

進み角制御によるステッピングモータの加減速特性

堀井龍夫*, 中村祥孝**, 新房健一**, 鈴木宏明**, 福田 聡**
青柳 栄**, 川原輝信**, 大越規善**, 渡辺志津弥**, 湧井源二郎**

(昭和63年 8 月26日受理)

Acceleration and Deceleration Characteristics of Stepping Motor under Lead Angle Control

T.HORII*, Y.NAKAMURA**, K.SINBOU**, H.SUZUKI**, S.FUKUDA**,
S.AOYAGI**, T.KAWAHARA**, N.OOKOSHI**, S.WATANABE**, G.WAKUI**,

A working closed-loop microcomputer control system is described for the PM and VR type stepping motors. To get the most acceleration of the motor, the lead angle must be control to raise a maximum motor torque. The experimental results of acceleration show that the system has the optimal lead angle. For the deceleration, four methods are examined. And it has been become clear that the method, to change the excitation phase sequence every half a step angle, gives the most deceleration of the motor.

1. まえがき

現在, 制御用ステッピングモータはOA機器, FA機器等, 幅広い分野で大量に利用されている。このモータの長所としては, 開ループ制御が可能でサーボ機構が簡単に済むこと, かつ静止時には大きな保持トルクを有し, モータの回転誤差がステップごとに累積されないこと等があげられる。

一方, 回転動作中において, あるパルスレートの振動, 共振が発生することにより, あるいは外乱によりミスステップが発生する欠点がある。このため開ループ制御では応用分野が限定される欠点がある。このミスステップを除去し, より迅速な制御を行なうためには閉ループ制御を行なう必要がある。

これまでにステッピングモータに関して多くの報告があるが, 現在の閉ループ制御の基礎は既に1960年代

に確立されていた⁽¹⁾。1970年代後半におけるマイクロコンピュータの出現は簡単に閉ループ制御を実現できる基盤となり, マイクロコンピュータを用いた閉ループ制御方式が数多く報告されている^{(2)~(6)}。また, 最適なスイッチ角で励磁切り換えを行なう閉ループ制御の報告もある⁽⁶⁾。閉ループ制御を行なう場合, 全制御システムの核となるコントローラであるマイクロコンピュータのソフトウェアと全システムのハードウェアとのバランスを考慮する必要がある。閉ループ制御の中にコンピュータが介在した場合, フィードバックのデータの入力とそのデータの分析, そして適切な応答を行わなければならない。このために必要な制御の遅れ時間は制御系の高速度応答を犠牲にすることになる。この遅れ時間を最少にするには, コンピュータの負担をできるだけ少なくするため, ハードウェアに依存させる部分をできるだけふやす必要がある。現在, マイク

* 茨城大学工業短期大学部電気工学科

* Department of Electrical Engineering
College of Technology, Ibaraki University
Hitachi 316, Japan

** 茨城大学工学部電気工学科

* Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, Ibaraki University
Hitachi 316, Japan

ロコンピュータは32bitのものに主流が移りつつあり計算速度は8bitのものに比較し格段の進歩が見られるが、特に複雑な演算を行なわない限り、8bitコンピュータで十分制御を行なうことができる。

本論文では進み角制御のため設計製作したハードウェアについて述べ、本制御システムにおける加速時の最適な進み角を実験的に決定した。閉ループ制御においてステップモータを減速する方法としては、負のトルクを発生する進み角を設定する方法や、励磁位置を固定する方法⁽⁴⁾が既に報告されている。本論文では、上に述べた方法の他に回転子の逆回転方向に励磁を切り換える方法を新たに考え減速特性の実験を行ない、最適な減速方法を明らかとした。

2. 進み角制御

ステップモータを開ループで運転する場合には、励磁相の切り換えパルスの発生タイミングは、1ステップの距離を回転子が進むために必要な最少時間より余裕を持たせて設定しなければならない。つまり、固定子と回転子の磁極中心が一致する位置を安定点と呼ぶが、この位置に回転子が移動を終了してから後に、次のステップへ進むための励磁パルスを与えることになる。余裕を持ったタイミングで励磁切り換えが行なわれるので、回転子は安定点で振動し反発力の働く位置で励磁切り換えが行なわれたり、逆に一致した後の吸引力の働く位置で行われたりする。このため、開ループ制御では、安定点を中心として回転子が振動し、モータは滑らかな運転ができないことになる。

滑らかな加速減速運転を行ない高速位置決め制御を行なうには、励磁切り換え時の固定子と回転子の磁極中心の相対位置が、最適な位置になるように制御すれば良い。励磁を切り変えた後の新しい安定点に対する、励磁切り換え時の回転子の磁極中心の角度差を進み角と呼ぶ。理想的には、固定子と回転子の磁極中心が一致した瞬間に、次の励磁位置へ固定子の磁極中心が移動すればトルク振動は生じないことになる。しかし、実際にはフィードバックの遅れ時間が存在する。さらに、インダクタンスのため、切り変えた相の励磁電流は急激に立ち上れない。また励磁を切った相には残留電流が流れている。このため固定子の励磁切り換えで瞬時に次の安定点へ移動できないことになる。これらのことを補うため、加速時に、進み角を1ステップ以上にとり早めに励磁切り換えを行なう必要

がある。Fig.1は4相ステップモータを2相励磁した場合の進み角の説明図である。

Fig.1に示したトルク曲線は2つの相を励磁した場合の静止トルクで、進み角1.5ステップで最も大きな平均トルクが得られることになる。

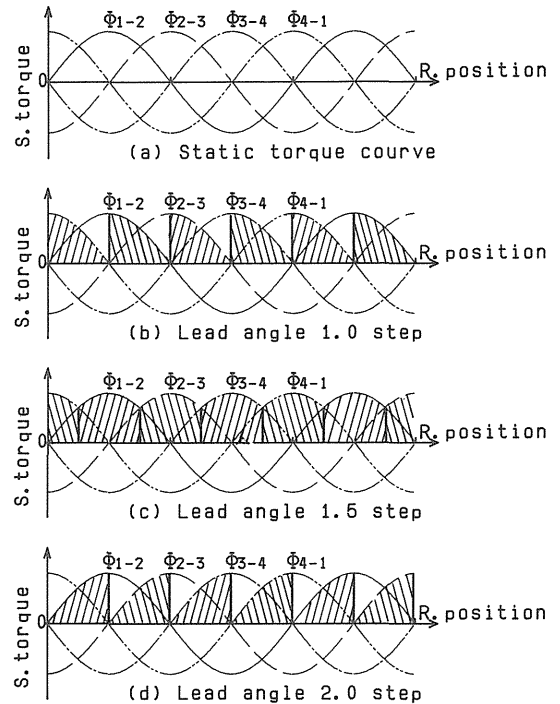


Fig. 1 Relationship between lead angle and static torque/rotor position characteristics

しかし、モータを含めた回路の時定数や、逆起電力によって、励磁電流の立ち上り変化し、また励磁を切った回路には残留電流が流れているため、図に示したような静止トルク曲線からは最適な進み角は求められない。

一般にステップモータは同一条件下で運転されることが多いので、マイクロコンピュータの学習機能を利用してステップモータを運転することも考えられる⁽⁷⁾。同じ理由から、実験的に最適な進み角を求め、制御に用いることもできる。そこで今回は、実験データから本制御システムに最適な進み角を求めた。

3. 閉ループ制御システム

Fig.2にシステム全体の構成を示す。閉ループは次のように構成されている。コンピュータから出されたパ

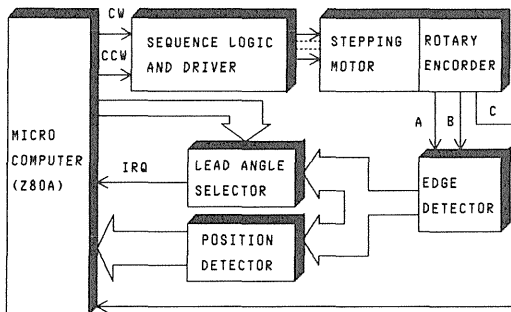


Fig. 2 Block diagram of closed loop system

ルス信号は励磁分配回路へ伝えられ、そこでステッピングモータの励磁相が切り換えられる。励磁相の切り変わりによって、ステッピングモータの回転子は1ステップ移動する。ステッピングモータの軸に取り付けられた光学式エンコーダは3種類の信号(A, B, C)を発生している。このうちAとBチャンネルの信号はエッジ検出回路へ伝えられ、入力信号の立ち上がりとしち下がりパルスが発生し、回転位置検出回路と進み角選択回路へ伝えられる。そして、おのおのの回路はマイクロコンピュータへ位置データや割り込み信号を伝えている。Cチャンネルは基準位置を示す信号でコンピュータの入出力ポート(PIO)へ接続されている。タイマー(PIT)は割り込み信号と次の割り込み信号までの経過時間をカウントしているので、コンピュータは、PITのカウントデータからステッピングモータの速度の計算を行ない、閉ループ制御を行っている。なお、制御用に用いているマイクロコンピュータは、パーソナルコンピュータとRS232Cと通信回線で結ばれている。制御に使用した速度データはメモリに記憶されているので、実験終了後、データをこの進信回線を介してホストであるパーソナルコンピュータに送り、速度特性を得ることができる。

次に実験に用いた閉ループ制御システムの各部について述べる。

3.1 試料モータ

実験に用いたモータは、4相永久磁石(PM)型およ

び4相可変リラクタンス(VR)型ステッピングモータである。Table1に今回使用したモータの仕様を示す。

Table 1 Specification of tested motors.

	4φPM	4φVR
step angle [°]	1.8	1.8
excitation mode	2φ	2φ
volt [V]	5.1	3.9
current [A]	1.0	1.1
holding torque [kg-cm]	4.3	2.3
rotor inertia [kg-cm ²]	0.105	0.055
weight [kg]	0.57	0.37
resistance [Ω]	5.1	3.5
inductance [mH]	10	16

3.2 励磁分配回路

励磁分配回路は時計方向(CW)パルス、または反時計方向(CCW)パルスの入力により、励磁相の切り換えを行なう回路で、ユニバーサル・コントローラCMOS-IC(山洋PMM8713)を使用している。励磁回路は一般的なトランジスタによるスイッチング回路である。固定子が静止しているときの励磁電流が0.9Aとなるように、励磁回路を設定している。

ステッピングモータを運転する場合、そのモータの相数によって、幾通りかの励磁方法が考えられる。励磁分配回路に用いたICは、4相モータの1相、2相、1-2相励磁のいずれかを選択することができる。2相励磁の場合、1相励磁よりもステップ応答の振動が少ないことが知られている。

これは、次のように考えることができる。1相励磁の場合、励磁切り換えとともに、固定子と回転子を通る磁束の全部が移動しなければならないのに対し、2相励磁では、全磁束の半分が移動すれば良い。また、4相モータでは1相励磁では励磁回路に印加する電圧が1/4周期であるのに対し、2相励磁では半周期と倍の期間であるので、電流の立ち上りを考えた場合1相励磁より有利となる。この為、励磁切り換え時に、磁束の変化成分が少なく済み、かつ磁束を発生させる電流の変化が半周期ごとで一定な電流の流れる期間が長い2相励磁方式は、1相励磁方式より安定にステッピングモータを駆動することができると考えられる。つまり、相数の多いモータを多相励磁で用いれば、より脈動の少ない安定な動作が期待できる。本研究では、4相ステッピングモータを試料機として使用しているので、上記の理由から励磁方式に2相励磁方式を採用した。

3.3 進み角制御回路

【1】 エッジ検出回路

ステッピングモータに取り付けられた光学式エンコーダはA, B, Cチャンネルの3種類の信号を発生する。今回使用したステッピングモータの1回転当りのステップ数が200であるのに対し、エンコーダは1回転に400のパルスを発生するものを使用している。さらに、A, B各チャンネル信号の立ち上り、および立ち下がり位置で、パルスを発生し、位置の分解能を4倍に高めている。このため、各回転方向ごとに、1相励磁および2相励磁では1ステップ当り8点の位置を得ることができる。

【2】 回転位置検出回路

モータの回転子の位置データを示す回路である。その有効範囲はモータの1回転分である。エッジ検出回路で得た全16の位置信号を時計方向と反時計方向の信号に振り分け、完全同期式カウンターへの入力とする。回転子の振動が任意の位置で発生しても良いように、完全同期式カウンターはアップダウン1600進カウンターとして働くように設計している。つまり、このカウンターは時計方向信号をアップ・カウント動作、反時計方向信号をダウン・カウント動作信号の入力と逆カウントが可能なものである。そして、0でダウン・カウント信号が入力されると1599を、1599でアップ・カウント信号が入力されると0を設定するような回路を付加している。

また、外部からのクリア信号によって位置の原点を決てることができる。

【3】進み角選択回路

エッジ検出回路で、各回転方向ごとに8箇所の位置信号が得られるが、これらの信号のうち、閉ループ制御を行なう場合に必要な進み角をコンピュータから指定し、この指定された信号をコンピュータの割り込み線に接続する回路である。

4. 加速減速特性

コントローラとして本制御システムに用いたマイクロコンピュータはZ80A(クロック4MHz)である。このコンピュータは3つのマスク可能な割り込みモードがあり、今回は最も強力なモード2を使用している。このモードの特徴は、割り込みサービスルーチンの開始アドレスの表を適当なメモリへ置き、その表をプログラム上で書き変えることができる点である。

このため、同一の割り込み信号に対して処理ルーチンを変えることが可能となる。

4.1 加速特性

加速時の最適な進み角は回転子の速度と共に変化するが、速度に応じて進み角を変化させようとする、コンピュータによる制御が非常に複雑になってくる。この為、今回は進み角の切り換えを1回行うこととして、加速時間の最も小さかったものを最適な進み角として考える。

ステッピングモータの進み角を制御する加速運転を、以下に述べる手順で行なった。まず、マイクロコンピュータ周辺LSI、メモリの初期設定を行ない、ステッピングモータを開ループで駆動し、エンコーダのCチャンネルの信号が出力されたところで停止させる。次に加速処理に移り、進み角1ステップで始動する。

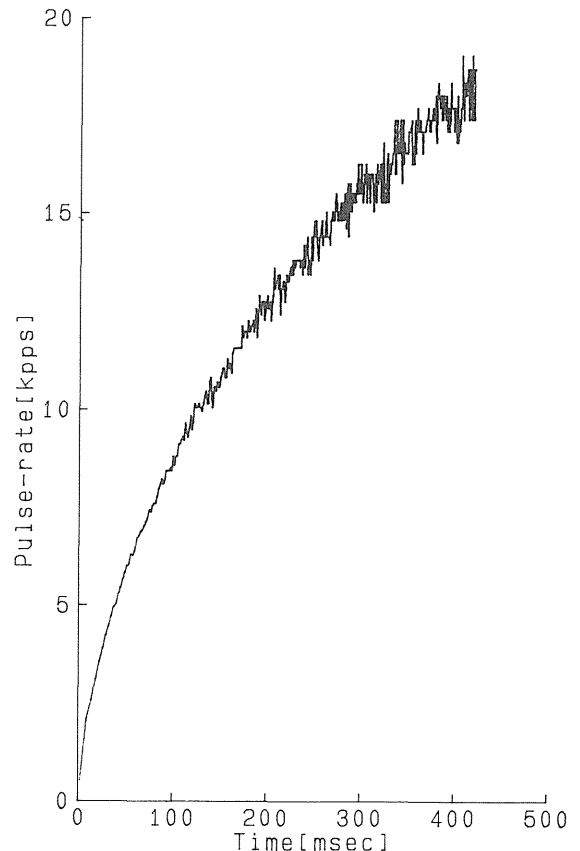


Fig. 3 Acceleration characteristic of PM type stepping motor (lead angle 1.75 step)

ステッピングモータの速度が進み角を変更する設定速度以上になると, 進み角を変更してさらにステッピングモータの加速を行なう。加速動作中の励磁パルスの出力や, 進み角の変更は割り込み処理ルーチンで行なう。

静止トルクの平均値が正の値で加速できる進み角のうち, 1ステップから2ステップの範囲を考え, この範囲の8種類の進み角について加速特性の実験を行なった。PM形ステッピングモータの加速特性の一例をFig.3に, VR形ステッピングモータの加速特性をFig.4に示す。Fig.5に進み角に対する10kppsまでの加速時間特性を示す。Fig.5から明らかなように2つのタイプのステッピングモータはいずれも, 進み角1.5ステップより少し大きいところで加速時間が最少になっている。この結果, 今回使用した制御システムで閉ループ制御を行ない, より迅速な加速を行なうためには, 進み角を1.5~1.8ステップの範囲に設定すれば良いことがわかった。

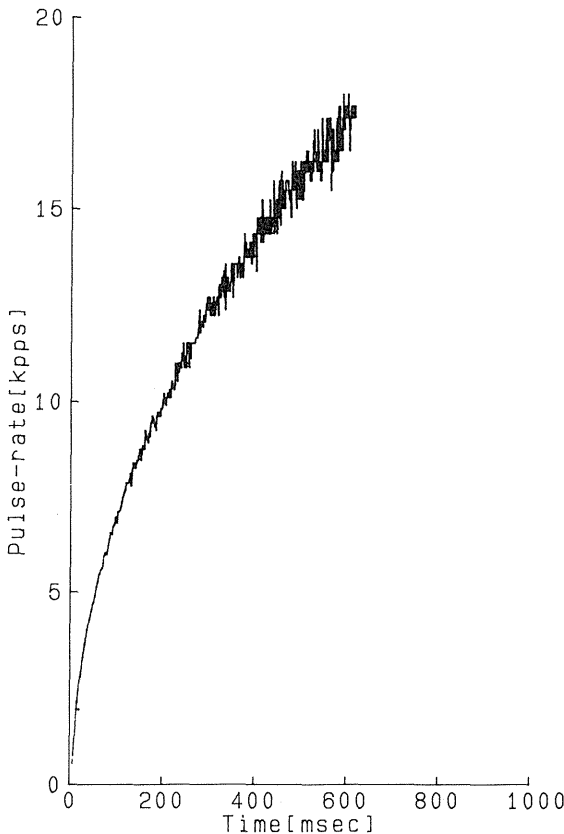


Fig. 4 Acceleration characteristic of VR type stepping motor (lead angle 1.75 step)

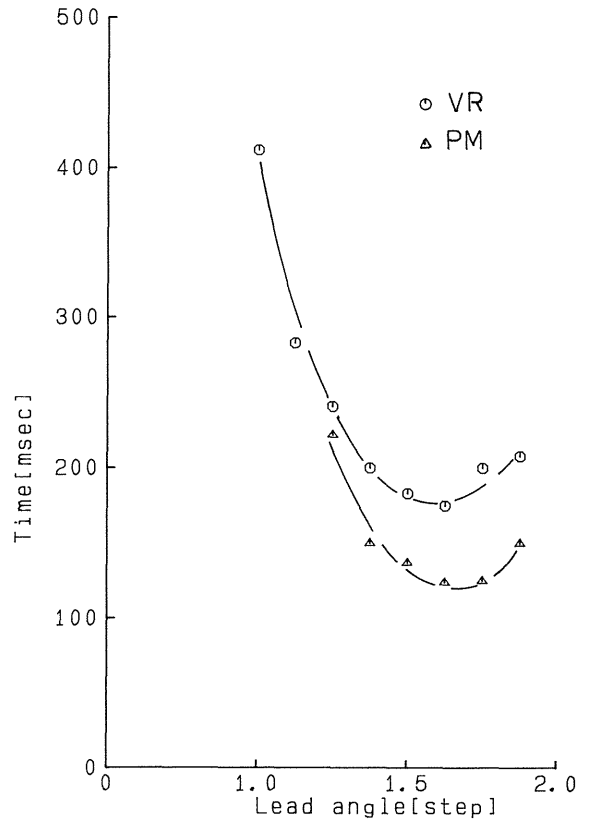


Fig. 5 Time of acceleration above 10kpps/lead angle characteristics

4.2 減速特性

減速特性については, まず進み角を与えて一定速度まで加速したあと, 次に以下に述べる4種類の方法で減速試験を行ない, PM及びVR形のモータについても最も速く減速できる励磁方法を実際に調べた。

- I. 制動トルクの発生する進み角に切り変える。
- II. 励磁相を固定する。
- III. 励磁シーケンスをCCW方向に設定し, 励磁切り換えを回転子が1ステップ進むごとに行なう。
- IV. 励磁シーケンスをCCW方向に設定し, 励磁切り換えを0.5ステップごとに行なう。

Iの方法は, 発生トルクの時間平均が0か又は負になるような進み角に設定し, 回転子の減速を行なう方法である。PM形で最少148msec, VR形で最少246msecの減速時間が得られた。この減速特性をFig.6, Fig.7に示す。IIの方法では, 回転子の回転速度に対し, 固定子の作る磁極が固定されているため, 回転子の回転と

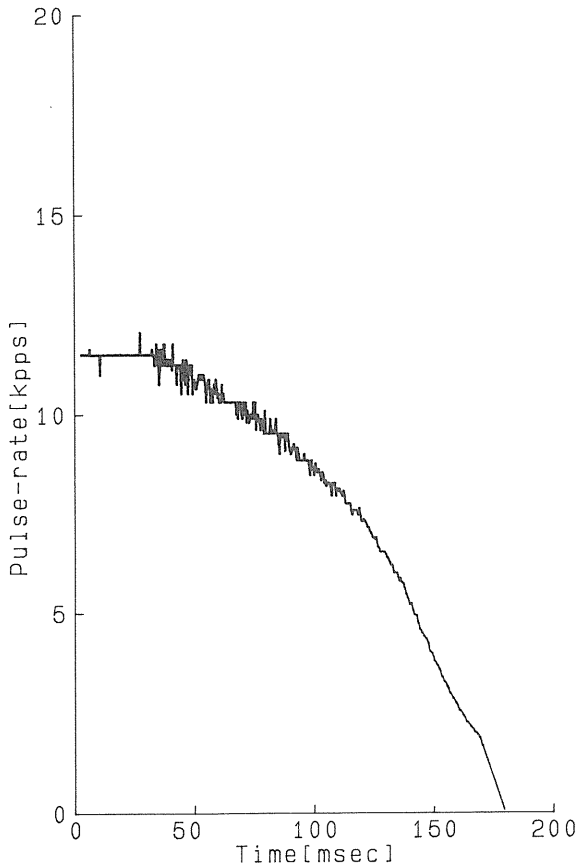


Fig. 6 Deceleration characteristic of PM type stepping motor by 1st method (0.5 step)

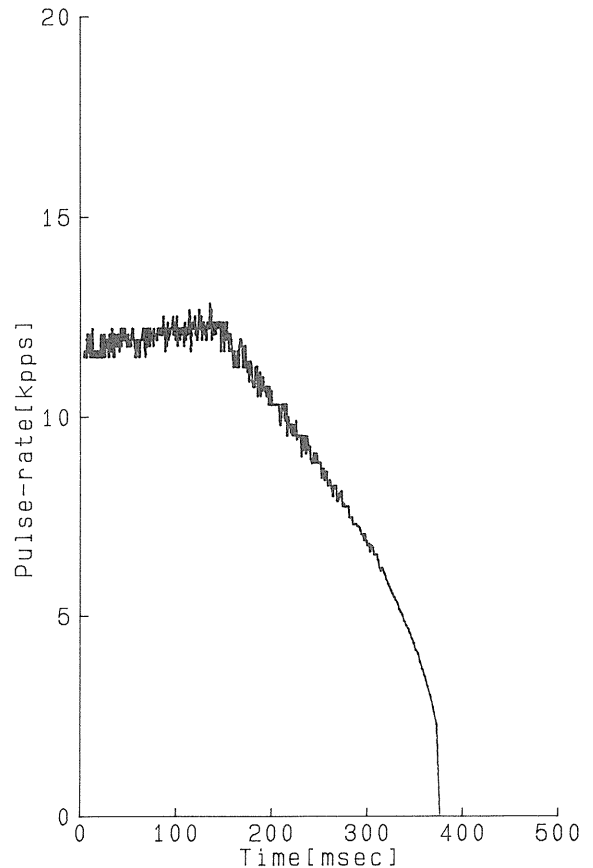


Fig. 7 Deceleration characteristic of VR type stepping motor by 1st method (3.5 step)

ともに加速トルクと減速トルクが交互に回転子に作用し回転子は直線的に減速する。12kppsから0ppsまで減速するに要する最少時間はPM形で225msec, VR形で303msecである。この減速特性をFig.8, Fig.9に示す。IIIの方法は、回転子の回転速度に対し、固定子を作る磁極の速度を、回転子と反対方向へ同一速度で移動するように制御するものである。IIIの方法で実験したデータを比較すると、PM形ステッピングモータの場合、励磁切り換えのタイミングによって減速に要する時間が変化し、最少で92msec, 最大で165msecとなった。VR形ステッピングモータでは、900msec以上とPM形に比べ非常に大きな時間を要する。なお、PM形ステッピングモータはおよそ12kppsから、VR形ステッピングモータは8kppsから減速されている。この減速特性をFig.10, Fig.11に示す。IVの方法は、回転子の回転速度に対し、固定子の作る磁極の速度を、回転子と反対

方向へ2倍の速度で移動するように制御するもので、進み角は周期的に変化している。この方法では、PM形ステッピングモータで約55msecの減速時間を得ることができた。この減速特性をFig.12に示す。実験から得た速度特性から、各々の方法で減速するために要した最少の時間の一覧表をTable2に示す。Table2から明らかかなように、IVの方法が最も減速時間が小さく、減速にはIVの方法が最適と考えられる。このことは次のように考えることができる。回転子を迅速に減速させるには、回転子の持っている運動エネルギーを素早く吸収する必要がある。4相の励磁回路は2回路ずつ対になって、コンデンサと抵抗で結合されているので、励磁切り換えによって、この結合部に電流が流れ、運動エネルギーは、この結合部の抵抗損失となって消費されると考えられる。IV, III, IIの順に励磁回路の切り換えの回数が多く、実際にIVの方法で最短の減速時間

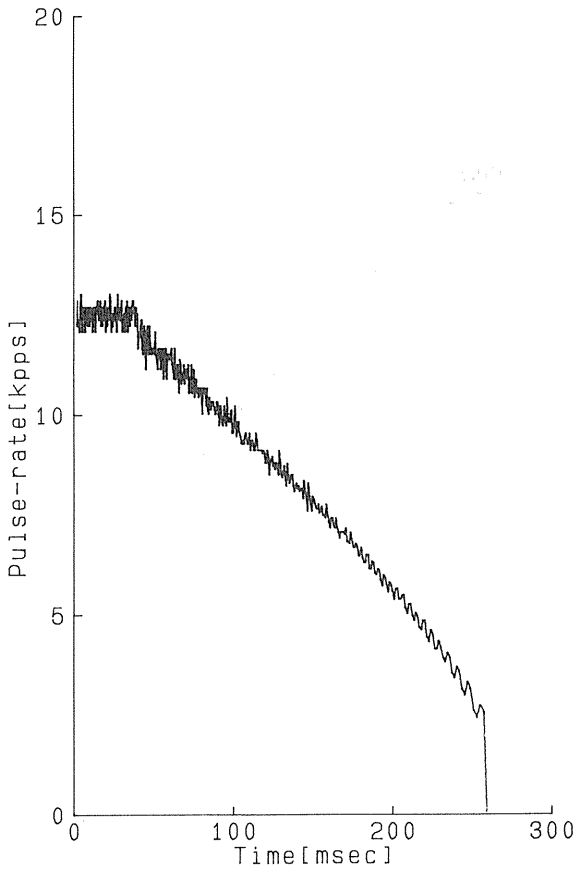


Fig. 8 Deceleration characteristic of PM type stepping motor by 2nd method.

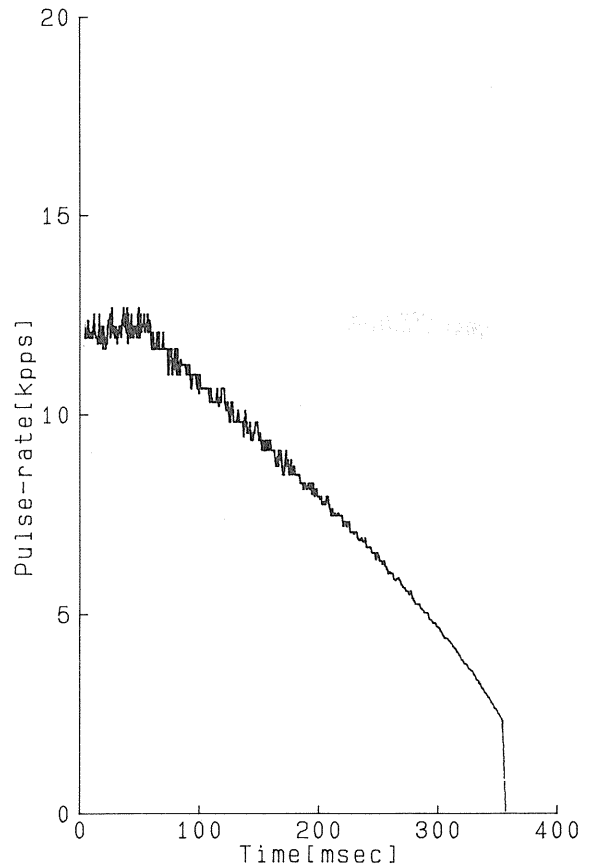


Fig. 9 Deceleration characteristic of VR type stepping motor by 2nd method

を得ることができた。

5. まとめ

位置決め制御のために設計製作したマイクロコンピュータ制御システムを用いて、ステッピングモータの加速時の最適な進み角、及び減速時の最適な減速方法を実験的に求めた。PM形、VR形ステッピングモータ共に、本制御システムの最適な進み角は、1.5~1.8ステップの範囲にあることが明らかとなった。減速時は、励磁切り換えを頻繁に行なうことによって、回転子の運動エネルギーを励磁回路に吸収させる方法が最も減速時間が小さいことが明らかとなった。20kpps以上のパルスレートでは、割り込みも次の割り込みまでの時間間隔が $50\mu\text{sec}$ 以下となり、今回用いたシステムのコ

ンピュータでは、システムのコントローラとしての機能を果たすことができなくなる可能性がある。このような場合、コンピュータをより処理能力のあるものに変更し、ハードウェアのシステム全体に占める割合も大きくする必要がある。

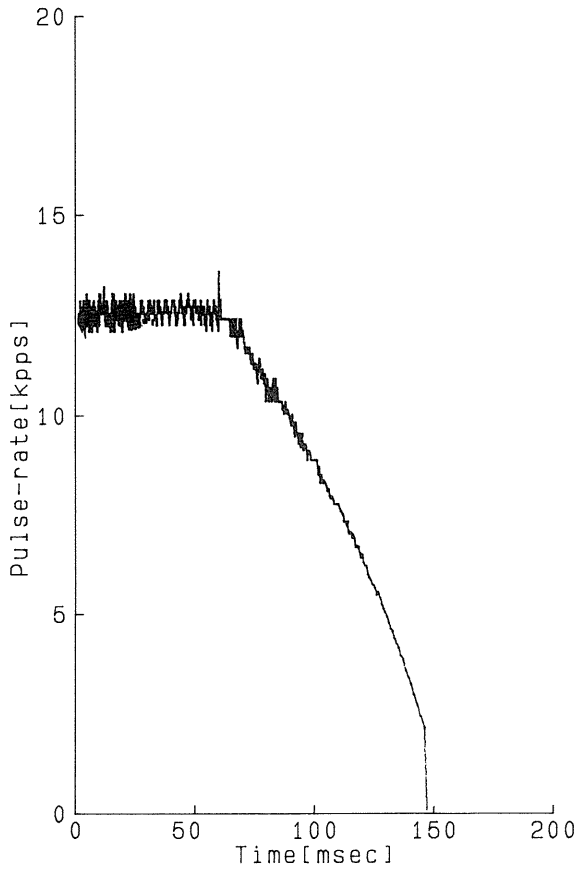


Fig. 10 Deceleration characteristic of PM type stepping motor by 3rd method

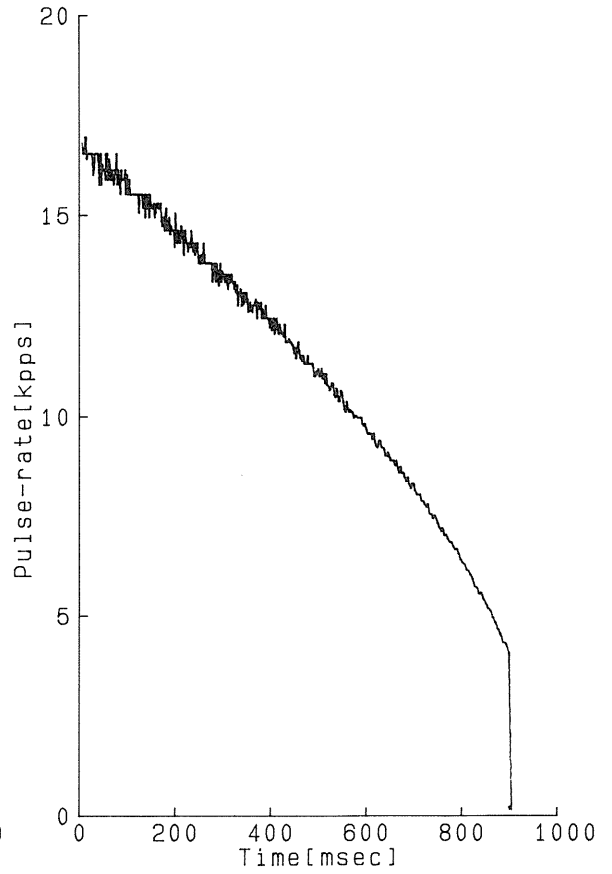


Fig. 11 Deceleration characteristic of VR type stepping motor by 3rd method

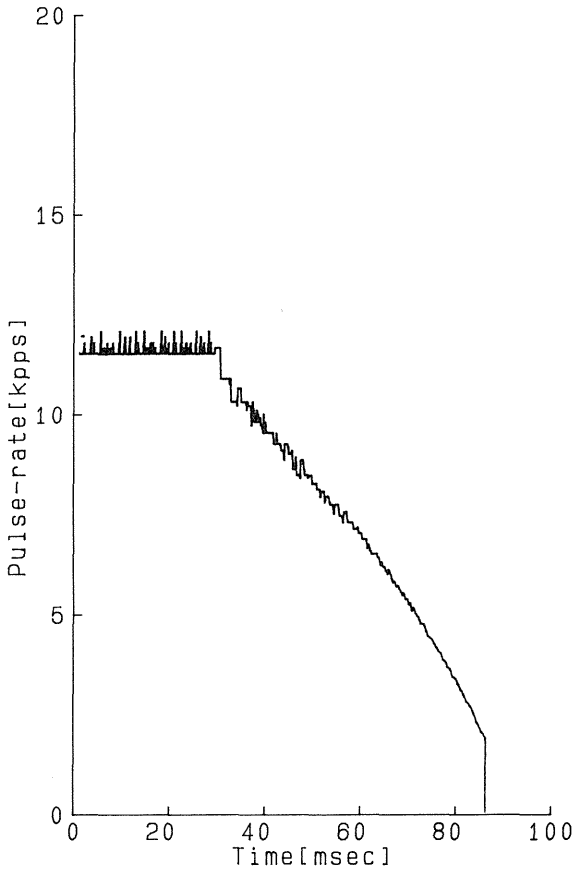


Fig. 12 Deceleration characteristic of PM type stepping motor by 4th method

Table 2 Minimum time of deceleration from 12kpps to Opps

exciting sequence	motor type	min. time of decele.	lead angle
I STOP	PM	225msec	
	VR	303msec	
II CW	PM	148msec	0.5step
	VR	246msec	3.5step
III CCW	PM	92msec	0.5step
	VR	900msec	0.5step
IV CCW	PM	55msec	

謝 辞

最後に本研究に多大の御援助, 御協力を戴いた山洋電気(株)の飯島専務, 山田常務の両氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) T.R.Fredriksen: "Application of the closed-loop stepping motor", IEEE Tran. on Automatic Control, Vol. AC-13 (1968), No.5. p464
- 2) M.M.Radelescu, D.Stoia: "Microprocessor closed-loop stepping motor control", Proceedings of the international conference on stepping motors and systems, University of leeds (1976)
- 3) P.H.chappell, W.F.Ray, R.J.Blake: "Microprocessor control of a variable reluctance motor", IEE Proc., Vol 131B (1984), No.2, p51
- 4) 片岡・下谷: 閉ループステップモータのマイコン制御, 昭和58年電気学会全国大会. No. 726
- 5) 関根・須藤・他: 16bit Microcomputerによる Stepping Motorの閉ループ制御, 昭和62年電気学会全国大会, No. 760
- 6) P.P.Acarney, P.Gibbons: "Closed-loop control of stepping motors: prediction and realisation of optimum switching angle", IEE Proc., Vol. 129B (1982), No.4, p211
- 7) Kenjo, T., and Takahashi, H.: "Microprocessor controlled self-optimization drive of a step motor", Proceedings of 9th annual symposium on incremental motion control systems and deices, University of Illinois (1980), pp115-124