) 60th steps

Fig.11 Step response

(simplex method： t_d=1.0, s=1.0)

次に case3 のタイミング調整中に負荷変動があった場合の結果を示す．Fig.8 は無負荷である case1 の条件からタイミング調整をはじめ，その後に case2 の負荷条件へと移行した場合の目的関数の変化である．負荷変動を検知する手続きは，(9)式で示される式を満足した場合に行われ，その後新たに初期値を設定しなおす．なお，初期値の再設定は 4 章で示した初期値 b^0，u^0 の設定手順に従う．また，今回負荷変動のタイミングは第 30 ステップとした．Fig.8 より，目的関数の増大にともない新たに最適解の探索を行い，かつ負荷変動後も 10 ステップ程で目的関数が小さい値へと抑えられていることがわかる．Fig.9 は第 29, 62 ステップで得られた励磁シーケンスでそれぞれ 1 ステップ駆動を行った場合のステップ応答である．(a), (b)どちらも振動が抑制されている．これにより，タイミング調整中に負荷が変動する場合にも本手法が有効であることが示された．

次に，収束性や目的関数の演算量などの観点からシンプレックス法[3,5)] を適用した場合と比較を行う．駆動ステップ数は 60 回，駆動条件は case3 の場合を想定し，シンプレッ

クス法をステッピングモータの励磁タイミング調整へと適用するアルゴリズムはすべて文献 3)に従う($\alpha=1$, $\beta=0.5$, $\gamma=2$).ただし，目的関数は本研究で設定したものを用いる．また，負荷変動を検知する手続きは以下のようにした．

$$s<0.1\text{ms かつ } f^{k}>3f^{k-1} \qquad (10)$$

ここで，f^{k}，f^{k-1} は最新ステップおよびその直前のステップにおける目的関数値で，s はシンプレックスの各頂点間の距離である．上式を満足した場合，シンプレックスを初期化し，最適解の再探索を行う．

初期値(t_d=1.0ms，s=1.0ms)を与え，シンプレックス法を適用した場合の目的関数の変化を Fig.10 に示す．無負荷である範囲では黄金分割法を適用した場合と同様に 10 ステップ程で目的関数が低い値へと抑えられている．ただし，負荷変動があった後では目的関数が 10 ステップ程で収束をはじめているものの，小さい値へと抑えられてはいない．シンプレックスの頂点での目的関数の大小の比較により，シンプレックス法の各操作が行われるため，一回の反復の中で目的関数を演算する回数は黄金分割法よりも多くなる．ただ駆動ステップごとの演算量は黄金分割法の演算量と比べても大きな差はない．Fig.12 は第 29，60 ステップのとき最終的に得られた励磁シーケンスを用いて 1 ステップ駆動を行った場合のステップ応答である．無負荷である(a)は目的関数が低く抑えられているため振動が抑制されているのが確認できるが，慣性負荷を取り付けた(b)の場合はハーフステップ駆動を行う期間が長いため，2 段ステップの形を描いており，1 ステップでの振動抑制効果は得られていない．これは，最適解が基本ステップの立ち上がり時間を越えた領域で収束をはじめたことが原因と考えられる．

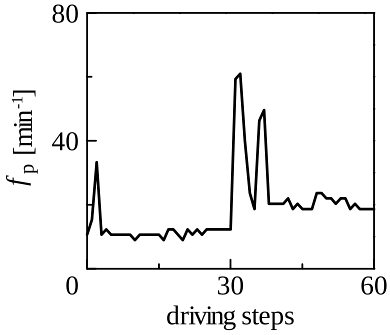
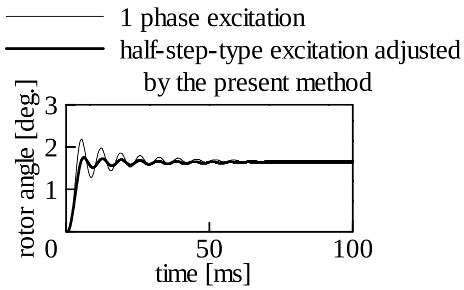
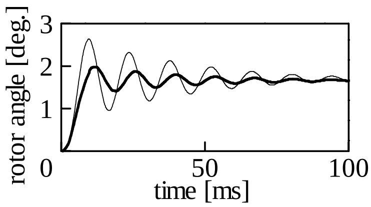


Fig.12 Variation of objective function
(simplex method： t_d=2.0, s=1.0)



(a) 29th steps



(b) 60th steps

Fig.13 Step response
(simplex method： t_d=2.0, s=1.0)

続いて，初期値(t_d=2.0ms，s=1.0ms)を与え，シンプレックス法を適用した場合の目的関数の変化を Fig.12 に示す．また，第 29，60 ステップで得られた励磁シーケンスを用いて 1 ステップ駆動を行った場合のステップ応答を Fig.13 に示す．Fig.10 に比べ，目的関数が小さい値に抑えられているが，本研究で提案した手法を用いたものに比べてやや大きい値で収束をはじめている．それに伴い，Fig.13(b)のステップ応答も 1 ステップでの振動抑制がなされてはいるが，Fig.9 の波形と比

べると振動抑制効果は十分ではない．

以上から，シンプレック法を適用した場合は, 10 ステップ程で目的関数が収束をはじめるものの初期値の選定次第で，シンプレックスが部分空間に落ち込んでしまって，真の解が得られなくなるという欠点があることが示された．一方，本研究で提案した手法では最小点を含む区間を，1 ステップ速度応答の実測値から立ち上がり領域のある期間と決定し，その操作は区間の縮小のみであるため,上記のような部分空間に落ち込むという問題は回避されている．駆動ステップごとの演算量に両手法の差はほとんどなく，また最初に内点を求めるときと負荷変動を検知して最適解を再探索するとき以外は，一回の反復で，目的関数の演算が一回だけですむため,収束性，演算量の観点からみても本手法は有効である．

６．おわりに

ステッピングモータの回転子振動抑制に関して，速度センサから得た値を目的関数として黄金分割法を適用することで，ハーフステップ形駆動法の励磁タイミング調整を行った．

タイミング調整後に最終的に得られたスイッチングシーケンスを用いてモータを駆動したところ，5 章に示したように通常の 1 相励磁にくらべ大幅に振動が抑制される結果となった．負荷変動があった場合においても，最適解の再探索を行い，振動が抑制されるスイッチングシーケンスを得ている．また,シンプレック法を適用した場合と比較した結果，シンプレックス法を適用した場合では,初期値の選定次第でシンプレックスが部分空間に落ち込むことで真の解から遠ざかる可能性をもつことが示された．しかし本研究で提案した手法では立ち上がり領域の区間の縮小のみ行うため，その欠点は回避されている．

上記のように，提案された手法を用いることにより，簡易なスイッチングシーケンスであるハーフステップ形駆動法の励磁タイミングの自動調整が可能であることがわかった．また，安価な速度センサを用いて調整できることからシステム全体が低コストとなる利点も得られる．

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）三浦武，谷口敏幸：レギュレータによるステッピングモータの励磁タイミングの決定，電気学会論文誌 D，**116**-7，800/801(1996)
3）亀井澄人，三浦武，秋山宜万，谷口敏幸：ステッピングモータのオンライン励磁タイミング調整，計測自動制御学会東北支部研究集会講演資料，**203**-5，1/8(2002)
4) S.L.S.ジャコビ, J.S.コワリク, J.T.ピゾ(著), 関根智明(訳)：非線形最適化問題の反復解法，52/62，培風館(1976)
5)今野浩，山下浩：非線形計画法，284/288 日科技連出版社(1978)