

Self Tuning Controller のソーラーシステム 制御系への応用 (シミュレーション)

松井 稜 治*

On an application of the Self Tuning Controller to the control of a Solar System (Simulation)

Ryoji Matsui

Abstract

In this report, the Self Tuning Controller is applied to a solar system (time varying system), and whether it is controllable is searched by computer simulations.

まえがき

現在, IC などの技術の発展により, 制御系へもマイクロコンピュータなどが採用されつつある。マイクロコンピュータを制御系にとり入れた場合, その演算機能を利用して高度な制御が可能であり, Self Tuning Controller (S. T. C) も有力な手段の一つである。

更に, S. T. C は制御対象のパラメータを推定する機構を含んでいるため, サンプル周期に比べて時間的にゆっくりと変動する制御対象へ S. T. C を適用することができるのではないかと考えられる。

そこで, 本研究では, その特性が時間的にゆっくりと変動するソーラーシステムの温度制御系に S. T. C. を適用することについて, シミュレーションを行って調べてみたので報告する。

1. Self Tuning Controller (S. T. C.)

Clarke, Gawthrop¹⁾ によれば

システム:

$$A(z^{-1})y_t = z^{-k}B(z^{-1})u_t + d + C(z^{-1})\xi_t \quad (1)$$

但し, y_t : 出力(添字 t はサンプル周期を 1 とするときの時間), u_t : 入力(操作量), d : 入力 0 とするとき

の出力の定常値, ξ_t : 平均 0 の外乱

評価:

$$I = E \{ (P(z^{-1})y_{t+k} - R(z^{-1})w_t)^2 + (Q'(z^{-1})u_t)^2 \} \quad (2)$$

について

$$y_{t+j/t}^* \triangleq y_{t+j} - e_{t+j} \quad (3)$$

(時間 t における j step 後の予測値)

とすると

$$C y_{t+j/t}^* = F_j'(z^{-1})y_t + G_j'(z^{-1})u_{t+j-k} + \gamma_j d \quad (j \leq k) \quad (4)$$

ここで,

$$C = E_j A + z^{-j} F_j' \quad (E_j(z^{-1}) : j-1 \text{ 次}) \quad (5)$$

$$G_j' = E_j B_j \quad (6)$$

$$\gamma_j = E_j(1) \quad (7)$$

又,

$$\phi_{t+k/t}^* = P y_{t+k/t}^* + Q u_t - R W_t \quad (8)$$

ここで, $Q = q_0' Q' / b_0$

とすると, (1), (2)の系は次の系と等価になる。

$$C \phi_{t+k/t}^* = F y_t + G u_t + H w_t + \delta \quad (10)$$

ここで,

$$F(z^{-1}) = \Sigma P_j F_k' z^{-j} \quad (11)$$

$$G(z^{-1}) = \Sigma P_j z^{-j} G_k' z^{-j} + C Q \quad (12)$$

$$H(z^{-1}) = -C R \quad (13)$$

$$\phi_{t+k}^* = \phi_{t+k/t}^* + e_{t+k} \quad (14)$$

*宇部工業高等専門学校 機械工学科

この時、制御則は、 $\phi^* \rightarrow 0$ とすることにより求まる。
 $C = 1$ とすれば、(14)は次のようになる。

$$\phi_{t+k} = x_t^T \theta + \epsilon_{t+k} \quad (15)$$

ここで、

$$x_t^T = \{y_t, y_{t-1}, \dots; u_t, u_{t-1}, \dots; w_t, w_{t-1}; 1\}$$

$$\theta^T = \{f_0, f_1, \dots; g_0, g_1, \dots; h_0, h_1, \dots; \delta\}$$

この時、パラメータ θ は最小二乗法により推定すれば、出力結果を用いて次の反復形により更新することができる。

$$\hat{\theta}_t = \hat{\theta}_{t-1} + K_t(\phi_t - x_{t-1}^T \hat{\theta}_{t-1}) \quad (16)$$

$$K_t = P_t x_{t-k}^T (1 + x_{t-k}^T P_t x_{t-k})^{-1} \quad (17)$$

$$P_t = P_{t-1} - K_{t-1} (1 + x_{t-1}^T P_{t-1} x_{t-1}) K_{t-1}^T \quad (18)$$

この推定値 $\hat{\theta}_t$ を用いて、制御則は

$$x_t^T \hat{\theta}_t = \hat{F}y_t + \hat{G}u_t + \hat{H}w_t + \hat{\delta} = 0 \quad (19)$$

とすることにより求めることができる。

更に、forgetting factor β ($= 1 - \epsilon$) を用いて、(17)、

(18)は、それぞれ

$$K_t = P_{t-1} x_{t-k}^T / (\beta + x_{t-k}^T P_{t-1} x_{t-k}) \quad (20)$$

$$P_t = [I - K_t x_{t-k}^T] P_{t-1} / \beta \quad (21)$$

とするのが一般的である²⁾。又、このようなパラメータ推定については、Thornton らによる UD^{2), 3)} 法を用いて更に簡単な反復形にすることができる。

2. ソーラシステムの温度制御系への S. T. C. の適用

あるソーラシステムの温度制御系は、流量制御部をマイナーループとして含むカスケードタイプになっており、流量制御系は温度制御系に比べて時間遅れは無視できる程度に小さい。そこで、流量制御部と集熱器とを合せて、温度制御系の制御対象として、1次遅れ+むだ時間で近似する。但し、制御対象ゲイン、時定数、むだ時間は、いずれも日射量に逆比例するため、一定でなく日射量の変化と共にこれらの値も時間的に変化する。

例えば、暖房時、図1. のように日照時間10時間程度の時、ピーク時(ほぼ一定)2時間に対して、その前後4時間ずつはほぼ直線的に日射量は変化する。この内日射量がピークの $\frac{1}{2}$ 以上(一点鎖線より上)を利用する。この時変動部は約2時間であるから、サンプリング周期を10~20秒程度にとったとしても変動はゆっくりしたものと考えることができる。一方、S. T. C. は制御対象のパラメータが一定であるものに対して適用できる。サンプリング周期のオーダーで制御対象をみると、パラメータの時間的な変動は小さいので、ほぼ一定であると仮定し、S. T. C. を適用することが可能ではないかと考えることも

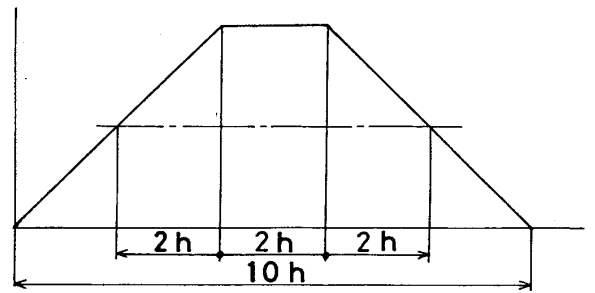


図1 日射量(縦)と時間(横)

できる。

この時、制御対象のモデルは

$$Y(s) = \frac{1}{TS+1} \{K_p e^{-Ls} (U(s) - W_{s(s)}) + \xi(s)\} \quad (22)$$

但し、

W_s は日射量に比例する量で、

$$W_{s(t)} = \begin{cases} t_r/100 & , 0 \leq t_r \leq 120 \text{ (min)} \\ 1.2 & , 120 \leq t_r \leq 240 \\ 1.2 - (t_r - 240)/100, & 240 \leq t_r \leq 360 \end{cases} \quad (23)$$

$$K_p = 4.8 / (W_s + 1.2)$$

$$T = 4.8 / (W_s + 1.2)$$

$$L = 1.2 / (W_s + 1.2)$$

とする。

W_s を考慮してサンプル値系の制御対象モデルとして

$$A(z^{-1})y_t = z^{-k} \{B(z^{-1})u_t + d_t\} + C\xi_t \quad (24)$$

を採用する。S. T. C. では d_t は一定であるとしているが、この場合には W_s が時間的に変動することから d_t も時間的に変動する。しかし、前記のように変動の割合は小さい。なお、 k の値は0次ホールドの場合

$$k = L / T_s + 1$$

となる。 L / T_s は必ずしも整数値となるとは限らないので、近似上の精度からいえば、整数値で表現できない部分を例えばPade近似などを用いて表現することもできるが、次数が高くなることにより、むしろ複雑さを増すにもなるので、簡単のため、ここでは L / T_s は整数値であると仮定しておく。

制御対象が1次おくれ+むだ時間で、0次ホールドの場合、

$$A(z^{-1}) = a_0 + a_1 z^{-1} \quad (25)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 \quad (26)$$

但し、

$$a_0 = 1, \quad a_1 = -e^{-TS/T}, \quad b_0 = K_p (1 - e^{-TS/T}) \quad (27)$$

$$E_k(z^{-1}) = e_0 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2} + \dots + e_{k-1} z^{-(k-1)} \quad (28)$$

において

$$e_0 = 1, e_1 = -a_1, e_2 = -e_1 a_1 \dots \quad (29)$$

$$f_0 = -e_{k-1} a_1 \quad (30)$$

$$G = E_k B_k + C Q \quad (31)$$

より,

$$Q = q_0 (1 - z^{-1}), C = 1 \quad (32)$$

とすると

$$\left. \begin{aligned} g_0 &= b_0 + q_0 \\ g_1 &= b_0 e_1 - q_0 \\ g_2 &= b_0 e_2 \\ &\vdots \\ g_{k-1} &= b_0 e_{k-1} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

従って, 推定すべきパラメータ θ は

$$\theta^T = \{f_0, g_0, g_1, \dots, g_{k-1}, \delta\} \quad (34)$$

となり, $k+2$ 個のパラメータを推定すればよいことになる。但し, これらのパラメータは(23)式のように W_s の時間的変化と共に, K_p, T, L が変化することにより, 時間的に変動するが, 前記のようにサンプリング周期に比べて, これらの変動速度は小さく, 推定に要する時間内での変化は小さいと考えられる。推定に要する時間は, パラメータ個数が少ない程短かくてすむはずである。従って, 前記のようにモデルはできるだけ次数の低いものをとるのが望ましい。

時間 t における推定パラメータ θ_t が求まれば, 制御則は,

$$f_0 y_t + g_0 u_t + g_1 u_{t-1} + \dots + g_{k-1} u_{t-k+1} + \delta_t = 0 \quad (35)$$

より, 操作量 u_t は

$$u_t = -\frac{1}{g_0} \{f_0 y_t + g_1 u_{t-1} + \dots + g_{k-1} u_{t-k+1} + \delta_t\} \quad (36)$$

として求めることができる。

3. 計算及び結果

前記のような操作量の決定法を, (22)式の系に適用する場合のシミュレーションを行った。その計算部の流れ図を図2. に示す。

データについては, 次の8種に関して計算を行った。

- ① $T_s = 0.25, k = 3, q_0 = 0.5$, ② $T_s = 0.25, k = 3, q_0 = 0.7$, ③ $T_s = 0.25, k = 4, q_0 = 0.5$, ④ $T_s = 0.25, k = 4, q_0 = 0.7$, ⑤ $T_s = 0.3, k = 3, q_0 = 0.5$, ⑥ $T_s = 0.3, k = 3, q_0 = 0.7$, ⑦ $T_s = 0.25, k = 4, q_0 = 0,$

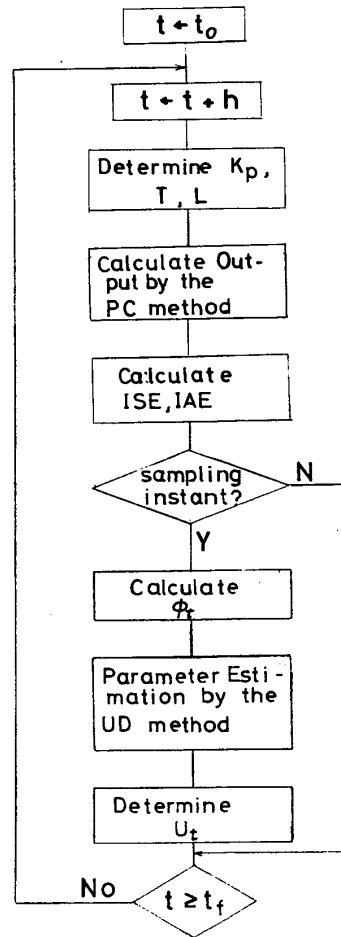


図2 計算フローチャート

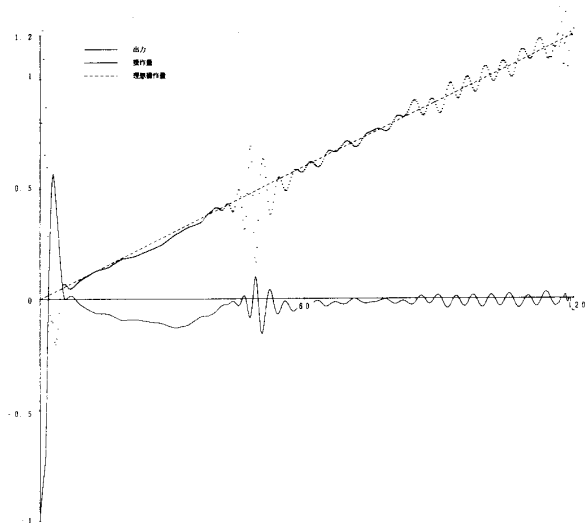


図3

⑧ $T_s = 0.3, k = 3, q_0 = 0.$

但し, 初期値 $y_0 = -1$ で, 操作量は流量であることを考慮して, $-1 \leq u_t \leq 1.5$ という制限をつけた。又, k の値が大きくなればパラメータ個数も増すので, k の値が大きくならないよう配慮して, T_s の値を決めた。

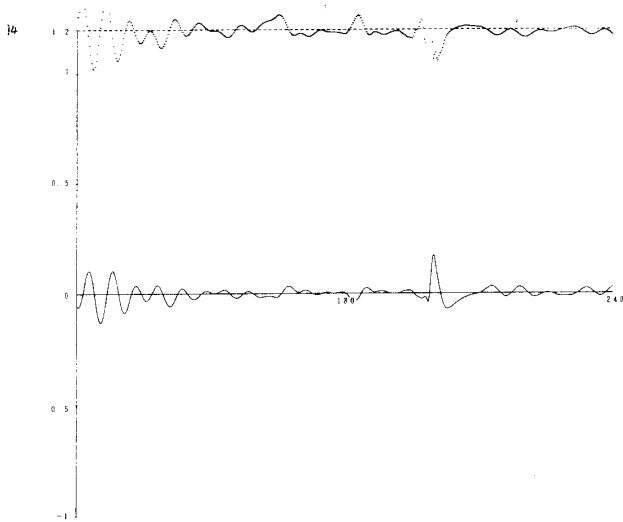


図 4

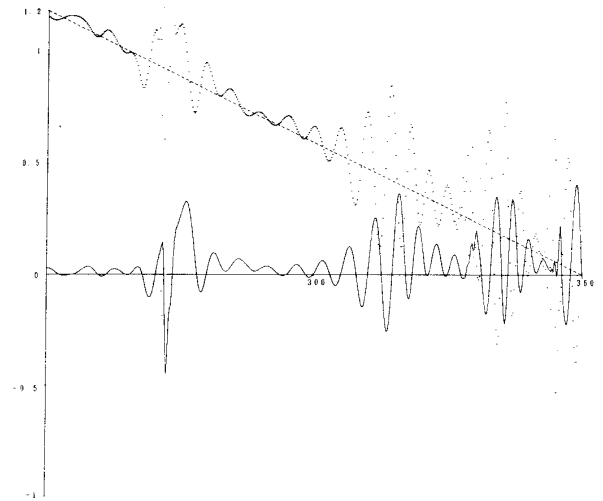


図 5

表 1 評価値

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
ISE	4.69	5.48	3.87	5.39	4.32	4.51	10.7	12.2	1.50	11.3
IAE	21.6	23.9	19.9	23.4	22.3	22.2	24.3	34.6	8.87	29.3

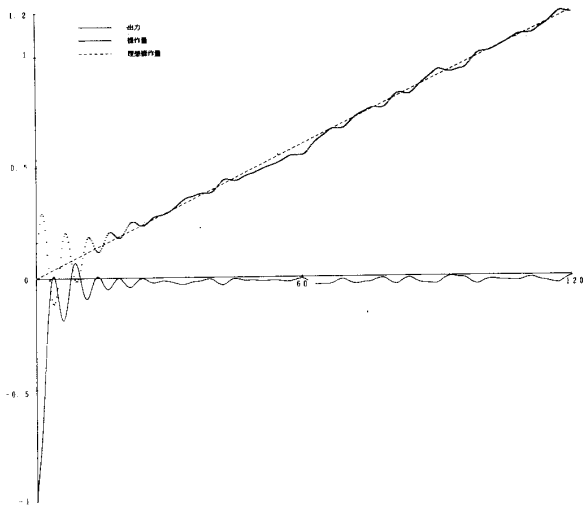


図 6

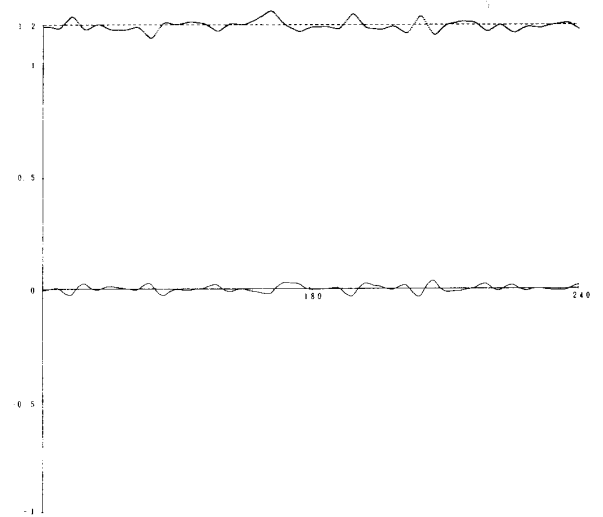


図 7

③の場合の応答を、図 3, 4, 5 に示す。又、各データに対する ISE, IAE 値を表 1. に示す。

比較の対象とするため PI 動作で制御した場合のシミュレーションも行った。この時、制御対象のパラメータが中間の状態における値 (⑨) とピーク (定常) における値 (⑩) との 2 つの場合についてジエグラ・ニコルスの限界感度法を用いて制御パラメータを決定した。制御パラメータはそれぞれ⑨比例感度 $K_c=1.04$, 積分時間 $T_i=$

2.28, ⑩ $K_c=1.56$, $T_i=1.52$ となった。⑨の場合の応答を図 6, 7, 8, ⑩の場合の応答を図 9, 10 に示す。これらの ISE, IAE 値も表 1. に加えてある。

4. 考 察

S. T. C. では、パラメータ一定の場合を想定しているの
で、当然ながら、定常状態 (ピーク時) では好結果が得

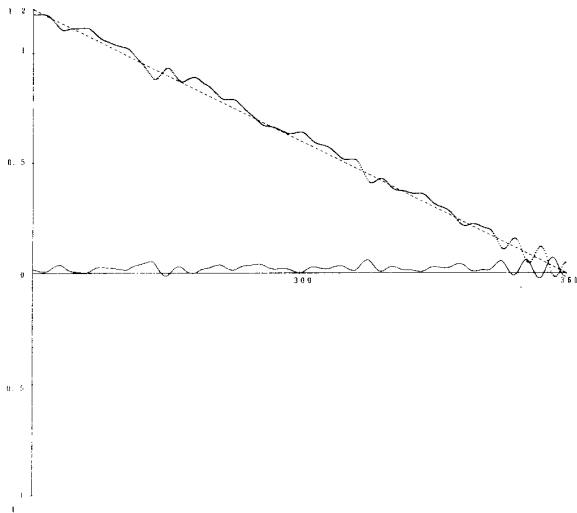


図 8

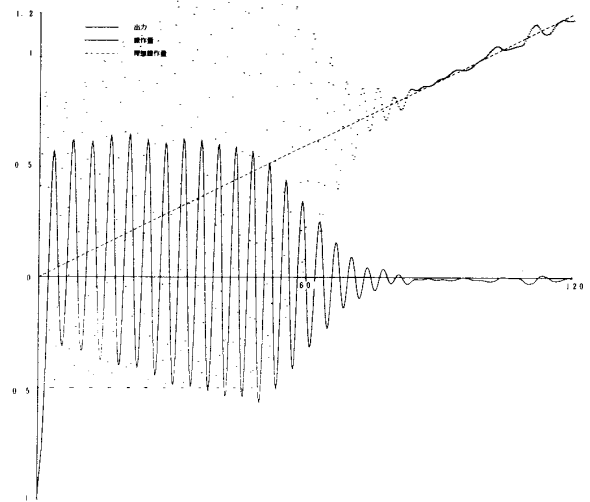


図 9

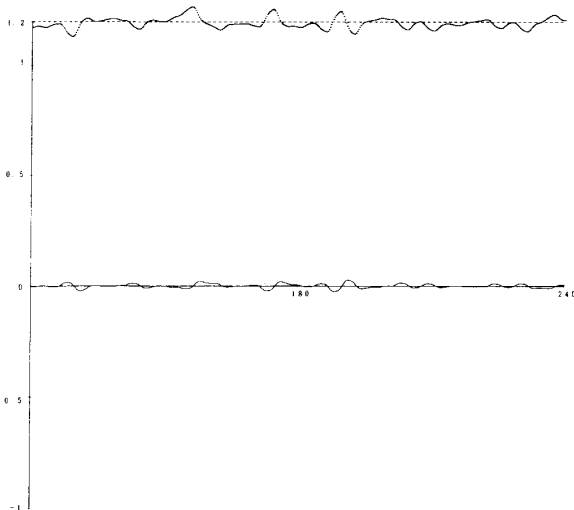
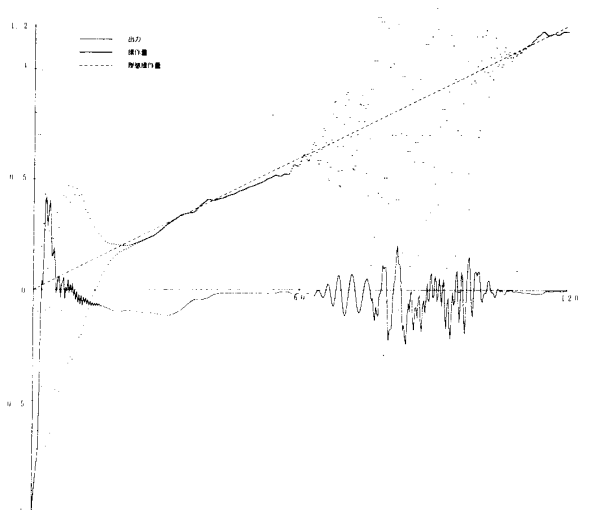


図 10

図 11 $T_s=0.25$ 、 $K=4$ 、 $q_0=0$

られるが、全般的に、上昇時、下降時にかなり大きい振動成分をもっており、特に、下降時に顕著である。但し、上昇時については、③のデータの場合、比較的良好な結果を得た。ISE, IAE についても③のデータが最良であるが、これより次のことがいえる。

① $T_s=0.25$, $K=4$ というデータは、むだ時間部を 0.75 としたことになり、これは真のむだ時間の平均的な値を示しており、

② $q_0=0.5$ のデータは、 $q_0=0.7$ と $q_0=0$ との中間の値であり、0.7 と 0 との間に適当な重みがあるのではないと思われる。

$q_0=0$ の場合、図 11. に示すように、成積はかなり悪い。即ち、評価には、操作量に関するものを入れた方が良いことがわかる。但し、この場合、出力 0 に対する操

作量の定常値は 0 ではない場合があるので、操作量の大きさのみを評価にとり入れることはできない。従って、ここでは次善の策として、操作量の変化を評価にとり入れている。

S. T. C. と PI 制御では、⑨の PI 制御の場合は、S. T. C. よりも良好な結果を得ることができたが、逆に⑩の場合は、同じジグ・ニコルスの方法でありながら③と比較して結果は悪い。このことより、PI 制御の場合、制御対象の特性が良くわかっていて、制御パラメータの値を適切に決めることができれば、良い結果が得られるが、特性が不明確で、パラメータ設定を誤ると悪い結果に導くことが予想される。

従って、特性が不明確である場合(但し、オーダー程度はわかっているものとする。), S. T. C. にはパラメータ

推定機構が含まれるだけ有利ではないかと思われる。但し、この場合も、評価の選び方やむだ時間のオーダーを知ることが重要であろう。

なお、今後の問題として、

ここでは、未だ十分のデータについて計算を尽しておらず、例えば

- ① サンプル周期 T_s を更に大きい値にすると、パラメータ数が減少するが、結果はどうなるか
- ② パデ近似をとり入れるとどうなるか
- ③ パラメータ推定を時変系とするとどうなるか

などについて調べてみる必要がある。

ここではシミュレーションのみに終わったが、更にマイコンをとり入れて実験するとどうなるかという問題も残されている。

5. お わ り に

本研究を進めるにあたり、昭和56年度、九州大学工学部で内地研究中、高田 勝教授、毛利 彰教授より多大

なる御助言をいただきましたことに謝意を表わします。

なお、計算にあたっては、九州大学大型計算機センター FACoM M-200 を使用した。

参 考 文 献

- 1) Clarke, Gawthrop: Self Tuning Controller, Proc. IEE, VOL. 122, No. 9, 1975
- 2) Clarke, D. W.: Some Implementation Considerations of Self Tuning Controllers, Numerical Techniques for Stochastic Systems, North Holland Publ., 1980
- 3) Thornton, C. L. and Bierman, G. J.: Filtering and Error Analysis via the UDU^T Covariance Factorization, IEEE, VOL. AC-23, No. 5, 1978
- 4) 遠藤康司: ソーラシステム温水温度系の調整, 東熱技報, No. 24, 29/40, 1981

(昭和57年9月16日受理)