サンプル値制御系に PI 調節計を使用する研究[†]

杉 浦 一 郎・成 瀬 禎 一

名古屋大学工学部 名古屋千種区不老町

(昭和 42 年 7 月 27 日受付)

Utilization of PI Controller for the Sampled-Data Control Systems

Ichiro SUGIURA and Teiichi NARUSE

(Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya)

(Received July 27, 1967)

For certain control systems, it is necessary to readjust some instruments in the closed loop circuit periodically. In this case, a sampling control system in which the plant is controlled continuously by the PI(D) controller at the interval $(T-h)$ and controlled by the hold element at the other interval (h) as shown Fig. 1 and 2, must be investigated.

Corresponding to the system performance index Q which is given as the integral of squared error, this report graphically gives the functional relationship of Q to the system parameters, $(T-h)/T$, L (plant dead time), k_c and T_c (controller's gain and integral time) by using analog-computation. Fig. 5~Fig. 7 are the main results of this report and give contour lines of Q with respect to the above mentioned parameters.

By using these graphs, the proposed system can be synthesized almost perfectly in the case of T/T_p (T_p is the plant time constant) is equal and nearly equal to 1/10. In addition, Fig. 8 shows that there are interesting cases in which the proposed system is superior to the continuous control system.

1. 緒 言

粉粒体の瞬間供給流量を制御するとき¹⁾ 検出端が摩耗したり、粉粒体が付着したりして使用に耐えなくなるといったような場合、あるいは製鉄工業等において温度検出器として使用する熱電対や保護管が使用中劣化してしまうような場合²⁾、さらに精密温度制御系の温度検出器にドリフトがあるような場合³⁾は制御中に、on-lineにある検出器を一定時間ごとに取り換えたりまたは調整することが必要である。すなわちこのような場合は Fig. 1 のように、線形連続制御系*に調整の期間 (h) を周期的 (周期 T) に必要とする制御系を考察しなけ

T : sampling period, h : hold interval

Fig. 1 Time division

ればならない。

以下この論文は、上記の方式の設計資料をうるため主としてアナログ計算機**を使用して 整定時間 (T_s) までの制御偏差の自乗積分値 Q を各種のパラメータの関数として求める。

系のブロック線図を Fig. 2 に示す。すなわちプロセスは 1 次遅れ (時定数 T_p , ゲイン k_p) + むだ時間 (L) で近似し、コントローラは PI 形 (比例ゲイン k_c , 積分時間 T_c) とする。

各種のパラメータとしてはつぎのような比率およびゲインが考えられる。

$$T/T_p, (T-h)/T, L/T_p, T_c/T_p, k_c \quad \dots\dots (1)$$

プラントの時定数は時間に関するパラメータの基準値とする。

Fig. 2 に示した制御系は、有限幅パルスサンプル値系となるので、その応答の解析的表現はいちおう可能であるが^{4)~6)} それはきわめて複雑なものである。すな

* 以下線形連続制御系を単に連続制御系または連続系と略す。

** 日立高精度アナログ計算機 ALS-1000.

† 第 4 回計測自動制御学術講演会 (昭 40・7・18), 自動制御部会 (昭 41・2・22) で発表

- (1) plant
(2) PI controller
(3) hold element
(4) integral circuit of squared error ε^2

Fig. 2 Block diagram

わち数サンプル周期にわたる応答を数値的に求めるのに役立つ程度であって、 Q を(1)式のパラメータの関数として、解析的に表現することはほとんど不可能に近い。ゆえに以下ではアナログ計算機による一種の実験を行なった。

2. サンプル周期

Fig. 1 において h は上述のような機器の点検調整の時間であるから、その最小値 $\min(h)$ がきめられる。また、 $T-h$ は問題の機器が支障のない程度でしかくわれないという条件により、その最大値 $\max(T-h)$ がきまる。ゆえに本研究で扱うサンプル値系のサンプル周期をきめる自然な関係は、

$$T = \max(T-h) + \min(h) \quad \dots\dots (2)$$

である。すなわち、以下で、 T および h または $(T-h)/T$ は制御系の仕様として、あらかじめ与えられるものとする。ゆえに設計資料としては、 T および $(T-h)/T$ については、種々な値の場合を用意してお

くことが、これは膨大なものとなるので、 T に関しては、

$$T/T_p = 1/10 \quad \dots\dots (3)$$

の場合だけを求める。 $T/T_p = 1/10$ という値は、サンプル周期をかなり大きな値にとったことになるがこれは h 期間にいろいろ手間のかかる仕事をするを想定したためである。

3. 実験方法

3.1 アナログシミュレーション

外乱はステップ状で $t=0$ (computer put on のとき) に制御対象の操作端に加えられる。外乱の大きさは $+10\text{ V}$ (-10 V) を基準として、制御偏差の大きさの程度により $5\sim 20\text{ V}$ を用いた。

Fig. 2 の系を Fig. 3 に示すようにシミュレートした。

Fig. 3 において、

①は制御対象で、 L の発生にはタイムディレイ回路* (TD) を用いた。

②は調節計である。

③は零次ホールド (SH) でサンプルホールド盤**を用いた。

④は偏差の自乗積分値 Q を求める回路で、自乗はサージ乗算器を用いた。掛算器の前に $10/(1+0.05s)$ の回路をそう入したのは、TD 回路などにより発生するノイズを除くためのものである。この折点周波数は 3 c/s 程度であるから閉ループ系の折点周波数より十分高い。ループゲインはつねに $k_p=1$ として k_c で加減した。これは*印の4台の加算係数器と2個のポテンシオメータで行なった。これらはまたループゲインを所要の値に調整するばかりでなく、掛算器や TD の

入力とその精度を保つのに適正な大きさであるように調整する役目もする。なお、この精度を保つための調整にはステップ外乱の大きさの加減もあわせて行なった。

3.2 実験の範囲

(3) 式の比率を与え、さらに(1)式の各比率に種々な値をとらせるために、パラメータの値は

* ALS-1000 取扱説明書 TD-261.

** ALS-1000 取扱説明書 SH-261.

Fig. 3 System simulation

下記のように選んだ。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} T_p &= 30 [\text{sec}], K_p = 1, T = 3 [\text{sec}] \\ L &= 0.5, 1.0, 2.0 [\text{sec}] \\ (T-h)/T &= 0.15, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 \\ 1/T_c &= 0.2, 0.333, 0.5, 1.0 [\text{sec}^{-1}] \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

k_c は 1 より約 4 間隔ごとに安定限界までである。以下簡単のため、 $(T-h)/T$ 以外は (1) 式の比率を使わず、パラメータ値そのもので表す。

Table 1 には、行なった実験の全体をパラメータ値の組み合わせ表として示してある。すなわち、3 つの L の値のおおのに対して、 $(T-h)/T$ を変えて 5 種類の実験を行なったから、都合 15 種類 (実験 1 ~ 実験 15)、1 種類の実験については $1/T_c$ を 4 個、 k_c を平均 7 個以上に変えるので、全体で 500 回以上の実験となる。

3.3 結果の記録

実験においては、ペン書きオシロ (Rec. 1~Rec. 6) を用いて Fig. 3 に示すように各部を監視した。

Rec. 1 は三角波 (付録で説明) の監視、Rec. 2 は調節計の出力の監視、Rec. 3 は hold 出力の監視、Rec. 4 は制御対象における出力の監視、Rec. 5 は外乱の監視、Rec. 6 は Q の記録である。Fig. 4 に $t=0$ 付近の記録の一例を示した。

この図からわかるとおり操作量の大きさは、Rec. 2 と Rec. 3 の和である。実際の記録の一例を Photo. 1 [(1)~(6) (Rec. 1~Rec. 6) は Fig. 4 参照] に示した。これは $L=2.0 \text{ sec}$, $1/T_c=1$, $k_c k_p=1$, $\{(T-h)/T\}=0.25$ の場合である。

- (1) = Rec. 1: triangular wave
(2) = Rec. 2: controller output
(3) = Rec. 3: hold output
(4) = Rec. 4: control error
(5) = Rec. 5: step disturbance
(6) = Rec. 6: integral of squared error Q

Fig. 4 Examples of Rec. 1~Rec. 6 near $t=0$

4. 結 果

4.1 アナコンの精度

アナコンの精度は $\{(T-h)/T\}=1$ の場合について、 Q の筆算とアナコンによる結果とを比較した。ただし系にむだ時間 L を含ませたため、ステップ状外乱に対

$(T-h)/T$	L 0.5 [sec]				1.0 [sec]				2.0 [sec]			
	0.2	0.333	0.5	1.0	0.2	0.333	0.5	1.0	0.2	0.333	0.5	1.0
0.15	from [experiment 1. Fig. 5 (a)] $k_c=1$ to $k_c=1$ to $k_c=1$ to $k_c=1$ to 20.9 20 19.25 17.6				from [experiment 6. Fig. 6 (a)] $k_c=1$ to $k_c=1$ to $k_c=1$ to $k_c=1$ to 31 29.5 29 27.2				from [experiment 11. Fig. 7 (a)] $k_c=1$ to $k_c=1$ to $k_c=1$ to $k_c=1$ to 22.5 20.1 20 14.9			
0.25	from [experiment 2. Fig. 5 (b)] 23 21.9 19.9 17.6				from [experiment 7. Fig. 6 (b)] 24.6 24.0 23.4 21.6				from [experiment 12. Fig. 7 (b)] 23.1 20.4 19.4 13.6			
0.50	from [experiment 3. Fig. 5 (c)] 58 56.7 55.8 21.6				from [experiment 8. Fig. 6 (c)] 26.7 24.9 24.3 20.4				from [experiment 13. Fig. 7 (d)] 22.8 20 16.8 6.0			
0.75	from [experiment 4. Fig. 5 (d)] 95 91 89 52				from [experiment 9. Fig. 6 (d)] 47.5 44.5 29 26.2				from [experiment 14. Fig. 7 (d)] 22.5 19.8 14.1 2.2			
1.00	from [experiment 5. Fig. 5 (e)] 95 90 89 72				from [experiment 10. Fig. 6 (e)] 45.8 41.7 39.6 11.2				from [experiment 15. Fig. 7 (e)] 21.2 15.7 7.85 1.0			

$T_p=30 \text{ sec}$, $K_p=1$, k_c is increased every step by 4 from 1 to stable limit

note: for an example, the case of experiment 7. where $L=1.0 \text{ sec}$, $1/T_c=0.5 \text{ 1/sec}$, $(T-h)/T=0.25$ and $k_c=1$, 4, 8, 12, 16, 20, 23.4 includes seven kinds of experiments

Table 1 List of experiments

$L=2.0 \text{ sec}$, $(T-h)/T=0.25$, $1/T_c=1 \text{ sec}^{-1}$, $k_p k_c=1$

Photo. 1 Record of an experiment

する連続的な応答は、サンブラとホールドを仮想し、サンプル値系で近似⁷⁾して求め、ついでサンプル値列の2乗和の計算法⁹⁾に基づいて行なった。

$T_p=30 \text{ sec}$, $L=1 \text{ sec}$, $k_c=1$ および $T_c=3 \text{ sec}$ の場合、計算による $Q=0.90$ に対してアナコンによる結果も $Q \approx 0.9$ である (Fig. 6 (e) 参照)。有限幅パルスサンプル値系については、ステップ入力に加わってからの数サンプル周期にわたる応答を P 変換法⁴⁾により求め、アナコンの記録結果と比較して、きわめてよく一致することを確認した。

4.2 実験結果

以上の方法により、 L と $(T-h)/T$ をパラメータとし T_c, k_c の関数として Q を求めこれを T_c, k_c および Q の3次元空間に表わし、 $k_c=1$ から安定限界までの間の Q の等高線を求めた。各実験 (Table 1 の実験 1, 2, ...) で、まず $1/T_c$ をパラメータとし k_c を変化させてそれぞれの Q の値を求め1枚の片対数方眼紙上に k_c-Q ($1/T_c$: パラメータ) 曲線をプロットする。これをいくつかの $Q=\text{const.}$ の線で切って交点を $1/T_c-k_c$ 上にプロットし、これを滑らかな曲線で結ぶと

Q の等高線が求まる。計算機の演算誤差以外の主な誤差は読みとりの誤差であって、これは 1~5% 程度と考えられる。結果を Fig. 5 (a)~(e) から Fig. 7 (a)~(e) に示した。

図において安定限界近くの太線は、 Q の増加が急しゅんなため等高線をなん本も引くと繁雑になるため1本で代用した。○印は実験で求った安定限界である。ただし Q が直線的に増加するようになる点をもって安定限界とした。△印は積分時間一定にしたときの Q の最低値を示した。また $Q_{\min}$ は△印で示された Q の中の一番小さい値である (それゆえ実験の行なわれた範囲は山に囲まれた盆地の一部の様である)。

① 一般的にむだ時間の短い場合 ($L=0.5 \text{ sec}$) は、連続制御に近づく ($(T-h)/T \rightarrow 1$) と安定領域は広く、 $Q_{\min}$ は小さいが、逆に $L=2.0 \text{ sec}$ の場合は $(T-h)/T$ の小さくなるほど安定領域は広くなる傾向がある。中間の $L=1.0 \text{ sec}$ の場合には、安定領域の広さはあまり変化しない。

② 他のパラメータはおのおの同じであるとする、 Q はむだ時間の大きいほど大きい。

③ 縦軸に $Q_{\min}$ を、横軸に $(T-h)/T$ をとり、 L をパラメータとして $Q_{\min}$ をプロットしてみると、Fig. 8 のようになる。この図から線形連続制御の場合が、必ずしも $Q_{\min}$ の最低値を示さず

$$\left. \begin{array}{l} L=0.5 \text{ に対して } (T-h)/T \approx 0.83 \\ L=1.0 \text{ に対して } (T-h)/T \approx 0.9 \\ L=2.0 \text{ に対して } (T-h)/T \approx 0.65 \end{array} \right\} \dots\dots (5)$$

のような点が最低値を示している。これは本論文で提案した有限幅パルスサンプル値制御系が、線形連続制御系にまさる場合のあることを示している。そして連続系と同程度、またはそれよりすぐれた Q の値となる範囲は、

$$\left. \begin{array}{l} L=0.5 \text{ に対して } (T-h)/T \approx 1.0 \sim 0.65 \\ L=1.0 \text{ に対して } (T-h)/T \approx 1.0 \sim 0.78 \\ L=2.0 \text{ に対して } (T-h)/T \approx 1.0 \sim 0.5 \end{array} \right\} \dots\dots (6)$$

である。

なお、Fig. 8 の右端の値は、連続系について緒言で述べたような機器の点検整備の必要のない理想的な状態に対応する値である。ゆえに実際の系の値はこれより、はるかに悪いことを指摘しておく。

参考のため Fig. 5~7 に整定時間 T_s (×印、単位: sec) をも記入した。注意すべき点は、 Q と T_s の増減の傾向がまちまちなことである。ただ $Q_{\min}$ を与える k の値を k_{cm} とすると、 k_{cm} より少し小さい k_c に対する T_s のほうが、 k_{cm} に対する T_s より一般に小さ

い. また k_c が k_{cm} から少し大きくなると, Q は急激に増加する傾向にあり, 系の応答は不安定になる. ゆえに k_{cm} の付近を使用する場合は k_{cm} より少し小

い目に k_c の値を選ぶほうがよい.

5. 結 論

Fig. 5 (a)~(e) から Fig. 7 (a)~(e) および Fig. 8 が本研究の主要な成果である. これらのグラフを利用する場合原則としてつぎのことがいえる. このグラフはパラメータ T/T_p , $(T-h)/T$ と L/T_p が与えられたとき T_c , k_c と Q の関係を示しているから, 与えられるパラメータの値が,

① グラフのとおりの場合の場合は直接グラフから読

(a) $L=0.5$ sec, $(T-h)/T=0.15$

(b) $L=0.5$ sec, $(T-h)/T=0.25$

(c) $L=0.5$ sec, $(T-h)/T=0.50$

(d) $L=0.5$ sec, $(T-h)/T=0.75$

(e) $L=0.5$ sec, $(T-h)/T=1.00$

—○—: stability limit, —△—: minimum value of Q in this graph, ×(): number in () is settling time at ×

Fig. 5 Contour graph of Q in experiment 1~5

み取ればよいから問題はないが

⑤ パラメータが2枚のグラフのあいだの値をとる場合は近似的には比例的に内そうすればよい(内そう困難な場合もある)。

⑥ 他の値たとえば $T/T_p=0.1 \pm \alpha$ ただし $\alpha > 0.1$

(a) $L=1.0$ sec, $(T-h)/T=0.15$

(b) $L=1.0$ sec, $(T-h)/T=0.25$

(c) $L=1.0$ sec, $(T-h)/T=0.50$

のような場合において, Fig. 5~Fig. 17 をそのまま利用したいときには (2) 式の T は $(T-h)$ の max と h の min で算出することになっているので, 実際使用する $(T-h)$ および h を max $(T-h)$ より小さくするか, min (h) より大きくするか, あるいは両者とも変えるかして新しく $T^*=(T^*-h)+h$ として $T^*/T_p=0.1$ に書き改めたることできる. こうして $(T^*-h)/T^*$ の値を考慮して④あるいは⑥に該当すればそれらのグラフを使用できる(実際の場合も T^* を使用する)。

④ 内そうの困難な場合や④, ⑥の条件に書き改められないときは改めて実験を行なう必要がある。

5.1 例題

① $T/T_p=0.1$, $L/T_p=0.03$, $(T-h)/T=0.75$, $Q \approx 0.01$ の場合

(d) $L=1.0$ sec, $(T-h)/T=0.75$

(e) $L=1.0$ sec, $(T-h)/T=1.00$

Fig. 6 Contour graph of Q in experiment 6~10

(a) $L=2.0$ sec, $(T-h)/T=0.15$ (b) $L=2.0$ sec, $(T-h)/T=0.25$ (c) $L=2.0$ sec, $(T-h)/T=0.50$

Fig. 6 (d) の場合で等高線 0.01 上の点は、いずれも指定された Q の条件にかなっている。ゆえに T_s も考慮すると、点 A 付近が安定限界からも十分遠ざかっているの、適当と考えられる。

② $(T-h)/T=0.62$ の場合 (他は①と同様)

Fig. 6 (d) の 0.01 の等高線は、徐々に縮って Fig. 6 (c) の左側の 0.01 の等高線になるから、この 2 つの等高線の間、比例的に内そうして、等高

(d) $L=2.0$ sec, $(T-h)/T=0.75$ (e) $L=2.0$ sec, $(T-h)/T=1.00$ Fig. 7 Contour graph of Q in experiment 11~15 Fig. 8 Minimum value Q versus $(T-h)/T$

線を考えればよい。

③ $(T-h)/T=0.37$ の場合

Fig. 6 (c) の右側の 0.01 の等高線は、Fig. 6

(b) の $Q_{\min}=0.022$ に向って縮ってゆくとみなせる。ゆえにこの付近に求めるパラメータの値が存在する可能性がある。しかしたとえあったとしても、安定限界に近づきすぎているので、よい値とはいえない。 $Q=0.01$ という仕様をもうすこしゆるめる必要がある。

④ $0.016 < L/T_p < 0.033$ および $0.033 < L/T_p < 0.066$ の場合

前者の場合、Fig. 5 と Fig. 6 は、同じ $(T-h)/T$ に対しよく似た傾向の等高線からなりたっている。ゆえに前と同様、内そう法で中間の等高線が考えやすい。しかし後者の場合 Fig. 6 から Fig. 7 への変化はかなり著しいので、このような内そうが困難な場合がある。

⑤ T/T_p が 0.1 よりじゃっかん大きい場合

⑥ より、

$$T^* = \tau + \min(h), \quad \tau < \max(T-h) \quad \cdots \cdots (7)$$

ととり、 $T^*/T_p=0.1$ として Fig. 5~Fig. 7 から適当なパラメータ値を探すことができる。

⑥ T/T_p が 0.1 よりじゃっかん小さい場合

⑦ と同様、

$$T^{**} = \max(T-h) + n, \quad h > \min(h) \quad \cdots \cdots (8)$$

ととり $T^{**}/T_p=0.1$ とする。

⑦ $(T/T_p) \ll 1$ の場合 (たとえば $T/T_p=0.01$)

この場合は $T \doteq h$ として Fig. 9 のような普通のサンプル値系に構成するとよい。すなわち制御偏差をサンプル値周期 T ごとに瞬時にサンプルして、つぎにサンプルするまで零時ホールドした偏差を PI コントローラに加えたままとし、その出力で制御するのである。

T/T_p が十分小さいと Fig. 9 の系の安定領域は十分広く、制御成績も連続制御系に近いものとなる。ただし $T/T_p=0.1$ 程度の値になると Fig. 10 (筆算により求められる) に示したように、本論文で提案した有限幅パルスサンプル値系より、安定領域は著しく狭くなる。

⑧ $(T/T_p) \doteq 1$ の場合

$\{\max(T-h)/\min(h)\} \gg 1$ の場合は、あまり問題はない。すなわち、連続制御をしている時間が圧倒的に多いからである。逆に $\{\max(T-h)/\min(h)\} \leq 1$ の場合は、1 周期についてホールドしている期間がプラ

Fig. 9 A sampling system when $(T/T_p) \ll 1$

Fig. 10 Stable region for the system of Fig. 11 when $(T/T_p)=1/10$

ント時定数の半分またはそれ以上になるので、一般的に、本論文で提案した方式ではうまくゆかないことが予想される。もしこのような場合で、 Q をひじょうに小さくしなければならぬ場合には、問題の機器を 2 台用意して交互に使用し、けっきょく連続系と同じになるようなくふうが必要となるであろう。

⑨ T/T_p が 0.1 付近の値でなく、またきわめて小さくもない場合

アナログ計算機で別個に検討してみる必要がある。

以上ではもっぱら緒言で述べたような目的に対し、本研究で提案した方式を使うことを考えた。また、 $\{(T-h)/T\} \leq 0.5$ で仕様にかかった制御のできる場合には、1 台の調節計を 2 つ以上の同じような制御対象に切り換えて使用するところのいわゆる多点切換制御方式の設計資料としても本研究のグラフが使用できる。

最後に本研究は、中村良治氏（現在日本レーヨン株式会社勤務）との協同研究⁹⁾の内容を拡充したものであることを付記する。

参 照 文 献

- 1) 井伊谷鋼一：計測と制御からみた粉体工学の現状と問題点，計測と制御，Vol. 2, 835/842 (1963)
- 2) 野坂康雄・中倉正雄・佐藤利明：熱電対使用の実例，オートメーション，12-9, 76/80 (1967)
- 3) 杉浦一郎・中村良治：検出部のドリフトを時分割で補償しながら行なう自動制御，計測自動制御学会論文集 1-4, 296/303 (1965)
- 4) G. Farmanfarma: Analysis of Sampled Data System with Finite Pulse Width, Trans. A.I.E.E. Vol. 75, Pt. 1, 808/818 (1956)
- 5) E.I. Jury: Sampled-Data Control System (森，西村，合田共訳・丸善) p. 272 以下
- 6) J. Tou: Modern Control Theory, McGraw-Hill Book Company (1964) p. 107 以下
- 7) 5) の p. 43/104 参照
- 8) 榎木義一・布川昊：サンプル値列の自乗和の計算法，日本機械学会論文集（第一部）760/762 (1959)
- 9) 杉浦一郎・中村良治：有限幅サンプル値制御系に P-I 調節計の活用，自動制御，5-2, 61/65 (1966)

— 付 録 —

有限幅パルスシグナルの発生方法

Fig. 2 に示したスイッチ S_1 と $\sim S_i (i=1, 2, 3)$ を

SC : comparator, R : relay, A : adder, I : integrator, P : potentiometer, P₁ : amplitude adjustment (positive side), P₂ : amplitude adjustment (negative side), P₃ : frequency adjustment, SW₁ : sampling command switch

behavior of switches and signs of voltage at each position when the output of I₁ is negative

Fig. 11 Finite width pulse generating circuit

一定時間ごとに交互に on-off させるためつぎに述べる回路を用いた。

アナログ計算機の要素を使って Fig. 11 のような回路を作り三角波を発生*させてつぎに行なう。

Fig. 11 において正負変換器 SC_k (k=1, 2, 3, 4) とリレー R_k で比較器を形成している。そして SC_k の入力が正になっているときのみ R_k は動作する**。それゆえ三角波の出力が正のとき、すなわち積分器 I₁ の出力が正のとき R₂, R₃, R₄ は動作してスイッチ SW₁, S₁ は on となり $\sim S_1$ は off の状態となる。

① computer put on と同時 (Fig. 12 中の a 点の時刻) に三角波は負に減小しはじめる。このとき I₁ の出力が負であるため R₂, R₃, R₄ は動作せず各部の電圧とスイッチの動作状態は Fig. 11 に示したようになり SW₁, SW₂, S₁ は off, $\sim S_i$ は on のままであるから PI 制御の動作が行なわれる。

② Fig. 12 の b 点では I₁ の出力が正になるため R_k は動作し各リレーの接点は切り換わる。そのため SW₁, SW₂, S₁ は on, $\sim S_i$ は off となる。そのため制御系は PI 調節計の働かないホールド制御の状態になる。

ここで SW₁ は on になるときのみ (Fig. 12 では矢印のときのみ) サンプリグ指令用のスイッチとして働き, SW₁ が on になると無接点スイッチ S₀*** が

- (1) triangular wave
- (2) sampling command switch SW₁
- (3) switch S₀
- (4) switch $\sim S_i$ (for control)
- (5) switch S₁ (for hold)
- (6) step disturbance

Fig. 12 Mutual operating relation among switches

on になる。このためゲート電流が 200 μ s のあいだ流れて、このあいだに SH に加えられている電圧をホールドする。このとき SH に加えられている電圧がホールドされたのちに S₁, $\sim S_i$ を切り換える必要があるため、SC₃ と R₃ の回路を余分にそう入して R₄ が R₂ より遅れて (5 ms) 動作するようにしてある。

③ c 点では I₁ の出力は再び負になるから各スイッチは①で説明した動作位置になり①～③が繰返される。このように三角波の負の値の間 (T-h) は PI 調節計で直接に連続制御を行ない、正の値の間 (h) は SH で保持されている一定の操作量で制御される。また比率 (T-h)/T はポテンシオメータ P₁, P₂ を使用して波高値を正側と負側それぞれ別個に調整し三角波を上かあるいは下へ移動して変化させる。三角波の周期は I₁ の倍率とポテンシオメータ P₃ で調節できる。

なおステップ外乱は a 点 (t=0) でだけ加えられる。また三角波の負の期間において第 1 回目 (a~b の期間) と第 2 回目以下 (c~d, ...) とを比較すると、第 1 回目の制御時間は他の制御時間に比較して約 5 ms 多く $\sim S_i$ が閉じている。これは computer put on のとき $\sim S_i$ が on の位置にあるためである。しかしかなり小さな時間であるため無視している。

* ALS-1000 プログラムマニュアル p. 47 参照。

** ALS-1000 オペレーションマニュアル p. 32 参照。

*** ALS-1000 SH 261 取扱説明書参照。