

## ステッピングモータ特性評価システムの構築

大内, 毅  
九州大学大学院森林資源科学部門

新里, 祐宏  
琉球大学教育学部

<https://doi.org/10.15017/8874>

---

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 62 (1), pp.15-28, 2007-02-28. 九州大学大学院農学研  
究院

バージョン：

権利関係：



## ステッピングモータ特性評価システムの構築

大 内 毅<sup>\*1</sup>・新 里 祐 宏<sup>2</sup>

九州大学大学院森林資源科学部門生物材料機能学講座木質資源工学研究室  
(2006年11月7日受付, 2006年12月1日受理)

### A Construction of Evaluation System to Obtain Characteristics of Stepping Motors

Takeshi OHUCHI<sup>\*1</sup>, Sukehiro SHINZATO<sup>2</sup>

Laboratory of Wood Material Technology, Division of Biomaterial Science,  
Department of Forest and Forest Products Sciences, Faculty of Agriculture,  
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

#### 緒 言

近年, 家具工場などの製造現場においては, 効率化, 低コスト化を目的として, 省力化, 自動化された工作機械が多数導入されている. その中でも代表的な工作機械として, CNC工作機械 (Computer numerically controlled machine tool) が挙げられる. CNC工作機械とは, コンピュータがプログラムされた加工情報を数値情報に変換し, 工作機械に順次送信することによって, 主軸, 工具, 及びテーブル等の駆動を制御して自動加工を行う機械である. この主軸, 工具, 及びテーブル等の駆動においては, 制御可能なアクチュエータとして, ステッピングモータやサーボモータが使用される場合が多い. 前者のステッピングモータの特徴として, ○回転誤差がステップごとに累積されない; ○モータの回転角が入力パルス数によって決まる; ○回転角を検出するためのフィードバックが不要で, 制御回路が簡単である; ○サーボモータに比べ低コストである等が挙げられる. 以上の特徴から, ステッピングモータは, 回転角度, 速度, 及び位置を制御する用途において効果的であり, 工作機械に留まらず, プリント, プロッタ等のハイエンドオフィス機器に至るま

で幅広く用いられている. しかし一方では, ○特定の周波数で共振現象を発生し, トルクが急激に低下する; ○高速回転時に, 入力パルスに対してモータの回転子がミスステップして脱調する; ○駆動回路, 及び励磁方法の組み合わせによって, ステッピングモータの特性が大きく異なる等のマイナス的な特徴も有している. このマイナス的な特徴は, ステッピングモータを利用する上で把握しておかなければならない重要な特性であるにもかかわらず, 実際に組み込まれるシステムの機械的機構や駆動回路によって大きく異なるため, メーカーが規定した特性値から把握することは困難であり, 事前に最適なステッピングモータを選定することができない場合が多い. これまでに, ステッピングモータ単体の特性を評価するシステムが一部で公表されているが (谷腰, 1986), 駆動回路との組み合わせまで考慮した評価システムは, 未だ開発されていないのが現状である. したがって, 利用するステッピングモータの特性は, システムを設計する者が独自に調べておく必要があり, それには簡便で, しかも自動的に評価するシステムが望まれる.

そこで本研究では, ステッピングモータの特性として, 速度-トルク特性の中のスルーイング特性に着目

<sup>1</sup>九州大学大学院森林資源科学部門生物材料機能学講座木質資源工学研究室

<sup>2</sup>琉球大学教育学部技術教育教室

<sup>1</sup>Laboratory of Wood Material Technology, Division of Biomaterial Science, Department of Forest and Forest Products Sciences, Faculty of Agriculture, Kyushu University

<sup>2</sup>Department of Technology Education, College of Education, University of the Ryukyus

\*Corresponding author (E-mail: tohuchi@agr.kyushu-u.ac.jp)

し、自動的にスルーイング特性が得られるステッピングモータ特性評価システムの構築を試みた。すなわち、スルーイング特性を得るには、ステッピングモータが脱調した時点でのパルスレートとトルクを測定しなければならないので、システムをトルク測定部、脱調検出部、パルスレート測定部、及びシステム全体を制御するとともにデータをサンプリングする計測制御用パーソナルコンピュータ（以下、計測制御用 PC）で構成し、評価システムを構築した。さらに、このシステムの有効性を確認するために、スルーイング特性試験を行い、駆動回路を評価したので併せて報告する。

## ステッピングモータの動作原理とその特性

### 1. 動作原理

ステッピングモータは、別名ステップモータ、パルスモータあるいは階動電動機と呼ばれており、モータ軸の回転がステップ状に動くのが特徴である。駆動回路は、一般的にロジック回路とドライブ用のトランジスタで構成され、これに1つのパルス信号を与えると、モータは規定のステップ角度だけ1ステップ回転して停止する。したがって、駆動回路に与えるパルスの数と、それを送る速度を変えることによって、回転角度と回転速度が制御できる。

ステッピングモータの種類は、固定子の駆動相数により3相、4相、5相巻線型に分類され、磁気回路の構造によっても、VR（可変リラクタンス）型、PM（永久磁石）型、HB（ハイブリッド）型等に分類される。この中でも構造が簡単で、しかも低価格で汎用性の高い4相PM型ステッピングモータの概略図を図1に示す（戸荏，1991）。この場合、回転子は円筒状の永久磁石で、固定子には4相の巻線がある。ステッピングモータの駆動回路は、基本的に図2のよう

に、電源とスイッチで構成されている。最初に、スイッチ S1 を ON にすると、図1（a）のように、巻線  $\phi 1$  が励磁され、この時固定子が S 極になったとしたら、回転子の N 極が来て停止する。次に、S1 を OFF、S2 を ON すると、 $\phi 2$  が励磁されて回転子は  $90^\circ$  回転して停止する（図1（b））。このように、S1 から S4 まで順次繰り返してスイッチを切り換えることで、回転子が  $90^\circ$  毎に回転する。実際は、スイッチの切り換えに対するステップ角度はもっと小さい。

この4相ステッピングモータには、上述のような1相励磁方式に加えて、2相励磁、及び1-2相励磁方式があり、励磁方法によってステップ角、及び回転特性が変わる。図3に、各励磁方式のタイムチャートと動作原理を示す（戸荏・津坂，1991）。以下に、これらの励磁方式について説明する。

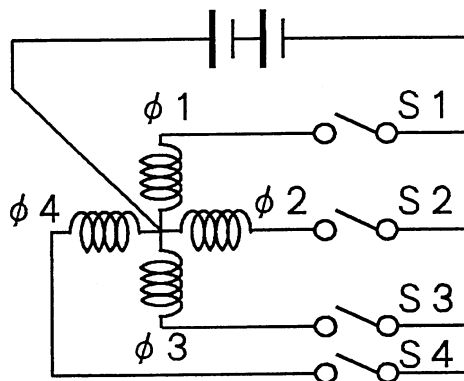


図2 駆動回路の構成

#### (a) 1相励磁方式

最も基本的な励磁方法で、固定子の1相のみを励磁し、順番に切り換えて回転磁界を作りモータを回転させる。

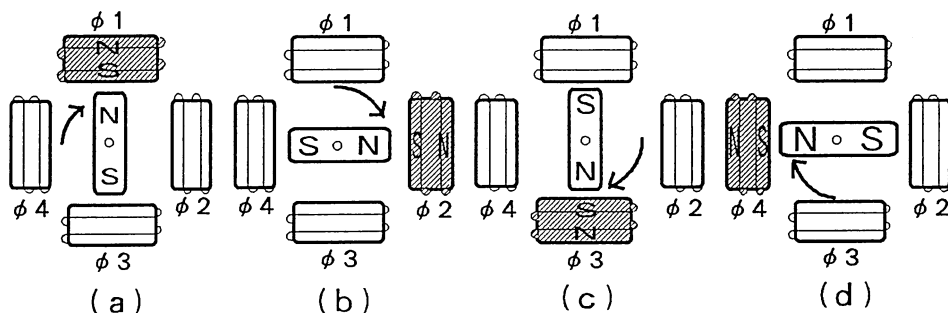


図1 4相PM型ステッピングモータの概略図

## (b) 2 相励磁方式

2 相を同時に励磁し、固定子に生ずる磁界のベクトル和を回転させる。回転子が安定する位置は、固定子と固定子の中間点となる。1 相励磁の時の安定する位置は、固定子と一致していたが、2 相励磁ではそこから 0.5 ステップずれる。相切り換えの時も必ず 1 つの相は励磁されているので動作も安定し、トルクも得られる。しかし、入力電力（消費電力）は 1 相の時の倍になる。

## (c) 1-2 相励磁方式

1 相と 2 相励磁を交互に行うもので、1 パルスに対するステップ角は 1 相、2 相励磁に比較して 1/2 になる。この方法は高精度・高分解能を必要とする制御に用いられる。

本研究では、被評価ステッピングモータとして、4 相 PM 型ステッピングモータを供試し、動作も安定してトルクも得られる 2 相励磁方式の駆動回路を用いた。

## 2. 特性

ステッピングモータの基本的な特性として、次の 3 つがある。

## (1) 回転角度とトルク特性

## (2) 速度-トルク特性

## イ) スターティング特性

## ロ) スルーイング特性

## (3) 過度応答特性

この内の (2) 速度-トルク特性は、ステッピングモータを用いた機械制御において重要な特性であるが、ステッピングモータ自身や使用する駆動回路や励磁方法によって、その特性は大きく異なる。図 4 に、一般的な速度-トルク特性を示す（谷腰，1986；横山，1990 など）。これより、ステッピングモータのトルクは、高速回転になるほど低下する傾向であることがわかる。ステッピングモータが無負荷時に、その回転が入力パルスと 1 対 1 に対応して回転できる速度が最大自起動周波数である。また、入力パルスに追従して起動、停止、逆転、加速、減速が行える領域が自起動領域であり、この領域における速度と最大トルクの関係が、イ) スターティング特性である。また、自起動領域内で起動させた後、徐々に入力パルス周波数を増加させることができる。この周波数を増加させながら、ステッピングモータの回転が入力パルス周波数と 1 対 1 に対応できる領域がスルー領域であり、この時の回転速度と最大トルクの関係が、ロ) スルーイング特性

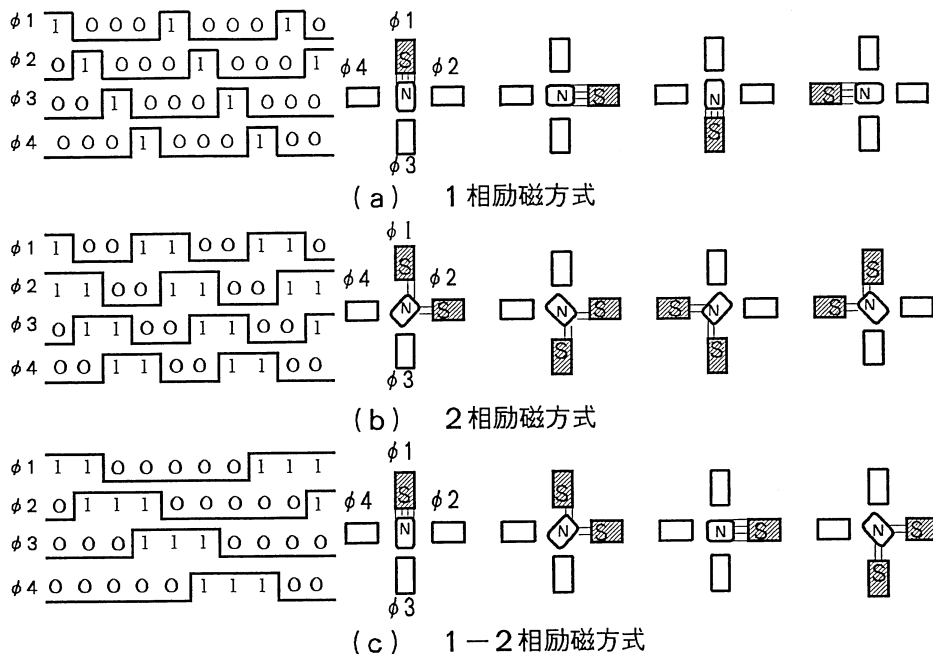


図 3 各励磁方式のタイムチャートと動作原理

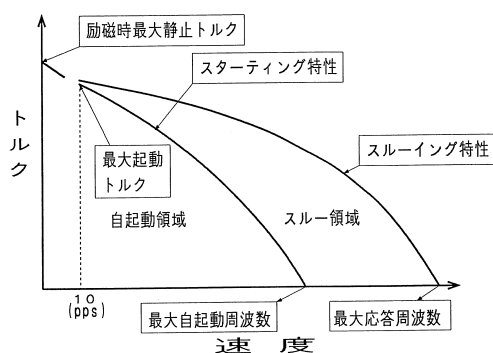


図4 ステッピングモータの速度-トルク特性

である。

本研究では、このスルーイング特性を自動的に得ることができる評価システムを構築するとともに、本システムによるスルーイング特性試験を実施した。

## ステッピングモータ特性評価システムの概要

ステッピングモータのスルーイング特性を得るためには、スルー領域における最大トルクと入力パルス周波数（以下、パルスレート (pps)）を測定しなければならない。この最大トルクとパルスレートは、ステッピングモータを自起動領域内で駆動させた後、徐々に増やす入力パルスに対してミスステップして脱調した時点で測定する必要がある。そこで、本システムでは、トルク測定部、脱調検出部、パルスレート測定部、及びシステム全体を制御するとともにデータをサンプリングする計測制御用 PC で構成した。以下に、各部の詳細について説明する。

### 1. トルク測定部

トルクの測定方法には、図5に示すように構成が簡便で、しかも脱調の検出が可能となる2 バランサ方式を採用した（谷腰，1986）。この方法は、モータの軸に取り付けたプーリに糸を巻き付け、その両端にばね秤を接続して、プーリに摩擦制動力を加えながらモータを回転させ、その際に生じる両ばね秤の荷重の差からトルクを求める方法である。

本システムでは、自動的に測定を行うことを目的としているので、図6に示すように、ばね秤で設定する任意の荷重を、荷重設定用ステッピングモータと精密ボールねじを用いて設定する。すなわち、精密ボールねじのステージに2つのばね秤を取り付け、このステー

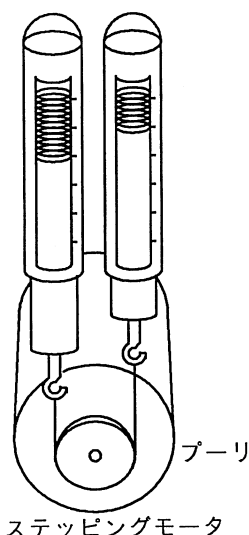


図5 2 バランサ方式によるトルク測定法

ジの上下移動を荷重設定用ステッピングモータによって制御することにより、任意の荷重を設定することができる。

次に、計測制御用 PC を用いてトルク測定を行うには、2つのばね秤の値をセンサによって電気量（電圧）に変換する必要がある。そこで、同図に示すように、センサとしてポテンシオメータを使用し、ばね秤の直線の変位（伸び）をポテンシオメータの回転角度に置き換え、その変位角度を電圧に変換することにした。測定では、両ばね秤を平行にした時のポテンシオメータ1、同2の値を加算した値（P1）と、測定時のポテンシオメータ1と同2の値を加算した値（P2）を計測制御用 PC に取り込む。測定時は、ばね秤1が伸びるとばね秤2は同じ量だけ縮むので、結果的にばね秤は2倍伸びたことになる。したがって、トルク： $T$  (N・m) は次式から求めることができる。

$$T = 2(P2 - P1) / K \cdot r \quad (1)$$

ただし  $T$  : トルク (N・m)

$P1$  : ポテンシオメータ1と同2の加算値  
(荷重設定時) (v)

$P2$  : ポテンシオメータ1と同2の加算値  
(測定時) (v)

$K$  : ポテンシオメータの電圧・  
荷重変換係数

$r$  : プーリの半径 (m)

なお、ポテンショメータ 1、同 2 の出力の加算は、図 7 に示すようにオペアンプ回路 LM324 を用いて製作した加算回路によって行った。この加算回路の出力は、A/D 変換器とパソコン用インターフェースを介して計測制御用 PC に取り込まれた後、(1) 式から自動的にトルクが算出される。最終的に構成したトルク測定部は、図 8 に示すブロック図の通りである。

## 2. 脱調検出部

ポテンショメータを用いた 2 バランス方式 (図 6) では、ステッピングモータが脱調すると、ステッピングモータのトルクが急激に低下し、ばね秤で設定した荷重 (摩擦制動力) が大きく勝ることになる。その結果、ばね秤のばねが急激に縮み、ばね秤は初期設定の位置まで戻されることになる。この時、ポテンショメータの軸も逆回転し、出力電圧が急激に降下する。そこで、このポテンショメータの降下電圧を利用して、脱調を検出するための電気信号 (以下、脱調検出信号)

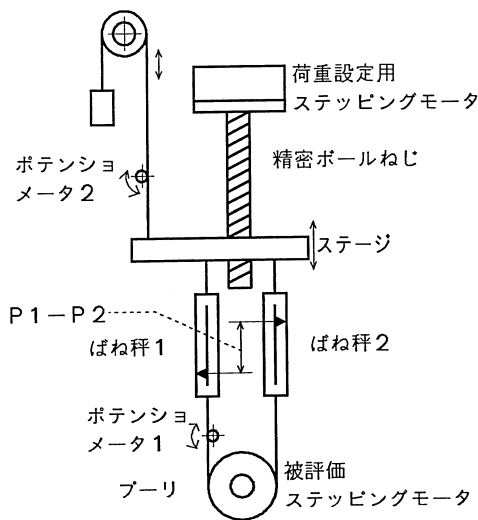


図 6 トルク測定部の概要

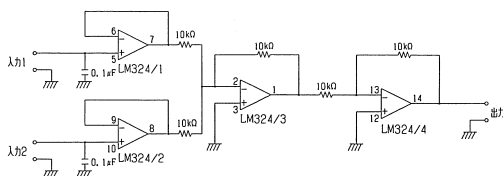


図 7 加算回路

を作る方法を、以下のように考案した。

ポテンショメータの降下電圧を利用して、脱調検出信号を作り出すために、オペアンプ回路 LM324 を用いて比較回路を作製した (塩田, 1991)。図 9 に、その回路図を示す。この比較回路はポテンショメータ 1 と接続されており、脱調の際には、ポテンショメータの電圧降下によって、同図中のコンデンサ C1 と C2 が同時に放電する。この時、放電に要する時間 (時定数: T1, T2) に差を設けることで、脱調検出信号となるワンショットパルス (+5v) を出力する。このオペアンプは、マイナス側が速く放電し、相対的にプラス側の電圧が高くなることで、脱調検出信号を出力する。図 10 に、マイナス側の時定数 T1 が  $3.3 \times 10^{-6}$  (sec)、プラス側の時定数 T2 が  $4.4 \times 10^{-2}$  (sec) の場合における比較回路の入出力波形を示す。これより、時定数の差によって脱調検出信号が出力されることが確認できる。本システムでは、脱調の検出を連続的に行うことを考えていたので、脱調検出信号の出力時間をできるだけ短くする必要があった。そこで、T1 を  $1.1 \times 10^{-3}$  (sec)、T2 を  $2.5 \times 10^{-3}$  (sec) と共に短く設定し、最終的に出力時間を 0.15 (msec) に設定した。

この比較回路を用いた脱調の検出においては、脱調検出信号を外部割り込み信号として計測制御用 PC に入力することで行った。すなわち、比較回路から出力される脱調検出信号の立ち上がりと同時に、計測制御用 PC が外部割り込み信号が入力された (脱調が発生した) と判断し、その時指定された割り込みサブルー

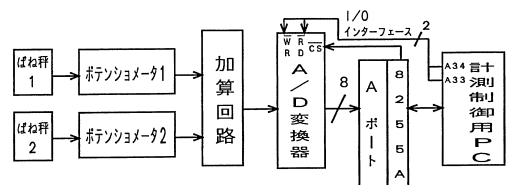


図 8 トルク測定部のブロック図

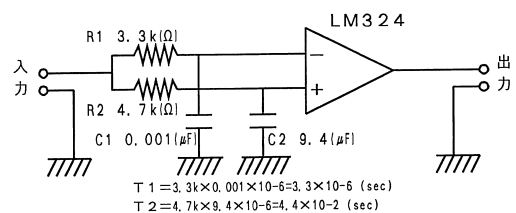


図 9 比較回路



チンプログラムを実行する（ハードウェア割り込み処理）。この割り込み処理によって、トルクとパルスレートの測定が自動的に行われる。

本システムでは、後述のようにシステム全体を制御し、特性試験を行うプログラムに、N88BASIC を用いている。したがって、この割り込み処理には、N88BASIC の ON HELP GOSUB 命令を使用することにした。通常このコマンドは、キーボードのヘルプ・キーが押されると実行するが、その際にメモリー上のあるビットにフラグ“1”が立ち、これをCPUが監視して割り込み処理が行われる。本システムでは、計測制御用PCに外部割り込み信号が入力されると、このフラグを擬似的に“1”にするプログラムを作り、あたかもヘルプ・キーが押されたものと等価の状態にして、ON HELP GOSUB 命令による割り込み処理

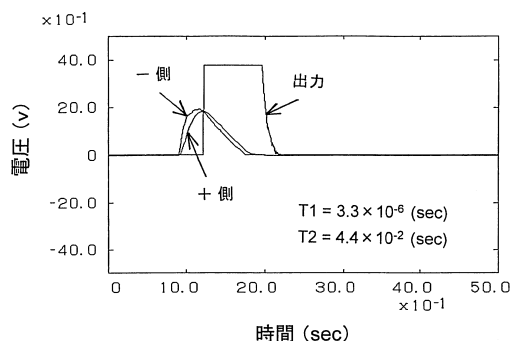


図10 比較回路の入出力波形

を行うことにした。この擬似的に“1”にするプログラムは、マシン語を用いて作成した。図11に、本システムにおける ON HELP GOSUB 命令による割り込み処理のブロック図を示す。同図に示すように、比較回路から出力される脱調検出信号が、外部割り込み信号として計測制御用PCの拡張スロット信号線 IR31 (B24番) に入力される。この IR31のベクタ・テーブルは2CH から2FH なので、ここにフラグを“1”にするプログラムの先頭アドレスを設定しておく。本システムでは、セグメント7D00H である。実際に、ヘルプ・キーが押されると、セグメント0060H のオフセット044BH の6番ビットにフラグ“1”が立つことから、IR31による割り込みサブルーチンプログラムには、この位置に“1”を立てる命令を設定しておく。これで、外部割り込み信号が入力されると、ヘルプ・キーが押されたことと等価の状態となり、ON HELP GOSUB 命令で指定されたサブルーチンプログラムが実行され、計測制御用PCにトルクとパルスレートの測定データが取り込まれる。

以上のようにして、ステッピングモータが脱調した時点でのトルクとパルスレートが、割り込み処理によって自動的に測定される。

なお、本研究では高精度で高効率な処理を目指すため、外部信号を用いたハードウェア割り込み処理を採用した。しかし、その処理の設定は前述のように複雑で、システムも計測制御に用いるPCに依存し、制約されることとなる。近年、PCの処理能力が高速化さ

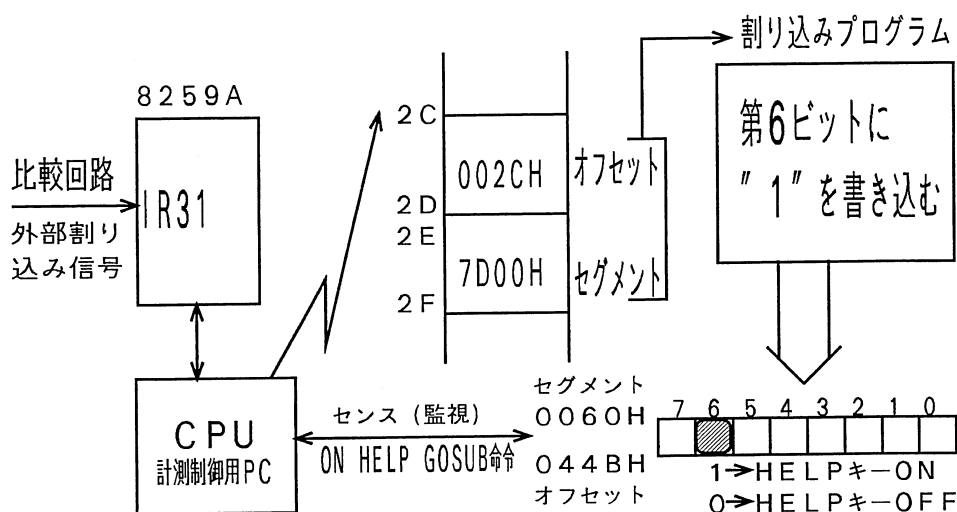


図11 割り込み処理のブロック図

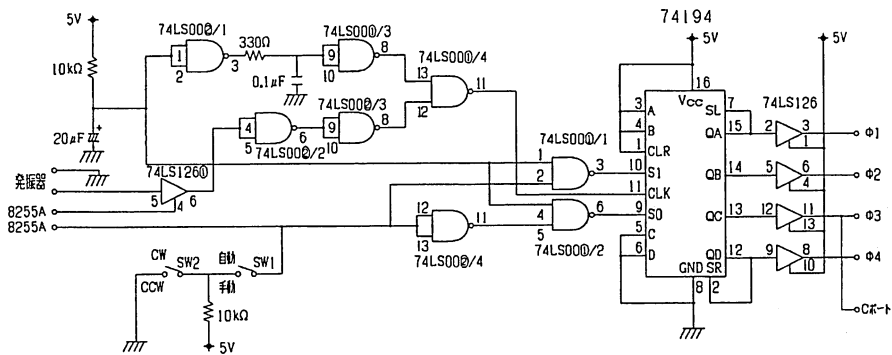


図12 シフトレジスタ

れていることから判断すると、ハードウェア割り込み処理ではなく、ソフトウェア割り込み処理（プログラムのな割り込み処理）での測定が可能であることが推察される。このソフトウェア割り込み処理が可能となれば、その設定とシステム自身が大幅に簡略化することができる。このことから、処理速度の速い PC を用いたソフトウェア割り込み処理の検証が、今後は必要と考えられる。

### 3. パルスレート測定部

本システムでは、4相PM型ステッピングモータを対象として、駆動回路における励磁方法に2相励磁方式を採用している。したがって、ステッピングモータを駆動するために必要な2相励磁回路として、4ビット双方向シフトレジスタ回路74LS194を用いてシフトレジスタを製作した。図12に、その回路図を示す。この回路の動作は、電源が入ると74LS194のA、B端子にHigh(+5v)が、C、D端子にLow(0v)が入力される。その結果、それぞれ対応する出力端子QA、QBにHighが、QC、QDにLowが初期設定される。そして、発振器からパルスが入力される度に、図13に示すようにライトあるいはレフト(CW/CCW)に2相励磁パルスがシフトされる。

パルスレートの測定は、計測制御用PCの拡張スロット信号線(A47番)から出力されてくるクロック信号(307.2kHz)を基準波とし、シフトレジスタから出力される2相励磁パルスがシフトする間に、この基準波が幾つあるかカウントして測定する方法を採用した。そこで、計測制御用PCのクロック信号をカウントするために、フリップフロップ回路74LS279と4ビットバイナリーカウンタ回路74LS193を用いて、16ビット

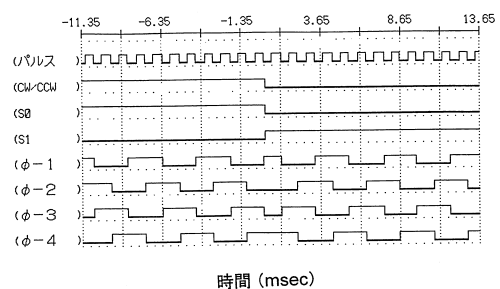


図13 2相励磁パルスタイムチャート

カウンタを製作した。図14に、その回路図を示す(塩田, 1991)。同図より、カウンタはフリップフロップ回路74LS279の入力端子 $\bar{S}$ 、 $\bar{R}$ に制御信号を送ることで、カウント開始、終了の動作を制御することができる。また、カウンタ回路74LS193のCLR端子に制御信号を送ることで、カウンタデータの保持、クリアの動作を制御することができる。そこで、図12に示すシフトレジスタのφ1からφ3信号と、計測制御用PCからプログラムの出力されるS1信号を組み合わせ、図15に示すようにカウンタを制御するための $\bar{S}$ 、 $\bar{R}$ 、CLR信号を作る論理回路を作製し、カウンタの前段に設けた(図14)。これらの各信号とカウンタ回路の動作(①カウント開始、②カウント終了、③データ保持、④データクリア)の関係を、図16のタイムチャートに示す。以下に、この関係について説明する。

#### ①カウント開始

S1がHigh、φ1がLow、φ2がLow、φ3がHighで $\bar{S}$ 端子をLow、 $\bar{R}$ 端子をHighにしてカウントを開始する。



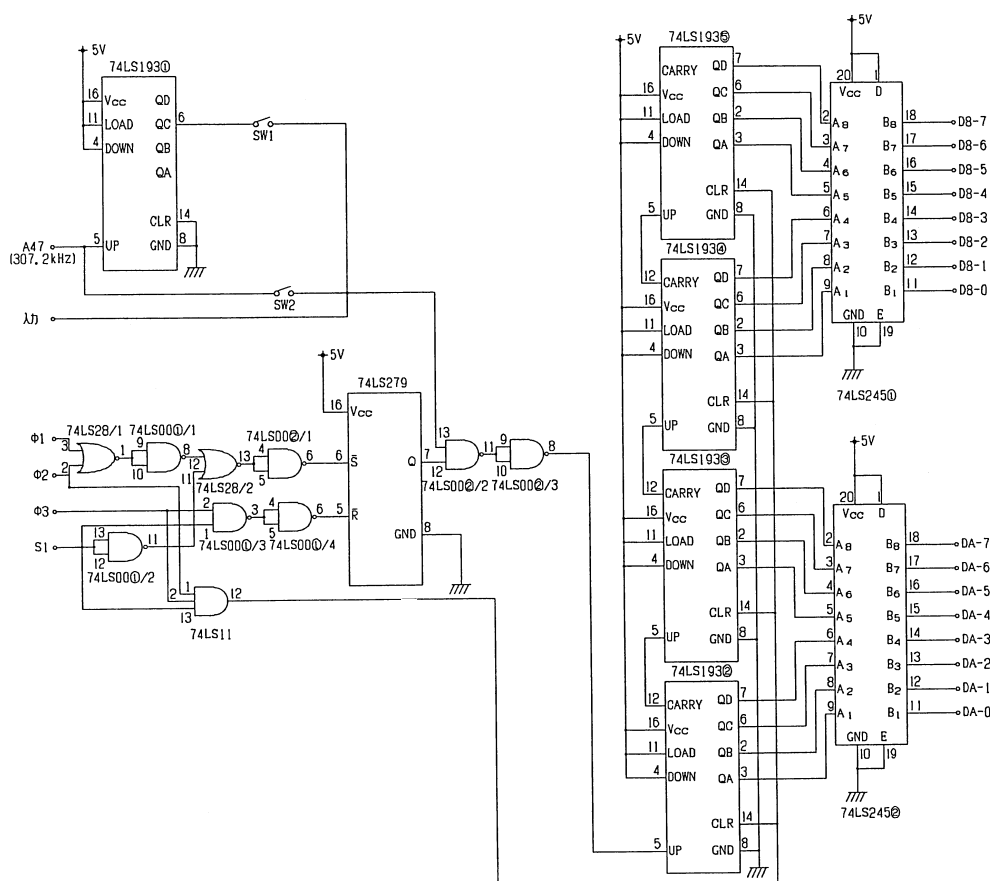
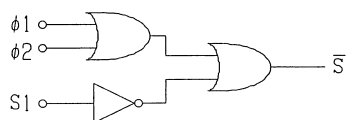
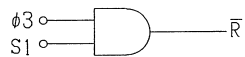


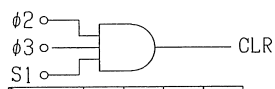
図14 カウンタ



|        | $\phi 1$ | $\phi 2$ | $S1$ | $\bar{S}$ |
|--------|----------|----------|------|-----------|
| カウンタ開始 | L        | L        | H    | L         |
| カウンタ終了 | H(L)     | H(L)     | L    | H         |



|        | $\phi 3$ | $S1$ | $\bar{R}$ |
|--------|----------|------|-----------|
| カウンタ開始 | H        | H    | H         |
| カウンタ終了 | L        | L    | L         |



|     | $\phi 2$ | $\phi 3$ | $S1$ | CLR |
|-----|----------|----------|------|-----|
| クリア | H        | H        | H    | H   |
| 保持  | L(H)     | L(H)     | L    | L   |

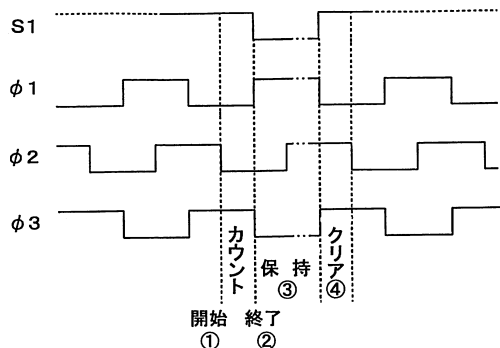
図15  $\bar{S}$ ,  $\bar{R}$ , CLR 信号論理回路

図16 カウントタイムチャートの概要

### ②カウント終了

S1 が Low,  $\phi 1$  が High,  $\phi 2$  が Low,  $\phi 3$  が Low で  $\bar{S}$  端子を High,  $\bar{R}$  端子を Low にしてカウントを終了する。

カウント開始・終了における  $\bar{S}$  信号は,  $\phi 1$ ,  $\phi 2$ , S1 信号を組み合わせで作成,  $\bar{R}$  信号は,  $\phi 3$ , S1 信号で作っている。これより, カウント開始時には  $\bar{S}$  端子が Low,  $\bar{R}$  端子が High となり, Q 端子から High が出力されてカウントを開始し, カウント終了時には  $\bar{S}$  端子が High,  $\bar{R}$  端子が Low となり, Q 端子から Low が出力されてカウントを終了する。

### ③データ保持

S1 が Low,  $\phi 1$  が High or Low,  $\phi 2$  が Low or High,  $\phi 3$  が Low で CLR 端子を Low にしてデータを保持する。

### ④データクリア

S1 が High,  $\phi 1$  が Low,  $\phi 2$  が High,  $\phi 3$  が High で CLR 端子を High にしてデータをクリアする。

データ保持・クリアにおける CLR 信号は,  $\phi 2$ ,  $\phi 3$ , S1 信号の AND 論理によって作っている。したがって, カウント終了時には CLR が Low となってデータが保持され, 続いて  $\phi 2$ ,  $\phi 3$ , S1 信号が全て High となり, CLR が High となってデータがクリアされる。

カウンタ回路を制御するための S1 信号は,  $\phi 3$  信号が Low になると同時に, 計測制御用 PC からプログラム的に出力される。これには高速処理が求められるが, 比較的処理速度の遅い N88BASIC によるプログラムでは,  $\phi 3$  信号が Low になるのを確認してから, S1 を Low とするのに時間を要する。その結果, カウント値に誤差を生じることが予想された。そこで,  $\phi 3$  信号を確認してから S1 信号を出力するプログラムには, 処理速度の速いマシン語を用いた。すなわち, このマシン語プログラムを, N88BASIC のプログラム上でマシン語プログラムデータとして格納した後, マシン語サブルーチンプログラムとして実行することにした。

このプログラムを用いてパルスをカウントした時のタイムチャートを図17に示す。同図は, シフトレジスタに発振器から出力されるパルスを入力し, 基準波 307.2kHz を用いてカウントした際のタイムチャートである。これより, 励磁パルスがシフトする間に, 基準波のパルスがカウントされていることが認められ, この基準波から求めたパルスレートが, 発振器の周波

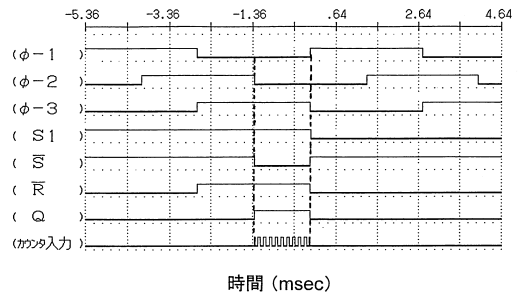


図17 カウントタイムチャート

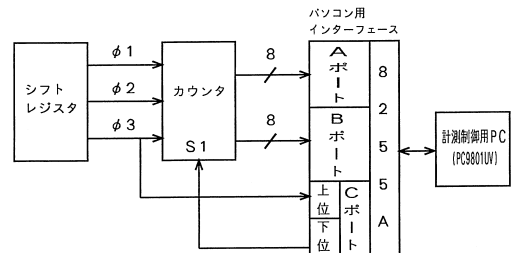


図18 パルスレート測定部のブロック図

数とはほぼ一致していることから, カウンタ回路が正常に動作していることが確認できた。

図18に, 最終的に構成したパルスレート測定部のブロック図を示す。同図より, シフトレジスタの  $\phi 1 \sim \phi 3$  信号と, 計測制御用 PC から出力される S1 信号で作られた  $\bar{S}$ ,  $\bar{R}$ , CLR 信号によって, カウンタが励磁パルスのシフトする間, 基準波のパルス数を自動的に測定する。そして, このカウント値はパソコン用インターフェースを介して計測制御用 PC に取り込まれ, パルスレートが自動的に算出される。

## 4. 計測制御用 PC とシステム全体の概要

トルク測定部, 脱調検出部, パルスレート測定部, 及び計測制御用 PC で構成したシステム全体の概略図を図19に示す。これより, 計測制御用 PC による各測定部の制御は, インターフェース回路8255A を 2 器使用して製作したパソコン用インターフェースの入出力ポート (八久保・蔵本ら, 1993) から, 計測制御用の信号を各測定部の回路や装置に送受信することによって行った。本システムで計測制御に用いたパーソナルコンピュータは, PC-9801UV (NEC) である。なお, 特性試験は, 同図中に示すように, シフトレジスタに試験に供する駆動回路とステッピングモータを接続して行った。

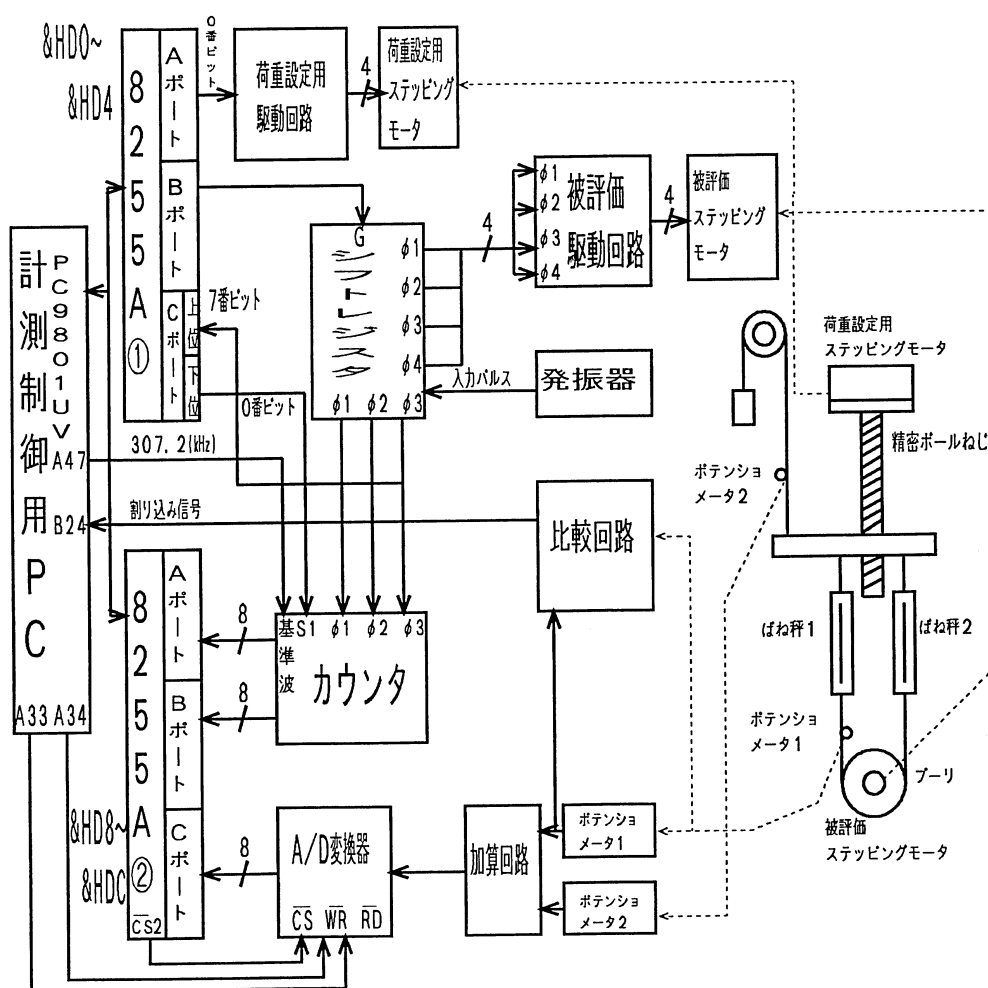


図19 システムの概略図

## 特性試験プログラム

特性試験プログラムは、脱調検出部で一部説明したように、主要な部分はN88BASICを用いて作成し、割り込み処理の一部と処理速度を要する部分にはマシン語を用いて作成した。スルーイング特性試験におけるプログラムのフローチャートを図20に示す。

本システムでは、まず、被評価駆動回路とステッピングモータを接続した後、荷重設定用ステッピングモータを駆動させ、自動的に任意の荷重を設定する。次に、被評価ステッピングモータが脱調するまで、パルスレートを増大させる。この処理によってモータが脱調すると、トルクとパルスレートの測定が自動的に行われる。

本プログラムでは、脱調した時点でのトルクとパルスレートを5回繰り返し測定した後、その平均値とトルクとパルスレートの特性図が、計測制御用PCのCRT画面に表示される。以上の測定を、脱調検出が可能な範囲で繰り返す。そして、測定終了を確認すると、全ての測定データを保存し、特性図をプリントアウトする。保存した測定データは、CRT画面に再現可能であり、テキストデータとしても確認することができる。

なお、このスルーイング特性試験に要する時間は、駆動回路とステッピングモータの組み合わせによって多少異なることが予想されるが、現時点では、およそ20分程度で一連の試験を行うことができる。

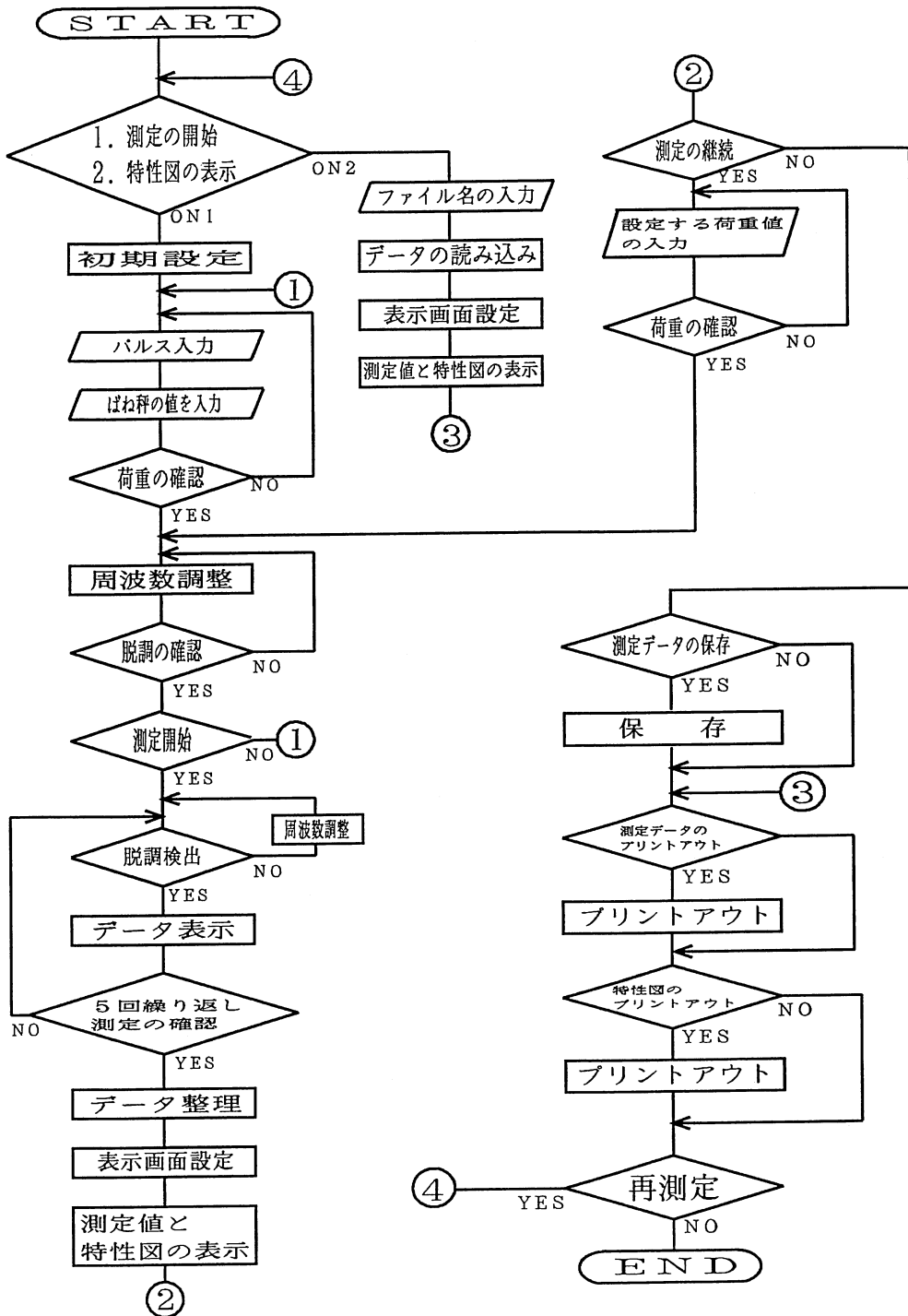


図20 フローチャート

## 特性試験

本システムを有効性を確認するため、ステッピングモータのスルーイング特性試験を行った。スルーイング特性に影響を与える因子として、ステッピングモータ自身の特性、回転軸回りのイナーシャ、及び駆動回路の特性が考えられる。そこで本試験では、被評価ステッピングモータを4相PM型ステッピングモータとし、回転軸回りのイナーシャについては、図21に示す真鍮製のプーリに限定してスルーイング特性試験を行った。

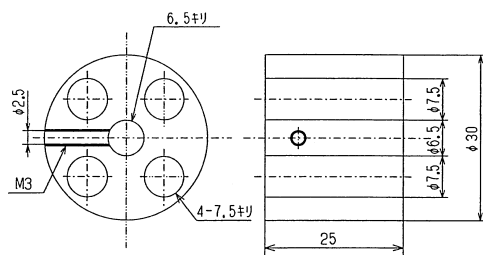


図21 プーリの概略図

### 1. スルーイング特性試験

試験に供した駆動回路の回路図を図22に示す（横山, 1986）。この回路はフォトカプラ（TLP532）によって、駆動回路の電源とデジタル回路の電源を絶縁しているのが特徴である。試験では、ステッピングモータのコイルに流れる電流の立ち上がり改善のために、同図中に示す外付け抵抗  $R_x$  を取り付けて行った。外付け抵抗値は、5, 10, 15  $\Omega$  とし、いずれの場合も、コイルにかかる電圧が定格の5.4 (v) 一定となるように電源を調整して試験を行った。そして、得られたスルーイング特性と、ステッピングモータのメーカーが規定した特性値を比較することで、駆動回路の評価を行った。

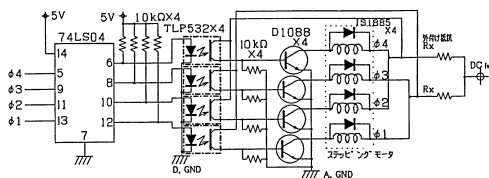


図22 駆動回路

### 2. 試験結果

得られた結果を図23に示す。これより、外付け抵抗が大きいほど、スルーイング特性が改善されていることがわかる。これは、外付け抵抗が大きいほど、コイルに流れる電流の立ち上がり時間が短くなったためと考えられる。しかし、特性値と比較すると、いずれの場合も大きな差が見られ、本駆動回路ではステッピングモータを高速回転で駆動することは不可能であり、その性能を最大限に発揮できていないことが明らかとなった。このことは、特性値の測定条件が明らかでないため、その原因が断定できないが、現段階では、駆動回路の相違によるものと推察される。そこで、ステッピングモータの高速回転を可能にすることを目的として、次のように本駆動回路の改良を試みた。

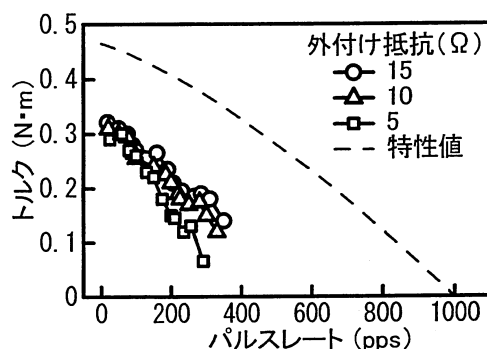


図23 スルーイング特性

図24に、本駆動回路におけるトランジスタ2SD1088を含めたドライブ回路（φ1）を示す。これより、トランジスタがOFFになると、ステッピングモータのコイルにスパイク電圧が発生して、ダイオード 1S1885とコイルに循環電流が流れ、これが結果的に制動トルクとして作用して、スルーイング特性が低下したと考えられた。このダイオードは、トランジスタがスパイク電圧によって破損するのを防止するために構成している。しかし、本駆動回路で使用しているトランジス

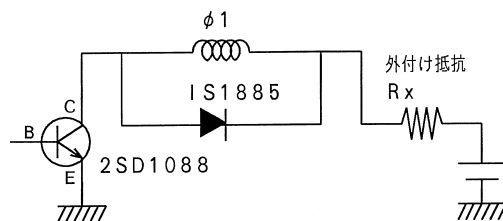


図24 ドライブ回路（φ1）

タ2SD1088の最大定格は、 $V_{CBO}=300$  (v)、 $V_{CEO}=250$  (v)、 $I_C=6$  (A) と高耐圧であるため、破損する可能性は少ないと判断できた。そこで、このトランジスタの高耐圧性を生かしてダイオードを取り外し、循環電流をコイルに流さないことで特性の改善を試みた。ただし、ダイオードを取り外した場合、今度はトランジスタが ON になると逆起電圧がコイルに発生し、トランジスタのコレクターエミッタ (C-E) 間に、その電圧が付加するので、これを防止するために C-E 間にダイオード IS1885を取り付けた。以上のようにして、改良した駆動回路のドライブ回路 (φ1) を図25に示す。

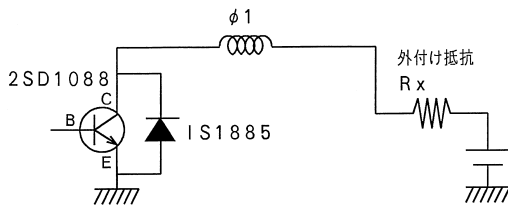


図25 改良後のドライブ回路 (φ1)

この改良した駆動回路を、再度、特性評価システムに接続し、改良前の駆動回路と同様にスルーイング特性試験を行った。得られた結果を図26に示す。これより、改良前の駆動回路と同様に、外付け抵抗が大きいほどスルーイング特性が改善されていることがわかる。また、外付け抵抗が10、15Ωの場合、パルスレートが最大で1000 (pps) 付近まで伸びていることから、高速回転での駆動が可能となり、特性が大幅に改善されたことがわかる。特性値と比較すると、パルスレート100 (pps) 付近の低速域においては、トルクは小さな値を示すが、およそ700 (pps) 以上の高速域では

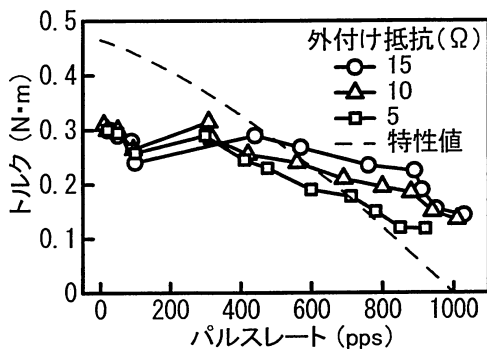


図26 改良後のスルーイング特性

大きな値を示した。改良の結果、ステッピングモータの高速回転においては、トルクを十分に発揮する高速駆動が可能となったが、パルスレート100 (pps) 付近では、トルクが急激に低下することも明らかとなった。低速域でのトルクの低下は、励磁パルスがシフトするタイミング、ステッピングモータ自身の振動、及び特性評価システム自身の振動が同期して共振したこと起因するものと考えられる。

本試験では、駆動回路のダイオードを取り外すことによって、ステッピングモータの高速回転における特性を改善することができた。しかし、低速回転では共振してトルクを落とす結果となった。したがって、ステッピングモータを低速駆動する場合は、共振を防ぐためにダイオードを取り付け、高速駆動する場合は、ダイオードを取り外す必要がある。今後、駆動回路を設計する際は、使用するステッピングモータの回転速度を考慮した上で、ダイオードを取り付けるかどうかを判断しなければならない。

## 要 約

本研究では、ステッピングモータのスルーイング特性をほぼ自動的に得ることができる特性評価システムを構築した。本システムは、トルク測定部、脱調検出部、パルスレート測定部、及び計測制御用 PC で構成した。本システムの有効性を確認するために行ったスルーイング特性試験から、次のように駆動回路を評価することができた。

1) 駆動電源とモータのコイルの間に取り付けた外付け抵抗が大きいほど、スルーイング特性は改善された。

2) モータのコイルに並列に取り付けているダイオードを取り外すことによって、大幅にスルーイング特性が改善され、外付け抵抗10、15Ωの場合では、最大で1000 (pps) 付近までの高速駆動が可能であることが確認された。一方、100 (pps) 付近では、共振してトルクが急激に低下することも明らかとなった。

本システムは、およそ20分の測定時間で、ほぼ自動的にスルーイング特性を得ることができる。したがって、利用するステッピングモータの特性を簡便に得るという目的を十分に果たせるものである。また、ステッピングモータ並びに駆動回路を付け変えることが容易であるため、ステッピングモータと駆動回路の組み合わせを考慮した特性試験を系統的に行うことが可能となった。



## 文 献

- 塩田泰仁 1991 メカトロニクス回路の基礎と演習, 第4版. 総合電子出版社, 東京
- 谷腰欣司 1986 やさしく学ぶステッピングモータと使い方. 総合電子出版社, 東京
- 戸茱吉孝・津坂昌利 1991 パソコン計測制御とインターフェース活用法, 第9版. 技術評論社, 東京
- 八久保重治・蔵本一峰・鈴木和也 1993 PC98とA・B・C言語による制御の実際. 総合電子出版社, 東京
- 横山直隆 1986 パソコン・インターフェースの製作実習. 技術評論社, 東京
- 横山直隆 1990 パソコン機械制御と製作実習入門. 技術評論社, 東京

## Summary

In this study, the evaluation system to obtain the slewing characteristics of the stepping motor automatically was constructed. This system was composed of the torque measurement part, the miss step measurement part, the pulse rate measurement part, and the PC for measurement and control. To confirm the effectiveness of this system, the slewing characteristic test was performed, and the drive circuit for the stepping motor was evaluated. The results obtained are summarized as follows:

- 1) The slewing characteristics was improved with increasing the value of resistance installed between the coil of motor and the power supply for driving.
- 2) The slewing characteristics was greatly improved by detaching the diode connected with the coil of motor in parallel, and it was confirmed that a high-speed drive to about 1000 (pps) for the resistance value 10 and 15Ω was possible. On the other hand, it became clear that the torque value in about 100 (pps) decreases rapidly by the resonance.
- 3) From the above results, it was found that this system was able to obtain the slewing characteristics automatically, and the measurement time was required for about 20 minutes.