

電気炉温度管理システムの開発

森山 実*・小林義一**・堀内富雄***

Development of a System for Temperature Administration in Electric Furnace

Minoru MORIYAMA, Yoshikazu KOBAYASHI and Tomio HORIUCHI

This paper reports the administration system of temperature control by the method of digital PID using personal computer. The features of this system are as follows:

1. Control pattern of the temperature that is stored in disk is flexible.
2. The system is able to control the multiple furnaces (4 units) at the same time.
3. Temperature is recored on the printer and displayed on the CRT.
4. Extension of the system is possible since the personal computer is used.

The precision of temperature control is within $\pm 1^{\circ}\text{C}$ with the tubular electric furnace. This system is necessary to improve the detection circuits of temperature in order to control more precisely.

1 緒 言

電気炉温度制御は、従来アナログ方式による等温制御が主であり、等速加熱、等速冷却或いは任意の制御パターンの温度制御は困難であった。近年、半導体製造技術の進歩に伴い、マイクロコンピュータやICが安価に入手できるようになり、これらを用いたデジタル温度制御が一般的となって来ている。本研究では、パーソナルコンピュータを用いてデジタル方式による高精度の等温保持、等速加熱、等速冷却及び任意の制御パターンの温度制御が可能であり、また同時に複数(最大4)の負荷の温度制御、温度表示及びレコーダ機能を有する金属熱処理用の電気炉温度管理システムを開発した。本システムは汎用パーソナルコンピュータを用いているため、制御パターン数及びステップ数に特に制限もなく、またホストコンピュータとのデータ通信、遠隔制御及びシステムの拡張等に対応できる。以下、これについて報告する。

2 仕 様

開発したシステムの仕様を Table 1 に示す。金属熱処理用としての電気炉温度制御には、単純な等温制御やプログラム温度制御、さらにより均一な温度制御のために複数のヒーター

* 機械工学科 講師

** 機械工学科 教授

*** 機械工学科 技官

原稿受付 昭和63年9月7日

Table 1 Specification

Control type	PID
Control channel	4
Control range	R. T. to 1000 deg. cen.
Control precision	±2 deg. cen.
Control cycle	Option
Control pattern	Hold, Cycle, Timer, Free
Power control device	Triac
Temperature display and record	CRT and Printer
Storage of control data	Floppy disk

を配置した電気炉のような、複数の負荷に対する同一温度制御などがある。従来、これらの温度制御には制御対象と同数の制御機器（電力制御機器を含む）や記録計を必要とした。本システムでは、これらすべての用途に対応できるようにパーソナルコンピュータ（以下パソコンという）を用いて、同時に4系統の、任意の制御パターンの温度制御を可能とし、またPID制御及びトライアックを用いた位相制御による電気炉の電力制御を行い、室温（R. T.）から1000°Cの温度範囲、±2°Cの制御精度を目標としている。さらに、CRTディスプレイに設定温度、計測温度をグラフ及びテーブル形式で常時表示し、その他、最高/最低温度、極大/極小温度、操作量も併せて表示する。また、これらの情報はプリンターにも出力可能である。尚、一度登録した制御パターンはフロッピーディスクに格納しておくことにより、複雑な制御パターンの温度管理も手軽に行うことができる。

3 ハードウェア

3-1 ハードウェアの構成

Fig. 1 にハードウェアの構成を示す。ハードウェアとしては温度制御及び周辺機器制御用のパソコン本体とフロッピーディスクドライブ装置（FDD）、CRTディスプレイ、プリンター、キーボード、デジタルI/Oボード等の周辺機器、さらにコンピュータ始動信号発生回路、ゼロクロス検出回路、カウンタ回路、トライアック駆動回路、熱電対用直流増幅器等の温度制御機器及び電源回路から成っている。

3-2 ゼロクロス検出回路

Fig. 2 に電気炉電源のゼロクロス検出回路⁽⁴⁾を示し、Fig. 3 にこの回路の各位置での信号チャートを示す。ここでは電源のゼロクロスポイントを検出し、周期が1/60秒と1/120秒のゼロクロスパルスを発生させる。ゼロクロスポイントは、電気炉電源（Fig. 3 ⑥）に対し、互いに逆向きに並列接続した2個のフォトカプラ（PC817）により検出する。フォトカプラの許容電流は約50mAなので、10kΩの電流制限抵抗を用いるとすれば、ここで生じる電力Pは $P = E^2/R = 100^2/10 \times 10^3 = 1W$ であり、余裕を見て10kΩ/10Wの抵抗を用いる。フ

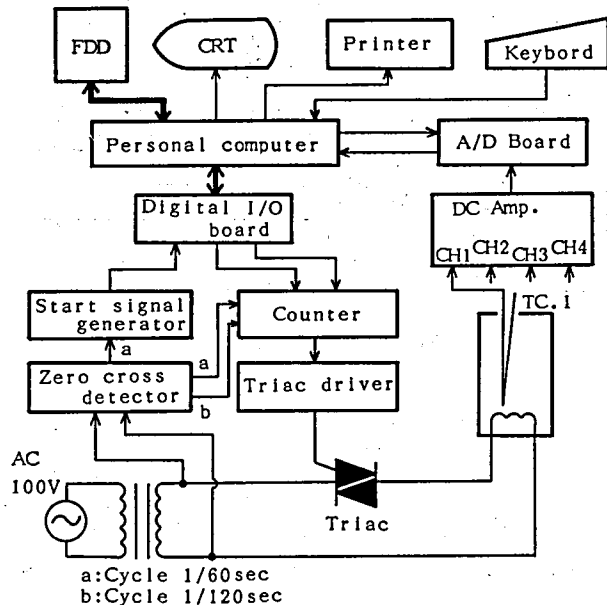


Fig. 1 Hardware

フォトカプラは電源電圧がしきい値 (1.4V) よりも高くなると発光するので、0 ~ ±1.4V の間を除いていずれかが発光する (Fig. 3 ㉑, ㉒). 2入力 NAND GATE (SN74LS00) の出力は、2入力がいずれもが 3.4kΩ の抵抗によりプルアップされているので、電源電圧が 0 ~ ±1.4V の間で H, L に変化するゼロクロスパルスが発生する。続くインバータでは、これを反転する (Fig. 3 ㉓). 電源周波数が 60Hz の時は、ゼロクロスパルスの周期は 1/120 秒である。インバータ出力は、カウンタ回路と波形整形用の単安定マルチバイブレータ (SN74LS123)^② へ送られる。ここで作られるパルスの幅 T (ms) は、 $T = 0.45RC$ から得られる。R=10kΩ, C=0.6μF とすると、 $T = 2.7ms$ となる (Fig. 3 ㉔). この出力は、さらにシンクロナス 4bit UP/DOWN カウンタ (SN74LS193)^② へ送られ、ここで 1/2 (周期 : 1/60 秒) に分周され (Fig. 3 ㉕), カウンタ回路及びコンピュータ 始動信号発生回路へ送られる。

3-3 コンピュータ始動信号発生回路

Fig. 4 にコンピュータ始動信号発生回路を示し、Fig. 5 にこの回路の各位置における信号チャートを示す。この回路では、ゼロクロス検出回路で得られた 1/60 秒周期のパルス信号 (Fig. 5 ㉖) を分周し、4 秒周期のシステム始動信号及び制御信号を発生する。分周には前述の 4bit カウンタ IC (SN74LS193) を用いた。このカウンタは予めデータをプリセットしておき、ダウンカウントすると、出力がゼロの時にポロー信号を発生する。4 秒周期のパルス信号を作るには、1/60 秒周期のパルスを 239 (0EFH) カウントするようなデータをプリセットしなければならない。そこで 2 個のカウンタを用い、まず 1 段目で 1/16 に分周し、さらに 2 段目で 1/15 に分周して 4 秒周期のパルス信号を得る。これらを Fig. 5 ㉗, ㉘) に示す。ところで、ここで用いたカウンタのデータプリセットはカウンタがポロー信号を発生し

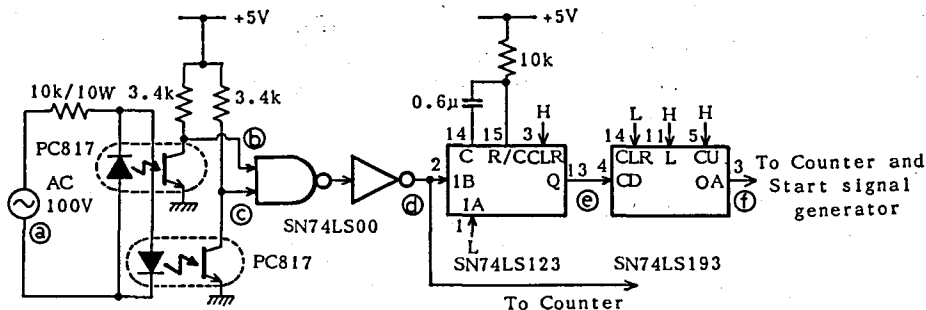


Fig. 2 Zero cross detector

ていない時に行わなければならない。プリセットデータは、予めハード的（端子番号15, 1, 10, 9）に与えておき、単安定マルチバイブレータ（SN74LS123）を2個用いてプリセット（ロード）信号を作り、データプリセットする。カウンタのポロー信号とプリセット信号のタイミングをずらせるために、まず1段目のバイブレータでパルスを遅延させる。ここでの出力パルス幅は、1/60秒（約16.7ms）以上必要であり、約45msとなるように、 $C=0.1\mu\text{F}$ 、 $R=1\text{M}\Omega$ とした（Fig. 5 ④）。またプリセット信号のパルス幅は、約2.7msとなるように $C=0.6\mu\text{F}$ 、 $R=10\text{k}\Omega$ とした（Fig. 5 ⑤）。以上のようにして得られた Fig. 5 ⑥に示すパルス信号のパルス幅は約1/60秒であり、やや狭いためにコンピュータが検出ミスを生じる恐れもあるので、R-Sフリップフロップ回路を用いてパルス幅を広げる。セット及びリセット信号には、それぞれ、2段目と1段目の各カウンタICのポロー信号を用いる。これらをR-Sフリップフロップ回路に入力すると、Fig. 5 ⑦に示すパルス信号（周期：4秒、幅：16T（267ms））が得られ、これをコンピュータ始動信号及び温度制御信号として、デジタルI/OボードのBポートへ送る。

3-4 カウンタ回路

Fig. 6に、パソコンで計算したデータを、トライアック駆動回路の制御信号に変換するためのカウンタ回路を示し、Fig. 7にこの回路の各位置での信号チャートを示す。カウンタには前述の4bitカウンタ（SN74LS193）を2個用いる。セットデータは、パソコンからデジタルI/OボードのAポートを介して、カウンタのデータ入力端子に加えられる。Fig. 7 ⑥で示すゼロクロス検出回路から、1/60秒周期のパルス信号をダウンカウントし、それぞれのカウンタの値がゼロになるとポロー信号が出力される。2段目のカウンタのポロー信号は、R-Sフリップフロップ回路のセット信号として用いられ、またデジタルI/O

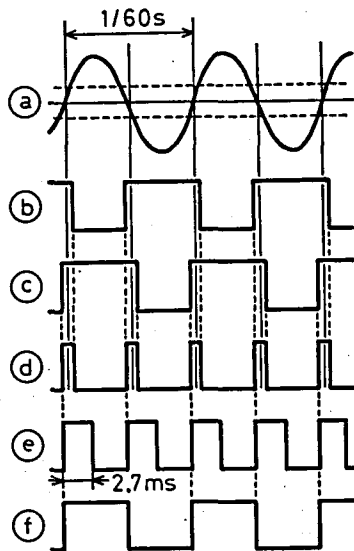


Fig. 3 Signal chart of the Zero cross detector

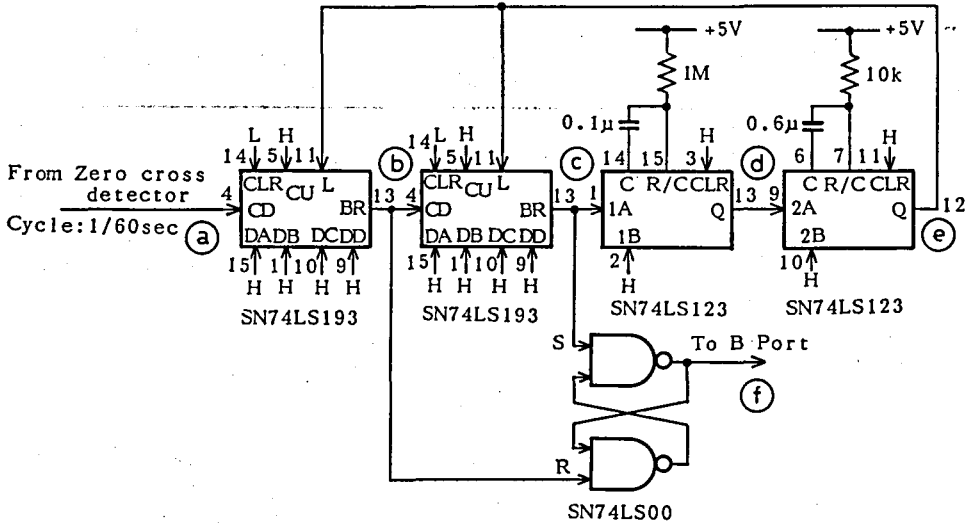


Fig. 4 Computer start signal generator

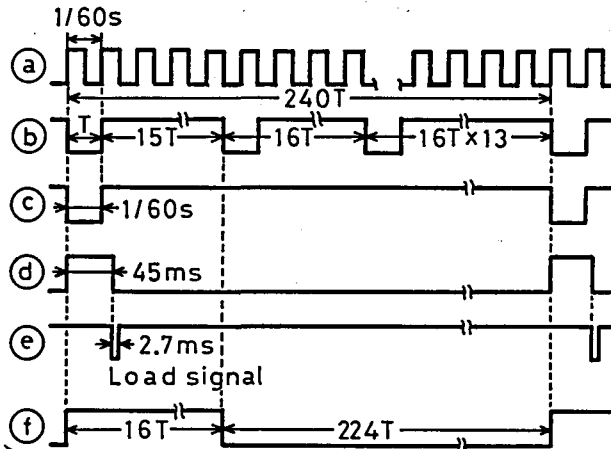


Fig. 5 Signal chart of the Computer start signal generator

OボードのCポートからの信号は、カウンタのプリセット信号及びR-Sフリップフロップ回路のリセット信号として用いられる。システムに電源が入ると、1/60秒周期のゼロクロスパルスがカウンタに入力され、パソコンからはトライアック駆動データがカウンタに与えられる (Fig. 7 ㉔) とともに、プリセットパルス (Load signal: Fig. 7 ㉓) がカウンタとR-Sフリップフロップ回路に加えられる。これによりカウンタはデータをプリセットし、またR-Sフリップフロップ回路はリセットされる。この時から、カウントは与えられたデータ数だけゼロクロスパルスをダウンカウントした後、2段目のカウンタよりポロー信号 (Fig. 7 ㉒) が出力され、これによりR-Sフリップフロップはセットされる (Fig. 7

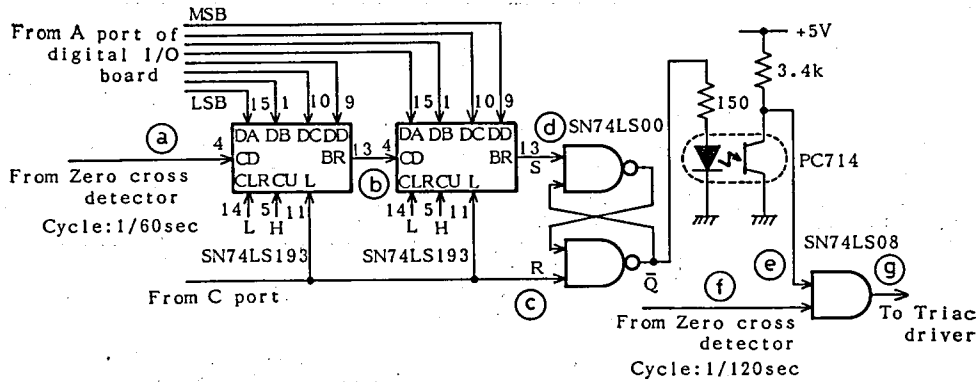


Fig. 6 Counter

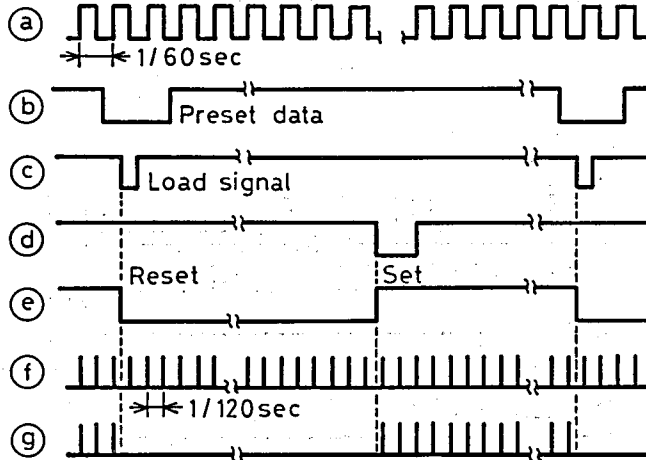


Fig. 7 Signal chart of the Counter

Ⓔ). Fig. 6 でR-Sフリップフロップの出力としてはQが用いられているが、これはフリップフロップの出力部と2入力 AND GATE (SN74LS08) の間に、アイソレート用のフォトカプラ (PC714) が接続されており、この部分で信号が反転するためである。 Fig. 7 Ⓔの信号は、2入力 AND GATE にゼロクロス検出回路からの1/120秒のパルス (Fig. 7 Ⓕ) と共に加えられ、Fig. 7 Ⓔの信号を作り、トライアック駆動回路へ送られる。

3-5 トライアック駆動回路

Fig. 8 にトライアック駆動回路を示し、Fig. 9 にこの回路の各位置での信号チャートを示す。カウンタ回路からのトライアック駆動信号 (Fig. 9 Ⓐ) は、 $1k\Omega$ の抵抗を介して1段目のトランジスタ (2SC458) のベースに加えられ、2段目のトランジスタ (2SC793) のベース電流を増幅する。2段目のトランジスタのコレクタからエミッタに電流が流れると、同時にパルストランスの1次側にも電流が流れ、2次側には巻数に比例した電圧が発生する。この信号をトライアックのゲートに加え、負荷の電力制御を行う (Fig. 9 Ⓒ)。ここで用い

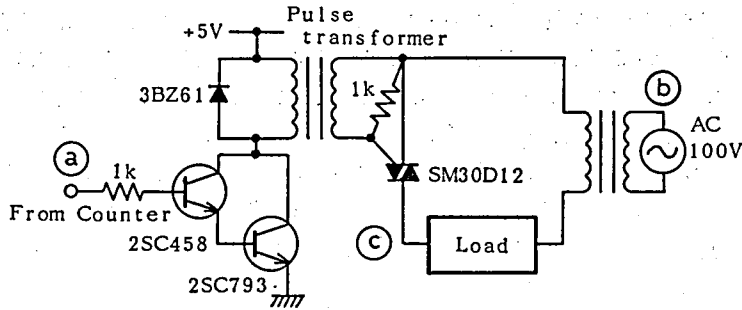


Fig. 8 Triac driver

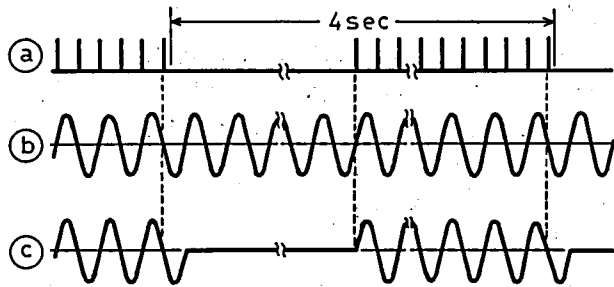


Fig. 9 Signal chart of the Triac driver

たトライアック (SM30D12) の最大定格は繰り返しピーク・オフ電圧 (V_{DRM}): 200V, 定格実効オン電流 ($I_{T(RMS)}$): 30Aである。

3-6 熱電対用直流増幅回路

Fig. 10 は熱電対用の直流増幅回路を示す。熱電対からの信号は、温度補償用の冷接点容器及び高周波ノイズ除去用のローパスフィルターを経て、直流増幅器に送られる。ローパスフィルターの通過帯域を約 3Hz とすれば、 $f_c = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ から、 $C = 100\mu F$ とすると、 $L = 1/(4\pi^2 f_c^2 C) = 1/(4 * \pi^2 * 3^2 * 100 * 10^{-6}) \approx 30H$ となり、これより、 $C = 100\mu F$, $L = 30H$ とする。信号増幅はオペアンプ ($\mu A741$) を用いて非反転増幅する。ここでは、熱電対の

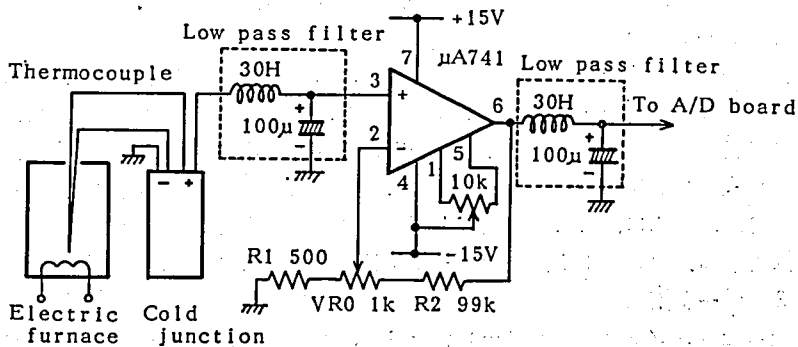


Fig. 10 DC Amp. for Thermocouple

熱起電力 (0~50mA) を A/D コンバータの入力範囲まで増幅するために、ゲインを100とする。Fig. 10 においてゲインを K とすると、抵抗 R_1 , R_2 は $K = (1 + R_2/R_1)$ から、 $R_1 = 1k\Omega$ のとき、 $R_2 = R_1 * K - 1 = 99k\Omega$ となる。ここではゲインを任意に変えられるように、 R_1 と R_2 の中間に可変抵抗器 ($VR_0 = 1k\Omega$) を入れ、 $R_1 = 500\Omega$, $R_2 = 99k\Omega$ とすれば、ゲインは67から201の間で可変できる。オペアンプで増幅した信号は、入力側と同じローパスフィルタで高周波ノイズを除去した後、12bit 8ch の A/D コンバータへ送られる。また、オフセット調節は1番ピンと5番ピンの間に取り付けられた $10k\Omega$ の可変抵抗器により行う。

4 ソフトウェア

4-1 プログラム構成

本システムを運用・制御するソフトウェアは、次に示すように大別して2個のプログラムから成る。制御データ管理プログラムは Fig. 11 に示すように、温度制御パターンデータの表示、登録、削除を行う。また温度制御プログラムは、Fig. 12, 13 に示すように、温度制御メインプログラムとPID制御サブプログラムを用いて負荷の温度制御を行う。

1. 制御データ管理プログラム

- ① データ表示
- ② データ登録
- ③ データ削除

2. 温度制御プログラム

- ① 温度制御メインプログラム
- ② PID制御サブプログラム

4-2 制御データ管理プログラム

4-2-1 データ表示

Fig. 11 に示すように、メインプログラムを起動した後、メニューでデータ表示モード①を選択すると、このプログラムが実行される。はじめに、各制御パターンデータの内容を表すコメントが、データファイルより読み込まれてCRTに表示される。ここで表示したい制御パターンデータのファイル番号をキーボードより入力すると、データファイルより制御パターンが読み込まれ、グラフ及びテーブル形式でCRTに表示される。

4-2-2 データ登録

新規に制御パターンデータを登録する場合には、このプログラムを用いる。Fig. 11 に示すように、メニューでデータ登録モード②を選択し、制御パターンデータとして、始点から終点までの各目標点の時間と温度をキーボードから入力する。これらのデータは、グラフ及びテーブル形式でCRTに表示されるので、これより入力データを確認する。データはファイルに格納され、さらに、これらの内容を表すコメントの入力要求が成されるので、キーボードより入力する。コメントも、またファイル番号をつけてファイルに格納される。

4-2-3 データ削除

不用となったコメントと制御パターンデータは、このプログラムを用いてデータファイルより削除し、ファイルの有効利用を図る。Fig. 11 に示すように、メニューでデータ削除モ

ード③を選択し、削除したいファイル番号をキーボードより入力する。すると、データファイルからコメントが読み込まれた後、指定したコメントのみ削除される。続いて、同様にして制御パターンデータが削除される。

4-3 温度制御プログラム

本プログラムは電気炉の温度計測、各種温度のグラフ及びテーブル形式での表示、操作量の計算など電気炉温度管理に関わる各種サブプログラムから成るが、これらをまとめて温度制御メインプログラムとしている。ただし、温度制御の中核である操作量の計算部分については、PID制御サブプログラムとして分割している。

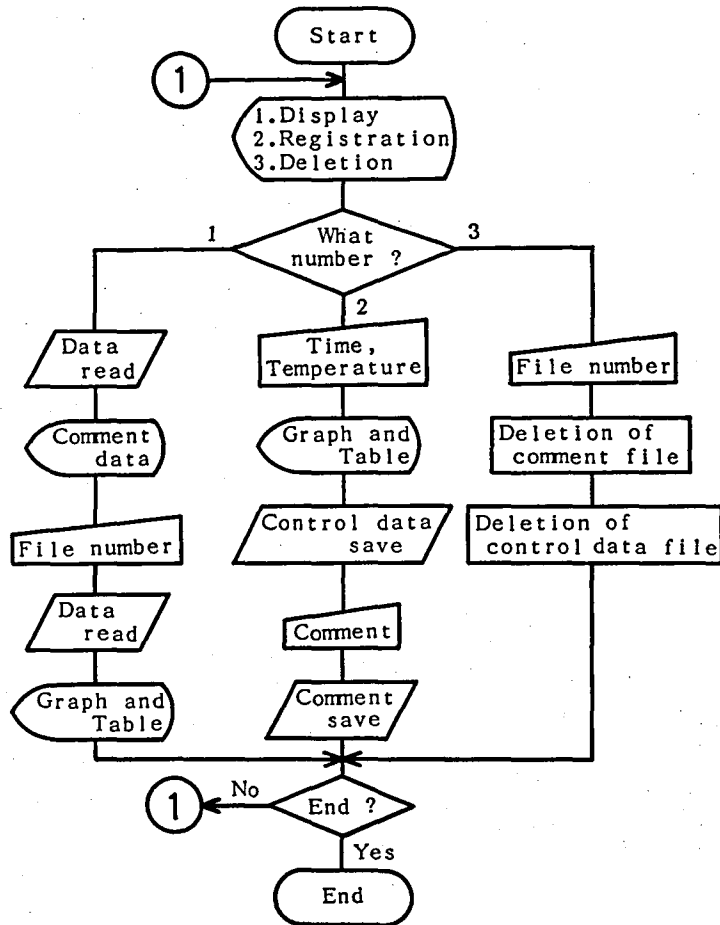


Fig. 11 Flow chart of the Control data management program

4-3-1 温度制御メインプログラム

Fig. 12 に示すように、本プログラムを実行すると、Initialize のステップにおいて、各種データ及びデジタル I/O ボードの初期設定が行われ、続いて CRT を用い、対話形式で

チャンネルの使用/未使用フラグとPID制御における時定数(T)及びむだ時間(L)をキー入力する。Control Data Read では、使用チャンネルの温度制御パターンデータ(1目盛の時間、目標時間・温度)がデータファイルより読み込まれ、続くGraph and Tableのステップにおいて、これらのデータはCRTに表示される。またデータファイルより読み込まれた温度制御パターンデータ(目標時間・温度)は、傾き(温度/時間)に変換され、続くPID制御サブプログラムにおいて用いられる。これらがすべて終了すると、A/DボードにPPI(Programmable Peripheral Interface: 8255A)の初期設定データと使用チャンネルデータが送られるとともに、A/Dボードからの温度制御スタート信号が検査され、これが検出された時、次のステップが実行される。A/Dボードからのスタート信号を受信すると、PID制御サブプログラムが4回実行され、各チャンネルの操作量が計算される。CSS Detectionでは、デジタルI/Oボードから送信される制御サイクルパルスを検出する。このパルスは、ゼロクロス検出回路及びコンピュータ始動信号発生回路において作られ、周期は4秒である。制御サイクルパルスが検出されると、各チャンネル毎の操作量がデジタルI/Oボード、カウンタ回路を経由して、トライアック駆動回路に出力される。BLK End?では、一制御区間(例えば等速加熱区間)が終了したか否かが検査され、もし終了ならば、Data Conversionのステップにおいて、次の制御区間の傾き(温度/時間)が計算される。CRL End?では各チャンネルの制御終了が検査され、制御を開始してからの経過時間が、予め設定した制御終了時間を越えていた時は、このプログラムは終了する。経過時間が制御終了時間に達していない時は、4回このループを繰り返した後、PID制御サブプログラムに戻り、以上の各ステップが繰り返される。

4-3-2 PID制御サブプログラム

Fig. 13にPID制御サブプログラムのフローチャートを示す。本プログラムでは、電気炉温度をPID制御するために、4チャンネル分の操作量を計算し、この結果がデジタルI/Oボード、カウンタ回路を経由してトライアック駆動回路へ送られ、トライアックによる電気炉の電力制御が行われる。メインプログラム(Fig. 12)において、カウンタ

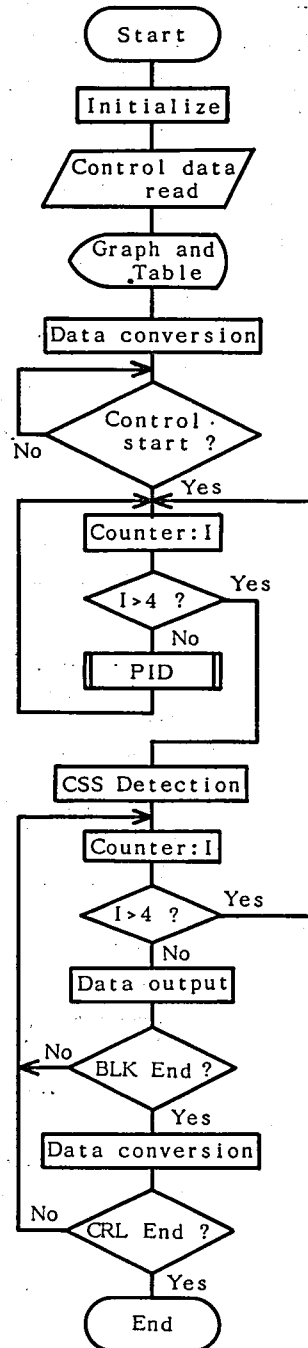


Fig. 12 Flow chart of the Temperature control main program

の値 (I) が 5 未満の間は、本プログラムが繰り返し実行される。このプログラムが実行されると、Temperature Read のステップにおいて、A/Dボードよりデジタル値に変換された熱電対の熱起電力が読み込まれ、同時に、CRTに現在の電気炉温度として表示される。Time Conversion では、制御を開始してからの経過時間が、分単位で計算される。

連続時間系でのPID制御は、操作量を $u(t)$ 、比例ゲインを K 、積分時間を T_I 、微分時間を T_D 、制御偏差を $e(t)$ とすると、

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \dots\dots\dots (1)$$

として表せる。デジタル制御の場合には、サンプリング周期を T_s とし(1)式を離散時間化すると、

$$u(k) = K \left(e(k) + \sum_{m=0}^k \frac{T_s}{T_I} e(m) + \frac{T_D}{T_s} (e(k) - e(k-1)) \right) \dots\dots\dots (2)$$

として与えられる。さらに、ここで $K_P = K$: 比例ゲイン、 $K_I = K T_s / T_I$: 積分項ゲイン、 $K_D = K T_D / T_s$: 微分項ゲインとすると、

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{m=0}^k e(m) + K_D (e(k) - e(k-1)) \dots\dots\dots (3)$$

として表せる。

本プログラムでは速度型制御方式⁽³⁾を用い、その変化分を ΔMV とすると、

$$\begin{aligned} \Delta MV = & K_P (e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) \\ & + K_D (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ はそれぞれ今回、前回、前々回の偏差である。これより今回の操作量を MV_n 、前回の操作量を MV_{n-1} とすれば、

$$MV_n = MV_{n-1} + \Delta MV \dots\dots\dots (5)$$

として与えられ、これをカウンタ回路で変換した後、トライアック駆動回路へ送り、電力制御を行う。

以上のアルゴリズムを基に、Calculation of Deviation のステップでは、予め与えられた制御パターンから今回の目標値を計算し、同時に今回、前回、前々回の偏差も併せて求める。続いて、Data conversion では(4)式及び(5)式を用い、変化分 (ΔMV) と今回の操作量 (MV_n) を計算する。ここで得られた操作量が、温度制御の1サイクル値 (239 : 4秒) よりも大きい場合には、1サイクル値 (239) とし、マイナスとなった場合には今回の操作量をゼロとする。

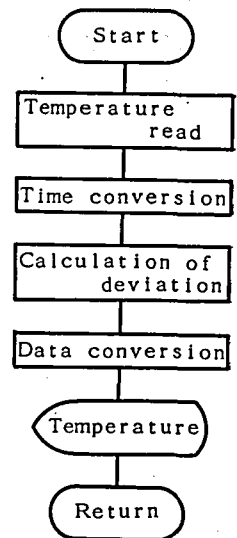


Fig. 13 Flow chart of the PID subprogram

5 試 験 結 果

本システムを管状電気炉（内径：50mm，長さ：500mm，容量：3.5kW）の温度制御に用いて，等温保持試験を行い，性能を検査した．その結果， $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の制御精度が得られ，当初の目標が達成できた．従来，アナログ調節計による温度制御では $\pm 2.5^{\circ}\text{C} \sim \pm 5.0^{\circ}\text{C}$ の制御精度であり，これと比較し，大幅に向上した．金属熱処理用としては，この程度の制御精度でも十分実用可能である．さらに高精度の温度制御を行うには，温度検出系の改善，例えば熱電対のリニアライズ（温度校正結果を予めパソコンに記憶させておき，実行時この結果を用いて温度補正を行う）を行ったり，直流増幅器の出力安定性を改善することが考えられる．

6 総 括

材料学へのパーソナルコンピュータの一応用として，複数の負荷に対し，任意の温度制御パターンが設定でき，さらに温度表示及びレコーダ機能を有する金属熱処理用の電気炉温度管理システムを開発した．当初目標とした制御精度は達成できたが，更に高精度の温度制御を行うには，温度検出系の改善が必要である．

謝 辞

本研究に際し，卒業研究生として助力された機械工学科第16期卒業生 滝沢誠司君及び三沢 仁君の労に対し，心より感謝の意を表します．

参 考 文 献

- (1) 坂巻佳寿美：インターフェイス，1981年5月 p.191
- (2) TTL Application Manual with Data Book，テキサス インストルメンツ（1981）
- (3) 成田誠之助：デジタルシステム制御，昭晃堂（1980）p.157