

電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (II)

プロセスコントローラ的设计¹⁾

船田 周*・橋本 康*・大政謙次*・豊住順一郎**

愛媛大学農学部*

日本電子株式会社**

ファイトロニクスのための D.D.C. の解析や設計のためには、プロセス、コンピュータ、プロセスコントローラの3つのサブシステムが検討されねばならない。この論文では、コンピュータとプロセスとを結びつけるインターフェイスからなるプロセスコントローラ的设计例を示し、その特性を明らかにした。そして、前報で明らかにされたプロセスの特性と本報で明らかにされたプロセスコントローラの特長にもとづき、制御アルゴリズムの例として温度制御をとり、D.D.C. システムの検討を行った。その結果、フィードフォワードにもとづく D.D.C. を行うと、冷却オンオフの整定時間が通常のフィードバック制御にくらべて約 1/3 に減った。

昭和48年10月3日受付

1. ま え が き

植物生育プロセス制御を電算機で行ういわゆる D.D.C. システムは、プロセスとコンピュータならびにそれらを結びつけるプロセスコントローラの3つのサブシステムに分割することができよう。すでに第1報¹⁾でプロセスの特性につき、九大と小糸工業の共同で試作され²⁾、本学でも採用した現在最も高性能で一般性をもつといわれるグロースキャビネットについて、D.D.C. のプロセスとその特性について検討を行った。本報では、コンピュータのインターフェイスを中心とした D.D.C. におけるプロセスコントローラを設計したので、その特性について述べ、あわせてこのプロセスコントローラを用いた D.D.C. システムの温度制御について検討を行ったので報告する。

2. プロセスコントローラ的设计ならびに特性

Fig. 1 に本設計の D.D.C. システムにおけるハードの構成図を示す。

Fig. 2 にこのシステムの情報の流れ図を示す。

ついで Photo. 1, Photo. 2 にコンピュータサイド、Photo. 3, Photo. 4 にプロセスサイドの写真を示す。Photo. 1 はコンピュータシステムの正面図で、Photo. 2 はインターフェイスである。Photo. 3 はプロセスならびにその操作部、Photo. 4 は冷凍機とその左側にコンピュータとの接続箱がみられる。ついで情報の細部について述べれば、プロセスで検出される制御量は 0~10 mV の直流電圧に変換され、プロセスサイドで 0~1V に増幅され (Fig. 1 AMP.), コンピュータサイドに伝送される。この情報は C.P.U. (Central processing unit) からの命令によりマルチプレクサで選択され、8ビットの A-D コンバータでデジタルデータ化される。このデジタルデータは、C.P.U. で演算処理が行われ、プロセスの炭酸ガス制御等のリレー操作部へはデジタルデータのまま、他方アナログ操作部へは D-A コンバータを通してアナログデータとして伝送されるシステムである。すなわち、温湿度の制御については Fig. 1 にその流れを示したが、D-A 変換命令により 8ビットデジタル信号が、それぞれの D-A 変換器で、0~10V のアナログ量に変換かつ伝送され、プロセス側で 0~10 mV にアッテネートされた後、V.C.T. で 5~25 mA の電流

¹⁾ Shu FUNADA,* Yasushi HASHIMOTO,* Kenji OMASA* and Junichiro TOYOZUMI** : Fundamental Studies on Biological Process Control by means of Digital Computer. (II) Design of Process Controller.

* Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama.

** Japan Electron Optics Laboratory Co., Ltd., Tokyo.

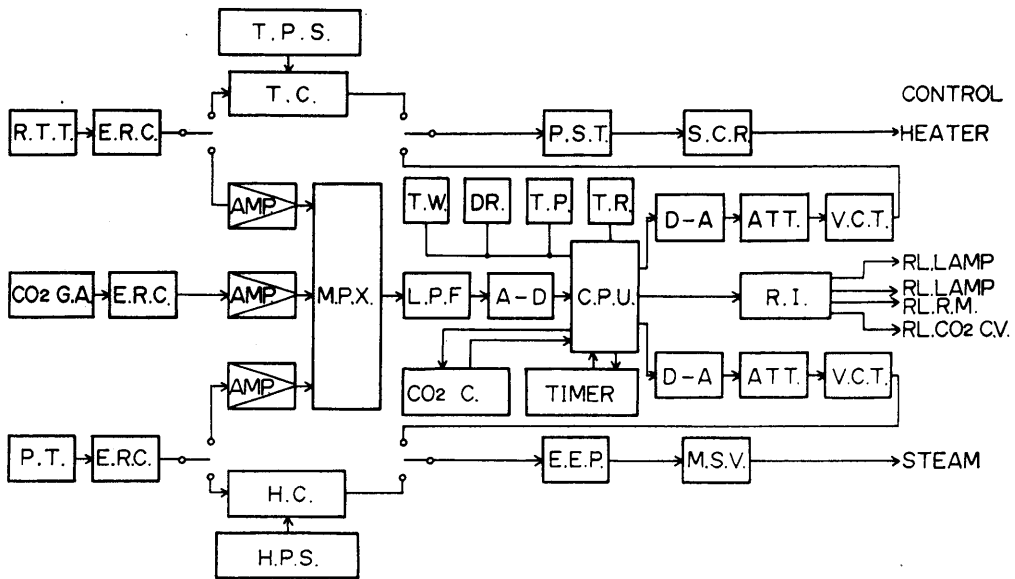


Fig. 1 Block diagram of computer hard system and analogue back up system in D.D.C.

- | | | | |
|----------------------|--|----------------------|-------------------------------|
| R.T.T. | resistance thermometer transmitter | ATT. | attenuator |
| CO ₂ G.A. | CO ₂ gas analyzer | L.P.F. | low pass filter |
| P.T. | psychrometer transmitter | A-D | A-D converter |
| E.R.C. | electronic recording controller | D-A | D-A converter |
| T.P.S. | temperature program set station | T.W. | teletypewriter |
| H.P.S. | humidity program set station | DR. | drum |
| T.C. | temperature P.I.D. controller | T.P. | tape punch |
| H.C. | humidity P.I.D. controller | T.R. | tape reader |
| P.S.T. | pulse signal transmitter | V.C.T. | voltage-current transmitter |
| S.C.R. | S.C.R. electric manipulator | R.I. | relay interface |
| E.E.P. | electric and electronic positioner | CO ₂ C. | CO ₂ controller |
| M.S.V. | modutrol steam valve | RL | relay |
| C.P.U. | central processing unit | R.M. | refrigerating machine |
| AMP. | differential instrumentation amplifier | CO ₂ C.V. | CO ₂ control valve |
| M.P.X. | Hg multiplexor | | |

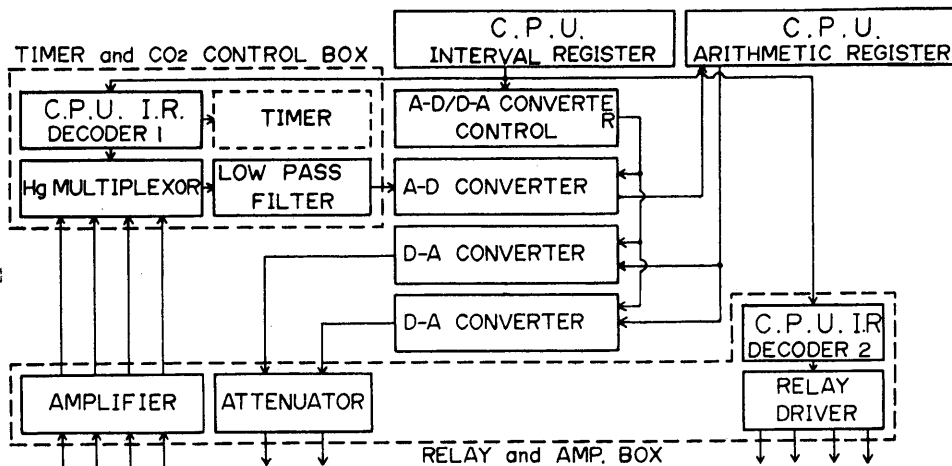


Fig. 2 Block diagram of process controller in D.D.C. system.

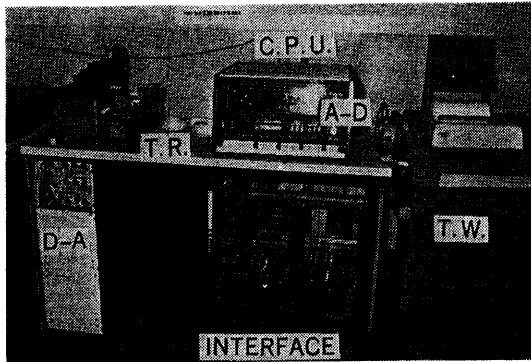


Photo. 1 General view of computer system.

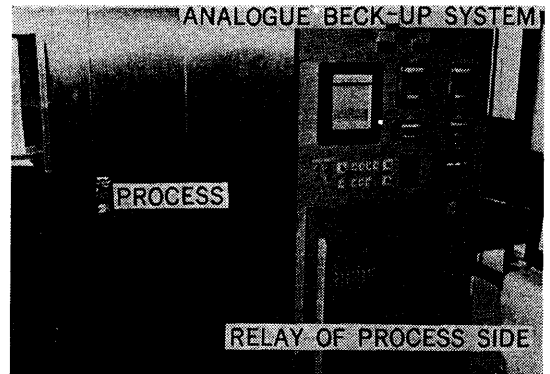


Photo. 3 General view of process side.

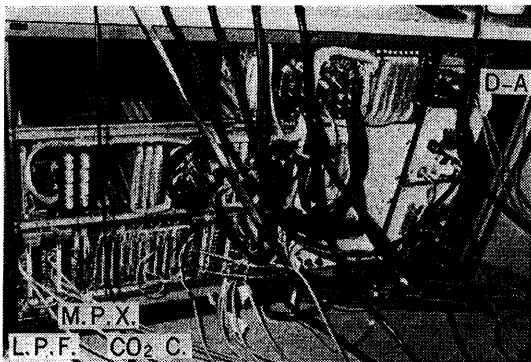


Photo. 2 General view of interface from the backside of computer system.

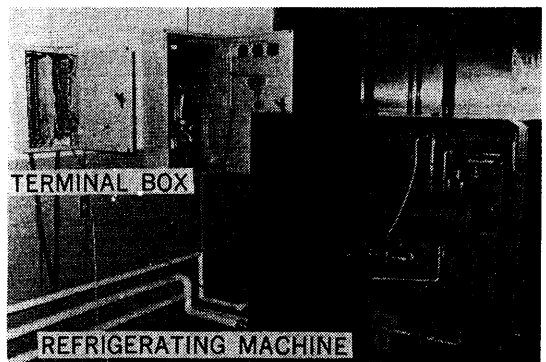


Photo. 4 General view of condensing unit and terminal box of process side.

値に変換され、温度については S.C.R. 電力変換器、湿度についてはモジュトルモータでそれぞれ操作される。炭酸ガス濃度の制御については、炭酸ガス制御弁の開閉回数および open の時間間隔を制御する方法が採用され、C.P.U. からの命令によりリレーがオン・オフされる。なお、炭酸ガス濃度制御弁の開閉時間は 0.5sec である。このシステムでのサンプリング周期の決定は、Skip 命令とタイマの併用により行われる。

Fig. 3 にタイマと後述する炭酸ガス噴射制御システムのブロック線図を示す。タイマはプログラムにより任意の時間（基本信号の整数倍）に設定でき、基本信号は Table 1 に示すようにハード的に選ぶことができる。

Fig. 4 にサンプリング周期を決定する際のタイム・チャートを示す。SET 1 命令により A.R. (Arithmetic register) の情報が I.R. (Interval register) にセットされ、同時に F.F.I. で表わされるフリップフロップにもとづくクロック・ジェネレータが動作する。サンプリング周期は (A.R. の情報) × (基本信号) で決定され、Skip 命令によりプログラムが実行される。サンプリング周期

の変更は、SET 1 命令を改めて出すか、Skip 命令の回復により行われる。

Fig. 5 に炭酸ガス濃度制御を Skip 命令によって行うタイム・チャートを示す。SET 2 命令により A.R. の情報は 8 ビットの I.R. へセットされ T (Sampling interval) を規定する。次に SET 3 命令により A.R. の情報は 8 ビットの Number register へセットされる。SET 2, SET 3 命令を実行するとこのむだ時間は 10 μ sec ~ 60 sec まで可変であるが、この場合 60 sec 後から炭酸ガス弁が規定通りオン・オフする。炭酸ガス濃度制御 END 信号が Skip 3 命令を用いて出される。プロセスサイドのグロースキャビネットの操作部には電源、冷凍機、ヒータ等、微小アナログ信号の伝送にとってノイズになる要素が多い。特に検出値に含まれるノイズは、フィードバック制御系において、直接、制御特性に関係してくるのでその除去は必要不可欠である。ノイズ除去にはフィルタが有効であり、本システムではアナログおよびデジタル両フィルタの併用によって行った。アナログフィルタは Fig. 1 に示すようにマルチプレク

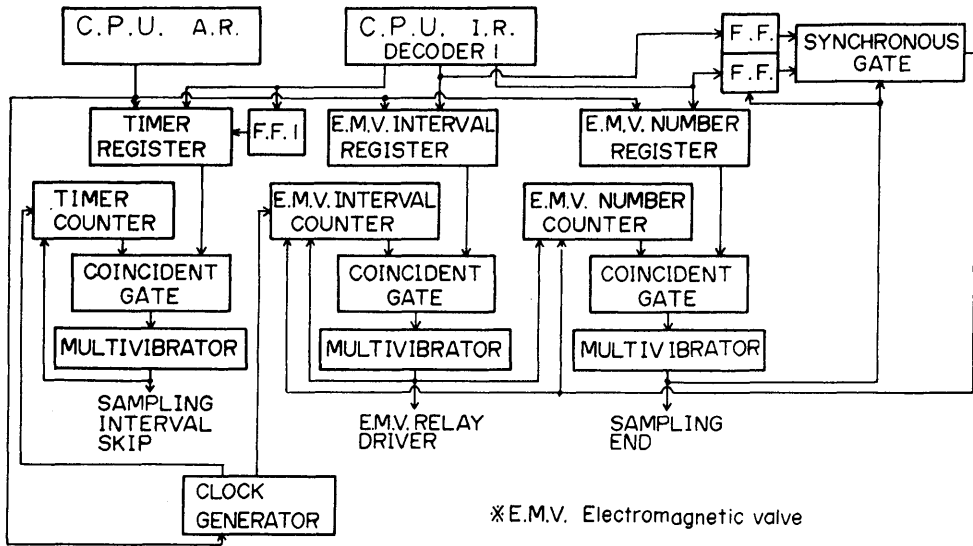


Fig. 3 Block diagram of Timer and CO₂ control system.

Table 1 Fundamental interval of Timer.

Interval	Duty
60 sec	50%
10	50
5	80
1	50
0.1	66

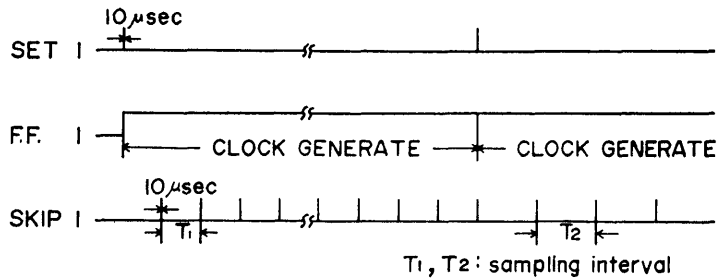


Fig. 4 Time chart of sampling interval control.

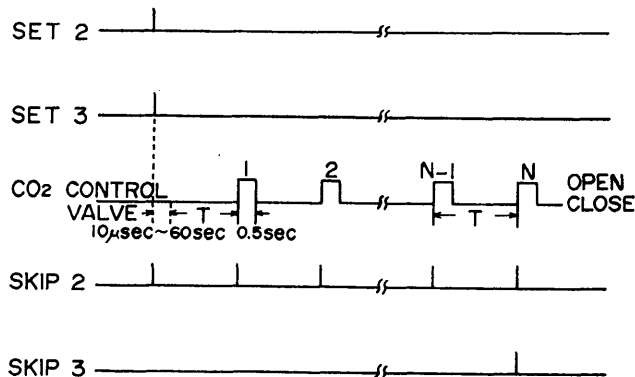


Fig. 5 Time chart of CO₂ control.

サの後に接続される。このロー・パス・フィルタの伝達関数は、3極 (60 db/decade) とし、折点周波数を 10 Hz ~1KHz まで可変とした。

Photo. 5, Photo. 6, Photo. 7 にはそれぞれ記録調節計におけるあるレベルに保たれた検出信号と、コンピュータサイドに伝送されてきた信号および 50 Hz 折点周波数のアナログフィルタを通した後の信号のそれぞれのノイズを示す。フィルタを通すことによって 0.4 VP.P. のノイズが 0.05 VP.P. まで除去された。これは 4 ビット程度のノイズであり、さらに簡単な算術平均によるデジタルフィルタにより 2 ビット内におさめることができる。

Photo. 8, Photo. 9, Photo. 10 には D-A 変換信号 0V, 5V, 10V をそれぞれ与えた場合の S.C.R. 電力変換器からの出力を示す。この S.C.R. 電力変換器では、それぞれの入力値に応じて、200V, 60 c/sec の交流電圧

が写真に示すような電圧波形に変形され、ヒータ出力が決定される。出力側においては、各操作部そのものにフィルタ要素が含まれているので、高周波ノイズは余り問題とはならない。

3. アルゴリズムの例にもとづく

D.D.C. システムの考察

前述のプロセスコントローラを用いた D.D.C. システムの検討ならびに考察を行うには、コンピュータのソフトウェア、すなわち制御アルゴリズムを規定せねばならない。この制御アルゴリズムについては種々のものを現在検討中であり、他の機会にゆずるが、ここでは温度制御の例をとり D.D.C. システムの考察を行った。

1) 温度制御系の P.I.D. アルゴリズム⁴⁾

D.D.C. においても、制御の基本アルゴリズムは P.I.

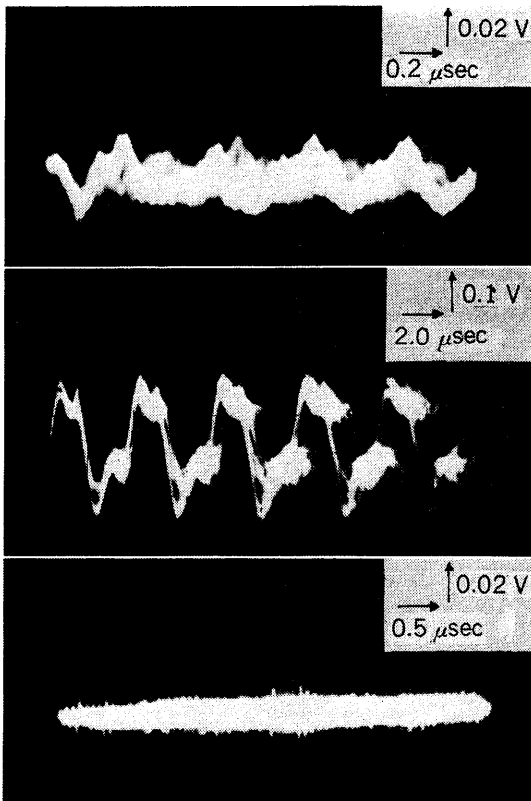


Photo. 5 Noise at output of electronic recording controller. (the upper of Photo.)

Photo. 6 Noise at terminal box of computer side. (the middle of Photo.)

Photo. 7 Noise after low pass filter. (the lower of Photo.)

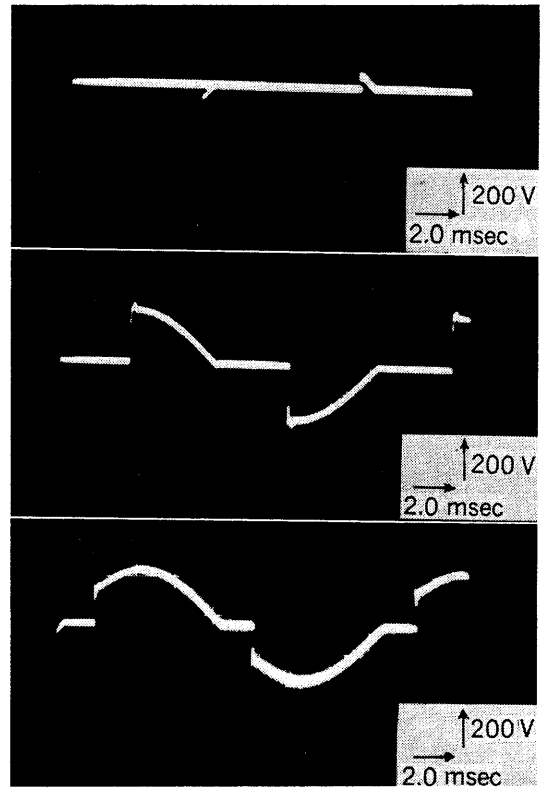


Photo. 8, 9, 10 Output of S.C.R. electronic manipulator.

Fig. 8 0 volt D-A signal as input (the upper of Photo.)

Fig. 9 5 volt D-A signal as input (the middle of Photo.)

Fig. 10 10 volt D-A signal as input (the lower of Photo.)

D. 制御式である。しかし、アナログ調節計の場合とは違いサンプリング P.I.D. アルゴリズムとなる。これには位置形と速度形があるが、本システムは出力コントローラに積分要素を持たないのので、基本的に次式で表わされる位置形 P.I.D. 制御式を用いる。

$$U = K \left(e_n + \sum \frac{\tau}{T_I} e_n + \frac{T_D}{\tau} (e_n - e_{n-1}) \right) \\ = K_P e_n + \sum K_I e_n + K_D (e_n - e_{n-1})$$

ただし、 e_n : 偏差, K : 比例感度
 T_I : 積分時間, T_D : 微分時間
 τ : サンプリング周期

上式のパルス伝達関数は、

$$G^*(\omega) = \left(K_P + \frac{1}{2} K_I + (1 - \cos(\omega\tau)) K_D \right) \\ - \frac{1}{2} j \frac{\sin(\omega\tau)}{1 - \cos(\omega\tau)} K_I + j \sin(\omega\tau) K_D$$

ただし $0 \leq \omega < \pi/\tau$

で表わされる。微分要素は適切な条件下において有効的に働く⁵⁾。本システムでは制御量および操作量を8ビットで量子化したので、制御量については 0.15625°C 、操作量については 33.725 Kcal/hr が1ビットに対応する。これらをもとにして温度系の制御を行った。

Fig. 6 (a), (b) に、基本的な形の P.I.D. プログラム・フローチャートを、Fig. 7 にその結果を示す。この場合の諸係数は $K=4$, $K_I=0.4$, $K_D=2$, $\tau=10 \text{ sec}$ である。また、デジタルフィルタは連続的に2回サンプリングして平均する方法を使用した。これによるノイズは、先に記したように2ビット以内であった。本システムの計算機はフォートラン、アセンブリ、および機械語のリンケージを自由に行うことができ、(a) がフォートラン・ルーチン、(b) がアセンブリおよび機械語のルーチンである。

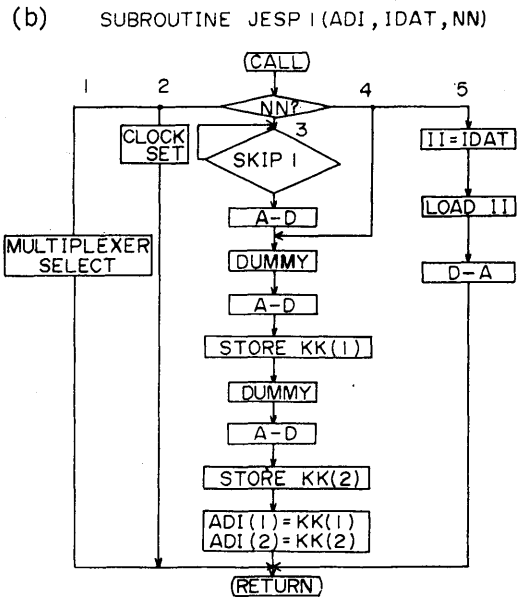
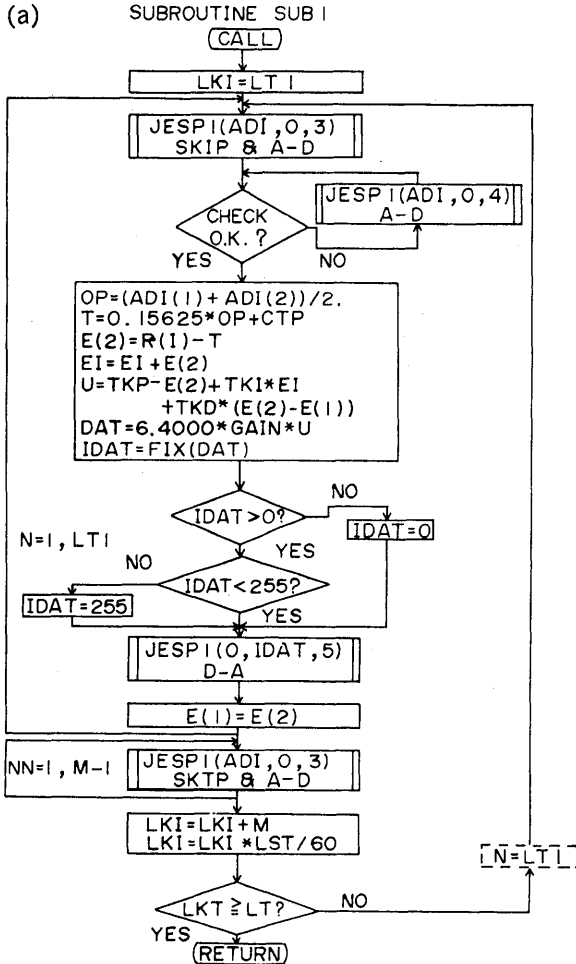


Fig. 6 Program flowchart of fundamental temperature P.I.D. algorithm in D.D.C.
 (a) FORTRAN routine.
 (b) Assembly and machine word routine.

2) 冷凍機のオン・オフを考慮したフィードフォワード・フィードバックアルゴリズム

第1報でも述べたように、フィードバック制御だけでは、外乱あるいは目標値の変化に対して、系が持つ遅れのために制御の特性が悪くなる。そして、これを改善するためには、外乱あるいは目標値の変化による制御系の変化を予測し、前もって操作量を計算し、与えるというフィードフォワード制御が必要である。この一例として、温度制御における冷凍機のオン・オフを考慮したフィードフォワード・フィードバックアルゴリズムについて検討した。

本システムの温度制御は、常時一定の冷却（冷凍機2

台）を前提とし、加温に対して、種々の制御式により、電気ヒータ容量調節を行う方式になっている。それ故、いろいろな温度状態に変化させる場合において、冷凍機の2段目をオンあるいはオフした方が、ヒータ容量の節約ができ経済的である。フィードバック制御では、1段目を常時オン、2段目をオンからオフ（あるいはオフからオン）した場合、Fig. 8 に示すように偏差を生じる。これをフィードフォワード制御式を用いて改善した。

Fig. 9 に、外乱として外気温 22~24°C、ランプハウス温度 30°C の条件下における定常状態でのヒータ出力を実験によって求めた結果を示す。縦軸が kcal/hr 単位のヒータ出力、横軸が制御対象内の温度状態を示す。温

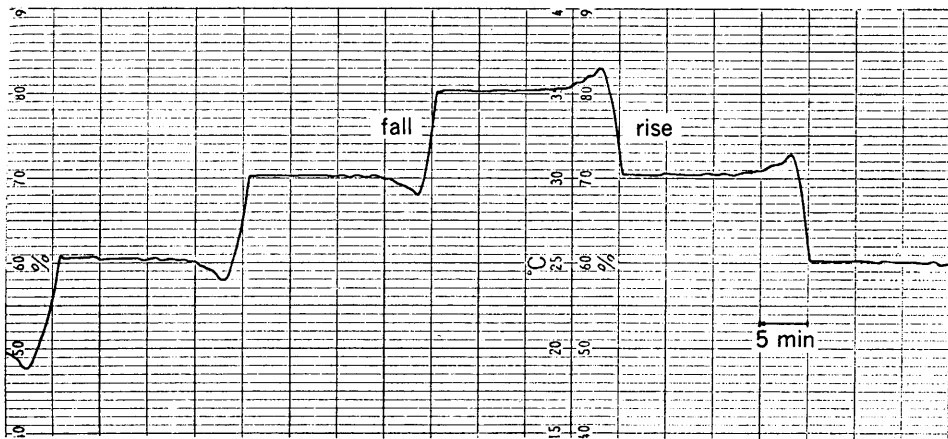


Fig. 7 Result obtained by the temperature control by a P.I.D. algorithm.

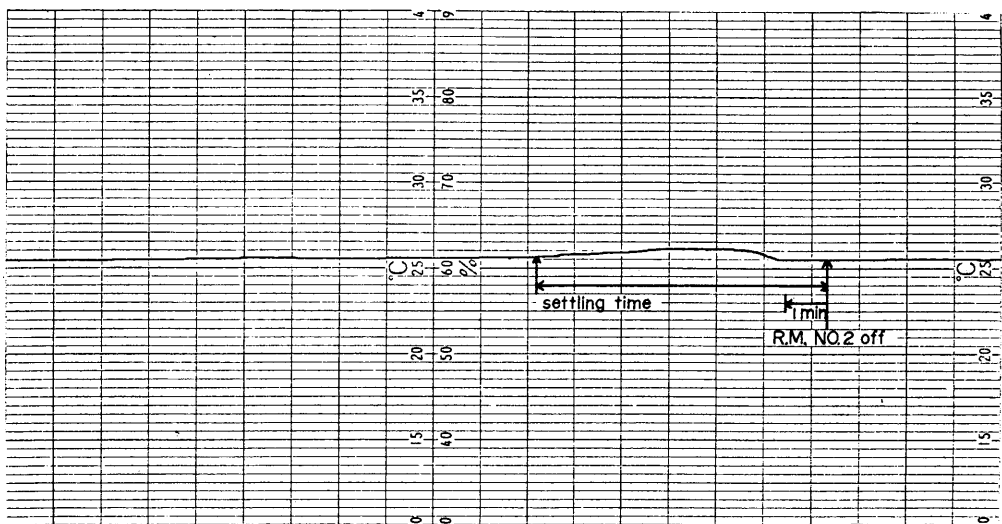


Fig. 8 Example of temperature control in the state of two cooling bases by P.I.D. algorithm.

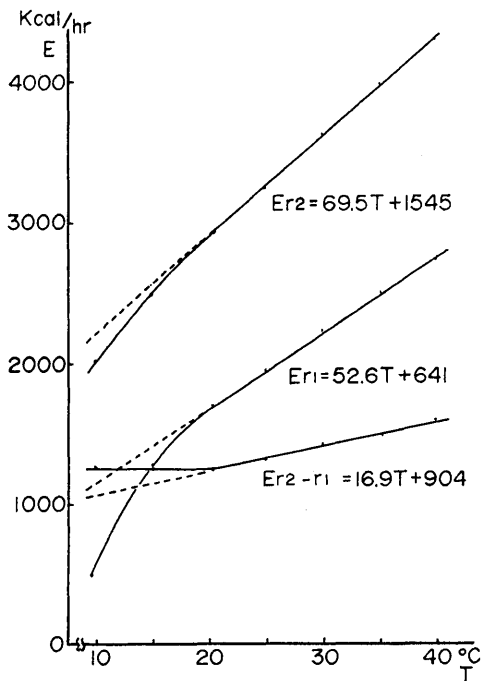


Fig. 9 Output of heater in the state of two cooling bases.

度状態が $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ において線形性が保障されるので、最小2乗法によってその直線を近似した。冷凍機2段の場合: $Er_2 = 69.5T + 1545$, 冷凍機1段の場合: $Er_1 = 52.6T + 641$. 2段および1段の差は $Er_2 - r_1 = 16.9T + 904$ となる。 $Er_2 - r_1$ より冷凍機1台をオン・オフさ

せたエネルギーの変化を各温度状態について数値的に求めることができる。これをもとにして、冷凍機のオン・オフに伴う温度変化を次式で近似する。

$$T_{er}(S) = \frac{K_r e^{-LrS}}{1 + T_r S} \cdot E_{r_2 - r_1} \cdot \text{sgn}(S)$$

この量がヒータによって補われることになるので今ヒータの温度変化を $T_{eh}(S)$ とすると、

$$T_{eh}(S) = \frac{K_h e^{-LhS}}{1 + T_h S} \cdot E_h(S)$$

そして、 $T_{er}(S) + T_{eh}(S) = 0$ とし、ヒータの操作量 $E_h(S)$ を求めると、

$$E_h(S) = -\frac{1 + T_h S}{1 + T_r S} e^{-(Lr - Lh)S} \cdot E_{r_2 - r_1} \cdot \text{sgn}(S)$$

$$= \pm \frac{E_{r_2 - r_1} (1 + T_h S)}{S(1 + T_r S)} \cdot e^{-(Lr - Lh)S}$$

ただし、 $K_r = K_h$, $T \gg \tau$

他方、実験値より、

オンの場合 $T_r = 1200 \text{ sec}$, $L_r = 24 \text{ sec}$.

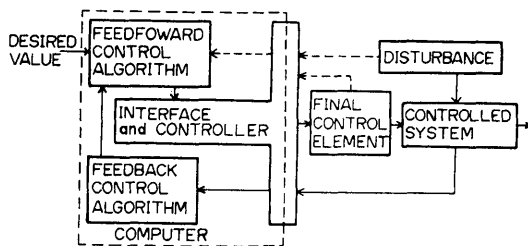


Fig. 10 Temperature feedforward-feedback algorithm in the state of two cooling bases.

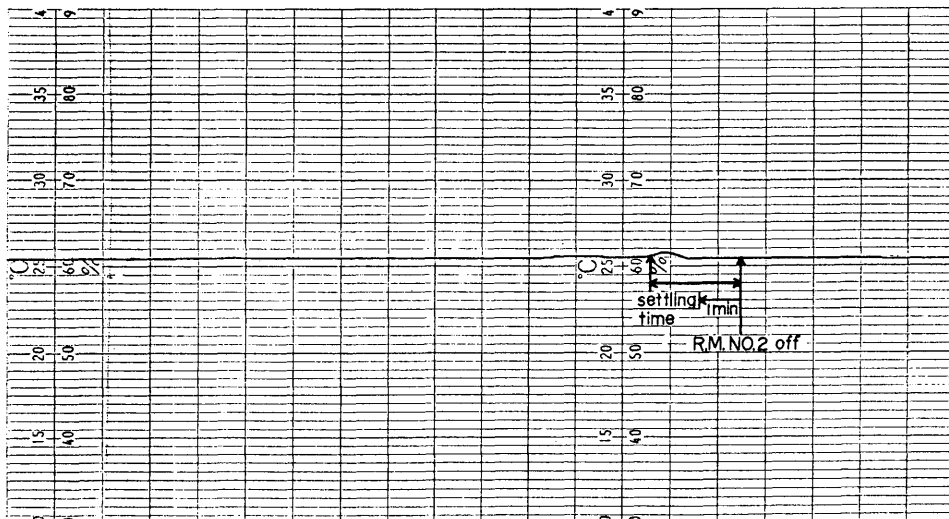


Fig. 11 Example of temperature control in the state of two cooling bases by feedforward-feedback algorithm.

オフの場合 $T_r=1800$ sec, $L_r=78$ sec.

$T_h=720$ sec, $L_h=15$ sec.

このフィードフォワード・フィードバック制御系は、Fig. 10 のブロック線図で表わされる。これを電算機制御で行った結果の1例を Fig. 11 に示す。

Fig. 11 は、冷凍機の2段目をオンからオフにした場合で、Fig. 8 と比較すると、特性は冷凍機のスイッチを切ってから、約 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ (± 1 ビット) 以内におさまるまでの時間をステップ応答に対応させて整定時間とすれば、約3倍改善された。

ここでは、冷凍機のオン・オフを制御系における外乱として、空気調和の温度制御におけるフィードフォワード・フィードバック制御の有効性を報告した。

以上のようにフィードフォワード・フィードバック制御は、単なるフィードバック制御のように制御系の遅れに拘束されないから、植物体のような高次の遅れを持つものを検出し、フィードバックする制御系においては、より有効的な効果が得られる。

4. あとがき

本報では、コンピュータのインターフェイスを中心とした D.D.C. におけるプロセスコントローラ的设计と、それにもとづく D.D.C. システムの検討を行った。しかし、D.D.C. の効果はそのハード面だけでなくソフト面、すなわち制御アルゴリズムによって大きく左右される。それゆえ、ハード面のプロセスコントローラからみた本報とは異なった制御アルゴリズムからの D.D.C. システムの検討も重要な課題となる。この面からの研究は次報でとり扱いたい。

文 献

- 1) 船田周他. 1973. 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (I). 生物環境調節 **11** (3): 117-125.
- 2) T. MATSUI, H. EGUCHI, Y. HANAMI, S. HANDA and T. TERAJIMA, 1971. A growth cabinet for the study on biotronics. Environ. Control in Biol. **9** (1,2): 37-46.
- 3) T. MATSUI, H. EGUCHI and K. TOH. 1973. Study on optimum PID controller settings for temperature control in a growth cabinet. Environ. Control in Biol. **11** (1): 31-34.
- 4) 保志尚 他. 1967. D.D.C. 実用化試験. 計測と制御 **6**(9): 658-668.
- 5) 平林啓義 他. 1967. D.D.C. のフィールドテスト. 計測と制御 **6**(9): 669-677.

Summary

For analysis and synthesis of D.D.C. system for phytotronics, three sub-system; process, computer and process-controller, should be examined.

In this paper, design and characteristics of process-controller which is composed of interface between computer and process are made clear.

And D.D.C. system which has a temperature-control algorithm upon characteristics of process in the previous paper and upon characteristics of process-controller in this paper is investigated.

As a result, the settling time of cooling on-off in D.D.C. upon feedforward method is one-third as large as that of cooling on-off in feedback control.

(Received October 3, 1973)