

# ステップモータの開発と利用技術の動向

Recent Applications and Developments of Step Motors

樋口 俊郎\*

Toshiro HIGUCHI

ステップモータは数値制御に適したサーボモータであり、近年のマイクロコンピュータの急速な発展に伴い、主としてコンピュータの周辺機器や事務機械に大量に使用されてきている。ここでは、ステップモータの開発と利用技術の動向をいくつかの例を示して解説する。

## 1. はじめに

ステップモータ(step motor)はステッピングモータ(stepping motor)あるいはパルスモータ(pulse motor)とも呼ばれ、アクチュエータとしての働きに加え、パルス列で与えられるデジタル量を機械的位置に変換する機能を有しており、数値制御に最も適したサーボモータである。ステップモータの特徴と利点を列挙すると、

- i) オープンループ制御が可能であり、エンコーダやポテンシオメータ等のフィードバック要素を用いることなく、サーボ機構を簡単かつ高精度に構成することができる。
- ii) 入力パルス周波数に比例する回転角速度が得られ、広範囲の速度制御が可能である。
- iii) 複数個のモータの同期運転が容易である。
- iv) 位置決め誤差が累積されない。
- v) 整流子を必要とせず、保守が容易である。

等である。

ステップモータの開発と利用の歴史は、直流モータや交流モータに比べて浅く、本格的なサーボ機構用アクチュエータとして大量に利用されたのは、1960年代に富士通によってパルスモータという名称で主としてNC工作機械用に開発と実用が進められたことに始まる。このパルスモータおよび油圧によってその出力を増幅する形式の電気油圧パルスモータは、工作機械のNC化に大いに貢献したが、高性能の直流サーボモータが開発されたことによって、1970年代後半から工作機械用サーボモータとしては、その役割を直流サーボモータに譲った。

一方、これとは別に研究開発が進められてきた比較的小型のステップモータは、電子計算機の普及に伴って、その周辺機器用のサーボモータとして、1970年代に入り急速に利用され始めた。近年、フロッピーディスク、プリンター、プロッタ、電子タイプライタ等の電子計算機の入出力機器や事務機のサーボ機構のアクチュエータとしての需要が急増しており、大量に利用されてきている。

これは、ステップモータが数値制御に適したサーボモータであることと、マイクロコンピュータの急速な発展によるものである。つまり、ステップモータをマイクロコンピュータと組み合わせて使用することによって、最も容易にかつ安価に小型機械の運動の制御ができることが評価されているわけである。

これに伴い、近年、ステップモータに関して、制御目的に適したモータの開発、駆動回路と制御方法の研究が積極的に行われている。ここでは、最近のステップモータの開発と、その利用技術の動向を、いくつかの例を挙げることによって解説する。

## 2. ステップモータの開発の動向

ステップモータを利用する各種機器の性能の向上および低価格化の要求に対して、種々のステップモータが開発されてきている。この動向を示す例を以下に述べる。

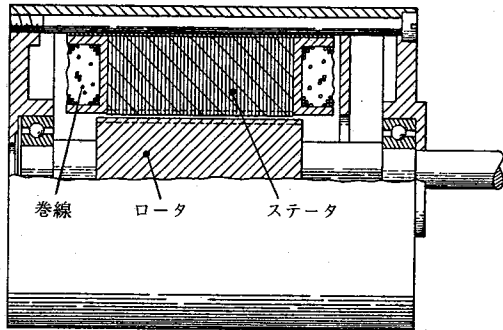
### 2.1 高トルク慣性化, 高トルク重量比化

位置決めを短時間でを行うことを目的として、モータの慣性モーメントに対して出力トルクが大きいモータが開発されている。1例として、図1に示すVR(variable reluctance, 可変リラクタンス)形ステップモータを紹介する。これはプリンタの活字選択用にIBMで開発されたものであり、活字選択用のモータがキャリッジ送り用のリニアステップモータの慣性負荷となるために、モータの重量をできるだけ小さくすること、選字時間を短縮するために、トルク慣性比を大きくすることを目的として設計されたものである<sup>1)</sup>。同一寸法のモータでは4相よりも大きなトルクが得られることを導き、ステータ巻線の相数を3としている。また、3相モータで問題となる2相励磁状態間の出力トルクの変動を、ステータの各極にそれぞれ1対の巻線を重ね巻き(パイファイラ巻き)することによって解決している。モータの出力を大きくするために、ステータおよびロータの材料として飽和磁束密度の高い、vanadium permendurの積層板を用いるとともに、ロータとステータの間隙を43 $\mu\text{m}$ という小さな値にしている。表1に従来の4相モータとの特性の比較を示す。このモータを二電源励磁方式で駆動し、

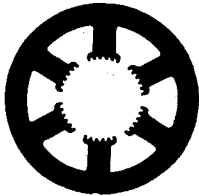
\* 東京大学生産技術研究所 第2部

表 1 モータの特性比較

		A	B	C	試 作 品	実 装 品
	形 式	4 相 PM	4 相 PM	4 相 VR	3 相 VR	3 相 VR
①	ステップ角 (度)	1.8	1.8	3.75	2.73	3.75
②	静大静止トルク (kgfcm)	7.2	10.8	7.92	6.84	6.48
③	ロータ慣性モーメント (gcm <sup>2</sup> )	235	641	114	30	19
④	②/③ (krad/s <sup>2</sup> )	30	16.5	68	221	333
⑤	重 量 (kg)	0.91	1.47	0.60	0.37	0.48



(a)



(b)



積層板断面  
(a) ステータ  
(b) ロータ

図 1 選字用 3 相 VR 形ステップモータの概要図<sup>1)</sup>

選字の最大移動量 (48 ステップ, 180° に相当) の位置決めを 23 msec の短時間で行っている。

2.2 ステップ角の微小化, 高精度化

フロッピーディスクのヘッド位置決めサーボ系やプリンタのキャリッジ送りに代表されるように, 減速機構や伝達機構をできるだけ省き, 負荷を直接的にステップモータで駆動しようとする利用形態が多くなってきている。こうした場合のサーボ系の位置決め分解能および位置決め精度は, ステップモータ自身の位置決め分解能と精度に直接的に支配される。したがって, ステップモータの位置決め分解能であるステップ角 (1 入力パルス当たりの移動量) の微小化および静止位置精度の向上が求められている。例えば, フロッピーディスクの磁気ヘッド位置決め用ステップモータに対し, フロッピーディスクの記録密度の高密度化に伴い, 静止位置精度として, ステップ角の ±3% 以内が要求されている。

ステップ角を微小化する方法としては, (a) ロータおよびステータの歯を微小化する方法, (b) モータの構造の変革, (c) 励磁電流を制御する方法等がある。このう

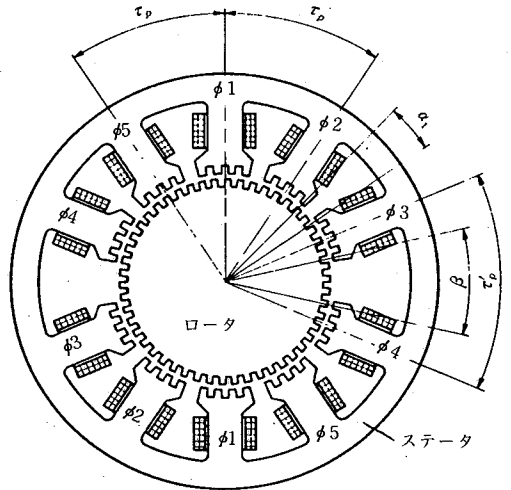


図 2 5 相 PM 形ステップモータの構造<sup>2)</sup>

ちの (a) および, 静止位置精度の向上には, 加工技術等の生産技術の開発が重要である。ここでは, (b) の一例として 5 相 PM 形ステップモータを紹介する。また, (c) については後に記す。

5 相 PM 形ステップモータは西独の Berger 社の開発によるものであり, 通常は 4 相であるハイブリッド形ステップモータ (PM 形ステップモータの一種である) の相数を 5 にすることによって, ステップ角を小さくするとともに動特性の向上を得ている<sup>2)</sup>。4 相モータのステータの極数が 8 で, その小歯が 1/4 ピッチずつずれているのに対し, 5 相モータは図 2 に断面形状を示すように, 極数が 10 で小歯は 1/5 ピッチずつずれている。ハイブリッド形ステップモータでは, 各相を励磁したときの静止トルクとロータ回転角との関係を表わす静止トルク曲線は図 3 に示すように正弦波形で近似できる。これら各相の静止トルク曲線の位相と振幅の関係はロータの歯の 1 ピッチ角  $\theta_0$  を電気角の 360° に対応させることによって, 図 4 に示すようにベクトル線図で表現できる。複数相を同時に励磁した場合は, 各相のベクトルの和で, また, 励磁電流の方向を逆にした場合は, ベクトルの向きを逆にすることによって表わせる。

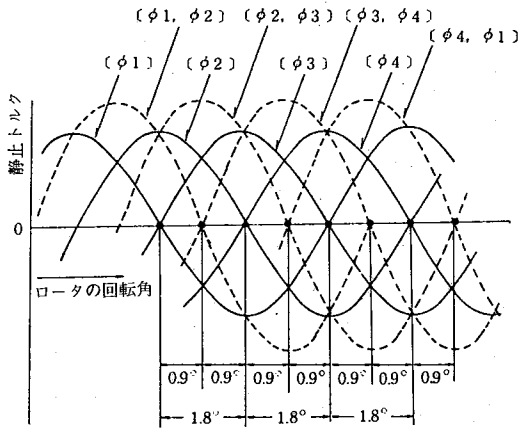


図3 4相PM形(ハイブリッド形)ステップモータの静止トルク曲線(ロータ歯数50の場合)

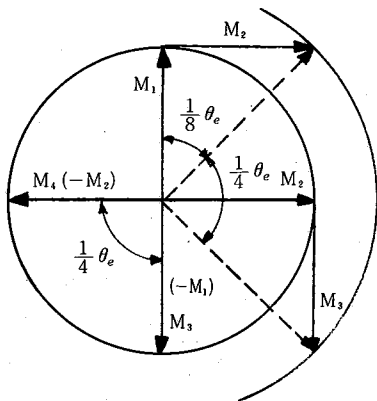


図4 4相PM形ステップモータの静止トルクを表わすベクトル線図

4相モータにおいては、図4から分かるように、1相励磁方式あるいは2相励磁方式で、ステップ角が $1/4\theta_e$ になり、1-2相励磁方式(半ステップ励磁方式)では $1/8\theta_e$ となる。これに対して、5相モータにおいては、4相励磁方式あるいは5相励磁方式で、ステップ角が $1/10\theta_e$ に、また4-5相励磁方式では $1/20\theta_e$ になることが図5に示した5相PM形ステップモータの静止トルクを表わすベクトル線図から分かる。つまり、ロータの歯数が等しいとき、例えば50としたとき、4相モータのステップ角は $1.8^\circ$ となるのに対して、5相モータでは、 $0.72^\circ$ というように $2/5$ となる。VR(variable reluctance)形ステップモータでは、4相モータと5相モータとを比較すると5相モータのステップ角は4相モータの $4/5$ となるのに対して、PM形ステップモータでは相数を1相増すだけで、ステップ角を $1/2$ 以下に小さくできる。この理由は、4相モータでは、例えば第1相を励磁した状態と第3相を逆方向に励磁した状態が一致していることによる。つまり、4相PM形ステップモータでは、図4

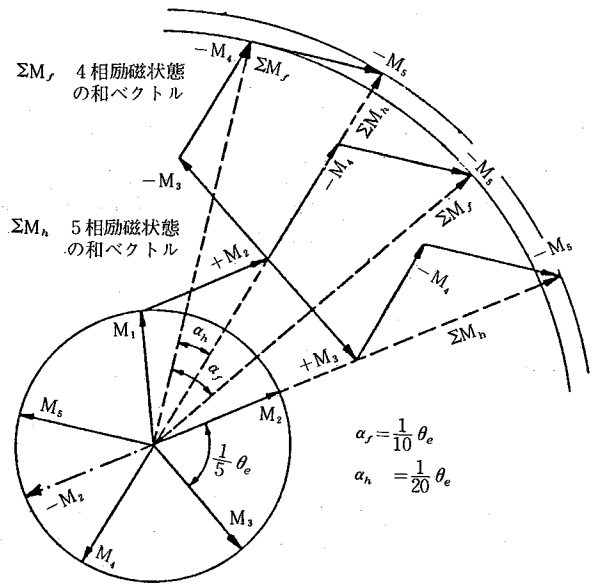


図5 5相PM形ステップモータの静止トルクを表わすベクトル線図

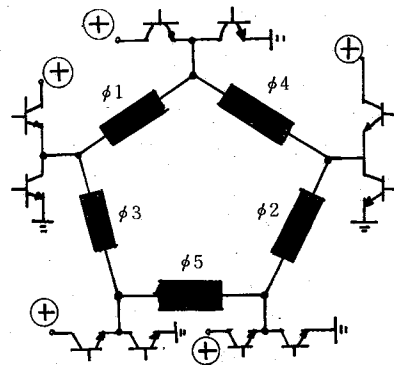
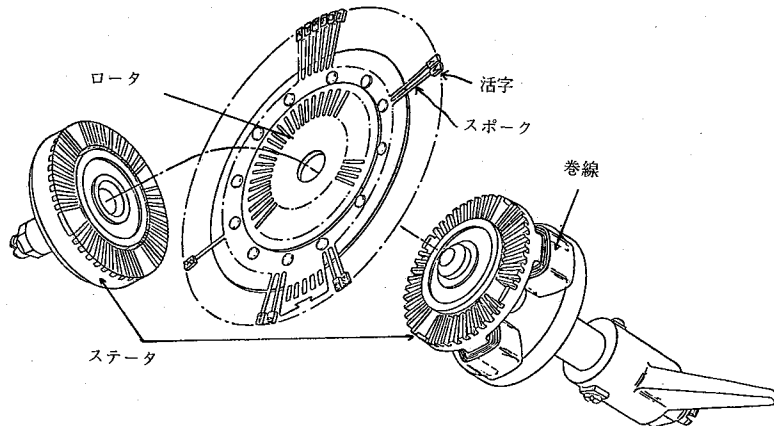


図6 5相PM形ステップモータの励磁回路例

に示すように、 $-M_1$ と $M_3$ 、 $-M_2$ と $M_4$ の励磁状態を示すベクトルが重なり、2個のベクトル $M_1$ 、 $M_2$ で全励磁状態が表現できることから分かるように、4相PM形ステップモータは基本的には2相モータであることによる。

この5相PM形ステップモータは、相数が多くしかも電流の方向を反転させる必要があることから励磁回路が複雑になる欠点があるが、例えば図6に示す励磁回路を用いることによって、駆動用のトランジスタの数を減らすことができる。この回路では、5相のうち1相の巻線が短絡されることになり、ダンピング特性が良くなるという利点が得られる。このことと、ステップ角が小さいことによって、4相モータに比べて共振現象等の不安定現象を起こしにくいとの報告がなされている。

図7 選字用4相VRステップモータの分解図<sup>3)</sup>

### 2.3 機器要素との一体化

伝達機構を省略することを進めていくと、機器要素にステップモータが組み込まれ、モータと機構とが一体化された形となる。ステップモータは、整流子を必要としない点や、開ループ制御による位置決めが可能である点などから、このように機器要素に直接組み入れることが容易に行える利点を有する。この例として、Exxon社によるインテリジェントタイプライタを紹介する<sup>3)</sup>。このタイプライタには、(a)キャリッジ送り用の4相VR形リニアステップモータ、(b)印字部の選字用の円板形をした4相VR形ステップモータ、(c)紙送り用の回転形ステップモータの3種のステップモータが用いられており、各部の運動の制御を行っている。(a)と(b)のモータが、機器要素と一体化したものであり、(b)の選字用のステップモータを図7に示す。図に示すように、デージーウィール(daisy wheel)形の活字板の根元に、ステップモータのロータの役割をする放射状に細穴をあけた円板が組み込まれている。このように、機器要素にステップモータを一体化した形で組み込むことによって、回転部のイナーシャの軽減と機構の小型簡素化が得られている。

ロータの円板の細穴の数は49であり、1回転当たりのステップ数は196であり、2ステップを1選字単位としている。さらに、活字のスポークを利用して、これと光電素子等からエンコーダを構成している。このエンコーダからの位置信号を用いて、開ループ制御による活字円板の位置決めを行っている。

このタイプライタのキャリッジ送りに使用されているように、減速機構や伝達機構を用いずに直線運動が得られるステップモータであるリニアステップモータは、近年、プロッタやタイプライタ等に数多く利用されてきている。

### 3. 制御方法の動向

近年の半導体素子の高性能化と低価格化に伴い、パルス入力に応じて順次励磁相を切り換えてステップモータを駆動するという通常の方法では得ることのできない性能を、ステップモータの運動をデジタル技術を用いてより精密に制御することによって得ようとする試みがなされている。

#### 3.1 ミニステップ駆動

複数の励磁相の各相電流の大きさを、1入力パルスごとに段階的に変化させることによって、静止トルク曲線の安定点の位置を微小角ずつ段階的に移動させることができる。この性質を利用して、ステップ角を細分化する方法がミニステップ(mini step)駆動である。

このミニステップ駆動を利用した例としてHP社のXYプロッタ9812Aを紹介する<sup>4)</sup>。このプロッタでは、ペンの位置決め分解能を高めるために、ミニステップ駆動を用い、さらに励磁電流波形を補正することによってトルクの変動を小さくする制御を行い、滑らかな運動を得て、描線の質の向上を図っている。この手法の概要を以下に述べる。

2相ハイブリッド形ステップモータに生ずるトルク $T$ は、ロータを外力によって角速度 $\dot{\theta}$ で回転させたときに巻線に生ずる逆起電力を $E_A$ 、 $E_B$ とすると、

$$\begin{aligned} T &= T_A + T_B \\ &= (E_A/\dot{\theta}) \cdot I_A + (E_B/\dot{\theta}) \cdot I_B \end{aligned}$$

で表わせる(ただし、 $I_A$ 、 $I_B$ はA相、B相の電流である)。

角速度 $\omega_0/N$  rad/sec ( $N$ はロータの歯数)の一定速度でロータを回転させたときに巻線に生ずる逆起電力 $E_A$ 、 $E_B$ の振幅スペクトルは図8のようであり、 $\omega_0$ の他に、奇数次の高調波成分を含んでいる。今、 $I_A = I \cos \omega_0 t$ とすると、 $T_A$ は0次成分の他に、偶数次の高調波成分が含ま

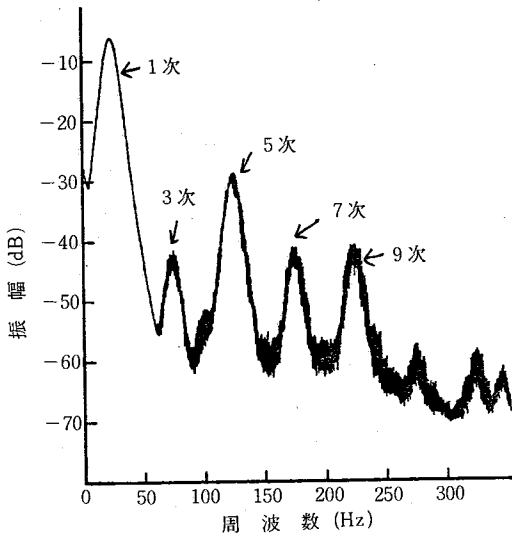


図8 逆起電力の振幅スペクトル<sup>4)</sup>

れることになる。さらに、 $I_B = I \sin \omega t$  として、 $T_A + T_B$  を求めると、2次と6次の成分は  $T_A$  と  $T_B$  で相殺され、0次と4次と8次の成分は残る。滑らかな回転を得るためには、トルク変動の主成分となる4次成分を減少させる必要があり、これには、励磁電流に適度の3次成分を持たせれば良いことが分かる。

こうした考えに基づくモータの制御回路の波形形成形の概要を図9に示す。ROMには  $-\cos 3\theta$ ,  $\sin 3\theta$ ,  $\cos \theta - (\cos 3\theta)/4$ ,  $\sin \theta - (\sin 3\theta)/4$  の4個の関数が  $2^7$  個の  $\theta$  の値に対して、おのおの8 bit で書き込まれている。プロッタのX軸用のモータについての位相角  $\theta$  を指令を  $125 \mu\text{sec}$  ごとに受け、ROMを順次読み出し、DA変換し、サンプルホールド回路とオペアンプによって加算することによって、3次成分を適当に含んだA相とB相の電流指令波形が得られる。次いで同様の処理がY軸のモータについてもなされる。3次成分の大きさは、可変抵抗  $R_1$  と  $R_2$  によって調整できる。アナログスイッチの切り換えとROMの読み出しの制御はマイクロプロセッサによって行われる。

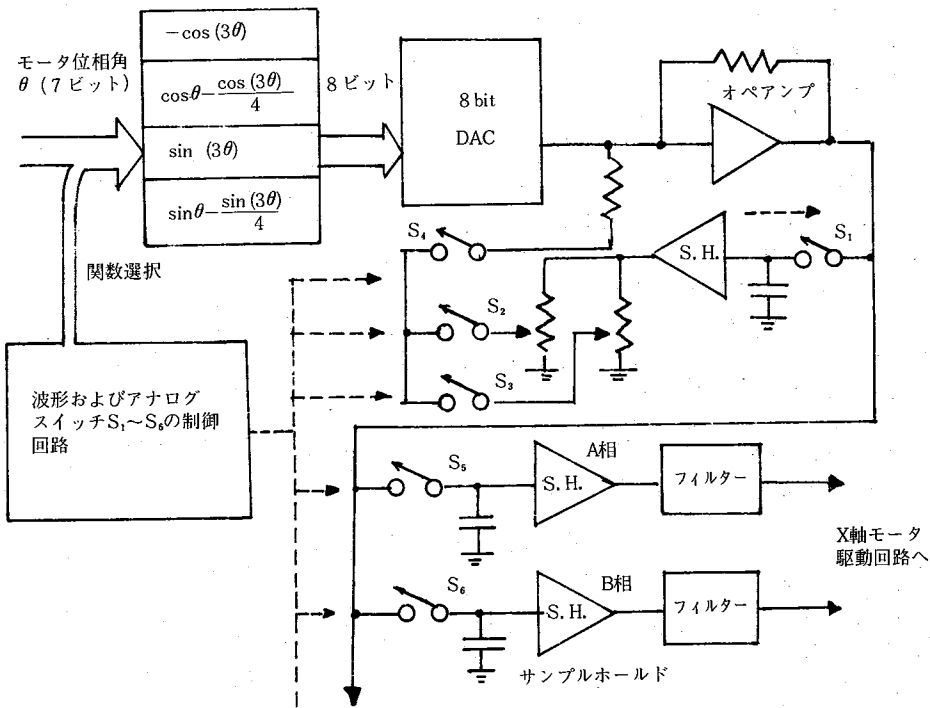


図9 駆動電流波形形成回路

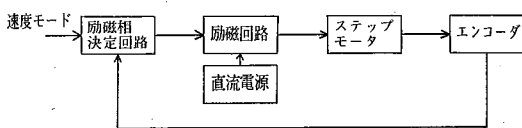


図10 閉ループ制御駆動の基本構成

### 3.2 ステップモータの閉ループ制御駆動

閉ループ制御を行える点が他のサーボモータにはないステップモータの特徴であり、本来その駆動には閉ループ制御は不用であるが、閉ループ制御を行うことによってサーボ系の性能を高めることができる。閉ループ制御駆動の一般的な構成を図10に示す。

閉ループ制御駆動は、ステップモータのロータ軸の位置を検出して、この位置信号あるいは位置と速度の情報に基づいて励磁相の切り換えを行う駆動方法である。通常の開ループ制御駆動に比べて制御回路が複雑になる欠点があるが、

- (a) モータの出力トルクを有効に利用することができる。
- (b) 加減速を自律的に短時間に、かつ円滑に行うことができる。
- (c) 一時的な過負荷による脱調を防止でき、また、振動現象や不安定現象を生じないように制御することができる。

等の利点がある。

ここでは、最近の閉ループ制御駆動法の考え方の基礎となっている Fredriksen の方法の概要を述べる。<sup>5)</sup>

対象としたモータはステップ角が1.8°のハイブリッド形ステップモータである。図11に示すようにロータ軸にエンコーダを取り付ける。このエンコーダは7.2°間隔に50個の小穴があけられた円板と位相を1.8°ずつずらした4個の光源と光電素子とからなっている。各光電素子がパルスを発生する位置とステップモータの1相励磁における各安定点の位置とを図12(a)に示すように一致させておく。そして、例えば信号Iに対して、第2相というように安定点が1ステップ角だけ先にある相を位置信号に対して順次励磁していくようにすると(この運転状態を進み角, lead angle が1ステップ角であると言う)、モータにはCW方向に回転するようにトルクが生じ、逆に1ステップ角だけ後にある相を励磁すると、CCW方向にトルクが生じる。また、位置信号と一致した相を励磁すると、安定点に停止させようとするトルクが得られる。高速回転を得るためには進み角を大きくすればよい。2相励磁状態をも利用すると、進み角の選択の数が増し、運動の制御をさらに細かく行うことができる。表2に、運動モードの指令に対する位置信号と励磁

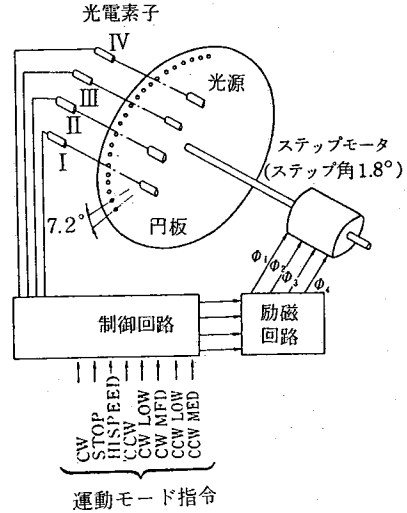


図11 Fredriksen の閉ループ制御駆動の説明図

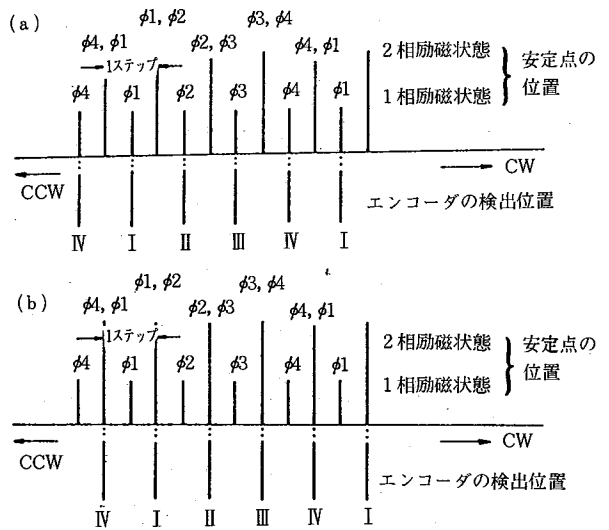


図12 エンコーダの検出位置と安定点の関係

表2 運動制御モードと励磁相の関係

(a) 1相励磁位置検出		エンコーダからの位置信号				(b) 2相励磁位置検出	
進み角*	運動モード指令	I	II	III	IV	運動モード指令	進み角*
1ステップ角	CW	$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 1$	CW LOW	1/2ステップ角
0	STOP	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$	CCW LOW	-1/2
±2	HISPEED	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 1$	$\phi 2$	CW MED	1 1/2
-1	CCW	$\phi 4$	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$	CCW MED	-1 1/2
1/2	CW LOW	$\phi 1 \phi 2$	$\phi 2 \phi 3$	$\phi 3 \phi 4$	$\phi 4 \phi 1$	STOP	0
1 1/2	CW MED	$\phi 2 \phi 3$	$\phi 3 \phi 4$	$\phi 4 \phi 1$	$\phi 1 \phi 2$	CW	1
-1/2	CCW LOW	$\phi 4 \phi 1$	$\phi 1 \phi 2$	$\phi 2 \phi 3$	$\phi 3 \phi 4$	CCW	-1
-1 1/2	CCW MED	$\phi 3 \phi 4$	$\phi 4 \phi 1$	$\phi 1 \phi 2$	$\phi 2 \phi 3$	HISPEED	±2

\*CW方向を正で、CCW方向を負で表わす。

信号との関係を示す。2相励磁における安定点を基準として位置信号を図12(b)のように一致させる場合にも同様の制御が可能であり、この場合の運動モード指令と励磁信号との関係についても表2に示している。

この運動モードを適宜選択して指令することによって進み角を段階的に変化させ、ステップモータの運動の制御を行ない、最短時間位置決め制御に利用する試みを行っている

閉ループ制御駆動の方法としては、この他に、ステップ角ごとにパルスが発生するエンコーダを用い、図13に示すように遅れ時間回路を介して励磁相切換え指令パルスを得る方法がある<sup>9)</sup>。この場合、進み角の制御は遅れ時間を調整することによって行える。

### 3.3 エンコーダを用いない閉ループ制御法

前項で述べた閉ループ制御駆動に関しては、多くの研究がなされ、優れた特性が得られることが報告されているが、これらの成果が実用化された例はほとんどないのが現状である。この原因として最も大きなものは、閉ループ制御駆動を行うためにエンコーダを用いなければならないことであり、これが実用上の障害となっていると考えられる。そこで、著者の研究室では、エンコーダを用いずに、回転に伴ってステップモータに生ずる逆起電力を検出することによって位置信号を得て閉ループ制御駆動を行う方法を開発している<sup>7)</sup>。以下にその概要を紹介する。この方法はハイブリッド形を含むすべてのPM形ステップモータに適用することができる。PM形ステップモータは基本的には2相交流同期モータとして取り扱うことができる。モータに発生するトルク $T$ は

$$T = -K \sin N\theta \cdot I_1 + K \cos N\theta \cdot I_2 \dots\dots\dots (1)$$

で表わせ、各相について

$$L\dot{I}_1 + RI_1 - K \sin N\theta \cdot \dot{\theta} = E_1(t) \dots\dots\dots (2)$$

$$L\dot{I}_2 + RI_2 + K \cos N\theta \cdot \dot{\theta} = E_2(t) \dots\dots\dots (3)$$

が成立する。ただし、 $K$ …トルク定数、 $N$ …ロータ歯数、 $\theta$ …ロータ位置、 $L$ …巻線のインダクタンス、 $R$ …巻線の抵抗、 $I_i$ … $i$ 相の電流、 $E_i$ … $i$ 相電圧

ここで、(2)、(3)式の $-K \sin N\theta \cdot \dot{\theta}$ および $K \cos N\theta \cdot \dot{\theta}$ はロータの回転に伴って発生する逆起電力であり、ロータの位置情報が含まれていることが分かる。したがって、この逆起電力を検出することによってエンコーダと同様の位置検出信号が得られることが考えられる。

逆起電力は図14に示すような回路によって検出できることを見出した。ステップモータの励磁巻線に重ね巻きた検出用補助巻線とトランスによって検出回路を構成できる。図15に、この回路で検出した逆起電力の波形の例を示す。これら1対の逆起電力が零となるときロータの位置は各相巻線を励磁した場合の安定点の各位置に対応することを利用して、図11に示した

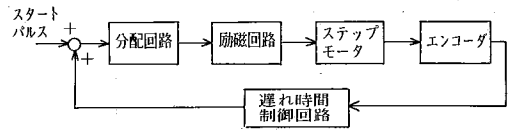


図13 遅れ時間を用いた閉ループ制御駆動法

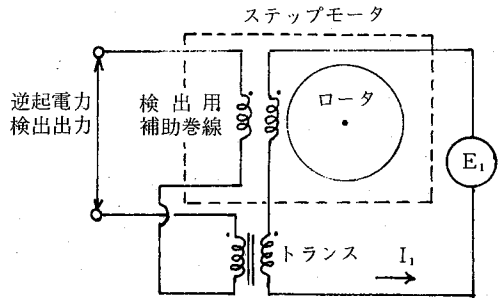
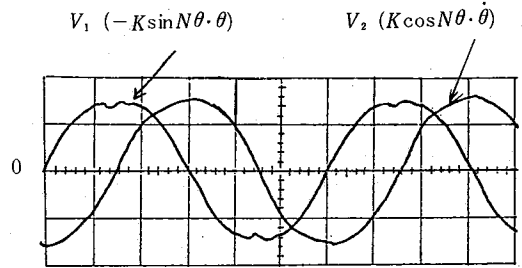


図14 逆起電力検出方法 (1相分を示す)



縦軸 10V/div, 横軸 1msec/div

図15 逆起電力検出波形例

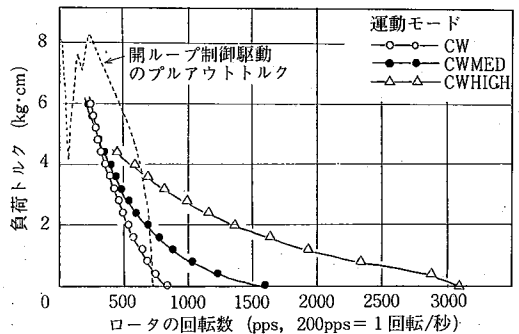


図16 負荷トルクと回転数の関係

エンコーダで得られる信号と同様の位置信号を得ることができる。前項で紹介した Fredriksen の方法に基づき、エンコーダを用いずに逆起電力を検出することによって閉ループ制御駆動を行った実験結果の1例を図16に示す。これは、各運動モードについて、負荷トルクとステップモータの回転数を示しており、閉ループ制御で駆動されるステップモータは、おのおのの運動モードについて、直流サーボモータに近い特性を示すことが分かる。

図 16 に破線で示した曲線は、同じステップモータを開ループ制御によって駆動した場合のプルアウトトルク（脱出トルク）特性を示している。これからも分かるように、閉ループ制御駆動によって、開ループ制御駆動では得られない高速領域での利用が可能となる。閉ループ制御駆動と開ループ制御駆動の切換はモータの運動を乱すことなく容易に行うことができるので、両者を併用し、おのおのの利点を生かすことによって、高性能のサーボ系をステップモータによって構成することが可能になると言える。

#### 4. お わ り に

最近のステップモータに関する研究開発の一端を紹介し、その動向について述べた。最近の直流サーボモータとその制御技術の発達から、ステップモータの将来を危惧する考えが一部に存在しているようであるが、ステップモータには他のサーボモータにない優れた特徴があることと、ステップモータの性能向上のための研究ならびに制御技術の開発を積極的に進めることにより、直流サーボモータとステップモータは競争しつつ共存するものとする。本稿がステップモータに関する理解を深めていただけるのに役立てば幸いである。

(1982年3月29日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) J. P. Pawletko and H. D. Chai: Three-Phase Variable-Reluctance Step Motor with Bifilar Winding, 5th Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices (1976) F1~F8
- 2) G. Heine: A Five-Phase PM Stepping Motor for Maximum Range in Resolution and Response, *ibid.* K1~K18
- 3) G. Singh 他: Motion Control Aspects in the  $Q_{ux}$  Intelligent Typewriter, Proceedings of the International Conference on Stepping Motors and Systems (1979) pp. 6~12
- 4) M. L. Pattarson: Analysis and Correction of Torque Harmonics in Permanent-Magnet Step Motors, 6th Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices (1977) pp. 25~37
- 5) T. R. Fredriksen: Application of the Closed-Loop Stepping Motor IEEE Trans. on Automatic Control, vol. AC-13 (1968) pp. 464~474
- 6) B. C. Kuo: Closed-loop Control of Step Motors, Incremental Motion Control, vol. II, pp. 234~255 SRL Publishing Co. (1979)
- 7) 樋口, 池田: 逆起電力検出による PM 形ステップモータの開ループ制御駆動, 第 20 回 SICE 学術講演会予稿集 pp. 155~156 (1981)

