

論文

ファジィ推論を用いたステッピングモータの駆動法

秋山宜万*・三浦 武*・谷口敏幸*

A New Method for Driving of a Stepping Motor Using Fuzzy Reasoning

Yoshikazu AKIYAMA*, Takeshi MIURA* and Toshiyuki TANIGUCHI*

Abstract

A stepping motor is used widely as an actuator for position control. However, there is a disadvantage in terms of efficiency because the motor is generally excited by maximum rated voltage. In this case, a problem of rotor oscillation also occurs by overabundant driving torque.

In this paper, the authors suggest a new method for more efficient operation and damping of oscillation.

Generally it is difficult to build up a strict mathematical model of a stepping motor because of its nonlinearity characteristic. However, it is possible to investigate the relationship between exciting voltage and aspect of step response qualitatively by some simple experiments. Therefore, the authors use a method including fuzzy reasoning which is suitable to describe qualitative relationship for decision of proper exciting voltage.

The effectiveness of this method is presented by the experiment for an actual stepping motor.

1. はじめに

ステッピングモータは構造上パルス等のデジタル量を指令値とした位置決め制御に適したモータであり、停止時でも保持トルクを有するなどの特徴をもつことからアクチュエータとして広く利用されている。また、構造が簡単で比較的安価なモータであることからその使用法も簡易な場合が多く、単純な励磁シーケンスに従い固定子巻線に対して定格電圧の印加を順次切り替えることで基本ステップ角ごとに歩進させるのが一般的である。したがって負荷の大きさに関わらずに歩進、停止時とも定格電圧で励

磁されるため運転条件によっては余分な電力を消費してしまふとも考えられる。このため、蓄電池等を用いた電源容量に制限のある場合には適さない。

また、ステッピングモータの大きな欠点として歩進するごとに回転子が振動するという現象もある。これも負荷の大小に関わらずに定格電圧で励磁することにより、駆動トルクが過大に、かつ、急峻に発生することが原因と考えることができる。このような回転子の振動抑制に対してはマイクロステップ駆動法⁽¹⁾、逆相励磁ダンピング法⁽²⁾、励磁タイミングの調整を行うスイッチングシーケンス法⁽³⁾等いくつかの効果的な方法が提案されているがこれらの方法では消費電力の観点からの考察がなされていない。しかし、近年制御装置の小型化、省電力化が急速に進んでおり、ステッピングモータにおいても省電力駆動法の開発が必要となっている。

1996年6月21日受理

*秋田大学鉱山学部電気電子工学科, Department of Electrical and Electronic Engineering, Mining College, Akita university.

ステッピングモータは非常に簡易に使用することを前提としたアクチュエータであるが、それ自体強い非線形性を持つことから、高度な使用法のための検討は比較的遅れているモータであるといえる。特に省電力駆動と振動抑制という2つの効果を期待できる方法はこれまで提案されていないと思われる。そこで、本研究においては単純な矩形波を維持しながらも省電力駆動と振動抑制を実現することが可能な励磁電圧を容易に決定する方法について検討した。ステッピングモータは非線形性を有するため厳密な数学的モデルがなく、種々の運転条件に合わせた最適な励磁電圧を決定することは一般に困難である。このような場合にはファジィ推論が有効であるため、本研究ではファジィ推論により最適励磁電圧を決定する方法を開発し、実際のモータに適用して実験を行った。以下にその結果を報告する。

2. 実験装置

2.1 実験装置

本研究では2相ハイブリット形(HB形という)、基本ステップ角 $\theta_s = 1.8$ 度のステッピングモータを使用した。実験装置の構成をFig. 1に示す。

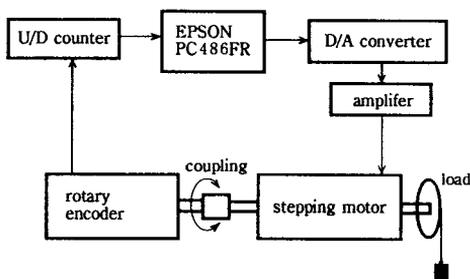


Fig. 1 Configuration of experimental apparatus.

また、各機器の主な仕様をTable 1に示す。

Table 1 Specification of equipment.

| equipment | specifications |
|----------------|---|
| stepping motor | HB type, 6V, 0.8A, $\theta_s = 1.8^\circ$ |
| computer | CPU486DX100MHz |
| D/A converter | 12bit, 5 μ s/ch |
| U/D counter | 4magnification |
| amplifier | 28V, 4A, DC~100kHz |
| rotary encoder | 6000pulse/rev., A·B·Zphase |

コンピュータからの励磁指令はD/A変換器によりアナログ電圧に変換され、アンプで増幅された後モータの固定子巻線に印加される。モータの回転はフレキシブルカップリングで結合されたロータリエンコーダにより角度に比例したパルス列に変換され、この信号をU/Dカウンタにより計数する事で検出される。以上のような実験装置により、回転子の回転角を θ_s の1/120の分解能で50 μ sごとに計測した。

2.2 負荷装置

本研究では負荷装置としてつり下げ負荷と慣性負荷の2種類について検討を行った。つり下げ負荷はモータの回転軸に半径1cmのプーリを取り付け、糸でおもりをつり下げたものを使用した。また、慣性負荷は円板をモータの回転軸に直接取り付けしたものを使用した。つり下げ負荷、慣性負荷はそれぞれ3種類の大きさのものを使用した。

3. 省電力駆動の原理

3.1 通常の駆動法

ステッピングモータはあるA相を励磁した状態から隣に位置するB相に励磁を切り替えることにより回転子の機械的構造または磁極配置に従い基本ステップ角 θ_s だけ歩進する。このとき回転子や負荷等の慣性により減衰振動を伴うことになる。通常用いられる一相励磁シーケンスと本研究で提案する省電力励磁シーケンスおよびステップ応答の例をFig. 2に示す。

本研究ではFig. 2に示すような整定位置の偏差と振幅の2量について着目することとし、それぞれ θ_e , θ_a であらわす。一般的な駆動法では歩進した後に停止した状態でもB相は定格電圧で励磁され続け、このときの励磁電流により保持トルクを発生する。しかし、この保持トルクは固定子と回転子の歯が向き合う状態で最小となるため、停止した状態で負荷トルクが有る場合には整定位置に偏差を生じることとなる。つり下げ負荷を取り付けてFig. 2に示すような通常の励磁シーケンスにより定格電圧で駆動した場合の整定位置の偏差をTable 2に示す。

つり下げ負荷が増加するに従い整定位置の偏差も増加している。同様に慣性負荷を取り付けた状態でFig. 2に示す通常の励磁シーケンスにより駆動した場合のオーバーシュート量をTable 3に示す。

慣性モーメントが増加するに従いオーバーシュート量が増加している。

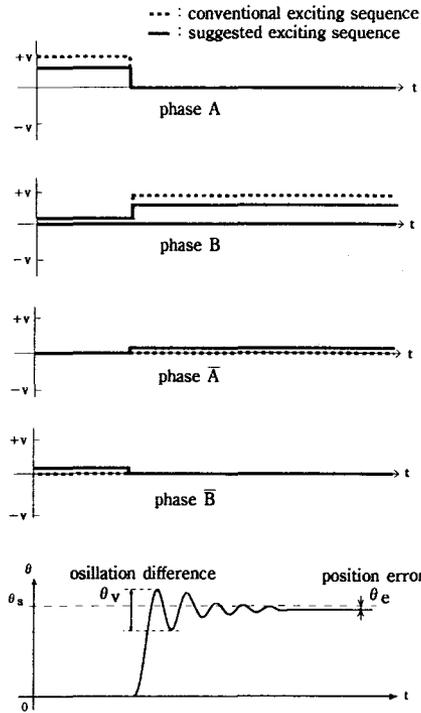


Fig. 2 Applied voltage and step response.

Table 2 Variation of position error with pull down load.

| weight (g) | θ_e / θ_s (%) |
|------------|---------------------------|
| 100 | 3.3 |
| 200 | 4.2 |
| 300 | 7.5 |

Table 3 Variation of overshoot with inertial load.

| type | moment of inertia (kg cm ²) | over shoot (%) |
|------|---|----------------|
| A | 0.051 | 7.5 |
| B | 0.123 | 16.7 |
| C | 0.593 | 36.7 |

3.2 消費電力

ステッピングモータは電気的にはLとRの直列回路であるが、固定子と回転子の位置関係により磁気回路が変化するため励磁電流が影響されると考えられる。慣性負荷を取り付けた状態でFig. 2に示した方法で駆動した場合の励磁電流のステップ応答の例をFig. 3に示す。

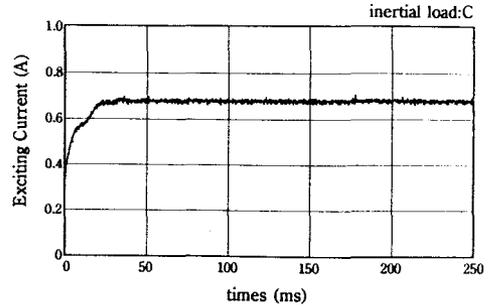


Fig. 3 Step response.

歩進直後の励磁電流の振動は僅かであり、立ち上がり時間も短いことが確認できる。一般に、ステッピングモータは低回転域で駆動されるため励磁シーケンスの周期と比較して励磁電流の立ち上がり時間は十分に小さく、(1)式のように近似することが可能である。ただし、 P は消費電力、 V_B 、 $V_{\bar{A}}$ はそれぞれB、 \bar{A} 相の励磁電圧、 r は固定子巻線の抵抗である。

$$P = (V_B^2 + V_{\bar{A}}^2) / r \quad (1)$$

従って励磁電圧を低減することで消費電力を低減することが可能であり、本研究では簡単のため励磁電圧のみを評価する。

3.3 励磁電圧の低減

励磁電圧を減少させた場合は定格電圧で駆動した場合と比較して θ_e は増加することになる。つり下げ負荷を取り付けた状態で励磁電圧を変化させたときのステップ応答の一例をFig. 4に示す。

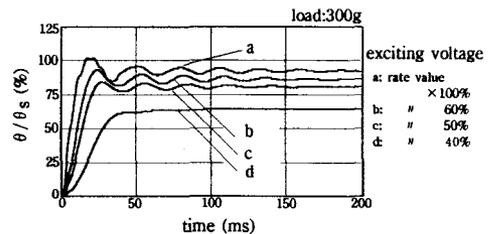


Fig. 4 Step responses with exciting voltage (pull down load).

このように励磁電圧を減少させた場合は、駆動トルクが過剰な状態から低減される方向へ調整されるため θ_v も減少するが、保持トルクも減少し θ_e が増加する結果となる。また、定格電圧付近での励磁電圧の変化に対する θ_e の変化と比較して励磁電圧が

低い場合のそれは非常に変化が大きい。これはステッピングモータに含まれる非線形性によるものと推測できる。励磁電圧のごく僅かな変化に対する θ_e , θ_v の変化が大きい領域は次のステップの角変位も変化するため、駆動回路の電気的特性やモータ構造の機械的なばらつきによっては歩進が不確実となり脱調する可能性の高い領域といえる。ステッピングモータをパルス等のデジタル量での位置決めを用いる場合は確実に歩進することが条件であるためこのような不安定な状態では使用できない。

同様に慣性負荷を取り付けた状態で励磁電圧を変化させたときのステップ応答の一例を Fig. 5 に示す。

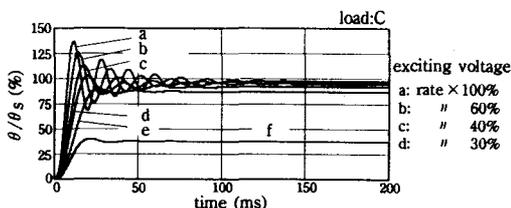


Fig. 5 Step Response with Various Voltage of Excitation (inertial load).

慣性負荷を取り付けた場合も駆動トルクが過剰な状態から減少する方向へ調整されるため θ_e が減少する。また、慣性負荷は停止時には負荷トルクとなりえないため励磁電圧を大幅に低減した場合でもほぼ θ_e ごとに歩進させることができる。しかし僅かではあるが整定位置の変動が見られる。これは停止位置付近ではモータのトルクが小さい上、さらに励磁電圧を減少させることにより機械的摩擦等の影響が顕著となるためと思われる。

以上のように単純に励磁電圧を変化させた場合は励磁電圧を低減することにより θ_e が減少するという傾向はみられるが、負荷の種類や大きさによりその応答は様々である。

3.4 2相励磁

次につり下げ負荷を取り付けた状態で θ_e を減少させる場合を考える。このような場合、保持トルクを無限に大きくすることは不可能である以上、B相だけの励磁電流を増大させることで整定位置の偏差を補償することも現実には不可能である。しかし、B相の励磁電圧を増加させるよりもむしろ \bar{A} 相を励磁した方が大きなトルクを発生しうる状態にあるため、B相と同時に \bar{A} 相も僅かに励磁する2相励磁

とすることで整定位置を補償することが可能であると考えられる。つり下げ負荷を取り付けた状態でB相と \bar{A} 相の励磁電圧を V_B , $V_{\bar{A}}$ とし、それぞれを変化させた場合のステップ応答を Fig. 6 に示す。

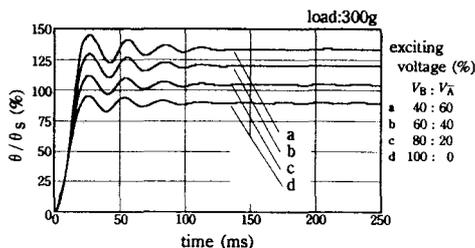


Fig. 6 Step response (excitation: 2phase).

このようにB相、 \bar{A} 相の励磁電圧の比率を変化させることにより θ_e を減少させることは可能である。しかしこの場合も単純に $V_{\bar{A}}$ の割合を増加させるだけでは逆に整定位置の偏差が増大してしまうため負荷の大小に応じた適正な励磁電圧の比を決定することは困難である。また、 θ_e の増加とともに θ_v も増加してしまう。ただし、この場合の θ_v の増加はB相、 \bar{A} 相の合成磁界により等価的にB相の位置を変化させることにより、1ステップで歩進する角度そのものが增加することによる θ_e の増加であると考えることができ、励磁電圧の増減に対する θ_e の変化とは異なり比較的非線形性が弱い現象である。

3.5 省電力駆動

このように2相励磁における励磁電圧の大きさ ($V_B + V_{\bar{A}}$) と励磁電圧の比 $\{V_{\bar{A}} / (V_B + V_{\bar{A}})\}$ を適正な値にすることができれば、単純な矩形波を維持しながら省電力かつ低振動となる励磁が可能と考えられる。しかし、種々の負荷に対して ($V_B + V_{\bar{A}}$) と $\{V_{\bar{A}} / (V_B + V_{\bar{A}})\}$ をそれぞれ変化させたときの θ_e , θ_v の応答は複雑である。また、 V_B , $V_{\bar{A}}$ の2量を操作量とし、 θ_e , θ_v の2量を制御量とすることとなり、さらにそれぞれの関係にステッピングモータのもつ非線形性を考慮する必要があるため厳密な数学モデルの構築は困難である。しかし、次のように言語的表現は可能である。

条件 a ($V_B + V_{\bar{A}}$) を低減

→ θ_e は増加

→ θ_v は減少

条件 b $\{V_{\bar{A}} / (V_B + V_{\bar{A}})\}$ を増加

→ θ_e は増加

→ θ_v は増加

4. ファジィ推論

このように厳密な数学的モデルの構築が困難であるものの言語的表現は可能であるような対象を制御する場合⁽⁴⁾、ファジィ推論が有効な手法であることはよく知られている。そこで本研究ではステッピングモータ自体や負荷の情報を用いることなく、前述の傾向のみを反映させたファジィ推論を構築した。また、言語表現における主な規則が2組あることからファジィルールも2組で構成した。

4.1 ルール (A)

ファジィルール(A)は以下のように決定した。前件部1, 2はそれぞれ θ_v , θ_e とし、後件部は励磁電圧($V_B + V_A$)の修正量 k_v とした。

if ($\theta_v = P4$ AND $\theta_e = Z0$)

= 駆動トルクが過大
then $k_v = NB$

if ($\theta_v = P0$ AND $\theta_e = Z0$)

= 駆動トルクがほぼ適正値
then $k_v = Z0$

if ($\theta_v = P0$ AND $\theta_e = NB$)

= 駆動トルクが不足
then $k_v = PB$

このようなファジィルール(A)に基づき構成したルールテーブル(A)をTable 4に示す。

Table 4 Rule table (A).

| | | θ_v | | | | |
|------------|----|------------|----|----|----|----|
| | | P0 | P1 | P2 | P3 | P4 |
| θ_e | PB | NS | NB | NB | NB | NB |
| | PS | NS | NS | NB | NB | NB |
| | Z0 | Z0 | Z0 | NS | NB | NB |
| | NS | PS | PS | PS | NS | NB |
| | | PB | PS | PS | PS | NS |

また、メンバーシップ関数(A)をFig. 7に示す。

4.2 ルール (B)

同様にファジィルール(B)を以下のように構成した。前件部1, 2はそれぞれ θ_e , k_v とし、後件部は励磁電圧の割合 $\{V_A / (V_B + V_A)\}$ の修正量 Δk_r とした。

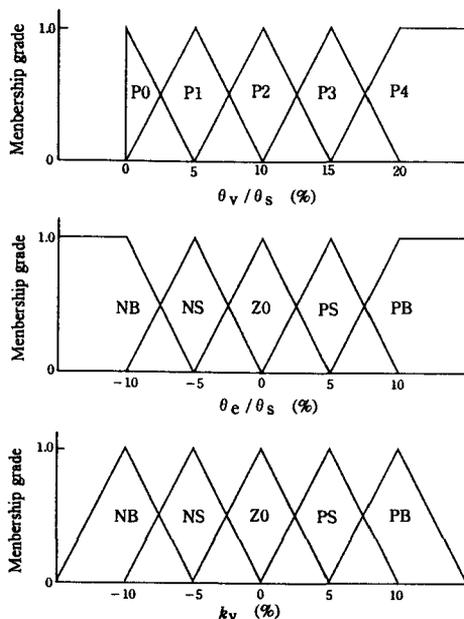


Fig. 7 Membership functions (A).

if ($\theta_e = Z0$ AND $k_v = Z0$)

= 駆動トルク・整定位置補償ともほぼ適正
then $\Delta k_r = Z0$

if ($\theta_e = NS$ AND $k_v = PS$)

= 駆動トルクが不足だが増加に補正
then $\Delta k_r = Z0$

if ($\theta_e = NB$ AND $k_v = PS$)

= 駆動トルクが大きく不足だが増加に補正
then $\Delta k_r = PS$

if ($\theta_e = NB$ AND $k_v = NB$)

= 駆動トルクが大きく不足し更に減少
then $\Delta k_r = PB$

このようなファジィルール(B)より構成したルールテーブル(B)をTable 5に示す。

また、メンバーシップ関数(B)をFig. 8に示す。メンバーシップ関数(A), (B)の出力はmin-max重心法により決定した。

5. 励磁電圧の決定法

励磁電圧の決定については(2)式による。ただし式中の $V_B(n)$, $V_A(n)$ はそれぞれ第nステップのB相、

Table 5 Rule table (B).

| | | θ_e | | | | |
|-------|----|------------|----|----|----|----|
| | | NB | NS | Z0 | PS | PB |
| k_v | PB | PS | NS | NS | NB | NB |
| | PS | PS | Z0 | Z0 | NS | NB |
| | Z0 | PB | PS | Z0 | Z0 | NS |
| | NS | PB | PB | PS | Z0 | NS |
| | NB | PB | PB | PB | PS | NS |

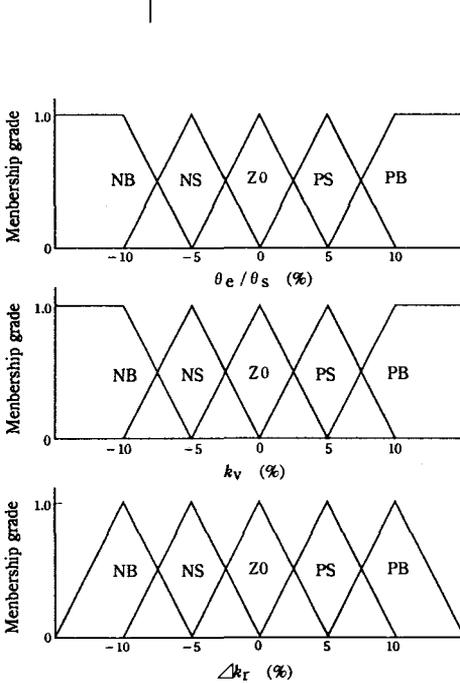


Fig. 8 Membership functions (B).

\bar{A} 相の励磁電圧, $V_B(n-1)$, $V_{\bar{A}}(n-1)$ はそれぞれ 1 ステップ前の B 相, \bar{A} 相の励磁電圧, $k_v(n)$ は第 n ステップでの励磁電圧の修正量, $k_r(n)$ は第 n ステップでの励磁電圧の割合の修正量とした。また, 初期値として $V_B(0)$ は定格電圧とし, $V_{\bar{A}}(0)$ および $k_r(0)$ は零とした。

$$\left. \begin{aligned}
 V_B(n) &= \{ V_B(n-1) + V_{\bar{A}}(n-1) \} \times \{ 1 + k_v(n) \} \\
 &\quad \times \{ 1 - k_r(n) \} \\
 V_{\bar{A}}(n) &= \{ V_B(n-1) + V_{\bar{A}}(n-1) \} \times \{ 1 + k_v(n) \} \\
 &\quad \times k_r(n) \\
 k_r(n) &= k_r(n-1) + \Delta k_r(n)
 \end{aligned} \right\} (2)$$

6. 実験結果

前述のような手法を用いて前述したつり下げ負荷と慣性負荷を取り付けた状態で実験を行った。

6.1 つり下げ負荷

つり下げ負荷装着時の諸量の変化を Fig. 9 に示す。なお, 定格電圧と定格電圧で励磁した時の θ_e をそれぞれ V_0 , θ_{v0} とした。

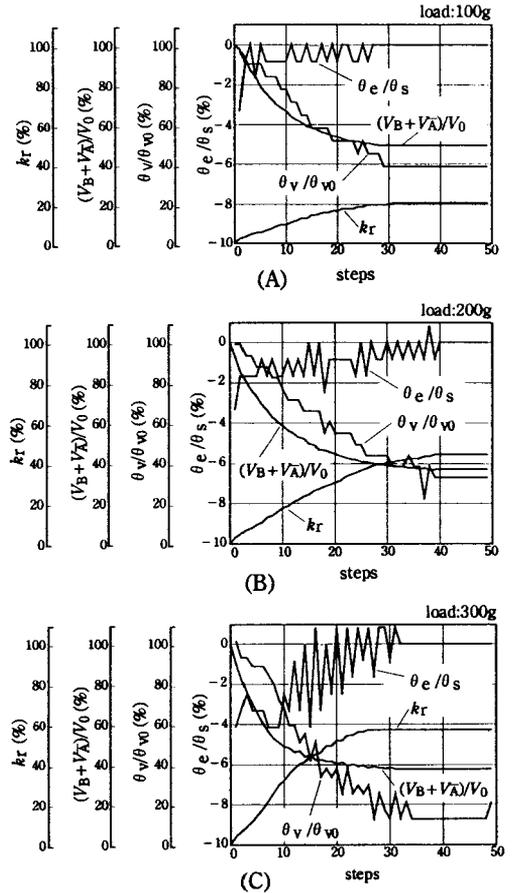


Fig. 9 Parameter variation with each step.

歩進するごとに励磁電圧が調整され, θ_e の増加を伴うことなく θ_r が減少していることが確認できる。また, 最終値に至るまでの調整に要する回数は少ないとはいえないが θ_e , θ_r は複雑に変動するものの最終値に収束していることから本研究で用いたメンバーシップ関数の構成は妥当であると考えられる。最終的には Fig. 3 においては脱調する可能性のある領域まで励磁電圧を減少させているにもかかわらず

θ_e はほぼ零に維持した状態で θ_e も抑制したまま歩進を続けていることから本研究で得られた省電力駆動の励磁電圧は適正であると考えられる。

つり下げ負荷取り付け時のステップ応答を Fig. 10 に示す。

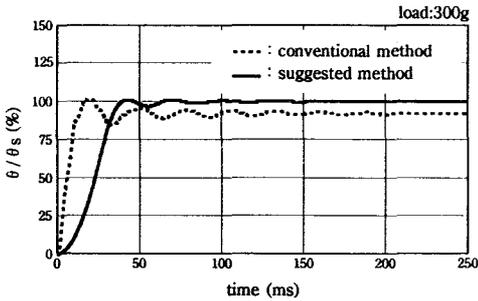


Fig. 10 Step response.

定格電圧駆動でのステップ応答と比較して省電力駆動での θ_e は抑制されていることが確認できる。また励磁電圧が低減されているため立ち上がりは遅れているものの、振動抑制が良好になされていることから逆に整定時間は約 70% に短縮されている。したがって位置決め制御の目的で用いるステッピングモータにとっては有効であるといえる。

6.2 慣性負荷

次に慣性負荷取り付け時の諸量の変化を Fig. 11 に示す。

慣性負荷を取り付けた場合も、つり下げ負荷と同様に歩進するごとに励磁電圧が調整され、 θ_e の増加を伴うことなく θ_e が減少していることが確認できる。また、慣性負荷のみでは停止した状態で負荷トルクを生じることが無く、つり下げ負荷と比較して励磁電圧が非常に小さい値に調整されている。通常の励磁方法の場合は、このように低い励磁電圧では十分なトルクが得られず摩擦等により停止位置が多少変動する場合があるが、本研究で得られた励磁電圧では θ_e を増加させることもなく良好に歩進していることから得られた励磁電圧は有効であると考えられる。

また、同様に慣性負荷取り付け時のステップ応答を Fig. 12 に示す。

つり下げ負荷等と同様に立ち上がりの遅れは多少見られるがこちらも θ_e が大幅に減少していることから整定時間は約 25% に短縮されており非常に良い結果といえる。

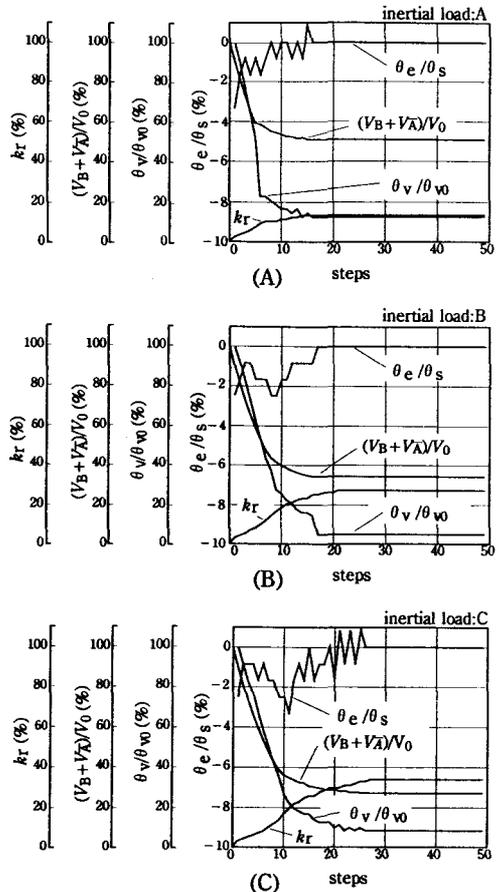


Fig. 11 Parameter variation with each step.

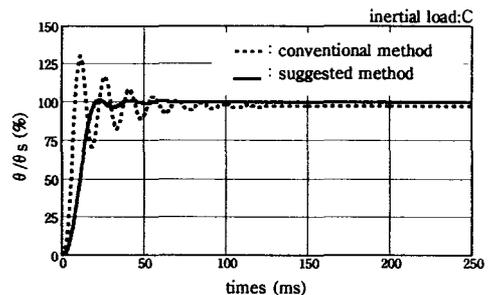


Fig. 12 Step response.

6.3 励磁電圧値

調整後得られた励磁電圧値を Table 6 に示す。

つり下げ負荷の場合は振動よりも整定位置の偏差が問題となるため励磁電圧は負荷の大小に関わらず

Table 6 Result of Exciting Voltage.

| load | exciting voltage (%) | k_r (%) |
|----------------|----------------------|-----------|
| pull down load | | |
| 100g | 49.6 | 20.8 |
| 200g | 37.2 | 44.7 |
| 300g | 37.8 | 57.6 |
| inatial load | | |
| A | 50.6 | 13.3 |
| B | 34.2 | 27.3 |
| C | 27.1 | 33.8 |

ほぼ同様の値となっているが、 k_r は負荷の増加にあわせて増大した結果となっている。また、対照的に慣性負荷の場合は整定位置の偏差より振動が問題となるため負荷の増加に伴い励磁電圧は大きく減少している。また、駆動トルクの大幅な減少による整定位置の偏差を補償するため k_r も増加した結果となっている。

7. ま と め

ステッピングモータを励磁電圧だけを減少するという簡易な方法で省電力駆動する場合、モータの持つ非線形性によって適正な励磁電圧を決定することは困難であるが、本研究では定性的な傾向を把握し

た上で、ファジィ推論を用いることによって簡単に適正值を決定する方法を提案した。これによって従来の2相励磁では負荷条件に関わらず定格電圧で駆動するために過剰な電力消費を生じるような場合でも、本研究で提案した方法を用いることで単純な矩形波の励磁シーケンスであるという簡易さは維持しつつ、消費電力を減少させた上、回転子の振動と整定位置の偏差も抑制する良好な省電力駆動が可能となった。また、本研究で提案した方法はステッピングモータ自体や負荷の情報を使用していないため負荷の種類や大きさ等の運転条件が変更された場合でも良好な結果が得られる方法である。

参 考 文 献

- (1) 百目鬼英夫(1993)：ステッピングモータの使い方，工業調査会，95-108.
- (2) 千住，仲濱，上里(1995)：ファジィ推論を用いたステッピングモータの回転子振動抑制法，日本ファジィ学会論文誌，Vol. 7, No. 2, 442-450.
- (3) 谷口，大塚，高杉(1988)：簡易なスイッチングシーケンスによるステッピングモータの振動抑制，電気学会論文誌，Vol. 111-D, No. 2, 497-498.
- (4) 菅野道夫(1988)：ファジィ制御，日刊工業新聞社，67-136.