

## 遺伝的アルゴリズムによるステッピングモータ駆動用励磁シーケンスの調整

### Adjustment of Exciting Sequence for Drive of a Stepping Motor by Genetic Algorithm

森元 直道\*, 秋山 宜万\*, 松尾 健史\*, 三浦 武\*, 谷口 敏幸\*

Naomichi Morimoto\*, 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), 励磁シーケンス (exciting sequence)  
遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm)

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入力パルスの総数および周波数により回転角, 回転速度を調節でき, 容易に開ループで位置制御および速度制御を実現できるモータである. また, そのような利点から, コンピュータ周辺機器をはじめ, FA 機器, OA 機器に幅広く用いられている<sup>1)</sup>.

ステッピングモータは, 各相の励磁を切り換えることによって生じる電磁吸引力を利用し, 基本ステップ角を単位として回転するモータである. そのため, モータを駆動させた場合, 慣性の影響により安定点付近において, 回転子が振動するという問題が生じる.

この振動を抑制する方法として, 励磁電圧のスイッチングのタイミング調整のみを必要とする遅延ダンピング法や逆相励磁ダンピング法などの励磁シーケンスの調整法が提案されている<sup>2)</sup>. これらの手法は, 単純で低コストなシステムを用いて行うことができるが, スイッ

チングのタイミングを試行錯誤的に決定しなければいけないことや負荷変動などによりパラメータが変化した場合, 励磁タイミングの再調整が必要になることなどが問題となる.

このような問題に対して, 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下 GA)<sup>3)</sup> を用いてステップ応答波形の整形を行い, 励磁シーケンスの調整を行う方法が報告されている<sup>4) 5)</sup>. これらの方法において慣性負荷の変動に対するロバスト性を考慮した振動抑制法が行われている. 慣性負荷に最大値を設定してこれを最悪の駆動条件と見なし, この条件に基づいて回転子の停止位置となるトルク平衡点の操作を行い, 回転子をそれに追従させることで慣性負荷の変動にロバストに振動を抑制する方法である. この手法を用いた結果, 目標波形は立ち上がりが正弦波状の波形となり, 励磁シーケンスの調整時間も決定された.

立ち上がりがランプ状の目標波形を用いた際には, 上記のようなロバスト性や最適な立ち

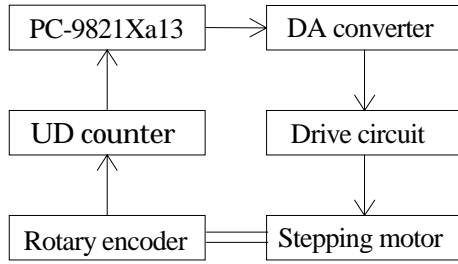


Fig.1 Experimental system

上がり時間については特に考慮されていなかった．そこで，本研究では波形自体が簡単であるという理由からランプ波形を目標波形として，設定された慣性負荷の最大値以内までの変動に対しロバストに振動を抑制できるまで，立ち上がり時間を変えて励磁シーケンスの調整を GA により行った．また，回転時の振動，脱調などの原因となる共振周波数の付近におけるゲインの減少量を，ステップ波形と比較することで最適な立ち上がり時間の検討も行った．

## 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．

本研究で用いた実験装置を Fig.1 に示す．駆動回路は電圧制御形を用いる．パソコンからの励磁指令は DA 変換ボードを介して駆動回路に入力され，ステッピングモータが回転する．回転子の角度は，分解能 5000pulses/rev.の光学式ロータリーエンコーダ(出力 2 相)によって検出され，UP/DOWN カウンタボードによって 4 通倍することで，最終的に 20000pulses/rev.の信号としてパソコンに入力される．なお，本実験システムのサンプリング時間は 0.3ms である．

## 3．トルク平衡点の操作による回転子振動抑制

ステッピングモータの駆動トルクは励磁する相を切り替えることによって生じ，回転子を次の安定点であるトルク平衡点に移動させる．

本研究では，最悪の駆動条件として慣性負荷に最大値を設定してトルク平衡点の操作を行い，回転子をそれに追従させることで振動を抑制する．これは従来の方法を使用しており，以下にその詳細を述べる<sup>5)</sup>．

本研究で用いている 2 相ハイブリッド形ステッピングモータの動特性は次のような運動方程式で表される．

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} = T(\theta, i_A, i_B, i_{\bar{A}}, i_{\bar{B}}) \quad (1)$$

ここで  $J$  は回転子の慣性モーメント， $D$  は制動係数， $T$  は発生トルク， $\theta$  は回転子の位置， $i_A \sim i_{\bar{B}}$  は各相の励磁電流を表している．トルク平衡点  $\theta_e$  の近傍でテーラー展開を行うと上式の右辺は次のようになる．

$$\begin{aligned} T(\theta, i_A, i_B, i_{\bar{A}}, i_{\bar{B}}) &\approx T(\theta_e, i_A, i_B, i_{\bar{A}}, i_{\bar{B}}) \\ &\quad + \left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_e} (\theta - \theta_e) \\ &= -c(\theta - \theta_e) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで定数  $c$  は

$$c \equiv - \left. \frac{dT}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_e}$$

である．上式を (1) 式に代入すると，次のような線形微分方程式が得られる．

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + c\theta = c\theta_e \quad (3)$$

この式をラプラス変換し，回転子の位置  $\theta$  とトルク平衡点  $\theta_e$  の伝達関数を求めると次のようになる．

$$G(s) = \frac{\theta}{\theta_e} = \frac{c}{Js^2 + Ds + c} \quad (4)$$

これにより回転子がトルク平衡点に追従するためには，広い周波数領域で伝達関数  $G(s)$  の値が 1 の近傍になければならず， $J$  および  $D$  をできる限り小さく， $c$  をできる限り大きい値にする必要がある． $J$  および  $D$  はシステムのパラメータなので変更をするのは困難であるが， $c$  はモータの発生トルクに関連する値であり，各相の励磁電流の関数となっているので，電流値

を適切に制御することによりこの値を常に許される範囲で最大化することで、伝達関数を1の近傍に拘束するという条件を満足しやすくすることが可能となる。また、定数 $c$ の値が大きいほど $J_s^2$ や $D_s$ の変化による影響が小さく、慣性モーメント $J$ や制動係数 $D$ の変動に対し低感度化が可能となる。以上のような理由から、以下では定数 $c$ を最大化するための各相の励磁電流値を求める。

2相ハイブリッド形ステップモータの角度-トルク特性は、一般に次のように表される。

$$T = -K_T(i_A - i_{\bar{A}})\sin(N_r\theta) + K_T(i_B - i_{\bar{B}})\cos(N_r\theta) \quad (5)$$

ここで、 $K_T$ はトルク定数、 $N_r$ は回転子の歯数を表している。この式の両辺を $\theta$ で微分すると次のようになる。

$$\frac{dT}{d\theta} = -K_T N_r (i_A - i_{\bar{A}})\cos(N_r\theta) - K_T N_r (i_B - i_{\bar{B}})\sin(N_r\theta) \quad (6)$$

また、トルク平衡点では $T=0$ となるので、(5)式の左辺を0としてトルク平衡点と励磁電流との関係を求めると次のようになる。

$$\frac{i_B - i_{\bar{B}}}{i_A - i_{\bar{A}}} = \frac{\sin(N_r\theta)}{\cos(N_r\theta)} \quad (7)$$

これを(6)式に代入すると、定数 $c$ は次のようになる。

$$c = \left. \frac{dT}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_e} = \frac{K_T N_r (i_A - i_{\bar{A}})}{\cos(N_r\theta_e)} = \frac{K_T N_r (i_B - i_{\bar{B}})}{\sin(N_r\theta_e)} \quad (8)$$

各相の励磁電流は定格電流 $I$ によって $0 \leq i_A, i_B, i_{\bar{A}}, i_{\bar{B}} \leq I$ と制限されているので、 $c$ の最大値 $c_{\max}$ および $c_{\min}$ を与える励磁電流値は各々のトルク平衡点において次のようになる。

$$\begin{aligned} c_{\max} &= \frac{K_T N_r I}{\cos(N_r\theta_e)}, & i_A &= I, \\ i_B - i_{\bar{B}} &= \frac{\sin(N_r\theta_e)}{\cos(N_r\theta_e)} I, & i_{\bar{A}} &= 0, \\ (-\pi/4 + 2n\pi \leq N_r\theta_e \leq \pi/4 + 2n\pi) & & & (9) \\ c_{\max} &= \frac{K_T N_r I}{\sin(N_r\theta_e)}, & i_B &= I, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_A - i_{\bar{A}} &= \frac{\cos(N_r\theta_e)}{\sin(N_r\theta_e)} I, & i_{\bar{B}} &= 0, \\ (\pi/4 + 2n\pi \leq N_r\theta_e \leq 3\pi/4 + 2n\pi) & & & (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{\max} &= -\frac{K_T N_r I}{\cos(N_r\theta_e)}, & i_A &= 0, \\ i_B - i_{\bar{B}} &= \frac{\sin(N_r\theta_e)}{\cos(N_r\theta_e)} I, & i_{\bar{A}} &= I, \\ (3\pi/4 + 2n\pi \leq N_r\theta_e \leq 5\pi/4 + 2n\pi) & & & (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{\max} &= -\frac{K_T N_r I}{\sin(N_r\theta_e)}, & i_B &= 0, \\ i_A - i_{\bar{A}} &= \frac{\cos(N_r\theta_e)}{\sin(N_r\theta_e)} I, & i_{\bar{B}} &= I, \\ (5\pi/4 + 2n\pi \leq N_r\theta_e \leq 7\pi/4 + 2n\pi) & & & (12) \end{aligned}$$

ここで $n$ は整数である。

以上より、最悪の駆動条件として $c_{\max}$ の最小値 $c_{\max 0}$ を考慮した場合、次のように表すことができる。

$$c_{\max 0} = K_T N_r I \quad (N_r\theta_e = n\pi/2) \quad (13)$$

この条件を満たすことによって、伝達関数を1の近傍に拘束する条件を満足しやすくなり、回転子がトルク平衡点に追従する。

以上より、本研究では(1)式の伝達関数を次のように表す。

$$G(s) = \frac{c_{\max 0}}{Js^2 + Ds + c_{\max 0}} \quad (14)$$

本研究ではモータの定格値である下記の値を用いている。

$$\begin{aligned} K_T &= 0.14 \text{ N}\cdot\text{m/A}, & N_r &= 50, \\ I &= 0.8 \text{ A}, & D &= 0.003 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad} \end{aligned}$$

また、ここでは最悪の駆動条件として慣性負荷の最大値を無負荷時の10倍と設定し、そこまでの変化に対するロバスト性を考慮するので、慣性モーメント $J$ は無負荷時の慣性モーメントである $2.4 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$ からその10倍である $24 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$ までの値と設定する。この範囲内で慣性モーメントの値を変動させたときのそれぞれのゲイン特性の先端同士を結び、それらの波形を包むように描いたエンベロープ波形と慣性モーメントを変えた3種類の制御対象のゲイン特性をFig.2に示す。

本研究では上記で示した慣性負荷の最大値以内までの変動に対しロバストに振動を抑制することを目的としている．そのため，例として Fig.3 に示した立ち上がり時間 10ms のランプ波形のゲインが，Fig.2 に示した共振周波数付近でステップ波形のゲインより十分に減少する必要がある．そこで，共振周波数付近の制御対象のゲイン  $g(\omega)$  を重みとし，その領域でランプ波形のゲイン  $r(\omega)$  とステップ波形のゲイン  $s(\omega)$  の差を積分した値の平均値  $h$  を用いて評価を行う．

$$h = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_1}^{\omega_2} g(\omega) |r(\omega) - s(\omega)| d\omega \quad (15)$$

ここで  $\omega_1$  は 20 rad/s， $\omega_2$  は 560 rad/s と設定した．

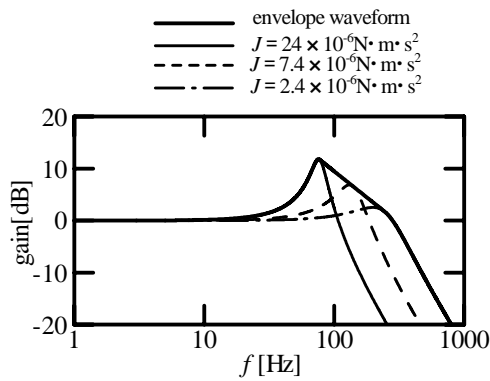


Fig.2 Gain characteristic of the controlled system

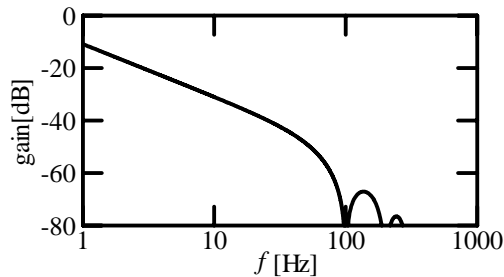


Fig.3 Gain characteristic of the ramp waveform ( $t_d = 10\text{ms}$ )

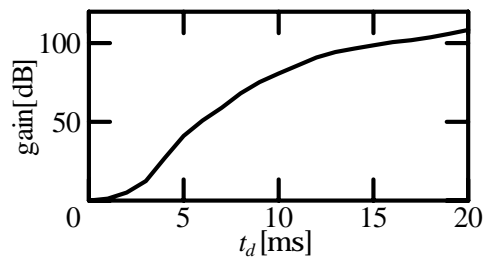


Fig.4 Evaluation of the ramp waveform

本研究では，(15)式で示した評価値を用いることで，最も効果的にゲインを減少させることができるランプ波形の立ち上がり時間  $t_d$  の探索を試みている．

Fig.4 にランプ波形の立ち上がり時間  $t_d$  と (15) 式を用いて求めたゲインの減少量との関係を示す．

この図より，グラフが飽和し始めるときの立ち上がり時間  $t_d$  [ms] が，それ以降大きなゲインの減少がないことを考慮すると，最も短い立ち上がり時間で効果的に慣性負荷の変動にロバストに振動を抑制できる時間と予想される．

#### 4．遺伝的アルゴリズムによる励磁シーケンスの調整

本研究では 2 相励磁方式で駆動する場合を考えており，初期位置は A 相と B 相の間，停止位置は B 相と A 相の間としている．この場合，トルク平衡点は  $\pi/4N_r \leq \theta_e \leq 3\pi/4N_r$  の間で変化するので，目標値の時間変化は次式で表される．

$$\theta_r = \begin{cases} \theta_s t + \frac{\pi}{4N_r} & (0 \leq t \leq t_d) \\ t_d & (t_d < t) \end{cases} \quad (16)$$

ここで  $\theta_r$  は目標値， $t$  は時間， $\theta_s$  は基本ステップ角を表している．

文献 5) より，調整する相と調整領域は以下のように決定することができる．トルク平衡点は  $\pi/4N_r \leq \theta_e \leq 3\pi/4N_r$  の範囲にあるので，励磁電流の条件として (10) 式を適用する  $i_A - i_{\bar{A}}$  の時間的変化のプロファイルを希望する波形に調整する場合，A 相と  $\bar{A}$  相の励磁シーケンスを調整する必要があると考えられ， $d(i_A - i_{\bar{A}})/dt$  は広い範囲をとることが要求される．

$\pi/4N_r \leq \theta_e \leq \pi/2N_r$  においては， $i_A - i_{\bar{A}}$  は正であり  $\theta_e$  が増加するにつれて  $i_A - i_{\bar{A}}$  は減少し， $d(i_A - i_{\bar{A}})/dt$  は常に負となる． $i_A - i_{\bar{A}}$  を常

に一定値とする場合は、 $d(i_A - i_{\bar{A}})/dt$  を 0 に近づけなければならないが、 $i_A - i_{\bar{A}}$  が正であるため A の励磁は必要ない。また、 $i_A - i_{\bar{A}}$  を急激に減少させる場合は、 $d(i_A - i_{\bar{A}})/dt$  をできるだけ負方向に大きな値としなければならないので、A 相を OFF とし A 相のみを励磁する。よって、この領域で  $d(i_A - i_{\bar{A}})/dt$  を広範囲で変化させるには、A 相と A 相の励磁シーケンスを調整する必要がある。

また、 $\pi/2N_r \leq \theta_e \leq 3\pi/4N_r$  においては、 $i_A - i_{\bar{A}}$  は負でありこの状況は A 相のみの励磁で実現できる。また、 $\theta_e$  が増加するにつれて  $d(i_A - i_{\bar{A}})/dt$  の急激な減少が要求されるときも負電流である A 相の調整だけでよく、結局この領域では A 相のみを調整すればよい。

以上より、目標波形と励磁シーケンスの調整領域は Fig.5 のようになる。

次に、GA による励磁シーケンスの調整法について述べる。励磁シーケンスは、望ましい応答波形が得られるように、各時間における各相の励磁電圧を調節することで決定される。GA を用いて励磁シーケンスの探索を行うためには、この過程を生物の進化を模擬するものとしてモデル化を行わなければならない。

本論文では、文献 4) のように励磁シーケンスをビット列としてコード化を行い、これを遺伝子の集合である染色体と見なして遺伝的操作を行う。このような操作を複数の個体より構成される個体群に適用し、世代を経ることで準最適解の探索を行う。

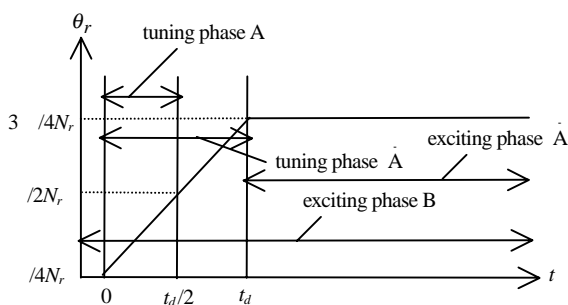


Fig.5 Tuning region of the exciting sequence

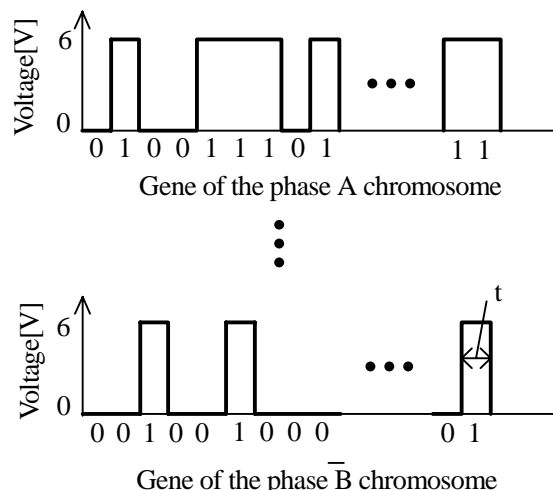


Fig.6 Coding of exciting sequence

励磁シーケンスのコード化の概要を Fig.6 に示す。ここでは調整相が A 相から B 相までの場合の例を示す。図のように、時間軸を一定の幅  $\Delta t$  を持った細かな要素に分解し、各々の要素において励磁電圧をモータに印加しない場合は「0」を、印加する場合は「1」を当てはめることにより励磁シーケンスのコード化をしている。また、励磁シーケンスを調整する相が単一の場合は 1 相分のビット列の染色体を 1 個体と表現し、調整相が複数の場合はそれぞれの相のビット列を接続した遺伝子の配列を用いるので、複数個の染色体で 1 個体を表現している。

各個体の適応度は目標角度  $\theta_r(t)$  からの偏差を時間積分した評価関数

$$f = \int_0^{t_{\max}} |\theta_r(t) - \theta(t)| dt \quad (17)$$

を用いて評価している。ただし、 $t_{\max}$  は角度波形のデータ取得時における最終時刻である。上記の評価関数より、本研究は得られる評価関数値を最小化する最適化問題となる。

本論文においては 1 世代あたりの個体の総数を 50 個体とした。また、最終世代は試行錯誤により 150 世代と設定し、最終世代の最もよい個体を最適な励磁シーケンスとした。なお、これらの過程はすべてコンピュータを用いて自動的に約 40 分で行われる。

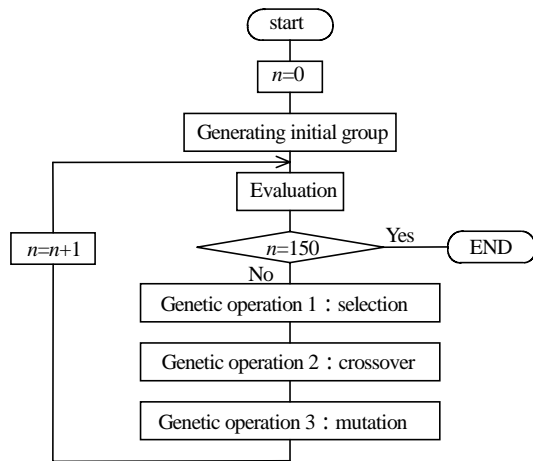


Fig.7 Flowchart of GA

GA のフローチャートを Fig.7 に示す .最初にランダムに与えられた遺伝子を持つ個体を  $N$  個生成して、初期世代の個体群とする .

次に各個体を用いて実際にモータを駆動させ、応答波形を取得する .そして、上記で述べた評価関数値を用いて計算を行う .

各個体の適応度を計算した後、最終世代に達するまで遺伝的操作を実行する .第 1 の遺伝的操作として個体の選択を行う .ここで、適応度の高い個体が増殖し、適応度の低い個体が淘汰される .本研究では、選択方法としてルーレット選択とエリート選択を用いた .ルーレット選択は、評価関数に基づいて各個体ごとに適応度の高い順に 1 位、2 位・・・とランク付けを行い、各ランクごとに決められた確率に従って選択を行う方法である .本研究では文献 5 ) のように次式で各ランクごとの選択確率を決定している .

$$p_m = \frac{[\exp\{-(m-1)/(N-1) \times 0.2\} + 1.0]}{\sum_{l=1}^N [\exp\{-(l-1)/(N-1) \times 0.2\} + 1.0]} \quad (18)$$

ここで、 $p_m$  は  $m$  番目のランクの個体の選択確率、 $N$  は個体数を表している .上式から得られる各ランクと選択確率の関係を Fig.8 に示す .この選択確率は適応度の低い個体でも選択される可能性を残している .

エリート選択は個体群の中で適応度の高い個体を無条件でそのまま次世代に残す方法である .

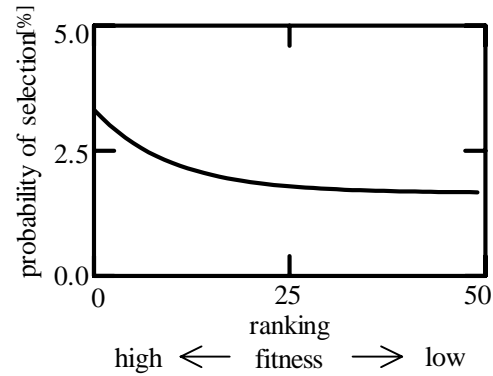


Fig.8 Probability of selection

第 2 の遺伝的操作として個体の交叉を行う .具体的には、任意の 2 つの個体(親)をランダムに選び、ランダムに選ばれた交叉点で遺伝子を組み替える操作である .ここでは一様交叉を用いている .一様交叉は、マスクパターンのビット列を作り、この遺伝子が 1 ならば親 A の遺伝子、0 ならば親 B の遺伝子を受け継がせる子 A と、その遺伝子とは反対の受け継ぎ方をする子 B を生成する方法である .そして、生成された子 A と子 B が次世代の個体となる .なお、交叉確率は 80% と設定している .

第 3 の遺伝的操作として個体の突然変異を行う .これは各個体の遺伝子を対立遺伝子に置き換える操作である .なお、突然変異確率は 1% と設定している .

以上のような遺伝的操作を完了することにより次世代の個体群が生成される .

## 5 . 実験結果

本研究では前章の方法を用いて、設定された慣性負荷の最大値以内までの変動に対し、ロバストに振動を抑制できるような応答波形を得るまで、ランプ波形の立ち上がり時間を変えて励磁シーケンスの調整を行った .Fig.4 において飽和し始めた立ち上がり時間である 10, 12, 14ms を用いて得られた励磁シーケンスと、この励磁シーケンスを用いてモータを駆動させた時のス

トップ応答波形を Fig.9 ~ Fig.11 に示す．また，Fig.12 に上記の立ち上がり時間における各世代の評価関数値の最小値  $f_{\min}$  の変化を示す．

これらの図からいずれの応答波形も目標波形に近い形状に整形されていることがわかる．また，評価関数値の変化は世代を経るごとに小さくなっており，およそ 100 世代あたりから収束していることがわかる．

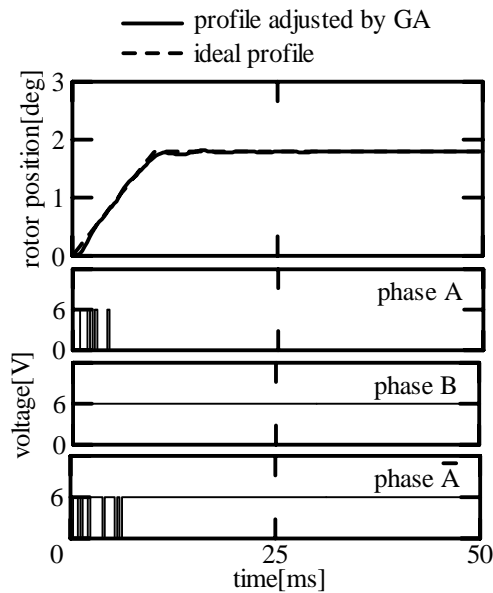


Fig.9 Tuned exciting sequence and adjusted profile of rotor position ( $t_d = 10\text{ms}$ )

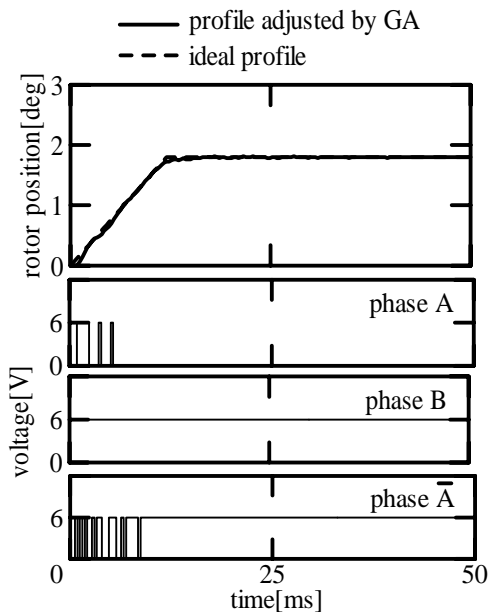


Fig.10 Tuned exciting sequence and adjusted profile of rotor position ( $t_d = 12\text{ms}$ )

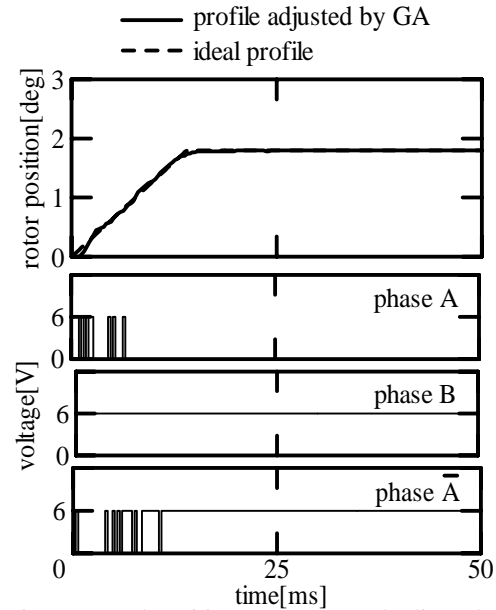


Fig.11 Tuned exciting sequence and adjusted profile of rotor position ( $t_d = 14\text{ms}$ )

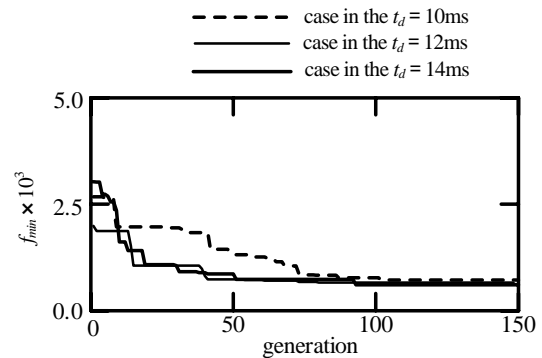
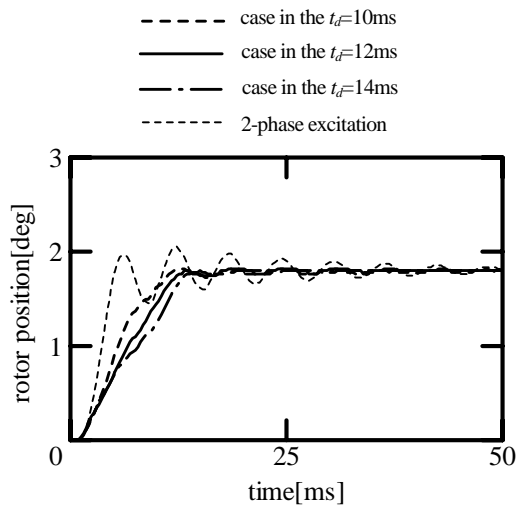


Fig.12 Variation of the performance index

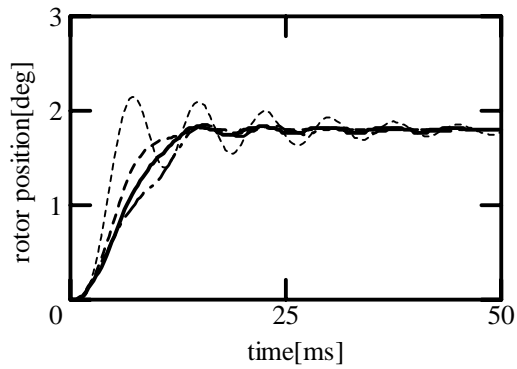
次に上記のように調整された励磁シーケンスを用いて，実際に慣性負荷を取り付けて実験を行ったときの結果を Fig.13 (a) ~ (e) に示す．

その結果，立ち上がり時間が 10ms では慣性負荷の変動に対して振動抑制の効果が不十分であった．それに対し，立ち上がり時間を 12ms とした場合は，14ms と同じように回転子慣性の変動に対しロバストに振動を抑制していることがわかる．

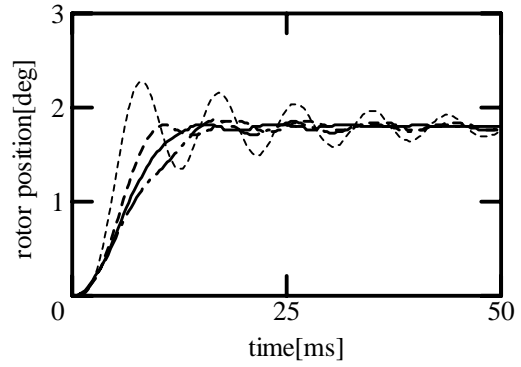
以上より，本研究で設定された慣性負荷の最大値よりも小さい負荷を用いる場合は，立ち上がり時間 12ms のランプ波形が，より短い立ち上がり時間で効果的に振動を抑制できるので最適と考えられる．また，この結果は 3 章において予測された最適な立ち上がり時間と一致する．



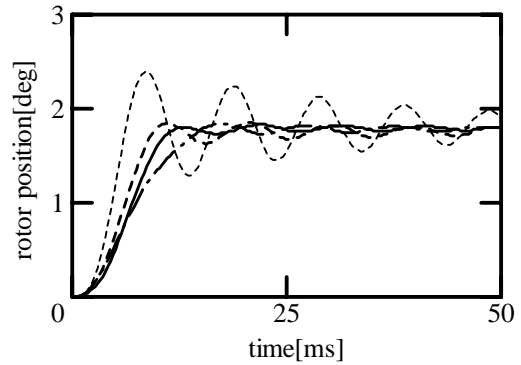
(a) case in the  $J = 5 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$



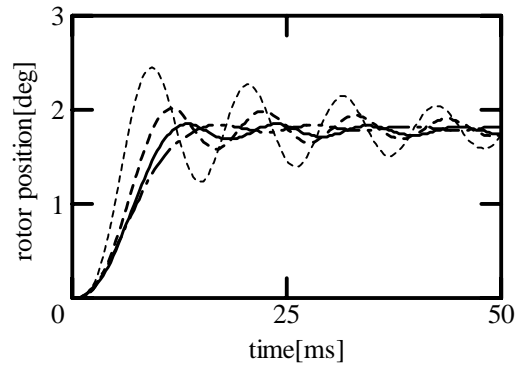
(b) case in the  $J = 10 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$



(c) case in the  $J = 15 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$



(d) case in the  $J = 20 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$



(e) case in the  $J = 25 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$

Fig.13 Step response (inertial load :  $5 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ )

## 6. おわりに

本研究では、ステッピングモータの問題点である回転子振動に関して、慣性負荷変動に対するロバスト性を考慮し、GA を用いた励磁シーケンスの調整を行った。その結果、上記のように設定した慣性負荷の最大値以内ならば、トルク平衡点の操作を行い回転子をそれに追従させることで振動抑制を実現できることを確認した。また、共振周波数領域でのゲインの減少量を

ステップ波形と比較することでランプ波形の最適な立ち上がり時間についても検討した。ゲインの減少量は立ち上がり時間を変えることで飽和する傾向があり、その飽和し始めた立ち上がり時間と実験的に求めた立ち上がり時間が一致した。

以上より、本手法を用いた場合、励磁タイミングの再調整をすることなく負荷を取り付けたときも回転子の振動を効果的に抑制できることが示された。



## 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 ,33/71 ,総合電子出版社 , ( 1996 )
- 2) 海老原 大樹,岩佐 孝夫:ステッピングモータ活用技術 ,144/150 ,工業調査会 ( 1984 )
- 3) 坂和正敏・田中雅博:遺伝的アルゴリズム , 1/31 , 浅倉書店 ( 1995 )
- 4) 三浦武・嵯峨敏・谷口敏幸:遺伝的アルゴリズムによるステッピングモータのステップ応答波形の整形 , 電学論 D , 117-11 , 1390/1395 ( 1997 )
- 5) T . Miura , T . Taniguchi : Open-Loop Control of a Stepping Motor Using Oscillation Suppressive Exciting Sequence Tuned by Genetic Algorithm ,IEEE Trans.Inst.Elect ,46-6 , 1192/1198 ( 1999 )