

# ステッピングモータのステップ角制御駆動

職業能力開発総合大学校 東京校 本 多 浩

Variable Controls of Step Angle on Driving Step Motor

Hiroshi HONDA

**要約** ステッピングモータのステップ角は構造上固定的なものとされているため、これを変えるには別のステップ角のモータに取り替えるか、減速機を介して最終段の送りを変える方法がとられている。またマイクロステップ駆動あるいはパーニア駆動と称して従来のステップ角を細分割（ $n$ 分割）して駆動する方法が開発されている。しかし1指令パルスあたりのステップ角が $1/n$ と小さくなるものの変可ではないこと、指令パルス幅の限界からむしろ高速性が犠牲になることである。本報告では新たに高速 $n$ 進加減算素子を開発し、ドライバに組み込むことによりソフト的にステップ角を自由に変更可能とした制御方法について述べる。

## I 諸 言

ステッピングモータは自動組立機、検査器等のアクチュエータとして多用され、近年はOA化の波に乗りプリンタ、X-Yプロッタにも組み込まれるようになった。この理由としてデジタル入力指令に同期した回転位置、速度が得られ、コンピュータ制御がしやすいこと、直流モータに比べてブラシがないため磨耗部分

が少なく保守が容易なことがあげられる。しかしながら各種機器の複雑化、高機能化が進むことにより、従来の構造や制御方法では対応しきれない部分が出てきた。ステッピングモータは構造上ステップ角が固定であり、組み込まれるシステムにより、1指令パルスあたりの送り量を変更するには伝動系の減速比を変えるか、別の分割数・ステップ角のモータに交換する必要がある。たとえば直動送りにおいてmm送りからinch単位送りに変えるときなどである。この1指令パルスあたりの送り量を自由に選択できるようになればモータの応用範囲が拡大され、新しい分野への活用が期待できる。本研究ではモータの各励磁コイルに流す電流値を操作することと、この電流比を自由に变化させるための高速演算器を開発することによりプログラマブルなステップ角制御を可能とした。

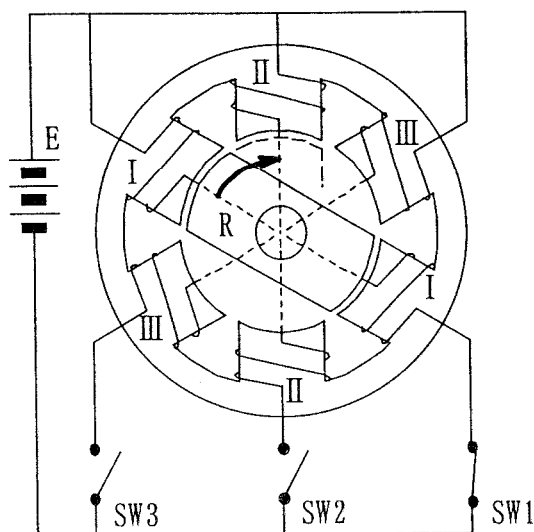


図1 構造及び動作原理

## II 構造および動作原理

### 1 従来構造

図1にステッピングモータの基本構造および動作原理を示す。図は3相6極モータであり、ロータ(回転子)は磁性鉄心、ステータ(固定子)は対応する極に

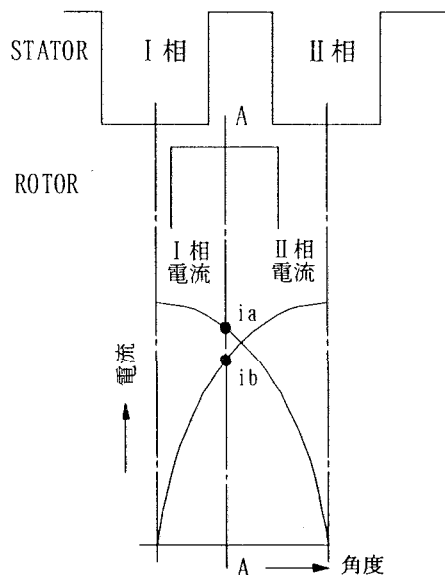


図2 相励磁電流と中間停止角の関係

角というが、システムに組み込んで細かな位置決めを行わせるときは減速ギヤと組み合わせるか、ステップ角の小さい構造すなわち極数の多いモータを使用することになる。しかしながら加工上(歯きり)の問題で極数には限界があり、また減速比についても同様である。もう一つの問題は機械的構造上、ステップ角は極数と綿密な関係があり、極間がステップ角となるので

$$\text{ステップ角} = 360^\circ / \text{極数}$$

である。また極数は整分割条件を満たさなければならないこと。さらに極数は相の整数倍でなければならないことから、ステップ角が制限されることである。

### 3 電流制御についての考察

#### 3.1 マイクロステップ駆動

上記の問題を解決するための電流制御の考えを説明する。相の切り換え、すなわち隣り合った極の励磁電

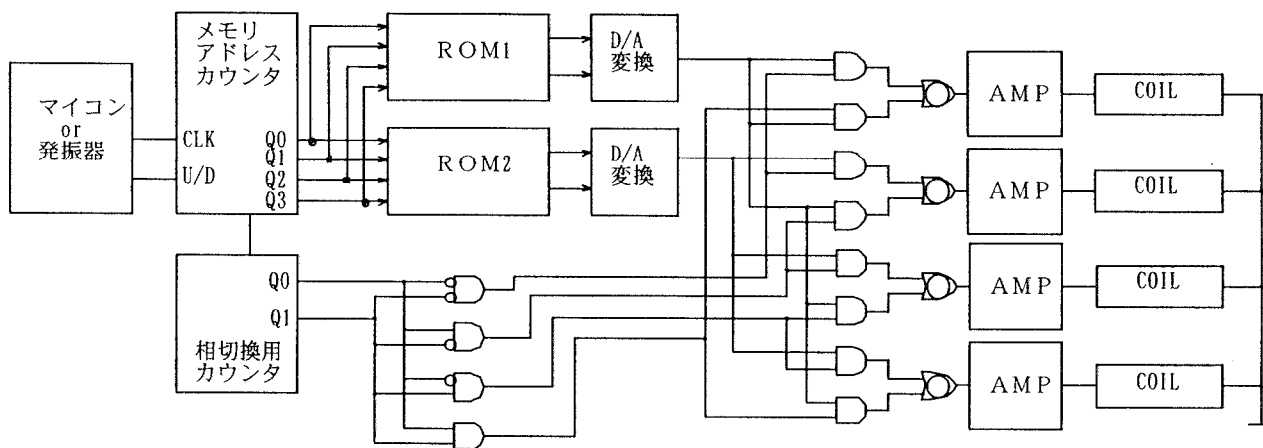


図3 マイクロステップ駆動回路

巻線方向を同一にした相を形成することにより、単一方向の磁場が形成されることになる。したがって図のようにSW1がONの場合はI相に励磁電流が流れることにより、ロータは図の位置に停止・固定されているが、SW1がOFFになり、SW2がONに切り変わった場合は磁力により隣の極へ移動、さらにSW2をOFF、SW3をONというように、相を連続的に切り換えることにより回転力を得る。ロータが追従する切り換え速度の範囲内(限界周波数内)であれば、切り換えを終えた時点での当該極において停止固定される。実用上この相切り換えは電子回路(ディストリビュータ)にて処理をしている。

## 2 問題点

この1回の切り換え時に得られる回転角をステップ

流を単純に切り換えるのではなく徐々に切り換えることにより、極間の停止点を何段階も作るということである。たとえばI相とII相の電流比を同じにすればちょうど隣り合った極の中間が停止点となり、ステップ角は1/2となる。これを等差的に微小ステップ角を得ようとする、それぞれの電流値は図2のような正弦波形を得る。<sup>1)</sup> この図においてロータを隣り合った極間の任意点Aで停止させるためにはI相に電流値ia、II相にibの励磁電流を流してやればよいことになる。この考えを基に図3の回路の説明をする。まず正弦波形に沿った階段状のそれぞれの相電流値データを2個のROMに入れておく。次にメモリアドレスカウンタの出力部とROMのアドレス入力を接続する。するとマイコンからのパルスがアドレスカウンタが受けるとROMのアドレスが1つ増し、一定の角度

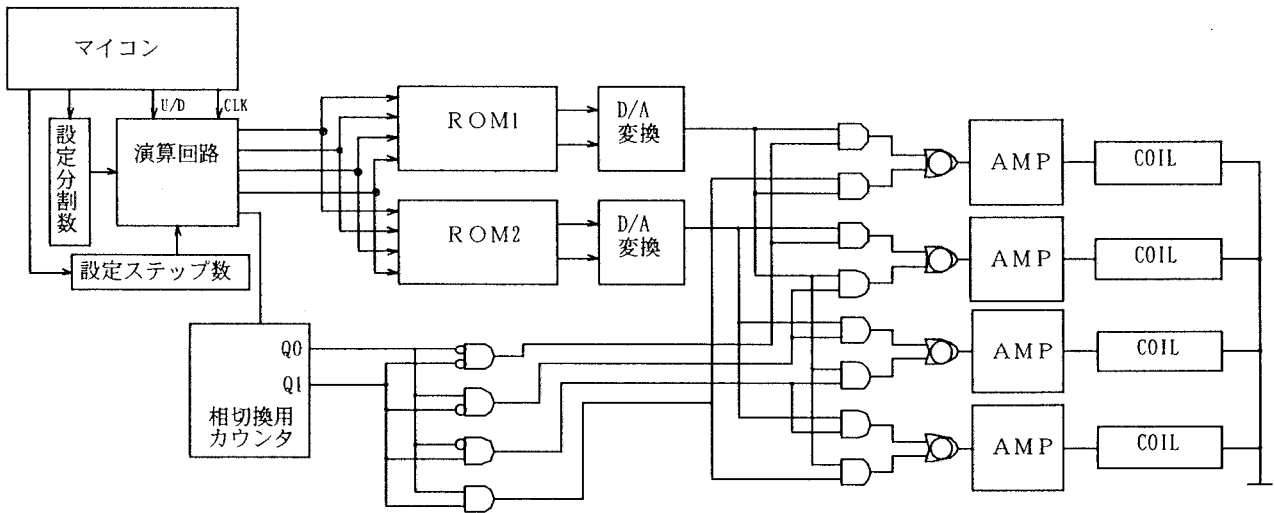


図4 本方式の駆動回路

をもってロータが歩進する。この1パルスあたりの回転角は、元のステップ角(ステータ間)より小さいので、微小ステップ角(micro step angle)と呼ばれる。微小ステップ角の大きさは階段の細かさ、すなわち元のステップ角を幾つに分割したかという分割数で決まる。このような方法をマイクロステップ駆動方式といい、図3は4相ユニポーラ駆動をマイクロステップ駆動としたものである。

### 3. 2 マイクロステップ駆動の問題点

基本ステップ角 $1.8^\circ$ のモータを使用した場合を考えてみる。微小ステップ角を $0.01^\circ$ とするためには分割数を180、すなわち180段階の電流値データを用意しなければならない。これを格納しておくためのROMと、カウント数180でカウントアップし、次のステータ間に移動するための相切り換え用信号を出す180進カウンタが必要となる。この信号を相切り換え用カウンタが受けて、4 to 2デコーダを通し、常に2つの相が励磁状態になるようにしている。ここで例えば $0.37^\circ$ のステップ角を得るためには、図3においてマイコンからメモリアドレスカウンタに37個の駆動指令パルス(この数のことを以後、ステップ数と称す)を送ってやればよいことになる。しかしマイクロコンピュータで37個のパルスを作ってカウンタに送るプログラムの演算時間などを考えると指令パルスの高速化には限界があり、回転速度を犠牲にすることになる。

## III n進加減算回路の開発

### 1 開発コンセプト

この問題を解決するために図3のカウンタに変わり、図4に示す演算回路を用いた。<sup>2)</sup>これはCLKに入ってくる1指令パルスを演算信号として、あらかじめ設定されたステップ数(この例では37)が演算回路内で加算、減算されるものである。そしてこの演算結果(出力)でROMアドレスを選択することにした。こうすることにより1回のパルスで、ロータは選択されたアドレス内に格納されたデータに対応する回転角( $0.37^\circ$ )を得ることになる。本研究はこの図4で示される演算回路を開発することとした。この理由は

- 1) コントローラやマイコンの負荷を軽くし、外部的には単純な指令パルスを送るだけの形にした。
- 2) 演算部をハード化することにより、信号遅れを最小限にする。
- 3) 市販のALUに適当なものがない。
- 4) n進数演算器(最大256進数)としたのはさまざまな分割数に対応可能としたものである。

### 2 演算部構成

図3、図4で示した相切り替えの説明のため、ステータ間におけるロータの動作と演算との関係を図5に示す。<sup>3)</sup>図において、ステータ間(通常のステップ角)を分割数nで細分割し、その分割に応じた電流値データをデジタル数値化し、ROMに入れて置く。1指令パルスがくるたびにあらかじめ設定されたステップ数mが演算回路により加算され、現在のROMアドレスを更新する方式とした。このようにすると、

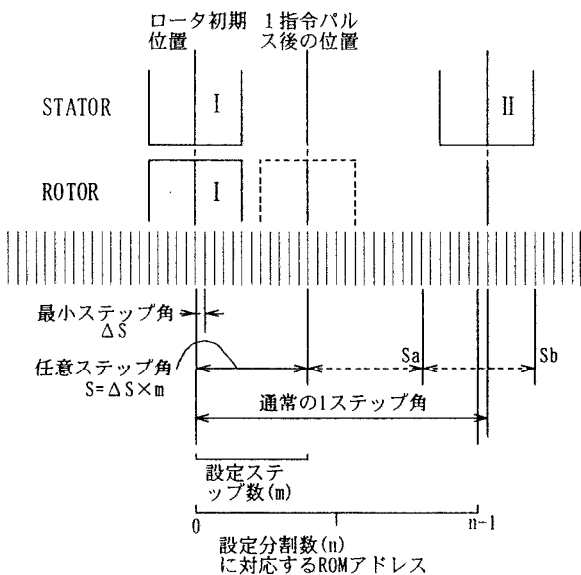


図5 ロータ進み角と演算との関係

任意ステップ角(S) = 微小ステップ角(ΔS)  
 × 設定ステップ数(m)

となり、設定分割数 n をできるだけ細かくとっておけば実用上ほとんどのステップ角を選択できることになる。したがって ROM アドレスは 0 から n-1 までの値を持つことになるが、図中 Sa 点より Sb 点へのステップ移動、すなわち極を通過する場合は、ROM アドレス変更とともに相切り換えを同時に行う必要がある。これは逆方向移動においても同じことである。このため演算回路は分割数 n に合わせた n 進加減算部構成とし、この演算における桁上がり、桁下がり信号を利用して相切り換えを行わせている。図6に演算部ブロック図、図7に演算部全回路図を示す。<sup>4) 5)</sup>

### 3 動作説明

図6におけるフルアダーは、駆動指令パルスが入力されるごとにあらかじめ設定されたステップ数 m の加算 (CW 方向) あるいは減算 (CCW 方向) を行う 8 bit 第1次演算部と、その結果を設定分割数 n に合わせた補正を行う 8 bit 第2次演算部をあらわしている。

#### 3.1 加算

第1次演算の結果 (加数+被加数:  $S=S+m$ ) が設定された分割数 n より大きいかどうかを比較器で判断させる。大きい場合には第2次演算において S から n を引かせる減算信号 D を出すとともに、2つの演算結果のうち、第2次演算の結果を選択出力させる信

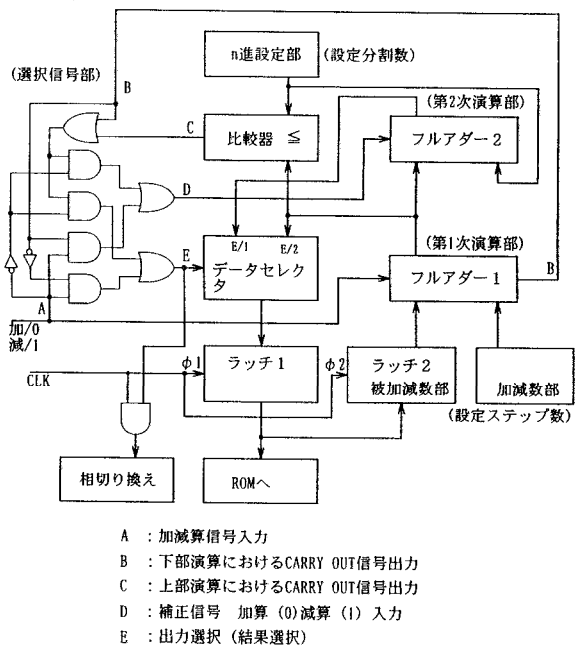


図6 演算部ブロック図

号を出す。もちろん桁上がりがないければ第1次演算の結果が出力される。大きいかどうかは第1次演算においてキャリアウトがあるかどうか (8 bit max = 256以上か)、つまり  $B=1$  となるか、または第1次演算の結果が設定値 n と比較して大きければ  $C=1$  となり、このいずれかが成り立てば大きいということになる。

#### 3.2 減算

減算の場合は第1次、第2次演算とも減算補正演算 (補数の加算) を行う。減算においては被減数よりも減数のほうが小さい場合は問題なく、第1次演算の結果を出力することになる。逆の場合は桁落ちを起こすので、このときは第2次演算で設定値 n を加える加算信号を出すとともに、第2次演算結果を選択出力させる信号を出す。減数のほうが小さいかどうかは減数補正演算 (補数の加算) となるので、第1次演算においてキャリアウトがあるかどうか、あれば  $B=1$  が成り立ち、小さいということになる。

#### 3.3 相切り替え

加算、減算において桁上がり、桁落ちがあったときに出力される選択信号 (ハイレベル) と CLP (指令信号) の立ち上がり (ハイレベル) との論理積を取り、相切り替え信号としている。この信号によりローラは I 相および II 相間の移動から II 相、III 相間の移動へと切り替わることになる。

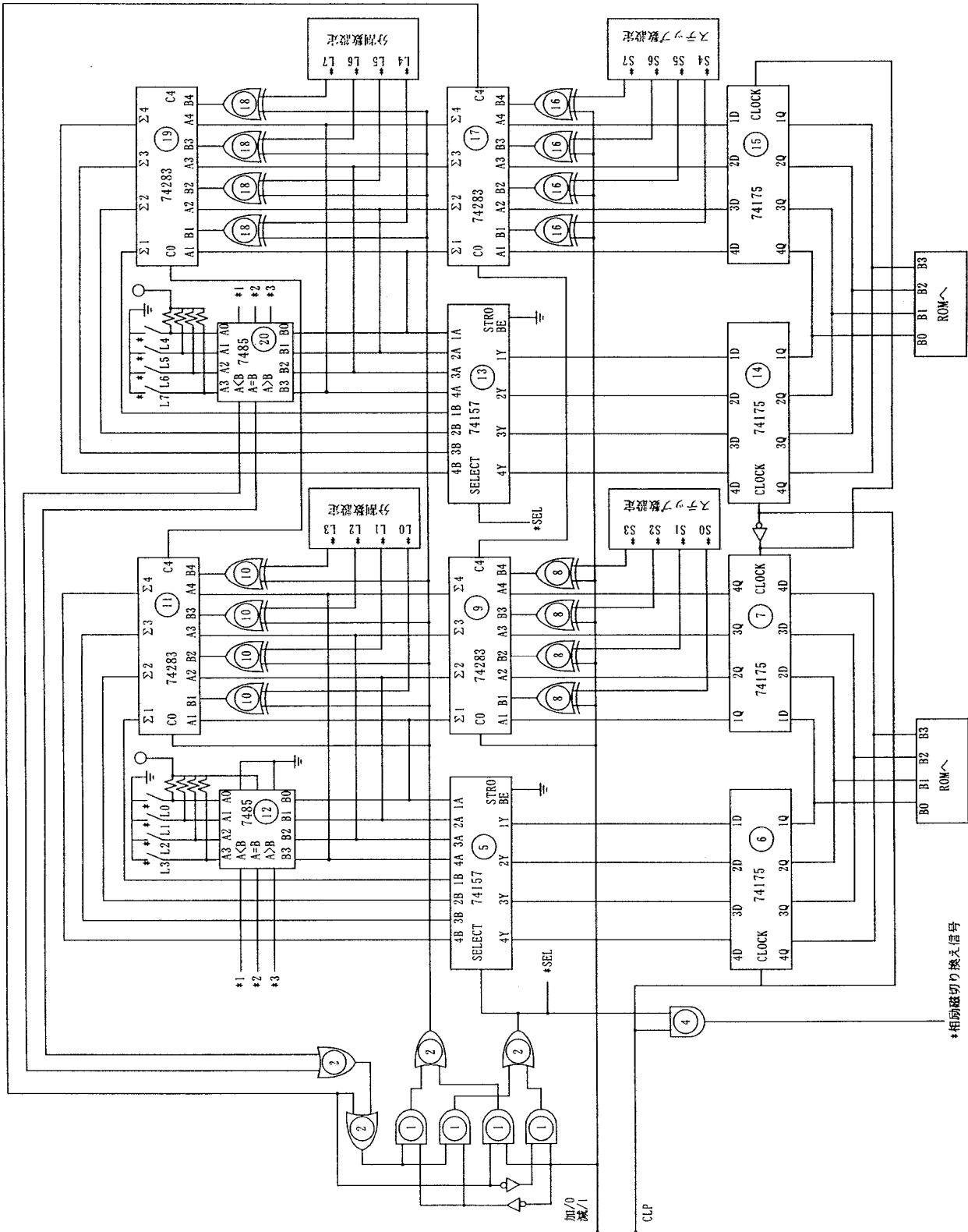


図7 演算部全回路図

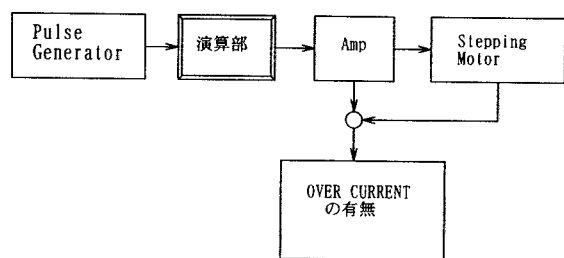


図8 限界周波数測定装置

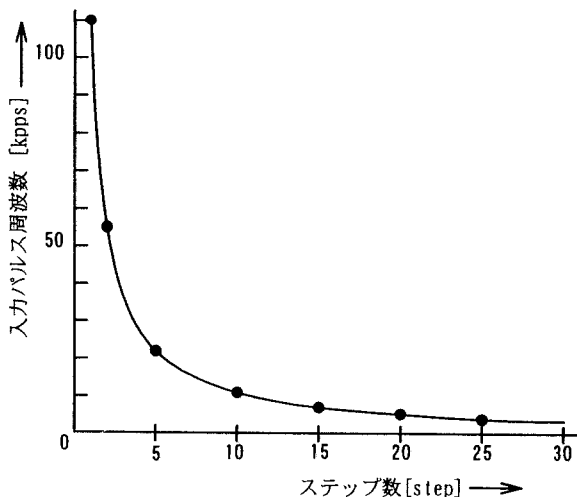


図9 限界周波数曲線

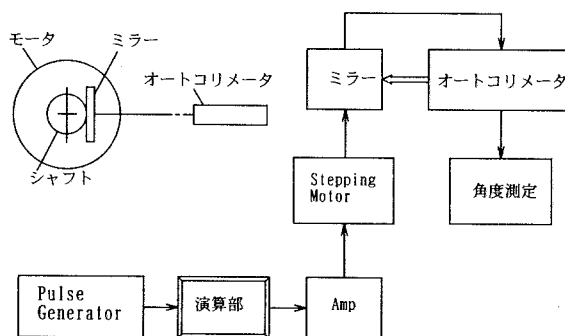


図10 静止角度誤差測定装置

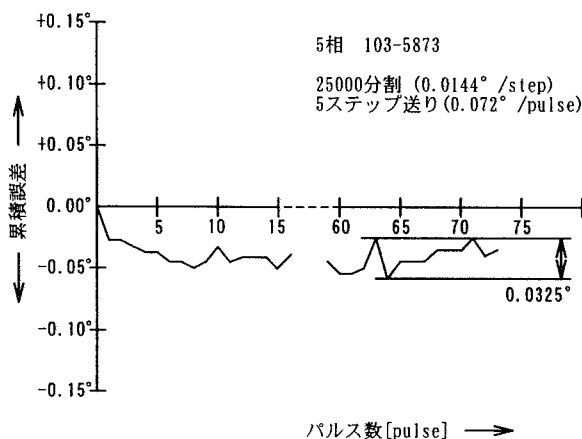


図11 静止角度誤差

#### IV 実験

1 指令パルスあたりのステップ数を設定して、任意のステップ角を作り出し、そのときの駆動特性や停止精度を調べるための実験を行なった。(株)山洋電気製4相ステッピングモータ TYP-103-845-1(基本ステップ角 $1.8^\circ$ 、定格電圧5V、1相あたり4A)、同型専用ドライバ(入力応答周波数500kpps、波形メモリ・D-Aコンバータ・増幅アンプ一体型)およびコントローラとして共和電業社製 Z80ボードコンピュータ、それに試作回路を用いて行なった。

##### 1 設定ステップ数—入力パルス周波数限界

設定ステップ数(ステップ角)と発振器から与えられるパルス周波数に対するモータの限界周波数を調べる。通常フルステップ駆動からハーフステップ駆動に切り換えると、脱調を起こさない限界周波数は約2倍になる。<sup>6) 7)</sup> 本実験では基本ステップ角に対する分割数の設定は125(総分割数:  $125 \times 200 = 25000$ 、微少ステップ角:  $360/25000 = 0.0144^\circ$ )とした。本モータの連続応答時のフルステップ駆動時の周波数限界は1.2kppsとなっている。実験は1指令パルスに対する設定ステップ数を1、2、5、10、…と変化させたとき

の限界周波数を調べた。実験装置の概略は図8に示す。また実験結果を図9に示す。このグラフは連続応答時の限界周波数を示すものである。

##### 2 設定ステップ角度誤差の測定

次に図10に示す実験装置及び山洋電気(株)製の5相ステッピングモータ103-5872TYPE(総分割数500、基本ステップ角 $0.72^\circ$ )を用いて設定ステップ角度誤差の実験を行った。分割数の設定は50(総分割数25000分割、微少ステップ角 $0.0144^\circ$ )である。これは任意の点を始点として、その点より設定したステップ角度だけ歩進させ、モータ軸に取り付けたミラーの反射角をオートコリメータで測定することにより回転角を求め、理論値との比較を行う。このときの測定値と理論値との差を角度誤差とする。結果は図11に示す。1パルスあたりの設定ステップ数は5 ( $0.072^\circ$ )としている。

#### V 結論・考察

##### 1 周波数限界について

任意のステップ角は当然基本ステップ角よりも小さいため、応答周波数は高い限界を示す。しかしながら回

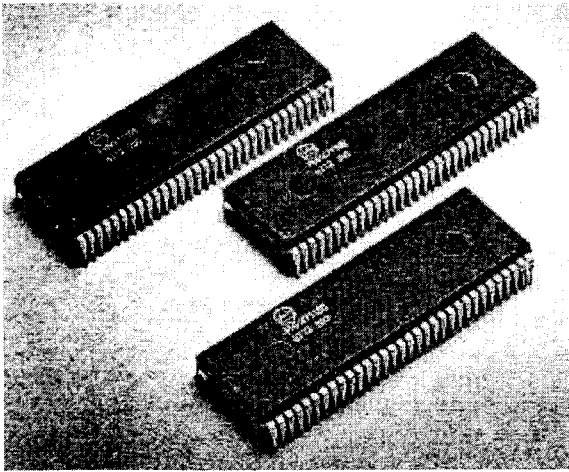


図12 高速演算 IC (PMM-671185)

転数に換算すると約250rpm 付近となり、これは基本ステップ角駆動に比べて1/3弱回転数が落ちることになる。理由としては演算部における信号の送れと D-A 変換の遅れが影響していると思われる。また小さなステップ角は吸引トルク(磁力)の分布の低い点を移行していることが考えられる。だが実用上は、後述するように小さなステップ角のまま最高速度に持っていくという使い方はなされないため問題はないと思われる。

## 2 角度誤差について

メーカーから出されているステッピングモータは2相、3相あるいは5相モータいずれも基本ステップ角の±10%の誤差を持っている。この理由はロータ、ステータの加工誤差、組立精度、コイル磁束のばらつき等諸因が挙げられる。当然微少送りについてもその誤差の影響が現れている。しかしながらグラフからわかるように、所定の微少送りに限って言えば基本ステップ角の誤差よりはるかに小さな変動範囲といえる。ただ現存モータをそのまま利用しての本駆動方式においては、あまり分割数を大きくしたり、ステップ数設定を小さくしても意味がなくなる限界はあると考えられる。もちろんモータ本体の精度を上げればよいのであるが、現行技術ではメカニカルな対処は無理だと思われる。それでも精密角度送りが必要となるとときに考えられるのは外部フィードバック信号を利用して、本方式における電流比データを補正すれば可能性は考えられるが、報告は次の機会に譲ることとする。

## 3 応用

本実験では分割数の設定を最大125としたが分割数を増やすことにより、理論上は木目細かなステップ角

の設定ができ、従来の固定的なステップ角に対し、広い用途が考えられる。また連続回転時は最大ステップ角(基本ステップ角)で駆動し、起動・停止時あるいは低速時にステップ角を小さくするなど、滑らかな駆動や多様な運転が考えられる。図12に山洋電気から本回路を商品化した高速演算 IC (PMM-671185) を示す。<sup>8)</sup>

最後に本研究に際し、全般的な指針を与えてくれた故 新村佳久(株)山洋電気取締役役に感謝申し上げますとともに同社元次長 大野克弘氏にドライバに関する技術協力を頂いたことを紙面を借りてご報告申し上げます。

## [参考文献]

- (1)小島昌一、新村佳久：電動機で駆動される系の機械特性に関する研究(第3報 Spanworm equation のマイクロステッピング駆動への適用)、日本機械学会第63期通常総会講演会講演論文集、pp1-7 (1986)
- (2) 本多 浩、大野克弘：ステッピングモータ制御用アドレス演算回路、公開特許公報、昭63-190597, pp541-546 (1988)
- (3) 本多 浩：ステッピングモータのステップ角制御駆動、群馬職業訓練短期大学校紀要、第1号、pp.49-55 (1991)
- (4) 本多 浩、大野克弘：ステッピングモータ駆動装置、特許第1914310号(平成7年)
- (5) 本多 浩、大野克弘：ステッピングモータの駆動制御方法、特許第2520408号(平成8年)
- (6) 見城尚志ほか：精密小型モータ総合資料集1,2,総合電子出版
- (7) 見城尚志、新村佳久：ステッピングモータの基礎と応用(1979),総合電子出版
- (8) 山洋電気製品カタログ、No.548-1'87.8.2DN