

アナログ計算機の自動プログラムシステム

Automatic Programming System of Analog Computer

三 浦 武 雄*
Takeo Miura

岩 田 純 蔵**
Junzō Iwata

平 原 由 光**
Yoshimitsu Hirahara

内 容 梗 概

アナログ計算機の操作の自動化を自動プログラミングと称している。このうち演算結果に基づいて次に行なうべき操作を決定し、自動的に解を求めようという閉回路自動プログラムシステムは固有値問題、境界値問題などの解析にきわめて効果的であり、従来のアナログ計算機の機能を拡大するに有効なシステムである。システムの概要、構成要素などについて説明し、終りにパンチテープ、パッチボード併用方式の自動プログラムならびに制御パッチ盤による自動プログラムの実用例を示した。

1. 緒 言

アナログ計算機（以下アナコンと略す）の操作の自動化をアナコンの自動プログラムと称しているが、これには係数用ポテンショメータの自動設定、パラメータの自動計画変更、計算機の自動点検のように、演算解とは全く独立に実施できる開回路自動プログラムと試行法のように演算解に基づいて適宜計算プログラムを変更しつつ操作する閉回路自動プログラムとがある。前者は主として機械の自動化に関するものであって、ディジタル入出力装置の発達とともに大形アナコンで実施されようとしているものである。これに対して後者は計算法の自動化に関するものであって計算機機能を増すうえにきわめて効果的なシステムである。

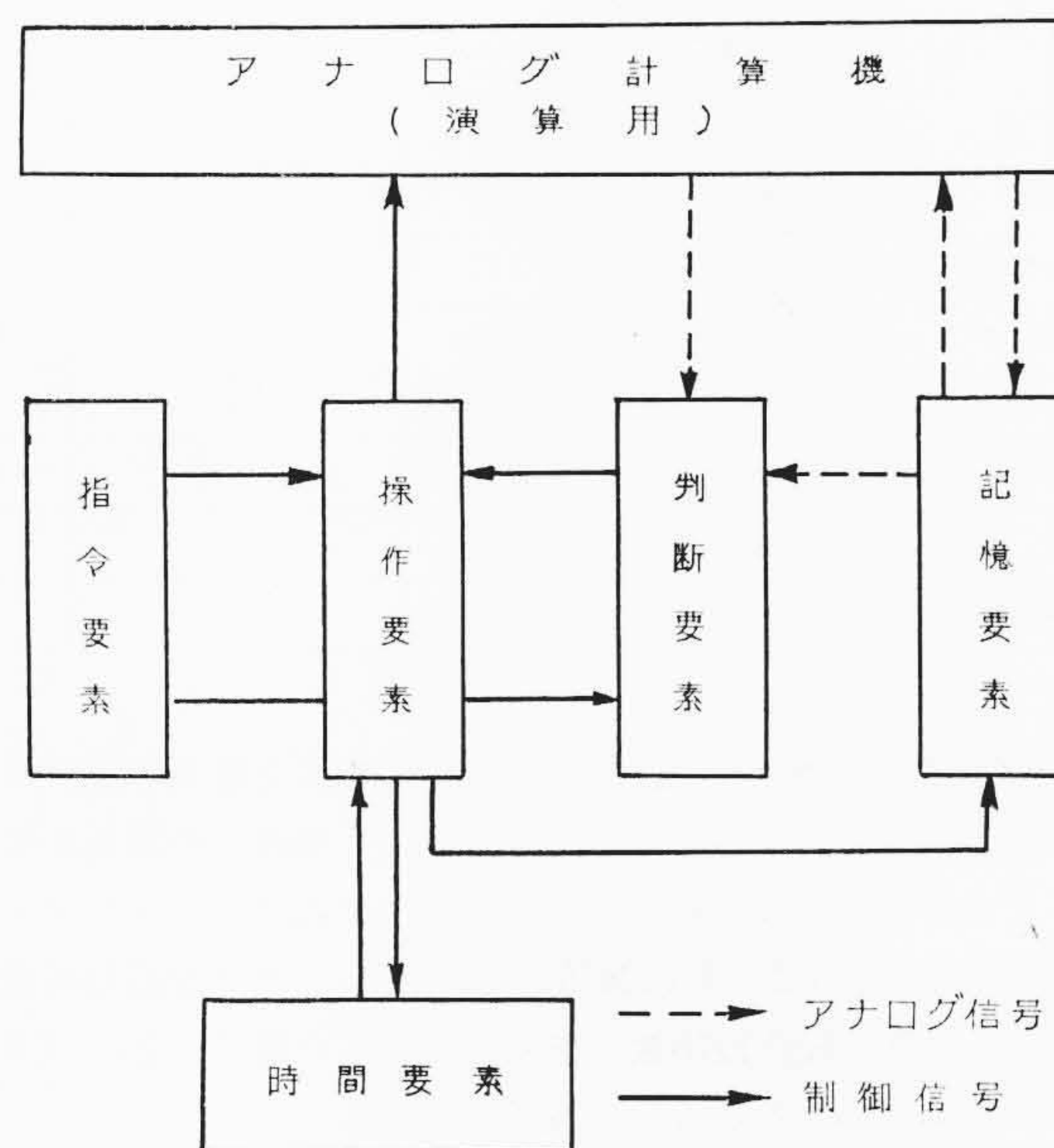
従来のアナコンはいわゆる初期値問題に適した計算機であって、境界値問題、固有値問題、極値問題のような場合には操作者の判断によって次の試行方式を決定し、実行するのが常で手順の複雑さ、人為誤差の混入が避けられなかった。これを解決するにはディジタル計算機（以下ディジコンと略す）と同様に判断要素、記憶要素、操作要素を付加し、ディジコンが計算を実施するのとあたかも同様に計算を行なわせればよいのであって、この思想に基づいて研究開発された装置が閉回路自動プログラム装置⁽¹⁾である。最近この考えは海外においても Iterative Analog Computation として開発⁽²⁾されつつあり、既にいくつかの計算機に実用されようとしている。その代表的なものはアメリカの DYSTAC⁽³⁾ (Dynamic Storage Analog Computer)であり、著者らによる自動プログラムシステムとはかなり趣きを異にするが、その目的とすることは全く上記と同じ理由に基づくものである。

本稿は自動プログラムシステムの概要ならびに製品化された装置を中心に主として使用法について述べるものである。理論的な内容に関しては文献⁽¹⁾にゆずる。

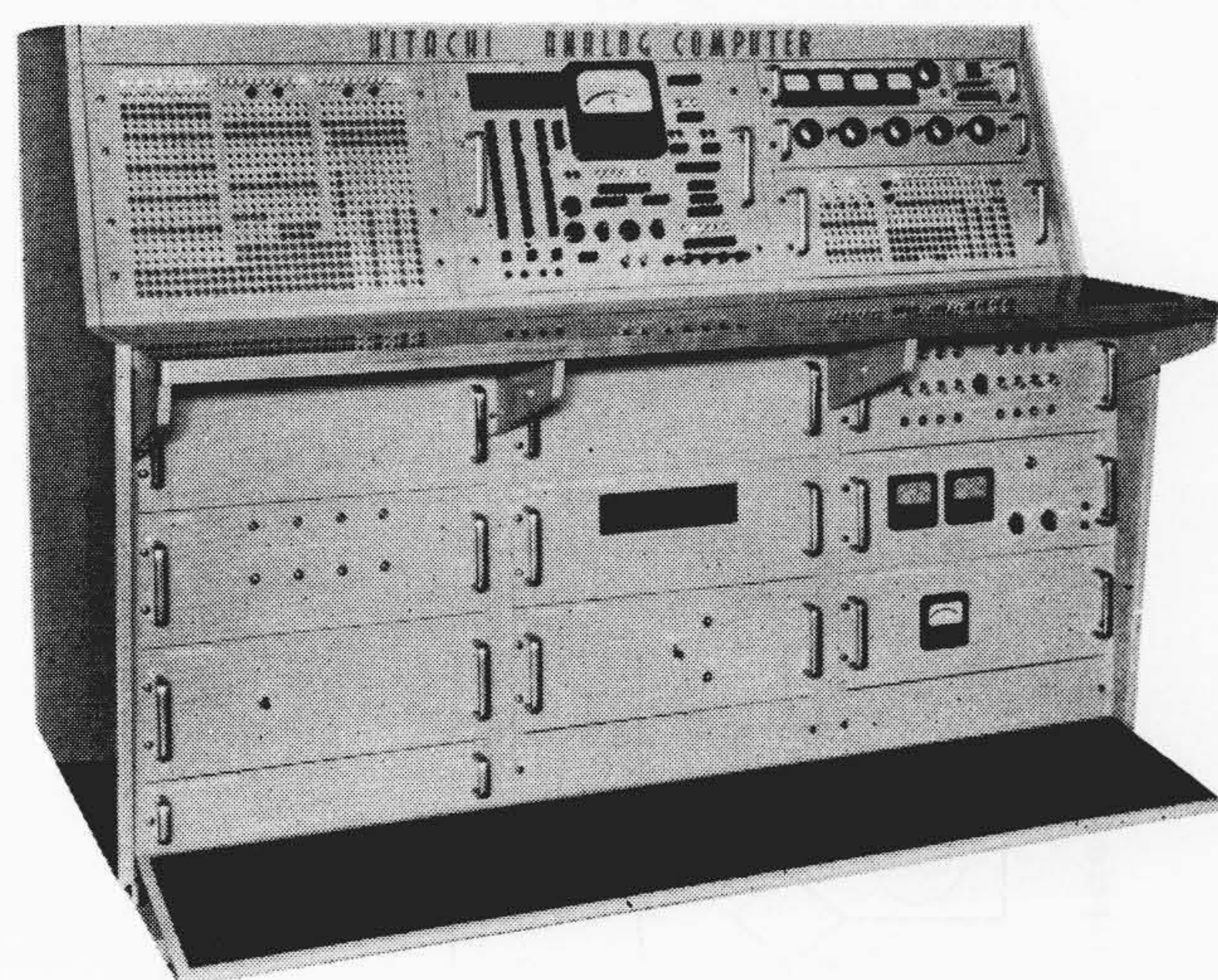
2. 自動プログラム装置の概要

2.1 システムの概要

本自動プログラムシステムは高精度を期するために演算用計算機として低速度形アナコンを対象とするものであって、第1図のブロック図に示すように計算機に指令要素、操作要素、判断要素、記憶要素および時間要素などを付加し、条件に従って自動的にアナコンを操作するものである。このうち判断記憶要素は演算用計算機の一部が使用されるため、このシステムのために新たに付加する部分は通常操作要素、指令要素のみである。この部分を特に自動プログラム装置と称している。いかなる条件のとき、いかなる操作（演算制



第1図 自動プログラムシステムのブロック図



第2図 万能形自動プログラム装置外観

御、演算回路の変更、設定定数の変更)をすべきかは、あらかじめプログラムをしておくのであって、このプログラムをパッチコードによる配線により行なうか、パンチテープにさん孔して行なうかによって、パッチボード式とパンチテープ式とがある。両者の得失をあげると次のとおりである。すなわち、パッチボード式の長所は、

* 日立製作所中央研究所

** 昭和電子株式会社

第 1 表 併用方式自動プログラム装置のプログラムの分担

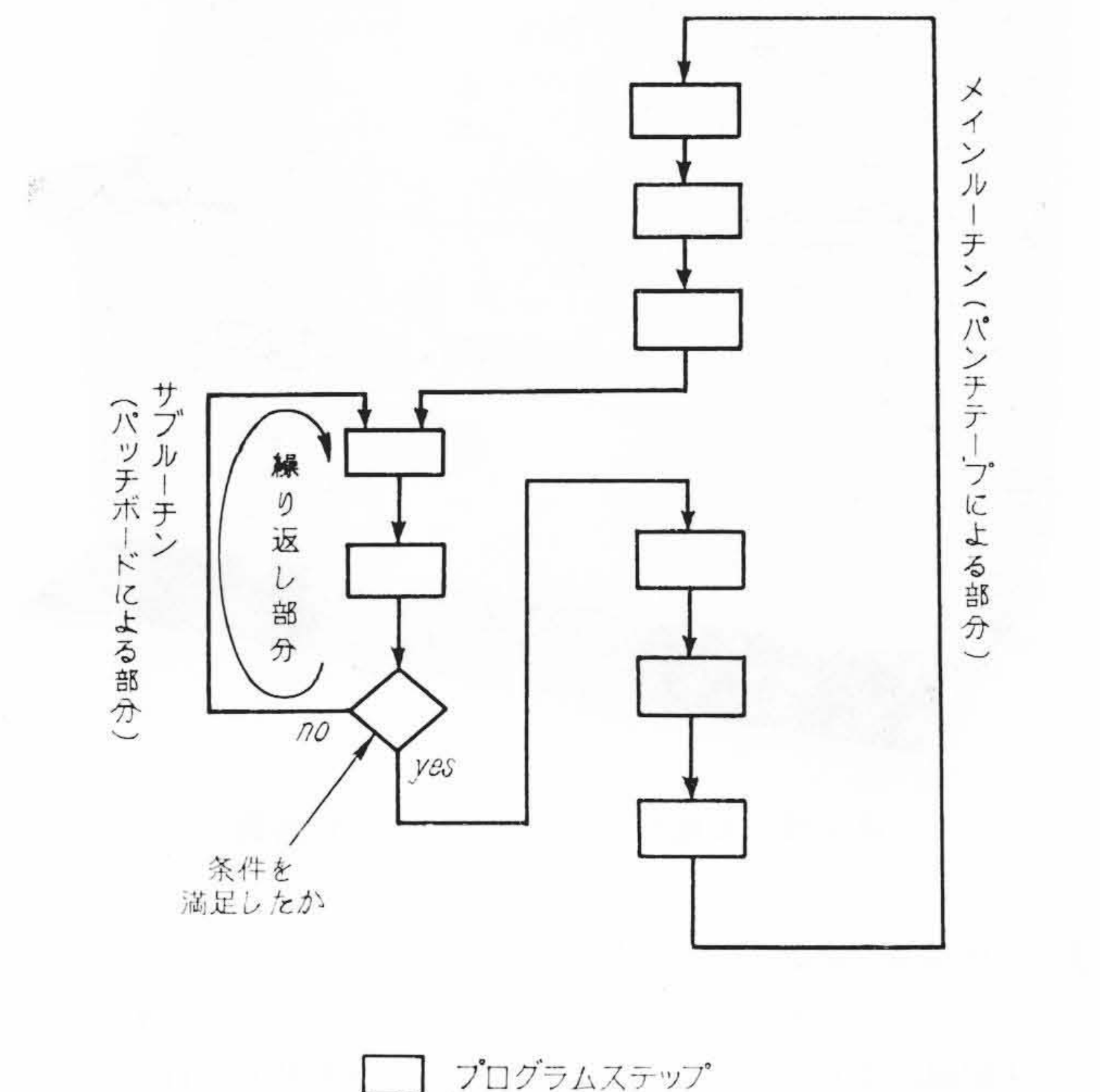
パンチテープにより行なうもの (比較的程序ステップの大きいもの)	① ポテンショメータの自動設定 (ポテンショメータによる記憶を含む) ② 回路切替 ③ デジタルポテンショメータの操作 ④ 条件による命令の飛越し ⑤ パッチボードによる命令の始動
制御パッチ盤により行なうもの (比較的たびたび利用されしかもプログラムステップの少ないもの)	① 演算制御 ② 記録器制御 ③ 回路切替 ④ デジタルポテンショメータ操作

第 2 表 自動プログラム装置各ユニットの使用例
(ビルディングブロック方式)

プログラム ユニット	使用内容	ポテンシ ョメータ 自動設定	適値取れん (パンチ テープ)	適値取れん (パッチ ボード)	パラメータ 計画変更 (パンチ テープ)	パラメータ 計画変更 (パッチ ボード)
さ ん 孔 機		○	○		○	
読 取 器		○	○		○	
翻 訳 器 盤		○	○		○	
条 件 飛 越 盤			○			
接 続 切 換 器 盤			○			
制 御 パ ッ チ 盤			○	○	○	○
自動設定ポテンショメータ		○	○			
デジタルポテンショメータ			○	○		○
比 較 器			○	○		
記 憶 回 路			○	○		

(1) 機構が簡単で値段が安く、(2) 指令要素を並列に設けることにより操作速度をあげることができ、(3) 間違いの修正が簡単であることである。これに対してパンチテープ式は、(1) プログラムが簡単であり、(2) 特に数値をパンチし、それを直ちに設定できること、(3) 操作段階数を無限に多数とり得ること、(4) プログラムの保存ができることが長所である。

第 2 図は両者の長を兼ね備えさせることを目標とした併用方式の万能形自動プログラム装置の外観の一例で、アナコンのデジタル入出力装置を兼用している。大形のアナコンでは既述のようにポ

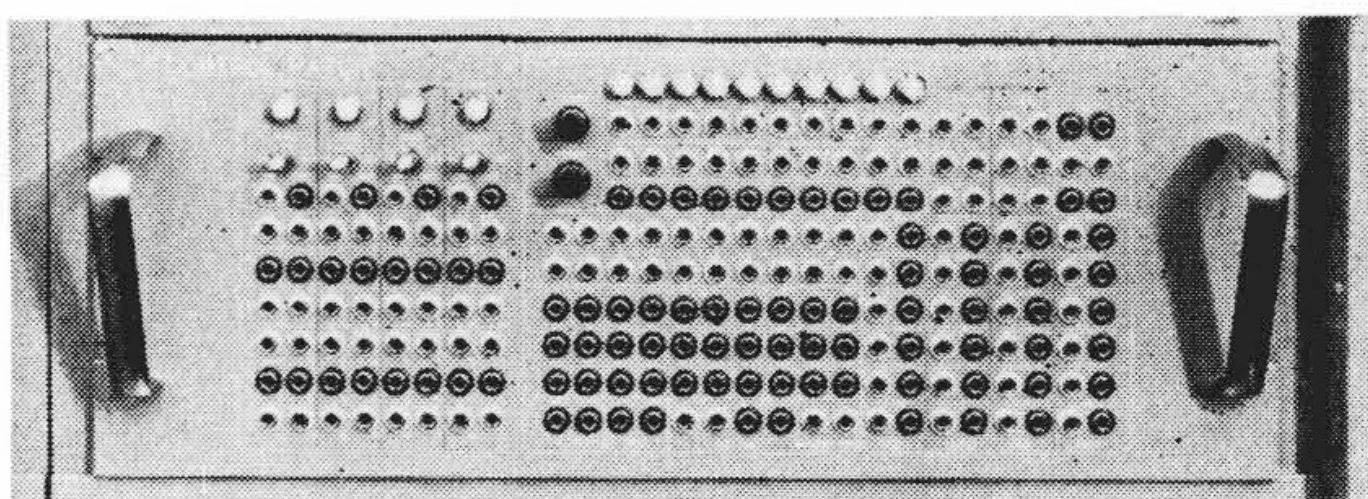


第 3 図 パンチテープパッチボード併用方式自動プログラムシステム説明図

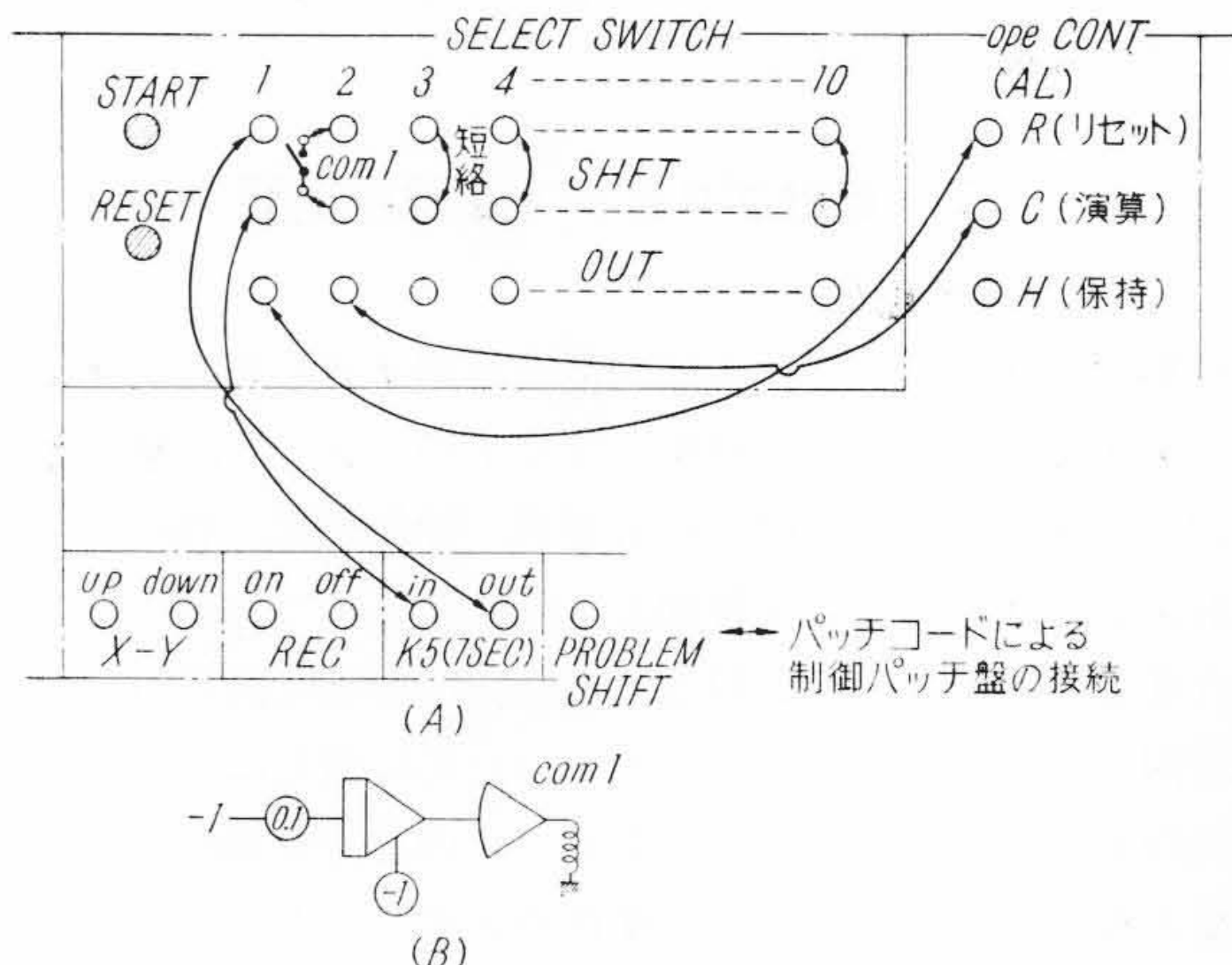
テンショメータの自動設定などのためにパンチテープを入力に用いるのが、国内でも次第に常識化しつつあるが、パンチテープ式自動プログラム装置はこの入力部をそのまま用いることができる長所がある。しかしすべての命令を一本のパンチテープのパンチのみにより行なわせると、テープを一巡する間の大部分が飛び越しのために費やされ、時間がかかる。この時間を節約するには、プログラムの各小ループごとにテープ読取り装置を並列に設ければよいが、この小ループは普通演算制御が主であり、複雑なパンチテープ読取器の必要はないと考えられる。したがって第 3 図に示すようにメインルーチンはパンチテープで、サブルーチンはパッチボード式で行なわせることにより時間の節約を図ることができる。これが併用方式の特長である。このプログラム用パッチボードを制御パッチ盤と称している。指令の分担は第 1 表に示すとおりである。問題のいかんによっては必ずしも大げさな自動プログラム装置を用意する必要はなく、その一部のみで十分であり、ここにビルディングブロックシステムが考えられる。第 2 表は各構成ユニットとその組み合わせの一例を示したものである。

2.2 制御パッチ盤によるプログラム

最も簡単なパッチボード式自動プログラムは制御パッチ盤のみでも行なえるのであって、これについて説明する。第 4 図はこの外観写真である。パッチ盤中央上部に 10 個の端子 (セレクトスイッチ) が設けられており、回転リレーのワイパが回転することによりこの端子は順次リレー電源に接続される。したがってこの端子を希望する指令順序に従って演算制御用や回路切替用のリレー巻線に接続しておけば、これらの巻線が順次励磁され配線された順序に操作を行なうことができる。これら端子のそれぞれに対し一組ずつのシフト端子があり、シフト端子間が短絡されているときは回転リレーのワイパは一定の時定数で次に移り、シフト端子間が開放されているときはワイパはそこで一時停止し、短絡されるに及んで次に移る。したがってある操作を一定時間 (若しくはある条件に達するまで) つづけたいときは、ワイパがこの端子まで来たら一定時間後 (あるいは要求の条件を満足したとき) に短絡する接点をこの端子間に配



第 4 図 制 御 パ ッ チ 盤 外 観



第 5 図 制御パッチ盤によるプログラムの例

線しておけばよい。今一例としてリセットと10秒間の演算を繰り返したいときは第5図のように励磁端子の1, 2をそれぞれ演算制御(OPE CONT)のリセット(R)および演算(C)の端子にパッチコードで接続し, 1のシフト端子は遅動端子に, 2のシフト端子はコンパレータのリレー接点に配線する。遅動端子(K5)はリセット時間をかせぐための専用端子で, 図のように接続しておくとワイパがこの1の端子に来て約7秒後にシフト端子が短絡される。したがって約7秒リセットしてワイパが次に移り, 演算を行なうことになる。演算回路の一部でたとえば第5図(B)のように10秒後にコンパレータ接点が動作するように回路を作っておけば, ここで演算が打切られてワイパが次に移る。3番ないし10番までのシフト端子は短絡しておく, ワイパは一巡してまたリセットに戻り, 以後同じことを繰り返す(どの演算制御用の端子も励磁されていないときは演算回路は保持の状態を保つよになっている)。この制御パッチ盤では励磁端子(セレクトスイッチ)が10個あるので10段階までの操作を自動的に繰り返し行なわせることができる。また条件に応じてオンオフする接点(たとえばコンパレータのリレー接点など)をプログラム用の配線の途中に入れることにより条件に応じて2種類の操作を選択することや, 飛越しも可能である。このように制御パッチ盤だけを用いてある程度の自動プログラム演算ができる。その二, 三の実例を後に示す。

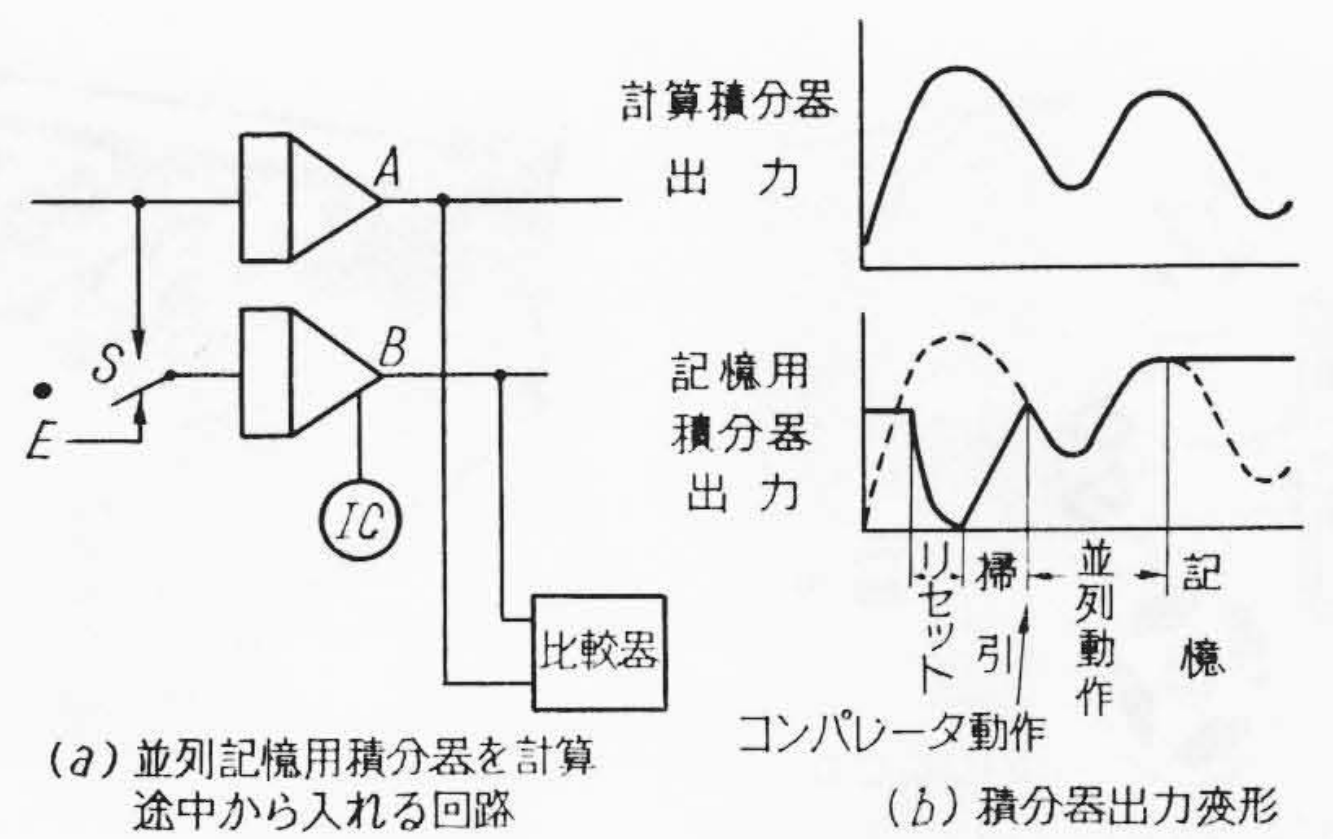
2.3 パンチテープによるプログラム

パンチテープは6単位のもので, 一つの命令は文字1と数字2, または数字のみの3字からなる。文字は命令の種類を示し, つづく二つの数字が番地に当るもので, 数字のみ3字の場合はポテンシオメータ自動設定の際の分圧比を指定するものである。第3表に命令の一覧を示す。

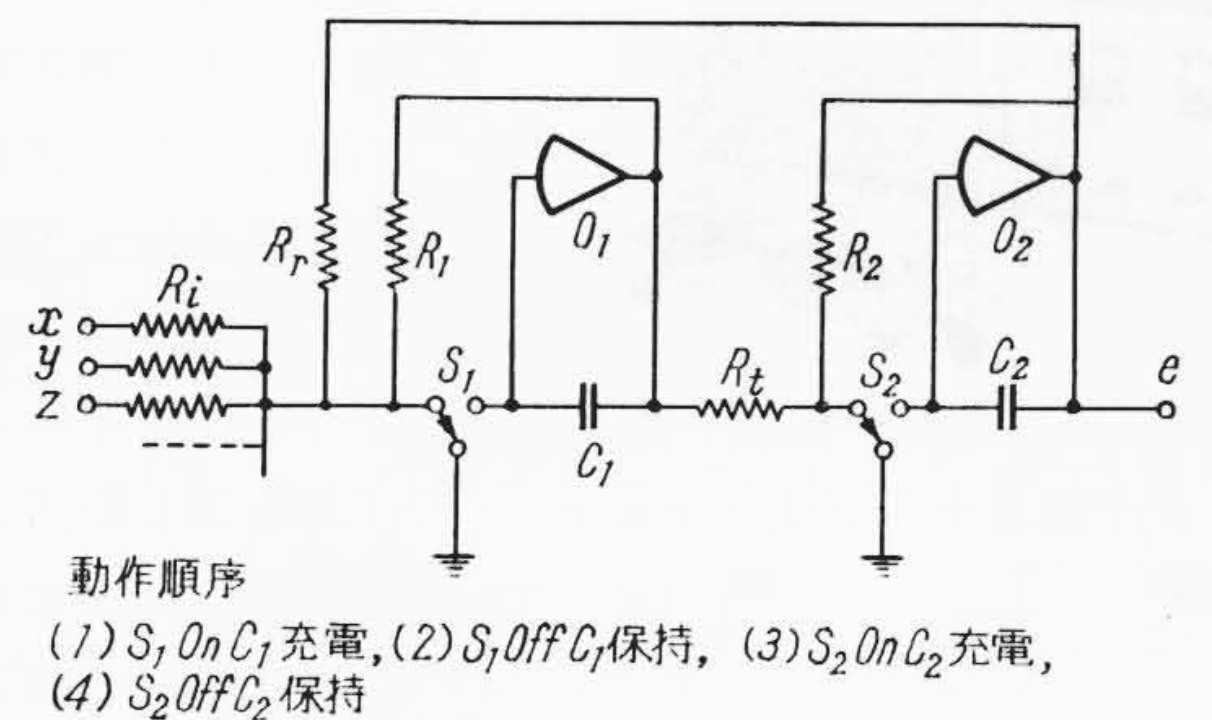
パンチテープを用いて自動プログラム演算を行なわせるには, 行なわせたい演算のフローチャートを作り, このフローチャートにしたがってパンチしてゆけばよい。条件によっていくつかの異なった操作を行ないたい場合は, その一つ一つの操作命令の前に飛越しの指令をおき, 指定された条件でない場合はその操作命令が行なわれないようにすることにより希望の操作を行なわせることができる。パンチテープによる命令には演算制御に関するものではなく, これは制御パッチ盤で行なう。パンチテープによる命令から制御パッチ盤による命令に切り替えるにはP00~P03およびQ00~Q09なる命令をパンチしておく。Pのあとにつく番地は始動すべき制御パッチ盤を指定するもので(第2図の装置では4個ある), Qのあとの番地はパンチテープによる命令に戻るための条件を示すものである。Qなる命令を読むとパンチテープの送りは停止するが, Qのあとに指定された番地の端子が短絡されると, またパンチテープが始動する。

第3表 パンチテープ, パッチボード併用方式
自動プログラム装置の命令

命 令	命 令 の 説 明
A00~A99	自動設定ポテンシオメータの1個を選択する。(Auto pot)
000~999	上記ポテンシオメータを0.000~0.999の分圧比に設定する。
B00~B99	自動設定のポテンシオメータ入力選択。(A→B)
D01	デジタルポテンシオメータ1ステップ動かす。(Digital pot)
D02	デジタルポテンシオメータ1ステップ逆に動かす。
D03	デジタルポテンシオメータ零にせよ。
D04	デジタルポテンシオメータ第1けたにせよ。
D05	デジタルポテンシオメータ1けた下げよ。
P00~P03	パンチテープ停止, パッチボードによるプログラム始動 (Patch board Program)
Q00~Q09	パンチテープ再始動の際の始動信号入力端子指定 (P→Q)
R00~R09	接続切換器盤のリレーオン (Relay)
S00~S09	接続切換器盤のリレーオフ (R→S)
J00~J09	接続切換器盤の条件端子オンなら飛越し開始 (Jump)
K00~K09	飛越し停止 (J→K)



第6図 動的記憶要素



第7図 アナログ累算器原理図

3. 自動プログラム要素

自動プログラム装置を構成する要素としては判断要素(たとえば電圧比較器), 記憶要素, 操作要素など種々の要素が用いられるが, このうち特色あるものについて述べることにする。

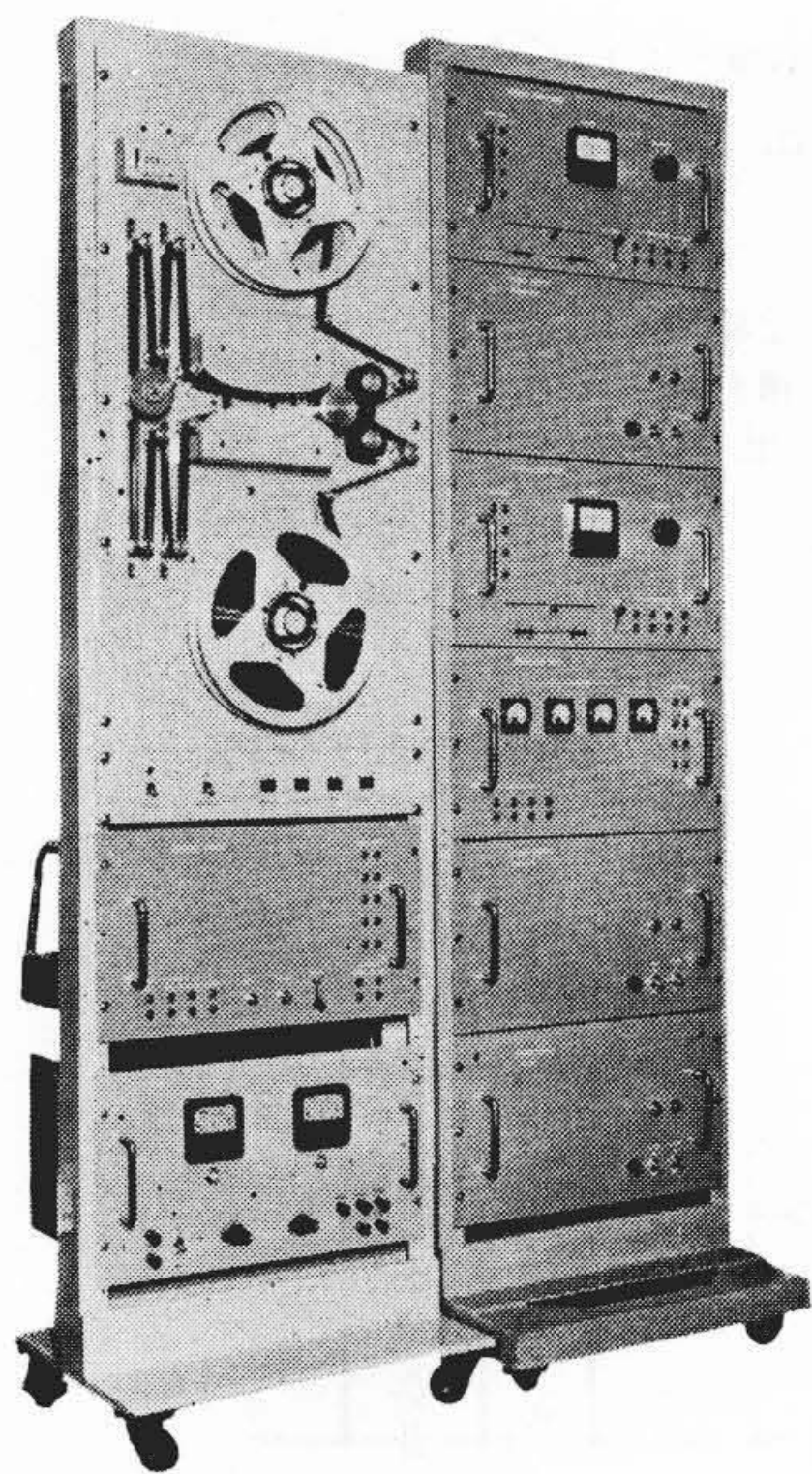
3.1 記憶装置

自動プログラム要素のうち, 特に重要なものとして記憶要素がある。すなわち, 演算結果を過去の結果と比較する場合や, 過去の結果に基づいて設定定数を変更する場合などにおいて必要である。著者の用いたアナログ記憶要素には多種のものがあるが, これらのうち比較的簡便な記憶用積分器について述べる。

これは積分器の保持特性を利用したものであって, その使用法は記憶に際し, 演算を停止してよい場合とできない場合とにより大いに異なる。前者に対しては, たとえば演算回路を2組以上設け, 計算していた積分器を“保持”にし, そのまま記憶用積分器にしてもよいし, また計算機を一時保持の状態にし, 記憶すべき電圧を他の記憶用積分器の初期値電圧として加え, そのまま保持させてもよい。後者の場合は解の途中の値を記憶するために前者ほど簡単ではない。これには演算回路と並列に記憶用積分器を使用し, 記憶すべきときに記憶用積分器の入力を切って保持させればよい。実際には記憶用積分器の個数を節約するために一度利用した記憶用積分器を再度演算回路にそう入し, これを利用することが得策である。これに対して著者の提案した方法を第6図に示す。図示のように演算ならびに記憶用積分器の出力を比較器に入れ, 記憶用積分器はいったん上限または下限にリセットしてから一定入力を加えて出力を全域にわたって掃引し, 演算用積分器の出力の値と等しくなったときを比較器で検出し, その瞬間に継電器接点Sを切り換えて計算回路に並列に入れ, 記憶すべき時刻がきたときに再びSを切り離して保持の状態にすればその目的を達する。

さらに記憶用積分器はアナログ累算器としても使用できる。ここに $x_i, y_i, z_i, \dots (i=1, 2, 3, \dots)$ なる入力がある場合に

$$e_n = \sum_{i=1}^n (x_i + y_i + z_i + \dots) \dots \dots \dots (1)$$



第8図 試作磁気テープ式アナログ記憶装置

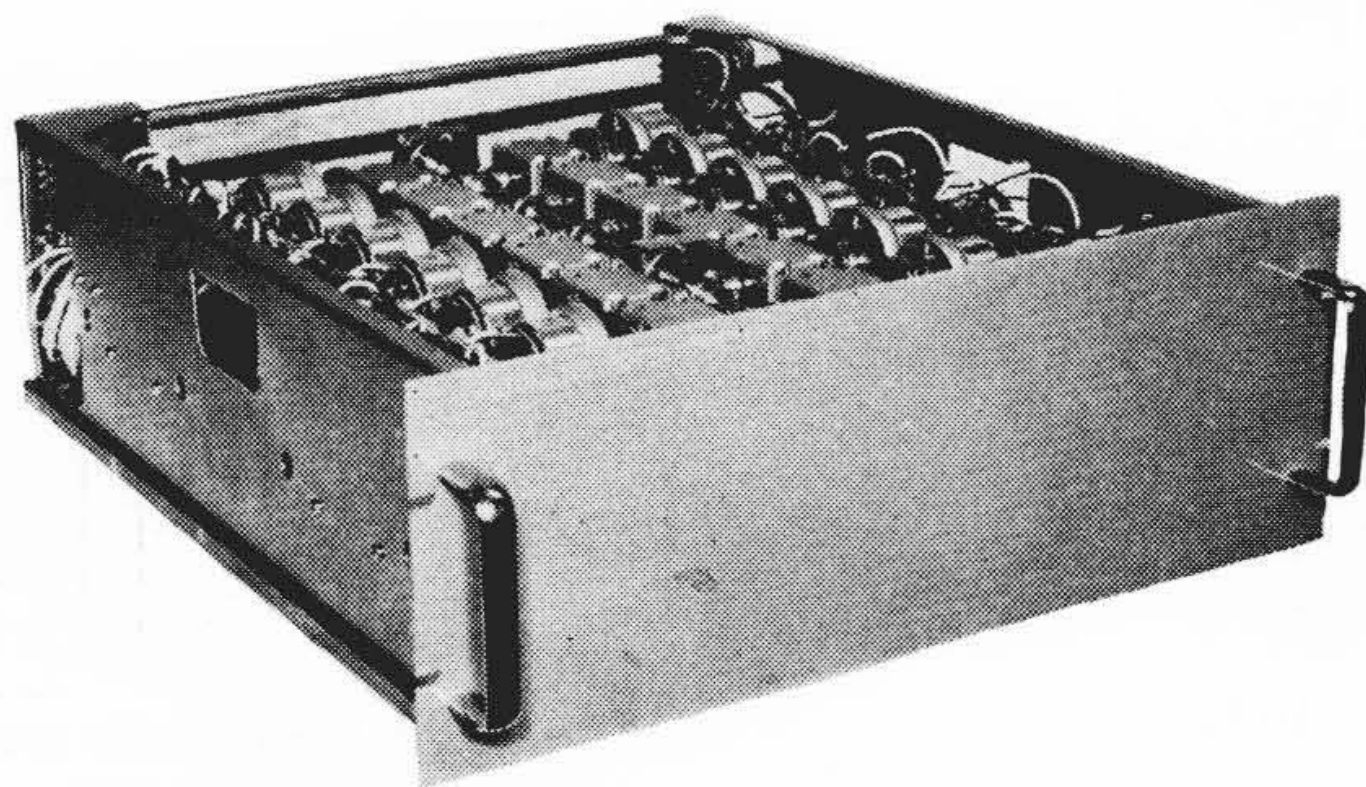
なる出力を得るのが累算器である。第7図は著者の行なった方式を示す。動作は増幅器1, 2の順序で初期値設定と保持をくり返すことにより、まず増幅器1の出力が入力の合計になるまでコンデンサ C_1 が充電されて保持され、次いで増幅器2の出力が増幅器1の保持出力に等しくなるまでコンデンサ C_2 が充電され保持されるものである。以上は演算時間中の特定の1時点における出力を記憶するものであるが、時間的に変化する量を記憶するための装置としては磁気テープが最も便利である。第8図に試作した磁気テープ式アナログ記憶装置⁽⁴⁾の外観写真を示す。

3.2 自動設定ポテンシオメータ

操作要素の一つである自動設定ポテンシオメータはテープによる自動定数設定用として使用されるのが主目的であるが、そのほかに多数の変量の記憶装置としても用いられる。第9図に自動設定ポテンシオメータの外観写真を示す。これは一つのサーボモータで、クラッチにより14個のポテンシオメータを設定できるもので、テープ読取器が自動設定ポテンシオメータの番地(A00~A99)を読み出し翻訳すると、その番地のポテンシオメータのクラッチが励磁されてポテンシオメータがシャフトに機械的に接続され、同時にポテンシオメータ入力基準電圧側に、出力はサーボ増幅器の入力側に切り換えられる。続いてテープが数字のみからなる命令を読み出すと、D-A変換器によりその数字に対応した電圧となり、これがサーボ増幅器のもう一つの入力として入り、サーボモータが前記シャフトを駆動し、平衡するとポテンシオメータ分圧比はパンチされた数字に対応することになる。ポテンシオメータを記憶装置として用いる場合は、ポテンシオメータ番地のあとにB00~B09なる命令をパンチしておけば0~9番の端子の電圧が、D-A変換された電圧のかわりにサーボ増幅器の入力に加えられる。したがって平衡に達したとき、ポテンシオメータ分圧比は、このポテンシオメータ自動設定用の端子に接続された電圧と対応する値になり記憶ができる。1個のポテンシオメータ設定に要する時間は最大3秒、自動設定の精度は0.05%以内である。

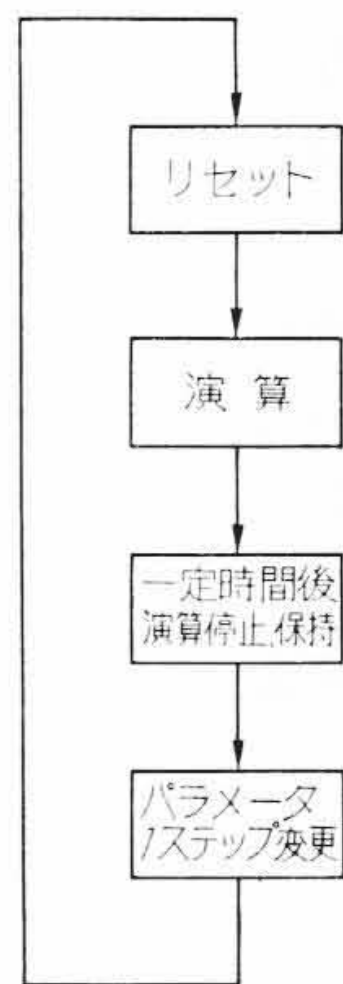
3.3 デジタルポテンシオメータ

デジタルポテンシオメータは、パラメータを一定間隔で順次変更する場合、あるいは演算結果に応じて自動的にパラメータを粗あるいは密に増減し、適値に設定するために用いるものであって、0.001 おきに0~0.999分圧比が設定できるポテンシオメータである。動かすべきけたを指定し、この指定されたけたに応じ0.1, 0.01 または0.001のステップで分圧比を増減することができる。この動作



第9図 自動設定ポテンシオメータ外観

なる出力を得るのが累算器である。第7図は著者の行なった方式を示す。動作は増幅器1, 2の順序で初期値設定と保持をくり返すことにより、まず増幅器1の出力が入力の合計になるまでコンデンサ C_1 が充電されて保持され、次いで増幅器2の出力が増幅器1の保持出力に等しくなるまでコンデンサ C_2 が充電され保持されるものである。以上は演算時間中の特定の1時点における出力を記憶するものであるが、時間的に変化する量を記憶するための装置としては磁気テープが最も便利である。第8図に試作した磁気テープ式アナログ記憶装置⁽⁴⁾の外観写真を示す。



第10図 パラメータの計画変更のフローチャート

はパンチテープの命令D01~D05によるか、あるいは制御パッチボードによるプログラムによる。この要素はリレーと回転スイッチにより構成されている。

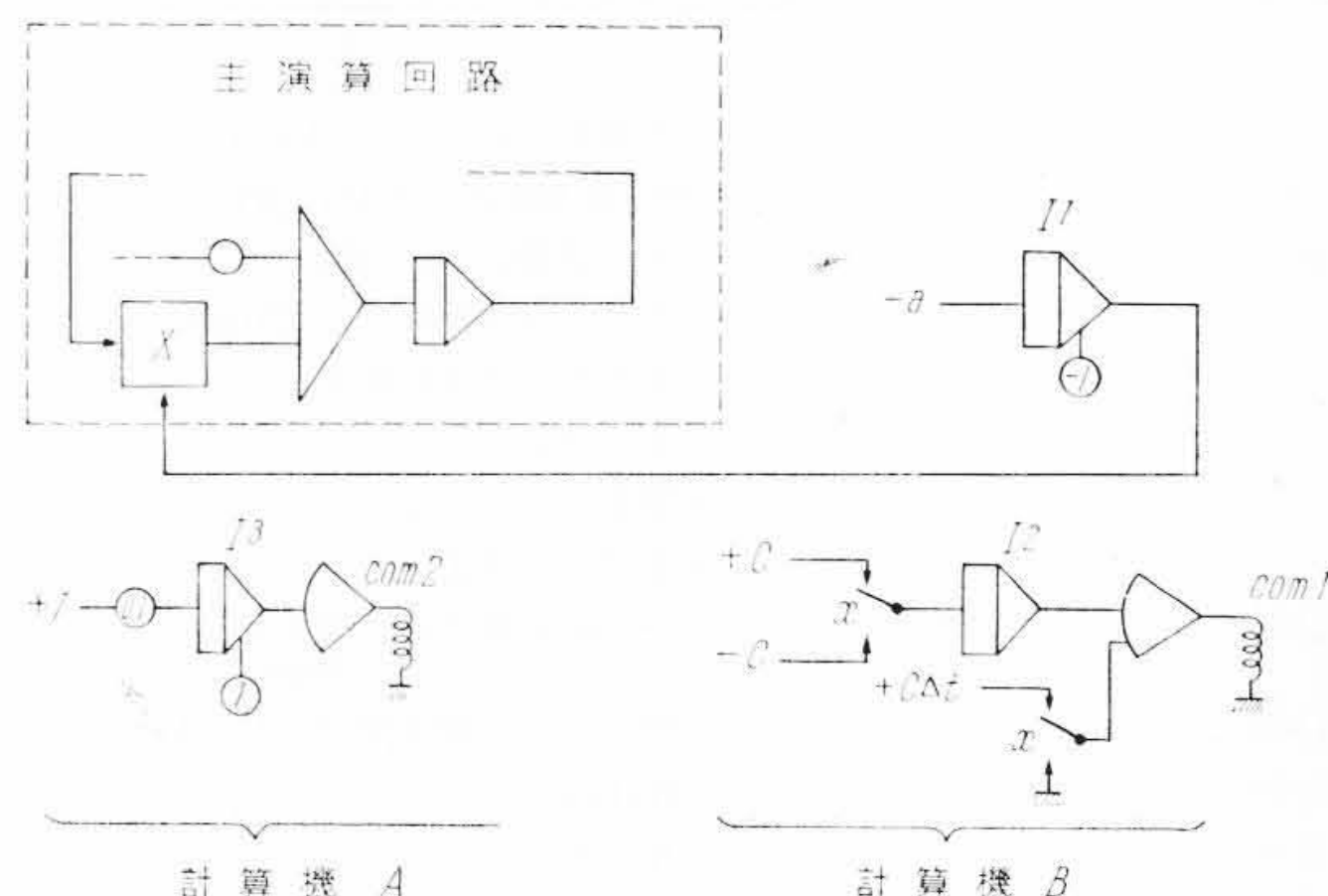
4. 制御パッチ盤のみによる自動プログラムの応用例

4.1 パラメータの計画変更

アナログ計算機で演算を行なう場合、ただ一つのパラメータの組み合わせで演算を行なうことは少なく、パラメータを種々に変えて演算を行ない、パラメータの変化が解にどのような影響を与えるかを見るのが普通である。変化すべきパラメータの数が多いとその組み合わせの数が急激に増し、演算する場合にいちいちポテンシオメータを変えることも、またその得られた解から必要なデータを読み取って整理することもはなはだ手数のかかる仕事になる。ここではパラメータを一定間隔で順次変えて自動繰返し演算を行なった例について述べる。さらに解をペン書きオシロに記録するのみでなく、X-Y記録計を用い、横軸にパラメータの値を、縦軸に解中の必要な値を描かせることにより、パラメータ変化の効果を一目で見られる資料を得ることもできる。

以上のことを行なうための手順をフローチャートに作ると第10図になる。すなわちこの問題は開回路自動プログラムの一例で計算結果に応じてプログラムを変える操作は必要ないが、パラメータを順次変更する必要がある。これには第11図のように主演算回路と別個に制御できる積分器I1を用い、一定値を一定時間 Δt だけ積分して保持させ、これを掛算器の一方の入力とすれば、この掛算器の他の入力と出力の関係は積分器出力の値に設定された係数用ポテンシオメータと全く同様であり、これを用いて演算回路を作ることができる。一定時間 Δt 積分するためには、この積分器と全く同様に制御される積分器I2を用い、同様に一定電圧 c を積分し、電圧が $c \Delta t$ だけ変化したことを比較器で検出することにより時間をきめる。I1の出力は一回の演算ごとに $a \Delta t$ ずつ増加するが、I2の出力は交互に $c \Delta t$ ずつ増加と減少を行なうよう、入力の極性と比較器の比較電圧をリレーXの接点により切り換える。

第4表にこの2つの計算機の制御を含む操作の順序を示す。制御



第11図 積分器と掛算器によるパラメータ計画変更演算回路

第4表 パラメータ計画変更操作手順

制御 ステップ	動作順序	次に移る条件
1	計算機Aリセット	7 遮 後 (遅動端子 K5 による)
2	計算機A演算	10 秒 後 (比較器 2 の出力による)
3	計算機B演算	5 秒 後 (比較器 1 の出力による)
4	{ リレーY off ならリレーX on リレーY on ならリレーX off	即 時
5	{ リレーX on ならリレーY on リレーX off ならリレーY off	即 時

第5表 パラメータ計画変更用操作要素とその特失

要素名	長 所	短 所
ポテンショメータのリレーによる切換	任意の値を設定し得る。特別の装置不要。変更ステップ数の少ない場合に適す。変更すべきパラメータステップが多いと要素多数必要となりプログラム複雑となる。	
積分器と掛算器	特殊の装置不要。ステップ間隔を任意に変え得る。変更ステップ数の多い場合に適す。プログラムやや面倒。	
自動設定ポテンショメータ	任意の値を設定し得る。プログラム簡単。	
デジタルポテンショメータ	プログラム簡単。ステップ間隔は一定である。	

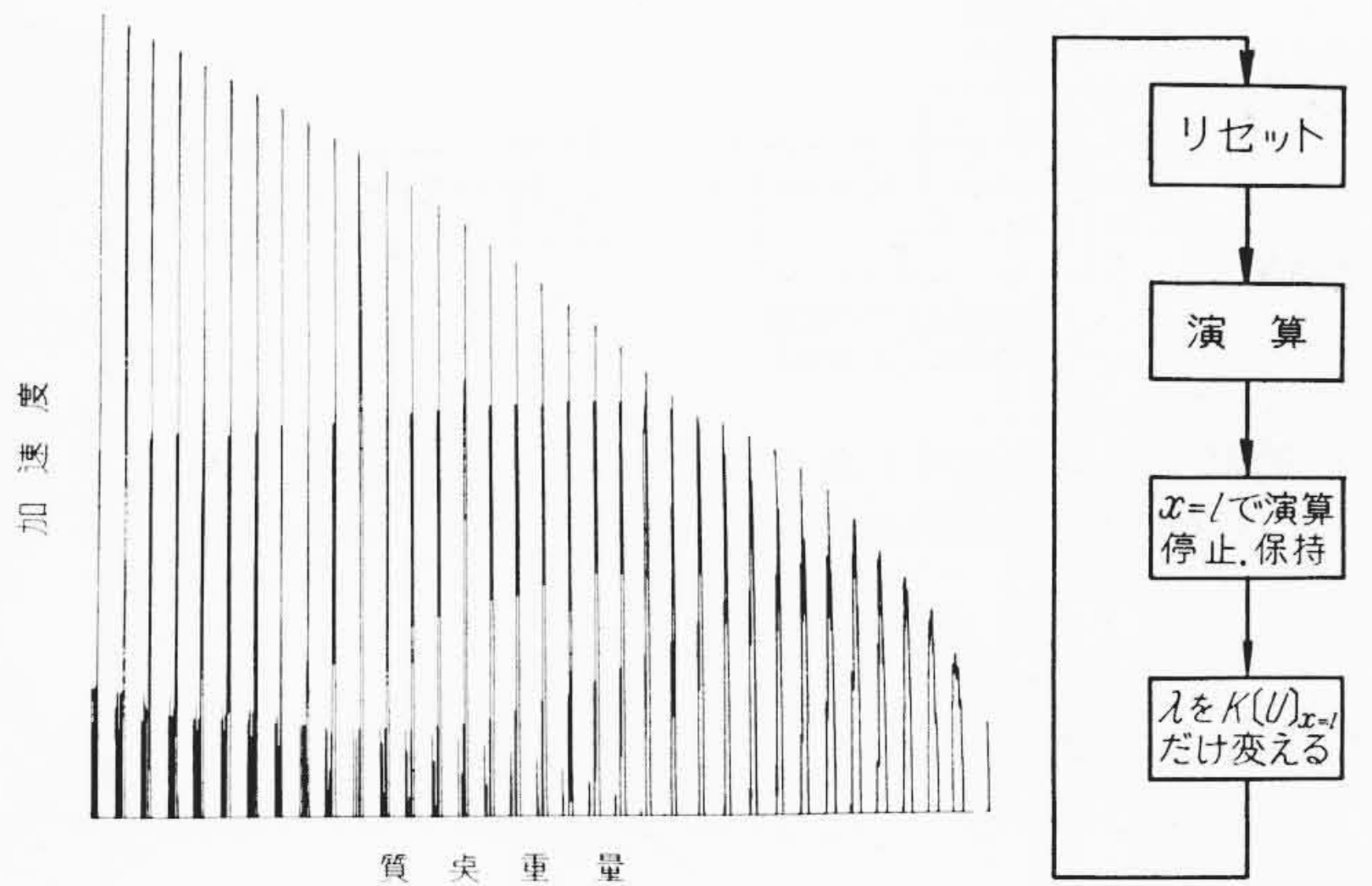
パッチ盤の接続はこの操作手順に基づいて行なえばよい。

第12図は非線形の連成振動系にステップ入力を加えたときの加速度の応答を求めたもので、一質点の重量をパラメータとして横軸に取ってある。これはたとえば車両振動と積荷との関係を示すものであるが、横軸に取るパラメータにより、あるいは周波数応答の記録、あるいは自動制御装置の設定値とステップに対するオーバーシュートの値を示すなど、アナコンを用いる場合の大部分はこの種のデータ処理ができるものといってよい程である。またこの例の場合は加速度の最大値を求めることを目的として、Y軸には解そのものを書かせたが、最大値に達するまでの時間、振幅が一定値以下になるまでの振動回数など、演算回路には電圧として現われていないものも、適当な演算回路や比較器を用いて電圧に変換しY軸に示すことができる。

上記のパラメータ変更の手法は制御パッチ盤と個別に制御できる積分器のみを有する場合であるが、このほかにも種々の方法がある。第5表にその特失を示す。使用目的および要素の有無により適当に使われればよい。

4.2 境界値問題、極値問題

この種の問題は閉回路自動プログラムの典型的な例題である。初期値問題は与えられた条件で演算を行なえば、ただ一回の演算で直ちに解が得られるが、境界値問題や極値問題は普通試行法と称し、幾度も演算を繰り返すことによって解かれる。これらの問題は演算を行なうに必要なパラメータ中に不明なものがあり、与えられた条件に適するよう、そのパラメータを定めなければならない。試行法はパラメータを順次変えながら繰り返し演算を行ない、その解から目的とする解を得るためにパラメータをいかに変えればよいかを判断し、次の演算を行なうのである。このパラメータの変更方法はある一定法則に従って行なえば終わりに正解に収れんさせることがわかっていることが多く、この判断と操作手順に従ってフローチャートを作り、制御パッチ盤に配線すればよい。収れん方法と収れん性については文献⁽¹⁾にゆずる。第13図に固有値問題のフローチャートの一例を示す。これは弦の振動の方程式



(質点重量値を自動変更)
第12図 非線形連成振動系の
加速度応答

第13図 固有値問題
(弦の振動)の自動解
析用フローチャート

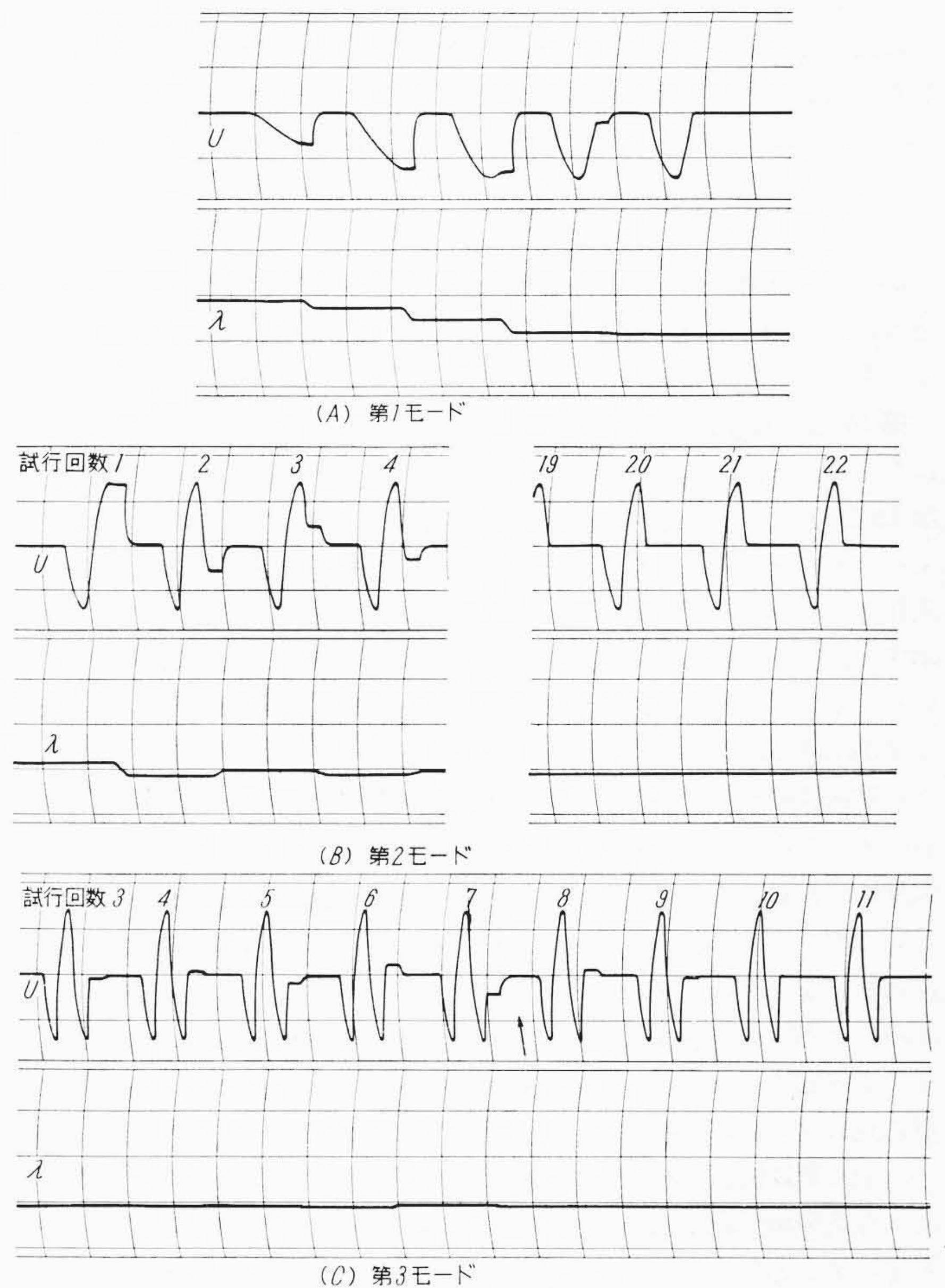
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \dots \dots \dots (2)$$

ただし u : 弦に直角方向のずれ
 x : 弦の方向に測った距離
 t : 時間

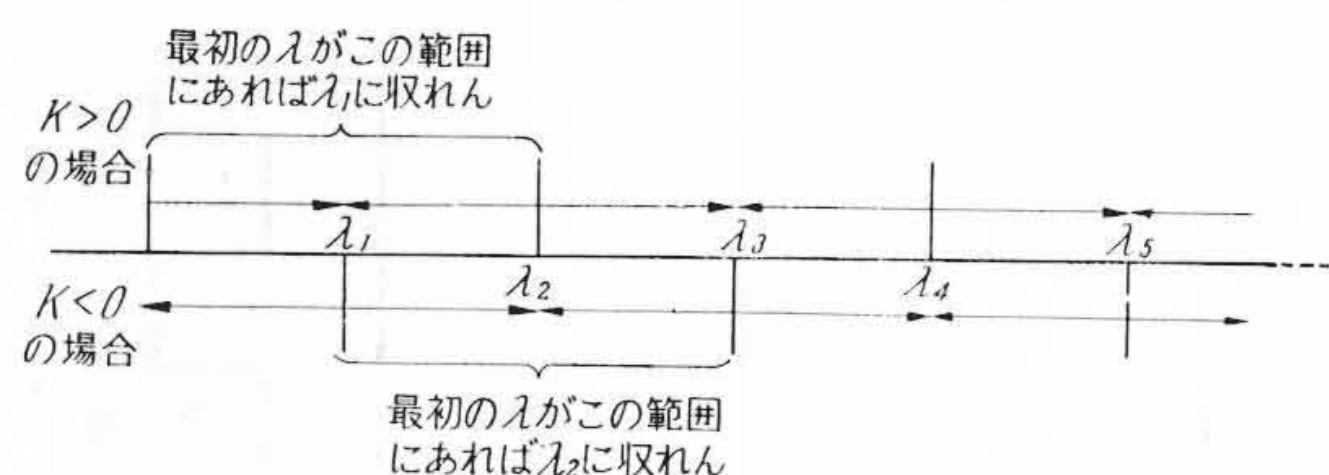
を変数分離法により

$$\frac{dU^2}{dx^2} = -\lambda^2 U \dots \dots \dots (3)$$

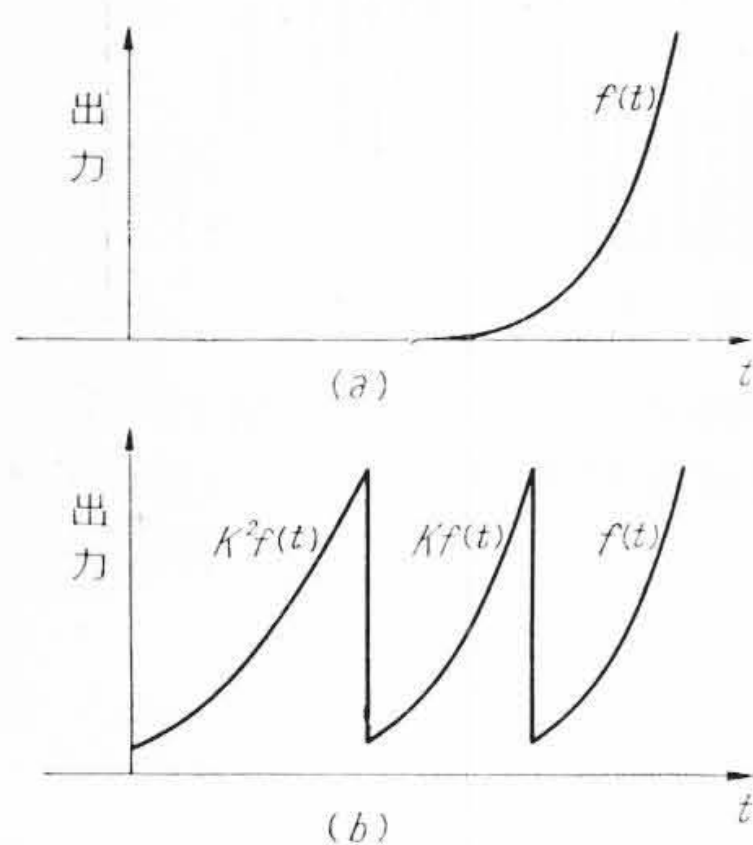
ただし U : 振動振幅で x のみの関数



第14図 固有値問題(弦の振動)の自動解析例 (第1～第3モード)



第 15 図 K の符号と第 1 回試行の λ による λ の収れん値 (弦の固有振動解)



第 18 図 換算係数の自動変換説明図

とした場合、固定点における境界条件

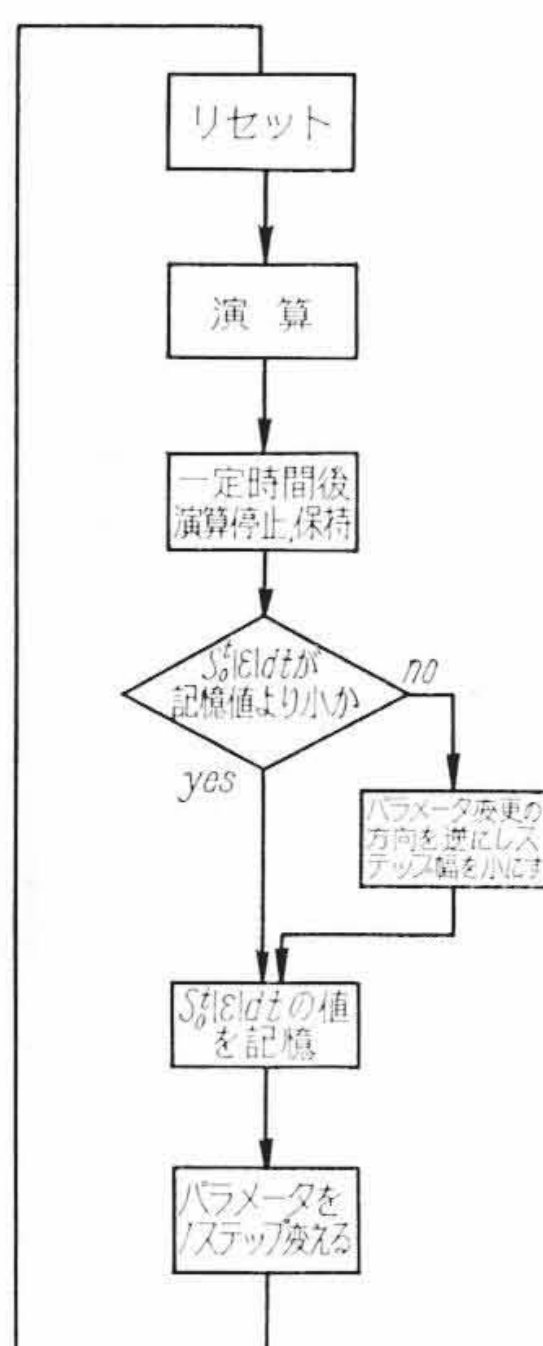
$$U=0 \quad (x=0, l)$$

を満たす解を求める場合のフローチャートである。第 14 図にこのフローチャートによる解の一例を示す。この問題では条件を満足する解は無数にあり、パラメータ訂正用の係数 k の符号によって λ の安定な収れん点は第 15 図に示すように一つおきに生ずる。あるモードの解を得たならば、 λ を希望する方向に少し変えたうえ k の符号を逆に切り替えれば次のモードの解が得られる。この訂正用の係数 k の値が小さいと収れん速度がおそく、大きいとやはりおそくなり、終りには発散するようになる。その限度は解の付近では

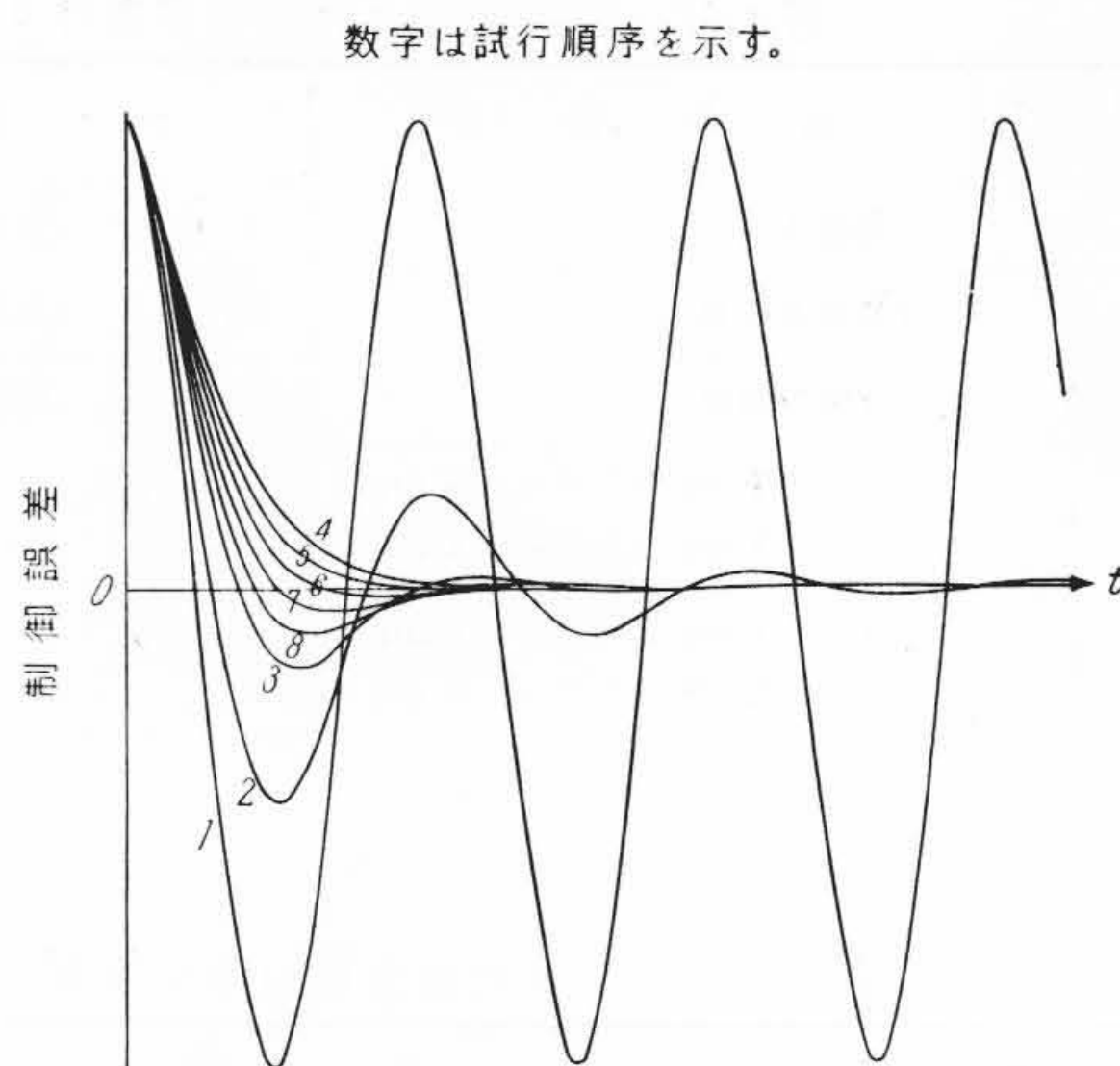
$$|k| < 2 \left| \frac{\partial [U]_{x=l}}{\partial \lambda} \right|$$

であるが、自動繰返し演算をさせながら解の変化状況を見て手動で適当に定めてもよい。第 14 図の第 3 モード矢印のところで手動により k を小にしている。

第 16 図は極値問題のフローチャートであり、試行後前回より大になったか小になったかを判断するために記憶装置を必要とする。第 13 図のフローチャートは解の希望条件からのずれの量に比例してパラメータを変化させたが、この場合はパラメータを一定値ずつ変化させる方法をとっている。第 17 図に極値問題による解の例を示す。記憶装置としては個別に制御できる積分器を記憶装置としている。本例は自動制御系においてダンピングを変えて制御誤差面積を最小にする問題である。同じ 1 パラメータの極値問題にしても、その解法は種々考えられ⁽¹⁾、パラメータが多くなるとその種類はさらに多くなる。一般には試行による解から得られる情報をなるべく大量に利用して次のパラメータを決める方法は、収れん速度が速いという利点はあるが、最初のプログラムが面倒であり、また不安定になりやすい。よく性質のわかった問題を大量に解く場合に有効である。一方解からの情報をあまり利用しない方法はプログラムが簡単で不安定は少ないが、そのかわり繰返し回数を多くしないと正解に達しない。最も極端な場合が第 1 例のパラメータの自動変更で、全く解に関係なくパラメータを変えていく方法であるが、どのような境界値問題や極値問題にもほとんど同じプログラムで不安定を起こすことなく適用できる。ただし最適点は得られたデータから人間が判断せねばならない。必要があれば最適点付近をさらに細か



第 16 図 極値問題 (制御誤差面積最小) の自動解析フローチャート

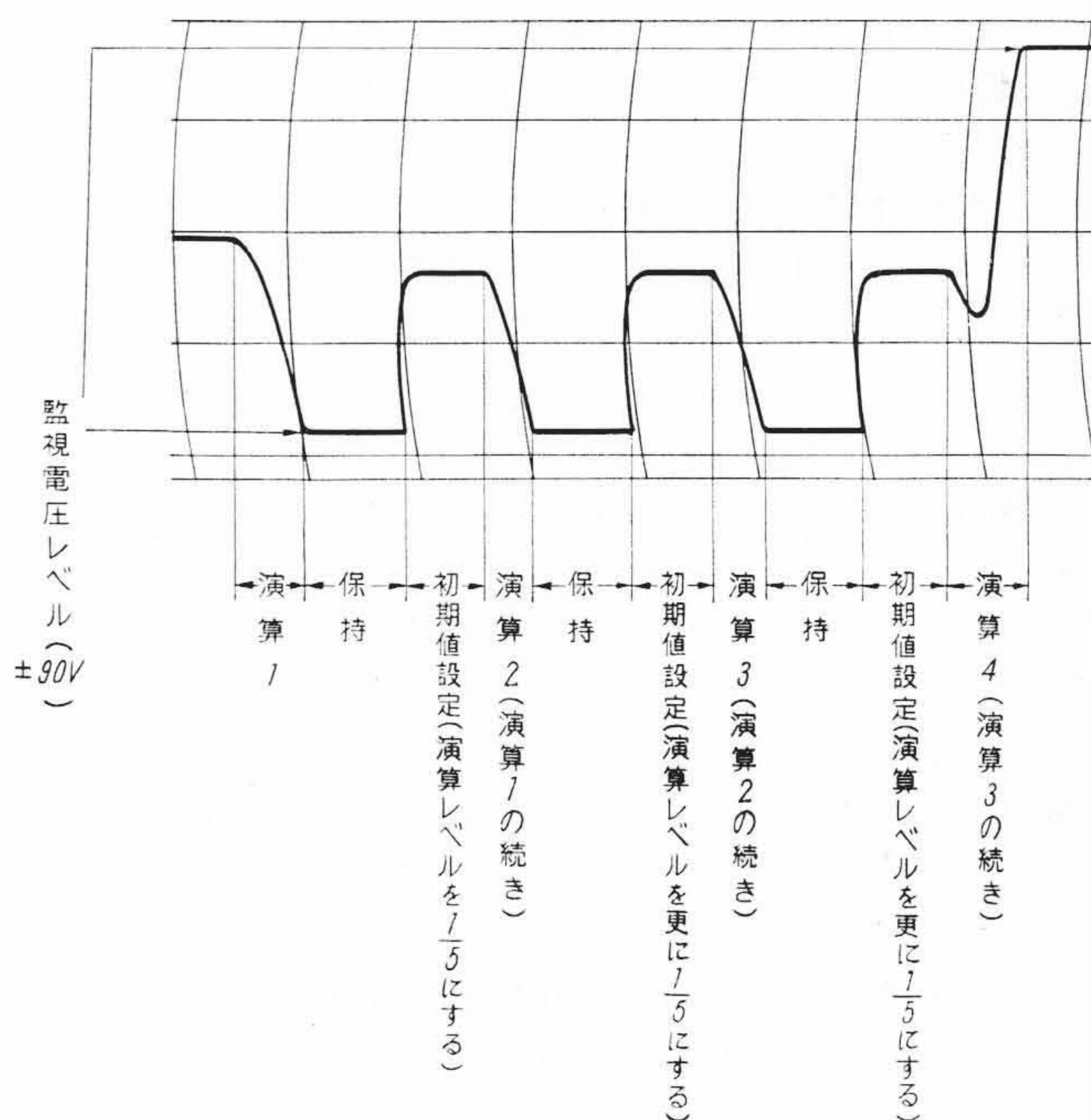


第 17 図 極値問題 (制御誤差面積最小) の自動解析例

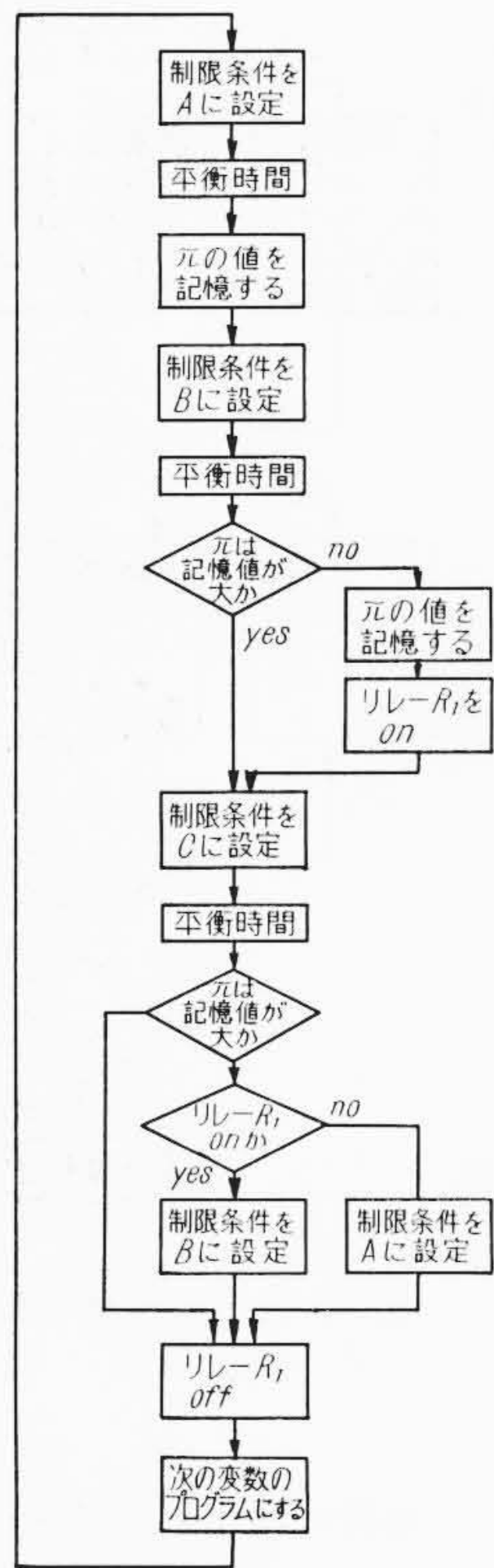
く変えればよい。パラメータと解の関係があまりよくわからない場合にこのような方法が適している。

4.3 換算係数の自動変換

アナコンでは各演算要素によって決まる最高演算レベル (普通 100V) を越えないように換算係数を変換して解を求めるが、このようにすると問題によっては解が第 18 図 (a) のようになって演算時間の大部分を非常に低い演算レベルで行なうようになる場合があり、精度の上から好ましくない。原子力関係や化学プロセスの問題にはこのような例がしばしばある。これを解決する手段の一つとして演算の途中で換算係数の変換を行なう方法がある。すなわち第 18 図 (b) のように換算係数を大にとって演算のはじめの部分も大きいレベルで演算させその出力レベルを比較器により監視して、演算器が飽和する直前に換算係数を変えて演算レベルを下げるのである。換算係数を変えるには各積分器の電圧を同一比率で変え、同時に非線形要素の常数を変えるのである。第 19 図にその解の一例を示す。この問題はある量の変化変速がその量自身とその自乗に比例するという反応の問題である。非線形要素の一つである掛算器が演算回路中にあるので、換算係数を変えるときにこの掛



第 19 図 自動換算係数変更の一例

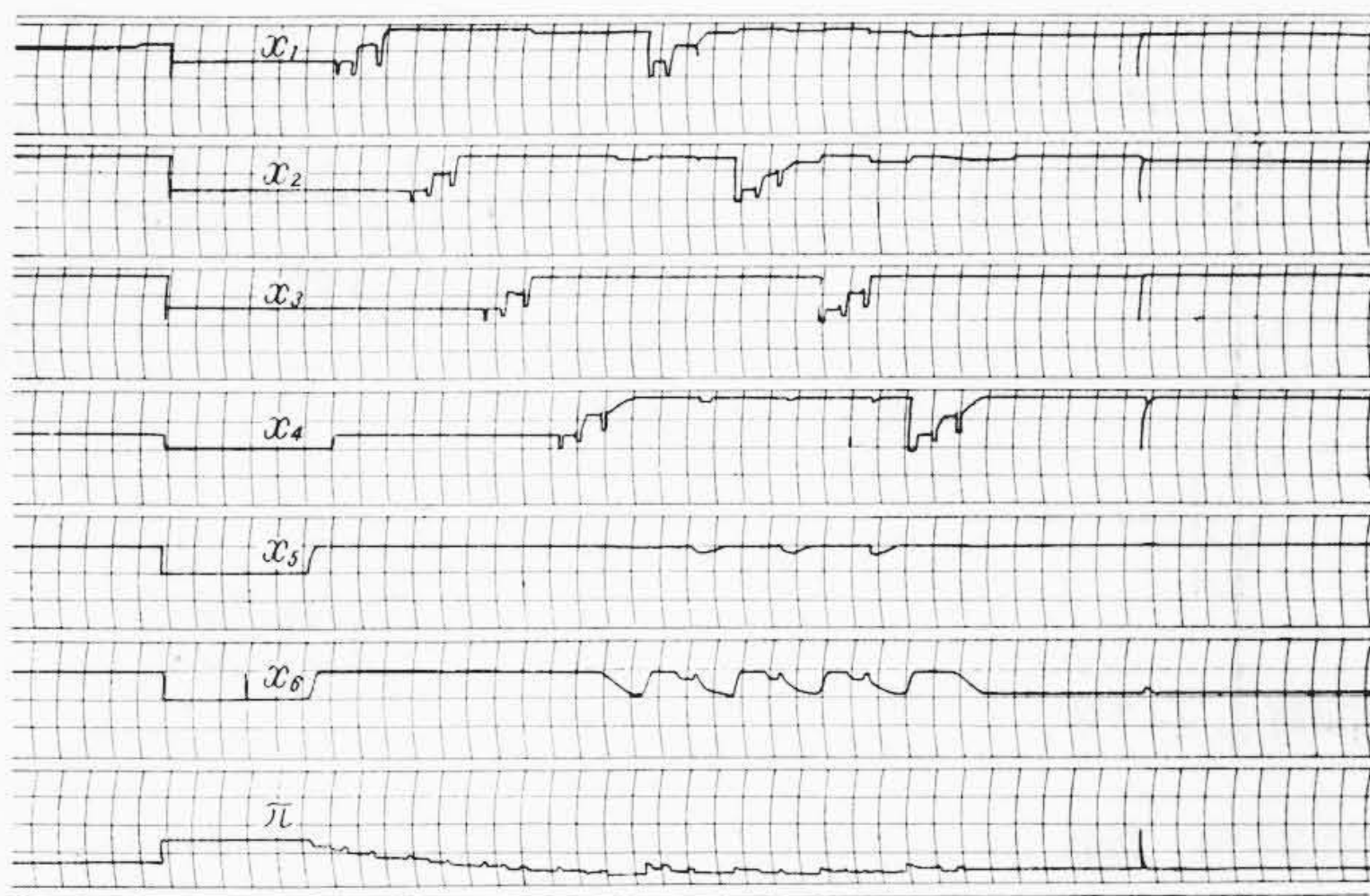


第20図 条件の複雑なリニアプログラム解析フローチャート

第6表 パンチテープによるプログラムの一例
(リニアプログラムの解析)

A10 ⁰	ポテンシオメータ10番を0.100に設定せよ	(x ₁ の下限のポテンシオメータ)
100		
A11	ポテンシオメータ11番を0.300に設定せよ	(x ₁ の上限のポテンシオメータ)
300		
P02	制御パッチボード2番始動	0.1 ≤ x ₁ ≤ 0.3の時のπの最高値を記憶する
Q00	0番端子が励起されるまでテープ停止	
A10	ポテンシオメータ10番を0.400に設定せよ	(x ₁ の下限上限を変える)
400		
A11	ポテンシオメータ11番を0.600に設定せよ	0.1 ≤ x ₁ ≤ 0.6の時のπの最高値と記憶値を比較し新しい値の方が大ならリレーR ₁ を動かし新しい値を記録
600		
P02	制御パッチボード2番始動	0.7 ≤ x ₁ ≤ 0.9の時のπの最高値を求める
Q01	1番端子が励起されるまでテープ停止	
A10	ポテンシオメータ10番を0.700に設定	J01 1番端子がショートされているなら(現在の値が記憶値より大なら)K01まで飛ぶ J02 2番端子がショートされているなら(R ₁ リレーがonしているなら)K02まで飛ぶ
700		
A11	ポテンシオメータ11番を0.900に設定	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
900		
P02	制御パッチボード2番始動	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
Q02	2番端子が励起されるまでテープ停止	
J01	1番端子がショートされているなら(現在の値が記憶値より大なら)K01まで飛ぶ	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
J02	2番端子がショートされているなら(R ₁ リレーがonしているなら)K02まで飛ぶ	
A10	ポテンシオメータ10番を0.100に設定	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
100		
A11	ポテンシオメータ11番を0.300に設定	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
300		
J03	無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
K02	J02からの飛越し終わり	
A10	ポテンシオメータ10番を0.400に設定	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
400		
A11	ポテンシオメータ11番を0.600に設定	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
600		
K03	J03からの飛越し終わり	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
K01	J01からの飛越し終わり	
S01	リレーR1 off	J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
S02	リレーR2 off	
...		J03 無条件に(3番端子はショートしておく)K03まで飛ぶ K02 J02からの飛越し終わり
...		

算機の次段の係数を同時に変えている。ただしこの方法では記憶要素の数だけの積分器のある演算回路しか組めない。



第21図 リニアプログラミングの自動解析例

5. パンチテープ、パッチボード併用方式によるプログラムの実例

5.1 リニアプログラミングへの利用

パンチテープの最大の利点は数値をパンチし、これを設定できることである。したがってパラメータを変える際に一定のステップで変えるのではなく、ある与えられた不規則な値を順次とらせる場合に有効である。これを条件の複雑なリニアプログラミングに適用した例を述べる。

リニアプログラミングは多数の変数 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ が、ある制限条件の下で、これらの一次関数を最大にしようとする問題である。制限条件として変数それ自身または変数の一次関数の上限と下限が押えられているときは既に知られている一般的な方法⁽⁵⁾を適用して簡単に数秒で解が得られるが、実際の問題にはこの制限条件が複雑な場合がある。ここに示した問題もその一つで、変数の解として許される範囲が不連続にいくつかある場合である。次にその問題の一例を示す。

$$\pi = 0.9x_1 + 0.8x_2 + 0.7x_3 + 0.6x_5 + 0.4x_6 \dots \dots \dots (4)$$

$$0.5x_1 + 0.5x_2 + 0.5x_3 + 0.5x_4 + 0.4x_5 + 0.4x_6 \leq 3.0$$

$$0.8x_1 + 0.6x_2 + 0.4x_3 \leq 1.5$$

$$0.75x_1 + 0.5x_2 + 0.25x_4 \leq 2.0$$

$$0.1 \leq x_1 \leq 0.3 \text{ or } 0.4 \leq x_1 \leq 0.6 \text{ or } 0.1 \leq x_1 \leq 0.9$$

$$0 \leq x_2 \leq 0.2 \text{ or } 0.3 \leq x_2 \leq 0.5 \text{ or } 0.6 \leq x_2 \leq 0.8$$

$$0.15 \leq x_3 \leq 0.3 \text{ or } 0.45 \leq x_3 \leq 0.6 \text{ or } 0.75 \leq x_3 \leq 0.9$$

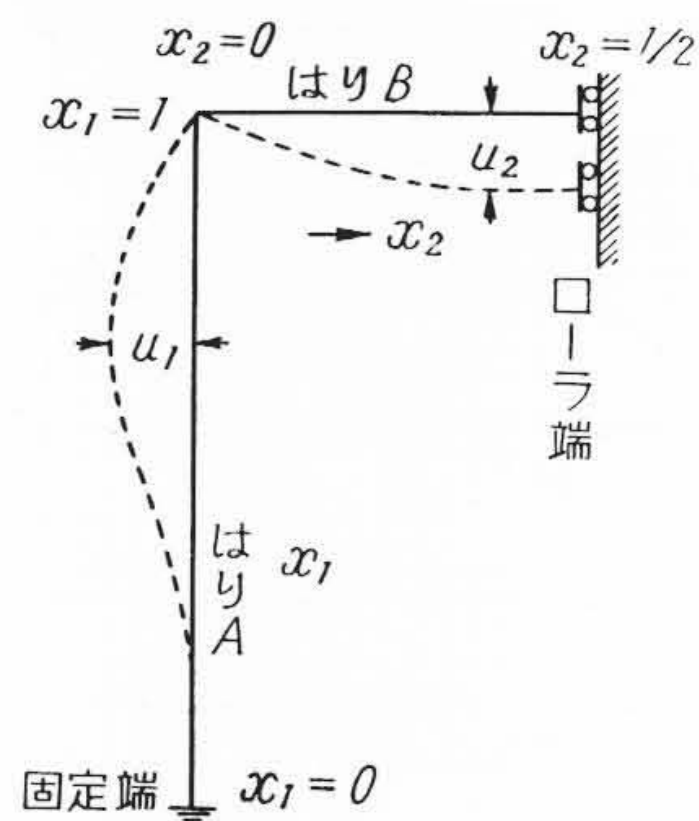
$$0 \leq x_4 \leq 0.25 \text{ or } 0.35 \leq x_4 \leq 0.6 \text{ or } 0.7 \leq x_4 \leq 0.95$$

$$0 \leq x_5 \leq 0.5$$

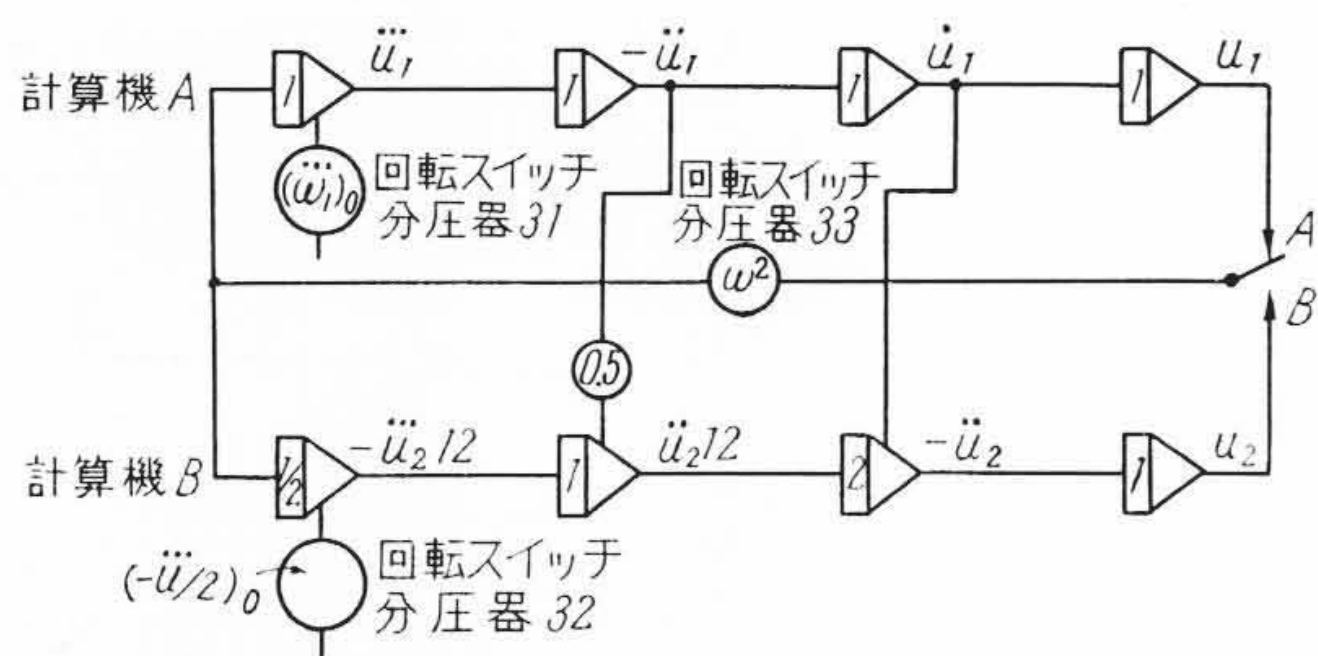
$$0 \leq x_6 \leq 0.5$$

(5)式なる制限条件の下で、(4)式のπなる値を最大ならしめる $x_1, x_2, x_3, \dots, x_6$ を求めるのがこの問題である。

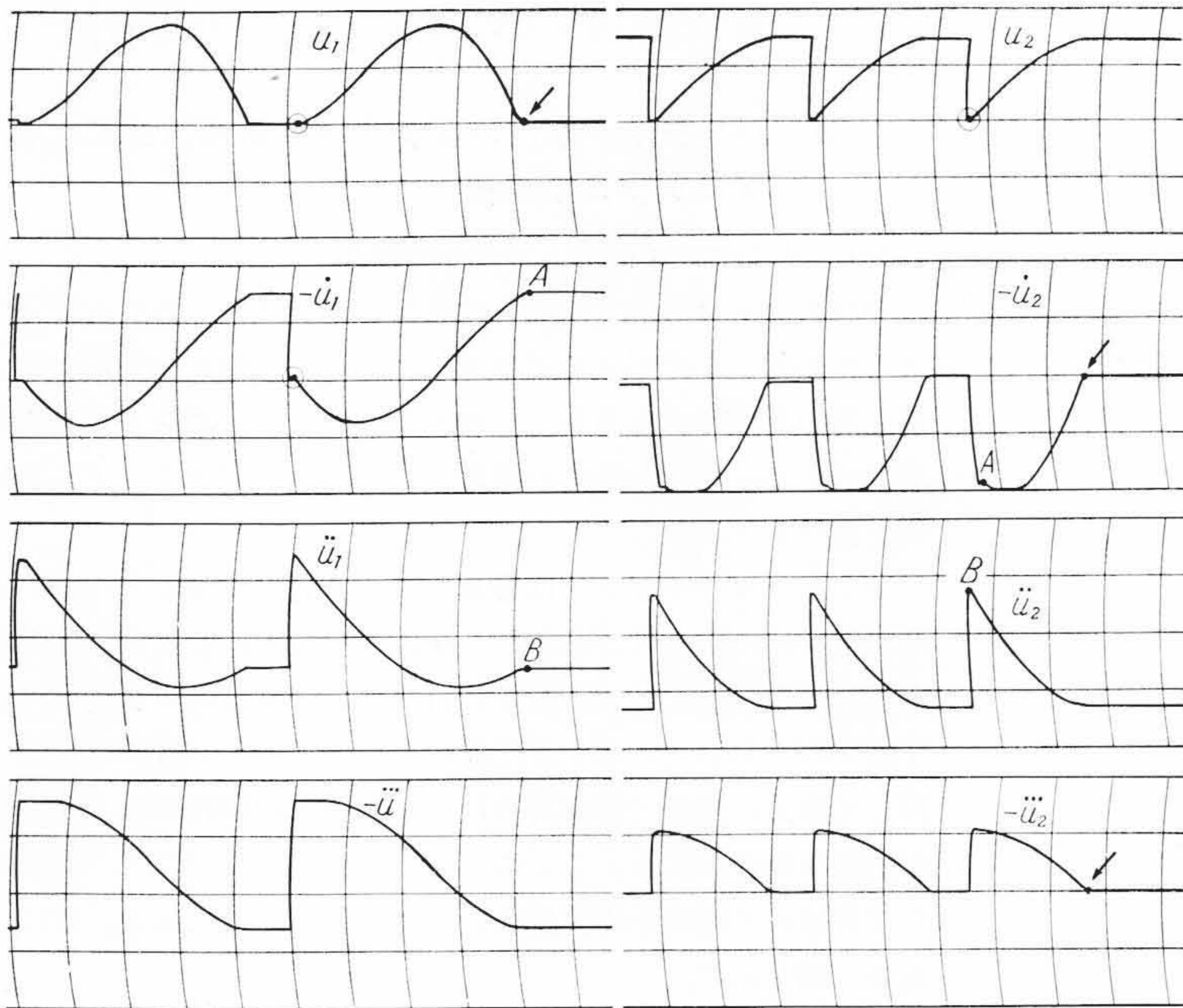
これを解くための手順は第20図に示すフローチャートによった。すなわち変数の制限範囲がとびとびでなく連続しているときは普通のアナコンによるリニアプログラミングの手法により短い時間で得られるから、ある一つの許された範囲でπが最高になる変数の組み合わせを求め、そのときのπを記憶させ、別の制限条件におけるπの最高値を求め、これを記憶していた値と比較し、その大きい方をとるという方法である。このようにしてある変数につきπが最高となる範囲を許された三つのうちから設定し、この条件下に次の変数についてπが最高となる範囲を定め、これを繰り返して最高の範囲の組み合わせを求めるものである。制限範囲の上限下限は与えられる問題によって全く不規則な値となるものであるから、この値を計算機に設定するためのポテンシオメータとして自動設定のポテンシオメータを用い、数値をテープにパンチしておいて順次に変更した。第6表にこれに用いたテープの命令とその説明を、第21図に



第 22 図 接続点のあるはり



第 24 図 接続点のあるはりの解析用演算回路



(図左 はり A 図右 はり B)

第 25 図 接続点のあるはりの演算解

解を示す。このような例は化学工場などのリニヤプログラミングなどに実在している。

5.2 固有値問題、接続点を有するはりの解析

多くの条件を同時に満足させる例として、第 22 図のような接続点のあるはりの固有振動の解析結果について述べる。はり A、はり B に対してそれぞれ次式が成り立つ。

$$\frac{d^4 u_1}{dx_1^4} - \omega^2 u_1 = 0, \quad \frac{d^4 u_2}{dx_2^4} - \omega^2 u_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし ω : 固有振動数

u_1, u_2 : それぞれはり A、はり B の振動振幅

x_1, x_2 : はりに沿う距離

境界条件としては

$x_1 = 0$ においては

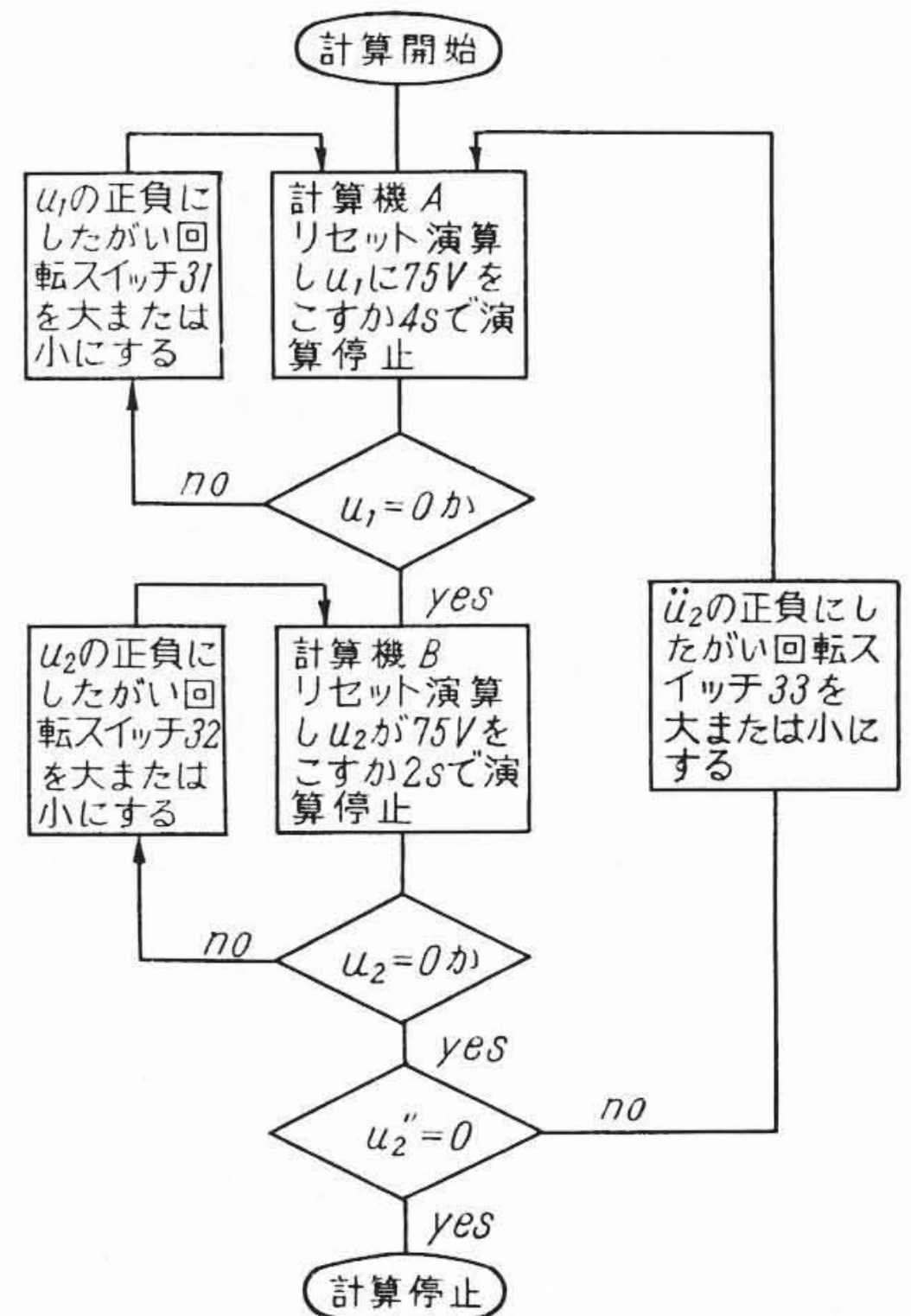
$$u_1 = 0, \quad \frac{du_1}{dx_1} = 0$$

$x_1 = 1, x_2 = 0$ においては

$$u_1 = u_2 = 0, \quad \frac{du_1}{dx_1} = \frac{du_2}{dx_2}, \quad \frac{d^2 u_1}{dx_1^2} = \frac{d^2 u_2}{dx_2^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$x_2 = \frac{1}{2}$ において

$$\frac{du_2}{dx_2} = 0, \quad \frac{d^3 u_2}{dx_2^3} = 0$$



第 23 図 接続点のあるはりの自動解析のフローチャート

解析に使用したフローチャートおよび演算回路を第 23, 24 図に示す。パラメータの修正はデジタルポテンショメータにより変更した。はり A に対する演算は 4 秒、はり B に対する演算は 2 秒であり、40 分に約 170 回の試行を行なって収れんした。第 25 図に解の一部を示す。図において、丸印と矢印が境界条件として零となることを要求されたところで、矢印の点が試行によりパラメータを適当に変えることにより条件を満足させた点、丸印は単に初期値を零に設定することにより満足させたものである。

6. 結 言

自動プログラム装置の概要、システム、構成要素、応用例について述べた。特に閉回路自動プログラムシステムについては著者らはいち早くその重要性を強調しこれを実用化した。このシステムはその規模、性能にもよるが大幅に従来のアナコンの機能を拡大するものであり、海外において問題とされている Iterative Computation を低速度形アナコンで行なうことを可能ならしめたシステムといえよう。

またこの自動プログラムシステムは最近化学プロセスの試行方式の最適装置として問題になっている Opcon などとは相共通するところがあり、この技術はその方面へも利用できるものと確信している。

終わりに臨みご指導を賜っている日立中央研究所須藤部長、阿部主任研究員を始め製作に当たられた日立製作所小金井分室の方々に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 三浦, 岩田: 電学誌 81, 872, pp 765~774 (1961)
- (2) W. E. Bushor: Electronics, 34, 52, pp 28~29 (1961)
- (3) Iterative Analog: Control Eng. July (1961)
- (4) 三浦, 岩田: 昭 36 電学会東京支部大会 73
- (5) I. B. Pyne: Comm. & Electronics May (1956)