

# パソコンを利用したデジタル制御実験の 学習支援システム

— DSP による DC モータの最短時間制御 —

稲井 義正

(愛媛大学教育学部技術研究室)

本田 安

(松山工業高等学校)

宮内 正義

(愛媛大学教育学部技術研究室)

(平成10年9月30日)

## Learning System for Experimentation on Digital Control aided by Personal Computer

— Minimal-time Control of DC Motor using Digital Signal Processor —

Yoshimasa INAI, Yasushi HONDA and Masayoshi MIYAUCHI

### 1. はじめに

パーソナル・コンピュータ（以下パソコン）を学習支援に導入した実験指導は、座学で学ぶ理論と実験より学ぶ実際面の統合化が容易に図れ、基本原理の学習徹底から設計の概要習得、動作及び特徴の理解までを、系統的にしかも効率よく学習できることから、指導効果を高めることが期待できる [1], [2]。

自動制御において、制御変数の偏差を許容範囲に抑え、目標値の変化に高速に応答させるなど制御成績の向上を図るには、操作変数を制御変数の変化と制御対象の特性をもとに計算した値に高速に追従させることが必要となる。デジタル制御 [4] の場合には、全ての操作変数を数値演算により計算することから、その処理速度が高いほど、より理想的な制御系を実現できる。

DSP (Digital Signal Processor) は、デジタル信号処理用に最適化が図られたハードウェアを備えたプロセッサで、高速に演算処理が実行できる。従って、DSP の制御系への応用のメリットは、従来アナログで処理されていた系を、デジタル化して信号の演算などをソフ

トウェアによって行うことにより、アナログ処理では困難であった適応制御系や、フレキシビリティのある制御システムの構築が容易にできることである。

本論文では、パソコンの計測・制御応用の一形式として、DSP [5], [6] によるDCサーボモータの最短時間制御システムについて検討し、この制御法の有用性を確かめるとともに、教員養成学部・大学院や工業高校あるいは工業高専において、デジタル制御学習の支援に有効な実験装置の構築 [3] を行ったので、この概要を述べる。

## 2. DC モータの最短時間制御

DSP の制御系への応用例として、DC サーボモータの位置に関する最短時間制御システムを設計制作した。

### 2. 1 最短時間制御

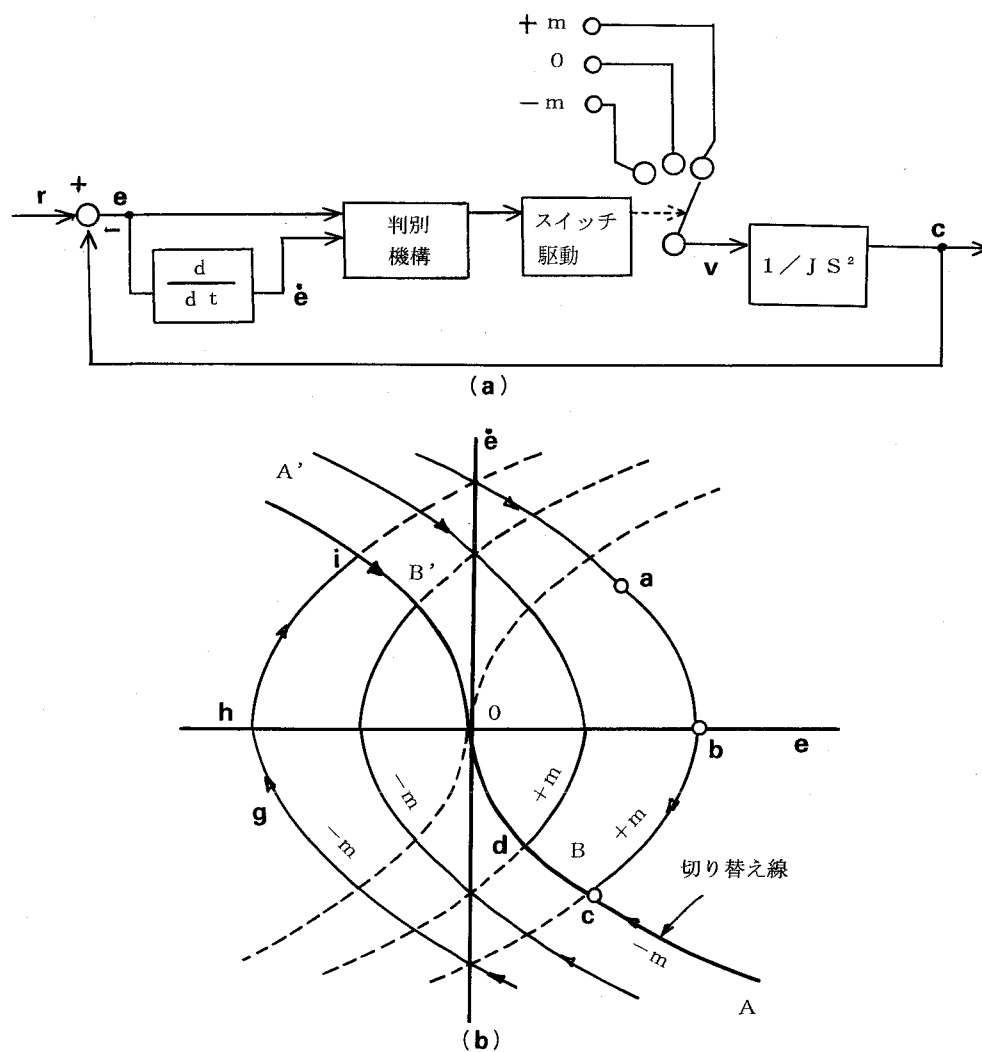


図1 慣性系の最短時間制御  
 (a) 最短時間制御システムのブロック図  
 (b) 位相面上での動作

最短時間制御とは、系で許容される最大の操作量を正負の間で交互に、しかも不連続に切り替えて加えることにより、最短の時間で制御変数とその設定値へ近づける制御法である。ここで、制御対象が慣性だけを有する図1(a)の系でこの制御法を説明すると次のようになる。

操作変数  $u$  の許容される最大値を  $m$  とすれば、最短時間制御では、 $u$  の値を適当な時刻に  $+m$ ,  $-m$ ,  $0$  の3段階に切り替えることになる。この切り替え時点は、制御変数  $C$  の設定値  $r$  からの偏差  $e (=r-C)$  と、その微分値  $\dot{e} (=de/dt)$  の値により決定される。ここで、設定値  $r$  がステップ入力として加えられたとすれば、最短時間制御を実行しているときの、位相面上での系の動作は図1(b)のような相似な放物線群となる。これは以下のようにして求められる。まず、制御系の状態方程式は次の(1)式で与えられる。

$$J \frac{d^2C}{dt^2} = \pm m \quad \text{または} \quad 0 \tag{1}$$

これを  $e$  と  $\dot{e}$  で書き換えれば、

$$\left. \begin{aligned} J \frac{d^2e}{dt^2} &= \mp m \quad \text{または} \quad 0 \\ \frac{de}{dt} &= \dot{e} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

(2)式より位相面上では次式を満たす。

$$\frac{de}{d\dot{e}} = \mp \frac{J}{m} \dot{e} \tag{3}$$

この式より、求める放物線群は次の(4)式となる。

$$e = \mp \frac{J}{m} (\dot{e})^2 + A \tag{4}$$

ただし、 $A$  は積分定数。

(4)式で積分定数  $A$  が0のときには、操作変数の値が  $+m$ ,  $-m$  のいずれであっても、状態変数である  $e$  と  $\dot{e}$  は原点  $O$  に向かって行く。原点  $O$  に達した時点で操作変数の値を  $0$  にすれば、この位置に留まる。この曲線  $A'B'O$ ,  $ABO$  を切り替え線と呼ぶ。

最短時間制御の方法は、最初の系の状態が  $a$  点上にあったとすれば、操作変数として正の最大値  $+m$  を加え、曲線  $abc$  にそって切り替え線に近づける。そして  $c$  の点で切り替え線に交わると、その時点で操作変数を負の最大値  $-m$  に切り替え、切り替え線上を原点に向かわせる。結果として、偏差とその微分値が  $0$  になった時点で操作変数を  $0$  に切り替える。またこれとは逆に最初の状態が  $g$  点である場合には、まず操作変数を  $-m$  とし、曲線  $ghi$  上で  $i$  点までもっていき、この時点で操作変数を  $+m$  に切り替え、切り替え線上  $A'B'O$  上で原点に収束させる。次の図2は図1(b)における曲線  $abcdO$  を、操作変数と偏差の時間経過として表したものである。

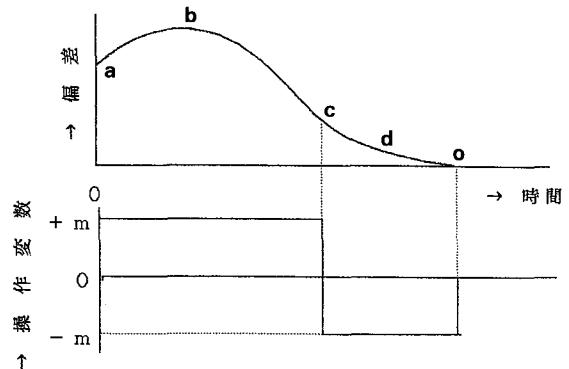


図2 最短時間制御の過程

## 2. 2 DC モータの最短時間制御

次に DC モータの制御に最短時間制御を使った場合について説明する。モータに加える電圧を操作変数、位置を制御変数とする。まず DC モータに加える電圧  $V$  と回転数（速度） $\Omega$  の間の伝達関数を考える（図 3，図 4 参照）。

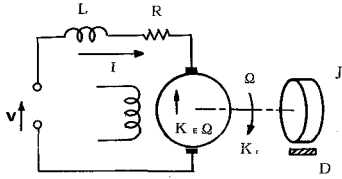


図 3 DC モータの電氣的、  
機動的要素

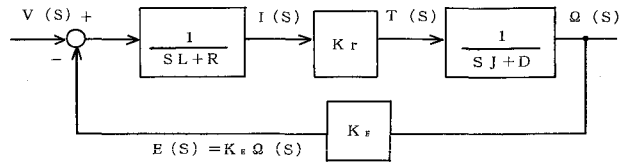


図 4 DC モータの伝達特性

$V$  と  $\Omega$  の間には次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} J \frac{d\Omega}{dt} + D\Omega &= K_r I \\ L \frac{dI}{dt} + RI + K_E \Omega &= V \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、

$V$ : 印加電圧     $\Omega$ : 回転数     $J$ : 慣性能率     $K_r$ : トルク定数     $I$ : 電機子電流  
 $D$ : 粘性制動係数     $R$ : 回路抵抗     $L$ : 回路のインダクタンス     $K_E$ : 逆起電力定数

ここで、粘性制動係数  $D$  を無視すれば、 $V$  と  $\Omega$  の間の伝達関数は、

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_r}{s^2 L J + s R J + K_E K_r} \quad (6)$$

また、モータの特性を表す次の 2 つ量

電氣的時定数 :  $T_E = L/R$

機動的時定数 :  $T_M = JR/K_E K_r$

の間に、 $4 T_E \ll T_M$  の関係が成り立てば、(6) 式は次の式で近似できる。

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{1/K_E}{(s T_E + 1)(s T_M + 1)} \quad (7)$$

さらに、一般に  $T_M \gg T_E$  の関係が成り立つから、電氣的時定数  $T_E$  は省略して、伝達関数を機動的時定数  $T_M$  による一次遅れ系として考える。モータの位置  $C$  は速度  $\Omega$  を積分したものであるから、最短時間制御系の設計に必要な印可電圧  $V$  と位置  $C$  の間の伝達関数を、

$$\frac{C(s)}{V(s)} = \frac{1/K_E}{s(s T_M + 1)} \quad (8)$$

と近似することにする。これより  $e-e$  位相面上の (4) 式に対応する曲線群は、

$$e = -T_M \Omega_0 \left( \frac{\dot{e}}{\Omega_0} \mp \log \left| 1 \pm \frac{\dot{e}}{\Omega_0} \right| \right) + A \quad (9)$$

ただし、 $\Omega_0$  は印可電圧の最大値に対応する回転数とする。

これより、最短時間制御のための切り替え線は、(9) 式で  $A=0$  と置いた場合で、

$$X = -T_M V_0 \left( \frac{\dot{X}}{V_0} \mp \log \left| 1 \pm \frac{\dot{X}}{V_0} \right| \right) \quad (10)$$

ただし、

$X$  : 偏差に対応するパルス数 [pulse]

$\dot{X}$  : 速度 [pulse/ms]

$V_0$  : モータに最大電圧を与えたときの速度 [pulse/ms]

$T_M$  : 機械的時定数

となる。

実験装置では、パルス数で位置を検出するためにエンコーダ付きの DC サーボモータを使用した。モータとエンコーダの仕様概略を表 1, 2 に示す。

表 1 DC モータの仕様概要  
サーボモータ: 511-012W18, 山陽電気㈱

定格出力	110 W
定格電機子電圧	75 V
定格電機子電流	2.1 A
定格トルク	3.5 kg·cm
定格回転速度	3000 rpm
電氣的時定数	0.61 ms
機械的時定数	5.1 ms

表 2 エンコーダの仕様概略  
エンコーダ: E501000C30, 山陽電気㈱

電源電圧	DC 5 V ± 5%
分解能	1000 P/R
出力チャンネル数	3
出力波形	方形波
出力回路方式	オープンコレクタ

このモータとエンコーダに対応する定数値を使って数値計算してみれば、切り替え線は図 5 のような曲線となる。

### 2.3 DSP を使用した最短時間制御システム

制御システムは、DSP ボード、DC モータドライバボード及び DC モータとエンコーダから構成されている (図 6)。DSP ボード上のプログラムには、最短時間制御動作指令だけでなく、定常動作指令を作成する部分もある。

最短時間制御動作時は、回転状態を検出するためのエンコーダによりモータの位置をパルス信号として DSP ボードに取り込み、与えられた目標値からの偏差  $e$  と偏差の時間微分値  $\dot{e}$  を演算により求め、 $e - \dot{e}$  位相面上での動作点の位置から操作信号である電圧の方向を判定する。その結果、動作指令は許容電力の最大値がモータに加わるようなゲート信号としてドライバボードに送られる。ドライバボードではパルス変調され

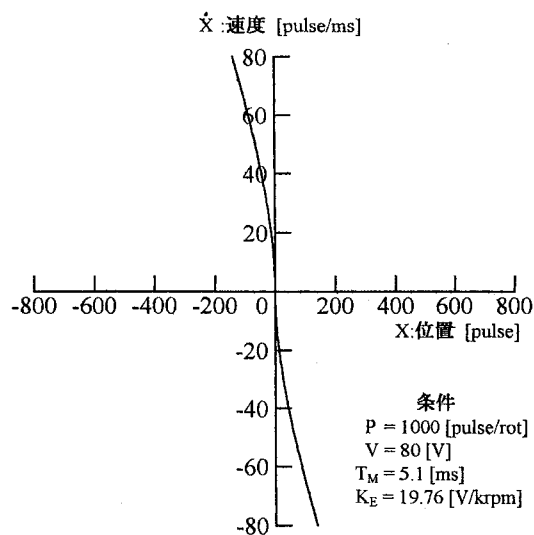


図 5 DC モータの最短時間制御の切り替え線

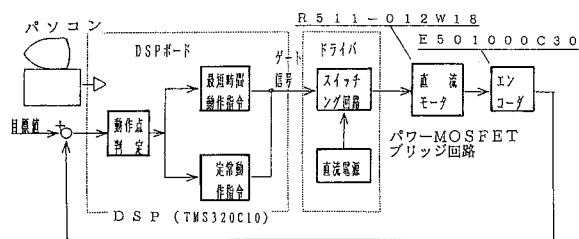


図 6 DC モータの最短時間制御システム

た直流電圧 (PWM 波, 周波数 20kHz) を作り, その平均電圧でモータを回転させる。そして, 動作点が切り替え線にくれば, 逆向きの最大電圧を引加するゲート信号がドライバに与えられ, 動作点は目標値へと移動させられる。実際には, 最短時間制御動作だけを続けていれば, 動作点が目標値の近くなると脈動動作となってしまうので, 制御動作を定常動作指令に切りかえ, 小さな偏差とその微分値に対応した PWM 波が加わるように設計し, 微妙な操作変数の調整により, 目標値への精度の高い追従性を持つシステムを構成する。

### 3. デジタル制御学習支援のための実験装置

工業高校, 工業高専や教員養成学部におけるデジタル制御の学習を支援をするためのシステムとして, 2. で述べた DSP による DC モータの最短時間制御システムとパソコンを組み合わせた実験装置を構築した。この制御実験装置の構成は, パソコンの拡張スロットに設置する DSP ボード, これと外部に接続するモータドライバのボード及びエンコーダを結合したサーボモータから構成される。

#### 3. 1 DSP ボードの構成

DSP ボードはパソコンの拡張用スロットに挿入して使用するものとし, そのインターフェースには次の機能を持たせている。

- (1) パソコンから DSP を起動, 停止できる。
- (2) メモリを共有し, DSP とパソコンから同時にアクセスできる。

図7は DSP ボードのブロック図である。DSP にはシンプルな DSP として知られている TMS320C10(T社)を採用した。このボードは DSP とメモリ, I/O ポート, カウンタ及びアドレスデコーダなどで構成されている。その周辺回路を図8, 図9に示す。使用した DSP は内部または外部クロック

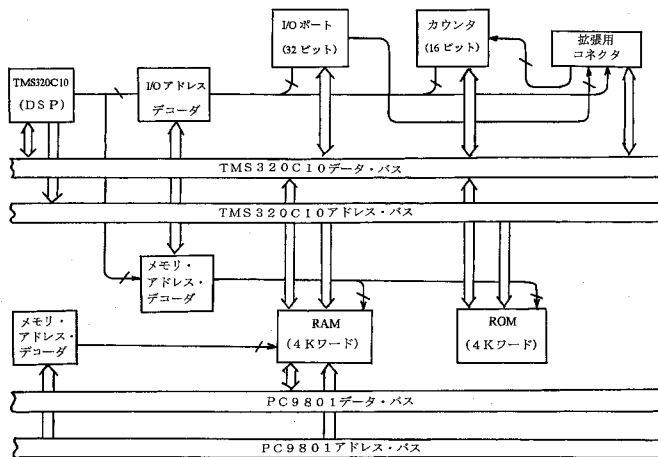


図7 DSP ボードのブロックダイアグラム

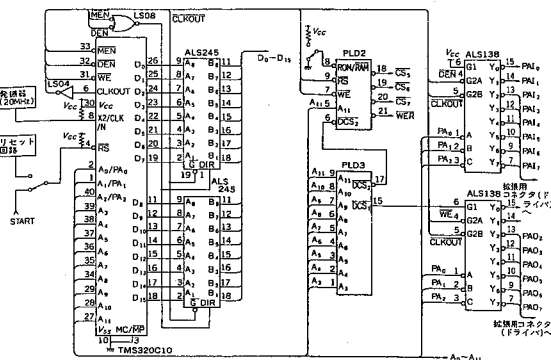


図8 DSP 周辺回路 その1

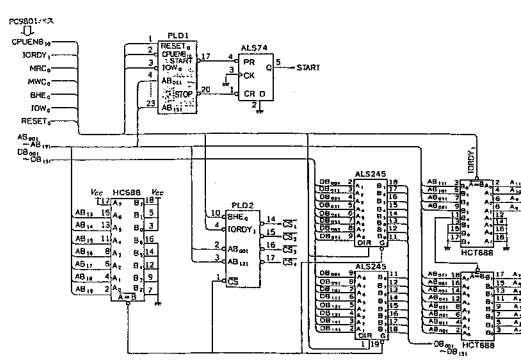


図9 DSP 周辺回路 その2

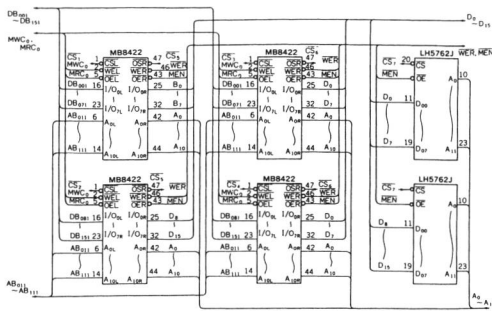


図10 メモリ回路

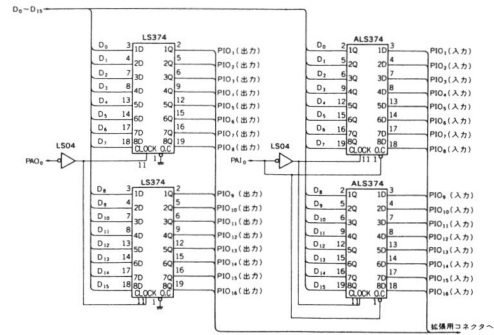


図11 I/O 回路

クを選択できるが、本実験装置では 20MHz のクロックを外部から供給している。データバスは ALS 245 を介してメモリ、I/O ポート、カウンタ及びパソコンの拡張用コネクタへ接続している。図 8 においては、DSP の起動および停止を行う  $\overline{RS}$  端子は、パソコンからコントロールできるように、START 側に接続して使用している。

図10はメモリ回路である。DSP 及びパソコンの両者からアクセス可能なデュアルポート RAM による共有 RAM 方式を採用し、高速なデータ転送を可能にした。図11は I/O 回路で、入力出力共に16ビットの PIO を構成した。そのうちの3ビットを制御パルス出力用 ( $\overline{CWP}$ ,  $\overline{CCWP}$ ,  $\overline{ENB}$ ) として使用した。

写真1が DSP ボードの外観である。

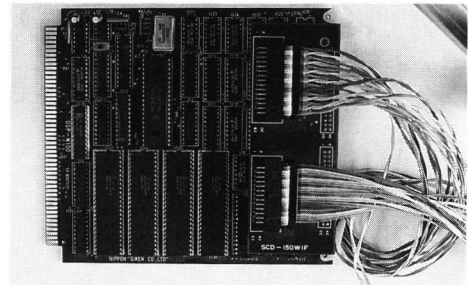


写真1 DSP ボードの外観

### 3. 2 モータドライバの構成

次に DC モータドライバについて説明する。DC モータをデジタル的な制御動作を行うために、モータをパルス (PWM 波) で回転させる方式の設計を行った。モータをパルスでドライブする場合は、回転をスムーズにさせるため、モータのインダクタンスと抵抗による時定数より十分に短いパルスで駆動する。

図12は指令パルス、エンコーダ・パルス入力部の回路である。指令パルス ( $\overline{CW}$  及び  $\overline{CCW}$ ) は、パルスジェネレータなどから入力され、4ビットのアップダウン・カウンタでカウントされ DSP のデータバス ( $D_0 \sim D_3$ ) に読み込まれる。本実験装置の構成では、指令パルスをパソコンから直接 DSP に与えるのでこの部分は使用しない。モータの回転状態を与えるエンコーダのパルスはドライバに入力された後、パルス弁別回路を経由してアップダウン・パルスに変換され、更にアップダウン・カウンタでカウントされ、DSP のデータバス ( $D_4 \sim D_7$ ) に読み込まれる。

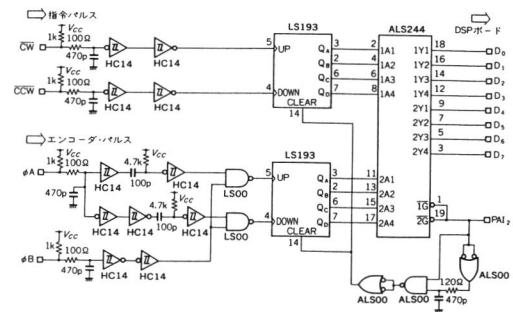


図12 指令パルス、エンコーダ、パルス入力部

図13は駆動パルス発生回路である。この部分で実際にモータを駆動するパルスが発生させる。発振回路、カウンタ及びラッチなどで構成し、PWM 波方式のパルス ( $\overline{CWP}$ ,  $\overline{CCWP}$ ) を発

生させる。PWM 波の周波数は20KHz，パルス幅の分解能は約0.2 $\mu$ 秒である。

図14が，制御パルス入力，ドライブ回路である。モータのドライブ回路にはいろいろな方式があるが，ここでは，(1) 被ドライブ素子にはパワー MOSFET を使用し，(2) ドライブ段とパワー段は絶縁し，(3) ブリッジ方式のスイッチング方式で，(4) そのスイッチング周波数は最高20 KHz として設計した。

図15がスイッチング回路である。スイッチング

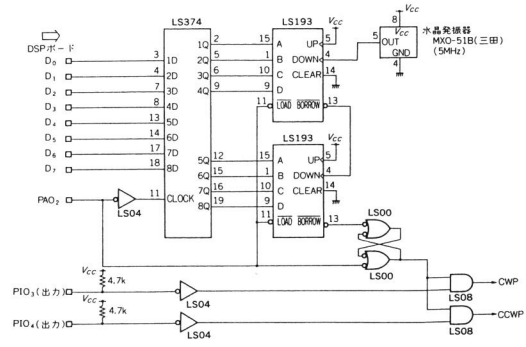


図13 駆動パルス発生回路

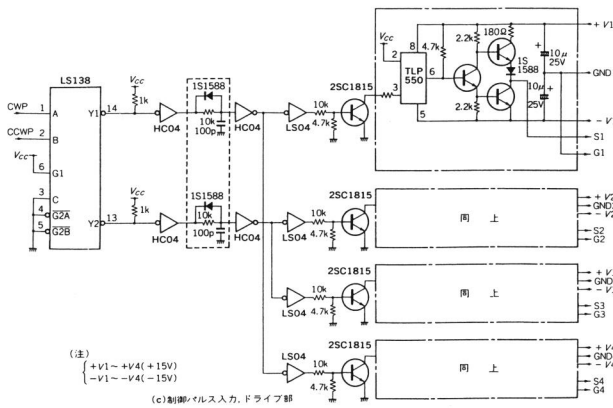


図14 制御パルス入力，ドライブ回路

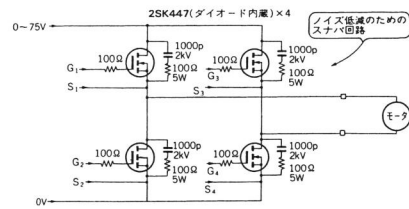


図15 スイッチング回路

速度が速く，駆動回路が簡単であり，かつ，逆回復時間が速いフライホイール・ダイオードが内臓されたタイプがあるなどの理由で MOSFET を採用している。

なお，モータドライブ回路には，次の機能を持たせてある。

- (1) 任意波形の追従特性も計測できる。
- (2) モータへ流れ込む電流を制限する。
- (3) 過電流が流れた場合，自動的にモータが停止する。
- (4) スイッチ部負荷温度が上がると警報がなる。

写真2がこのモータドライバ部とエンコーダ付き DC モータで構成した制御装置本体の外観である。

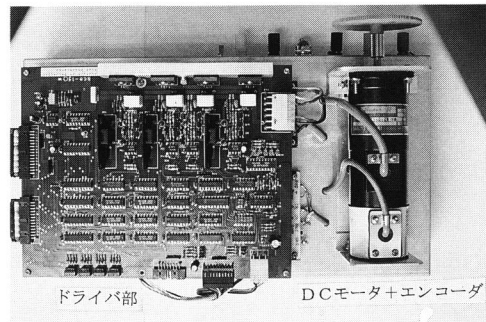


写真2 ドライバ部とエンコーダ付 DCモータからなる制御装置本体の外観

### 3. 3 ソフトウェアの構成

学習支援のためのソフトウェア [7]，[8] は，パソコン上で動作する実験管理メニューを備えたプログラムと，実際にモータをデジタル制御する DSP 上で動作するプログラムから構成される。一般的に DSP は機器に組み込まれる形で使われるので，必要なデータやプログラムは ROM 上に置かれ，処理の開始に先立ち起動時にデータを RAM に転送する方法が取



られる。この制御実験装置では、DSP のマクロアセンブラ言語で作成したプログラムやデータは、パソコン上のローダにより DSP とパソコンの共有 RAM に格納し実行する形式を取っている。従って、ROM は使用していない。パソコンで動作するプログラムはアセンブラ言語と C 言語により作成した。

写真 3 に動作実験の管理メニューを示す。その実験範囲は、

- (1) モータの回転制御がパソコンからの指定（パルスレート）通りに行われるかどうか、
- (2) その回転数制御特性の線形範囲、
- (3) モータの繰り返し運転時のばらつき、すなわち制御指令に対する誤差、
- (4) DSP 利用による最短時間制御のメリットを確認する応答特性、
- (5) 連続指令信号に対するモータの追従特性

を確認あるいは測定するものとした。

写真 4 は実験装置全体の外観である。

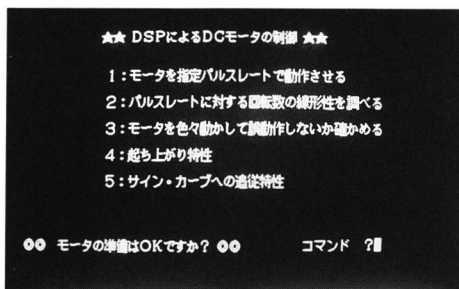


写真 3 動作実験の管理メニュー

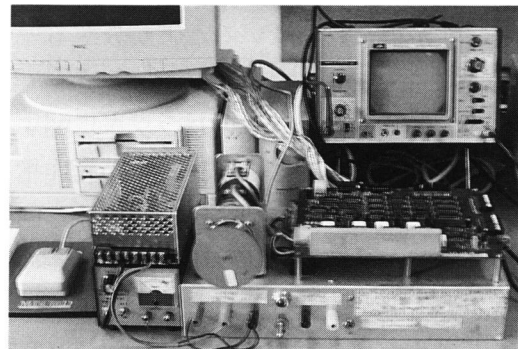


写真 4 実験装置全体の外観

## 4. 実験内容及び結果

本実験装置を DC モータ制御の学習支援に使用した場合をもとにして、DSP による DC モータ制御実験の内容と結果を示す。

### 4. 1 モータの指定パルスレート駆動実験

この実験は、モータが指令通りの回転数で回転するかを確認するためのもので、DSP へパルスレートを送り回転数を測定した結果を表示する。

図16はパルスレート指令を150, 200, 250にした場合のモータに印加される PWM 波のオシロスコープによる観測結果をスケッチしたものである。図17はパルスレートと回転数の実測例であ

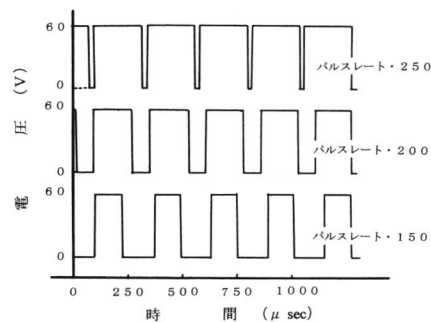


図16 パルスレート設定と PWM 波形

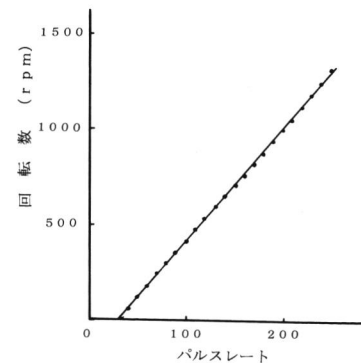


図17 回転特性の実測例

る。この実験結果は、モータに印加する電圧を60 [V] に設定してパルスレートを10パルスレートごとに変化させ、モータの回転数を回転計 [YEW 製] で測定したものである。

#### 4. 2 回転数制御の線形性を調べる実験

モータが制御可能な範囲 ( $-256 < \text{rate} < 256$ ) 内において線形性を有することは、実制御面では欠かせないものである。プログラムでパルスレート値を自動的に可変設定し、正転、逆転時の回転特性の実験が可能なものとして、エンコーダからの回転出力をパソコンに取り込み、パルスレートと回転数の関係を CRT 画面に表示したのが写真5である。これより、モータ駆動時特有の不感帯はあるが、正転、逆転範囲での線形動作はほぼ同様で、誤差も少なく良好な特性が得られるていることが分かる。

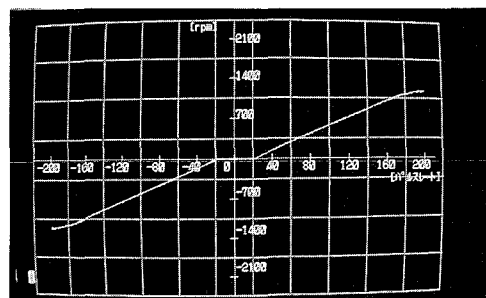


写真5 回転制御の線形性の実験結果

#### 4. 3 モータの回転数のバラツキに関する実験

実際の制御においては、モータへの動作指令は連続的に与えられることが多く、連続動作における回転数のバラツキ誤差の確認が重要なポイントとなる。この実験は、レート指令を連続して繰り返し供給することにより、モータの繰り返し動作に伴うエンコーダ出力を CRT 画面に点として表示し視覚的にバラツキを確認するものである。写真6はその結果である。結果から分かるように、モータの制御が理想的に行われたならば、同じパルスレートに対しては1点となるはずであるが、実際にはバラツキが見られる。この原因は、慣性の影響とモータの界磁極のもつヒステリシス特性のためである。実制御面ではこの程度のバラツキは問題とはならない。

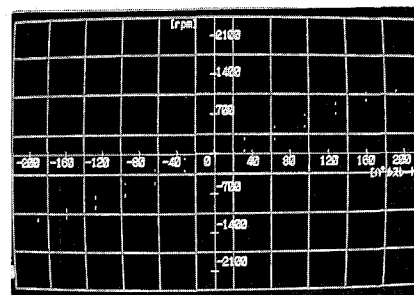


写真6 バラツキに関する実験結果

#### 4. 4 応答特性に関する実験

最短時間制御の最大のメリットは、ステップ状のパルス指令を与えてから、モータの回転がその指令に応じた値に達するまでの応答時間が非常に短い点である。図18に応答特性の実測結果を示す。(a)は従来のPID制御による結果、(b)がDSPを用いた最短時間制御の結果である。両者の比較から、通常のアナログ制御に対し応答特性が良いことで知られるPID制御より、この最短時間制御の応答特性はきわめて優れたものであることが分かる。

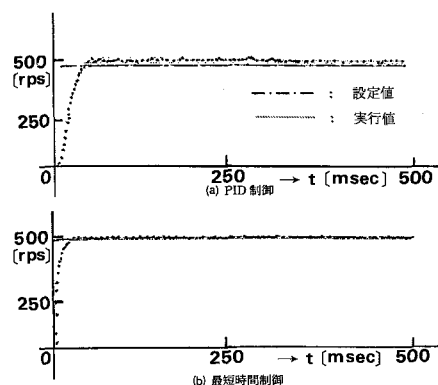


図18 応答特性の実測結果

#### 4.5 サインカーブに対する追従特性に関する実験

実制御においては、任意の連続指令にモータが的確に追従することは、重要なポイントのひとつである。ここではパルスレートをサインカーブ状で与えた場合の、指令値と回転数出力のズレを視覚的に確認できるものとした。写真7に追従特性を CRT 画面に表示した例を示す。写真から分かるように指令値と実効値の間にズレが見られる。これは界磁極を持つインダクタンスによる時定数と回転部の慣性によるものである。ズレの幅は一定であり、回転数変化はサインカーブとなっているので、実制御では問題にならないと考える。

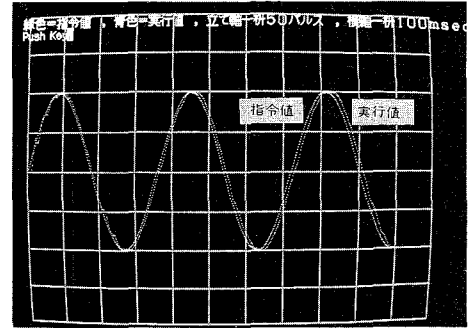


写真7 追従特性例

以上の結果より、この DSP による DC モータの最短時間制御システムは、高速な応答特性をもち高精度な制御が行える制御装置として、十分に実制御面でも使用できるものであることがいえる。

#### 5. 制御実験指導の支援を試行実践した結果

表3に、本装置を学習支援システムとして使用する場合の、実験指導における位置づけと学習展開の例を対象学習者別に示す。

表3 実験指導における位置づけと学習展開

	工業高校 電子科, 情報科	工業高専 電気・電子科	教員養成学部	大学院
DSP による DC モータ制御実験の学習展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>・しくみ理解 (座学・3時間)</li> <li>・実験 (4時間)</li> <li>・応用に関する検討 (2時間)</li> <li>・具体的課題研究 (61時間)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・理論 (座学・2コマ)</li> <li>・実験実習 (2コマ×2)</li> <li>・応用 高精度位置決め制御の実験 (2コマ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・しくみ理解 (座学・1コマ)</li> <li>・実験実習 (2コマ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・理論 (座学・2コマ)</li> <li>・実験実習 (2コマ)</li> <li>・応用 ワンチップマイコン駆動のための ROM 加工実習 (2コマ)</li> </ul>

##### ●工業高校情報科 (3年生) での試行結果

工業高校情報科、課題研究の授業での試行結果について以下に述べる。課題研究 (3テーマの中から) の題材として“DSP の制御応用”を選択した生徒は9名である。授業は、しくみ理解は全員で、実験は2班に分けて行った。具体的課題研究 (本装置と同様な装置の制作、ワンチップマイコン駆動による自動計量器、高精度位置決め制御 (各3名)) に取り組む前に行ったテストとレポート及び実験に関する感想をまとめた結果は、

○テスト結果: DSP と DC モータの最短時間制御とその特徴等の設問に対して4段階評価

A: 4名, B: 3名, C: 2名

- レポート : 共同作成のためいづれも評価はAとなった。
- 感想 : 本実験は大変良いとしたもの3名, 良いとしたもの3名, 2名はどちらともいえないであり, 最短時間制御のしくみ理解はむづかしいと答えたものが半数いた。

以上の結果から, 本装置による実験は理論の理解度に問題を残すが, 具体的課題研究に着手する前提実験としては有効なものであった。

## 6. ま と め

パソコンの計測・制御への応用の一形式として, DSP とパソコンによるデジタル制御学習の支援に使用できる実験装置の構築を行った。デジタル制御装置としては, 高速に演算処理が可能な DSP を使用した DC サーボモータの最短時間制御システムを構築し, 実験結果から, この最短時間制御法が高速応答・高精度性をもつことを確認し, 実制御面でも有用なシステムであることを確かめた。

この実験装置をデジタル制御の学習支援に応用する場合について, 対象とする学習者別にその位置づけと学習展開の例を示した。そして, 工業高校において試行した結果から, 最短時間制御のしくみを理解させることには問題が残るが, 本システムは制御実験の学習支援に有効なものであることを確認した。

なお, DSP やワンチップ・マイコンの応用では, ソフトウェアの ROM 化についての学習が必要であるが, その学習支援システムなどについては別の機会に報告したい。

## 文 献

- [1] 宮内, 稲井, 本田: パソコン支援による周波数変・復調回路の実験指導, 愛媛大学教育学部紀要, 第I部 教育科学 第40巻 第1号, pp.139-152 (1993-9)
- [2] 稲井, 宮内, 本田: 自動周波数特性測定システムの制作と学習応用, 日本産業技術教育学会誌 第37巻 第4号, pp.381-386 (1995-11)
- [3] 宮内, 矢野: パソコンの制御機器応用 —その1— DSP による DC モータの最短時間制御—, 第34回日本産業技術教育学会全国大会講演要旨集, No.405 (1991-7)
- [4] Charles L. Phillips, H. Troy Nagle Jr. 著, 横山, 佐川, 貴家訳: デジタル制御システム—解析と設計, 日刊工業新聞社, pp.293-336, pp.393-406 (1990-9)
- [5] 三上: デジタルシグナルプロセッサ・TMS32010, トランジスタ技術, CQ 出版, pp.401-409 (1986-7)
- [6] 石田, 鎌田: DSP 活用のポイント, 産業図書 (1990-9)
- [7] 宮崎誠一, 宮崎仁: パソコンで学ぶ自動制御の応用学, CQ 出版, pp.53-78, pp.174-186 (1992)
- [8] 横山: C 言語による制作と制御実習入門, KK シータス, pp.195-202, pp.284-295 (1996-3)