

工作機械の最新の制御方式

大 島 康 次 郎

1. は し が き

工作機械の自動化は従来からカムその他の機構を利用して実施され、いわゆる自動機とよばれる一群の工作機械が存在していた。これらは単純な形状の加工物の工作に限られていた。ところが工業の進歩に伴って、複雑な形状の部品を迅速に量産する要求から、いわゆる削り工作機械が生れた。これはテンプレートやモデルに所要の形状を与えておいて、それに接触して動くスタイラスに工具を追従させ、加工物の上にその形状を再現させるという方法を用いている。このスタイラス工具の追従にフィードバック制御のサーボ機構が応用されたのである。削り工作機械はそのサーボ機構の指令をテンプレートの形で与えるため、テンプレートの作製が先決である。しかもこの精度が加工物のそれを支配するのであるから、その製作には多大の熟練労働と時間を費すことになる。生産する部品の数が多ければ、これは問題にならないが、中小量の生産ではそのコストに影響するということになる。そこで指令の与え方について、より融通性に富んだ方式が要求され、磁気テープや穿孔テープ等を指令の手段に利用する制御方式が生れた。磁気テープを利用すると、熟練工の操作による工具の動きをそれにいったん記録させ、これを再生して工作機械のサーボ機構への指令とすることができる。これはいわば模範操作の play back 方式である。穿孔テープ（紙またはプラスチック）や穿孔カードの利用は、指令を数値の形で与えることを前提とし、これより適当な方法によって工作機械のサーボ機構への入力信号を発生させるのである。指令を数値で与えることができれば、設計図から直接それを作成することができ、最も進歩した方法であるということができよう。

このような方法に基いた制御方式は、すでに数種類が試作、または実用化の段階にある。特にこの種の機械を要望しているのは航空機工業である。航空機生産では絶えず機種の変更があり、しかも迅速な生産が要求されるからである。一般機械工場においても、量産に移す前の試作、試験段階のスピードアップにこの種機械は大きな役割を果たすであろう。この期間においては部品の形状、寸法の変更、修正がしばしば加えられるからである。指令が数値として与えられる場合も大別すると次の二通りが区別できる。

すなわち、その一つは工作機械のサーボ機構が削り

りと同種のアナログサーボとして構成されている場合である。ただし指令が数値の形で与えられるので、これを適当な方法でアナログの信号に変換する装置と、指令数値が工作物の輪廓を不連続な点の座標として指定するので、これらの点の間をインターポレートする装置とを備えている。

もう一つはサーボ機構への入力が数値指令に対応するパルスの数とといったいわゆるデジタル量で与えられる場合である。このようなサーボ機構はアナログサーボに対してデジタルサーボと呼ばれる。デジタルサーボ機構による工作機械の数値制御はフィードバック制御と計算機の技術を高度に活用したものであって、この両者の結び付きは制御の他の分野に先立って工作機械において実現されたということができる。穿孔テープを入力とするデジタルサーボ機構は工作機械の直接制御ばかりでなく、デジタル—アナログの変換器として、play back 方式の工作機械に対する指令磁気テープの作成に利用することができる。

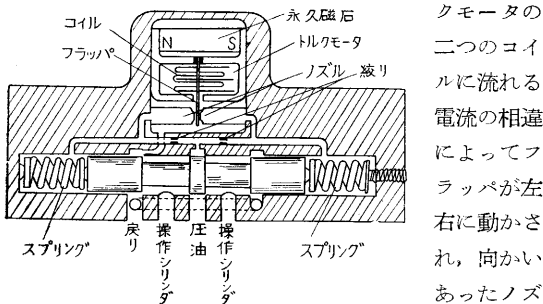
このように工作機械の最新の制御方式は次第に複雑、高度なものとなり、従来の自動機と較べて、質的に一段の飛躍をとげたのである。これこそオートメーションの中核をなすということができよう。本稿はこれらについての展望を試みようとするものである。便宜上アナログサーボ方式とデジタルサーボ方式に分けて述べることにしたい。

2. アナログサーボ方式

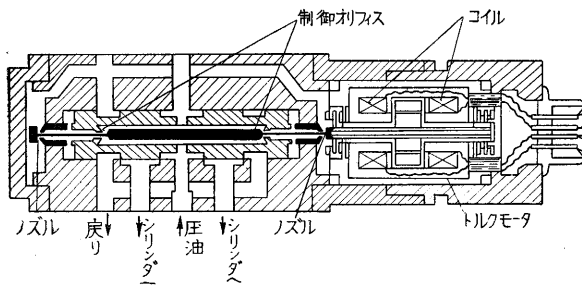
工作機械の制御も工具やテーブルの位置制御という点で一般のサーボ機構となら異なるところはない。従って一般のパワーサーボに用いられる構成要素や方式が大部分そのまま利用することができる。ただし工作機械の制御においては行き過ぎを嫌うから、他の応用面と較べて特に安定度の高い制御系を実現することが必要である。また精度の点でも厳密さが要求されるので、高感度、高性能であることが必要である。構成各部についていうと、まず検出部としてはシンクロ、差動変圧器、光電方式、空気マイクロ方式等が利用できる。増幅部としては真空管、磁気、サイラトロン各増幅器、ワードレオナード方式、アンプリダイン等の回転増幅機等が用いられる。またリレーやクラッチ方式も用いられる。サーボモータとしては直流電動機および油圧サーボモータが用いられる。油圧サーボモータにはパイロット弁や絞り管制

弁と操作シリンダとの組み合わせや hydraulic transmission 方式 (可変ストロークポンプと油圧モータとの組み合わせ) が用いられる。パイロット弁や絞り管制弁は検出部を兼ねさせることができる。特性補償には補償回路、回転計発電機等が用いられる。これらの構成要素の組み合わせによって多くの方式を作り出すことができる。一般にパワーサーボとして推奨されるのは電子油圧組み合わせ方式である。電子部分が特性補償を容易にし、油圧サーボモータが大きなパワーで応答が早いからである。最近電子油圧変換素子として性能の優れたサーボ弁が登場し、工作機械にも応用されている。

特に米国では各社が多くの種類の製品を作り出している。その若干を第1図(a)~(c)に示す。(a)はMoog Valve Co. 製のものでその動作は次のようである。トルクモータの

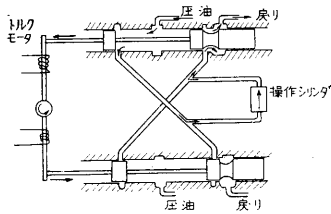


第1図(a) Moog Valve Co. サーボ弁



第1図(b) Pegasus Lab. サーボ弁

間隙が変り、左右のスプリングの入っている室の油圧が変化して、パイロット弁の弁ピストンがこの油圧の不平衡力とスプリングの力とが釣合

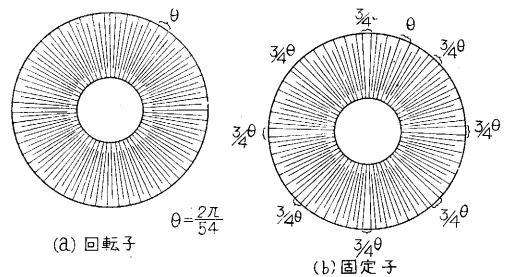


位置まで動かされるのである。すなわちパイロット弁を動かすのに油圧の前段増幅を行っている点に特徴がある。(b)は Pegasus Lab. 社製のものと同じくトルクモータ (ソレノイド方式) の動きでノズルの間隙が変り、パイロット弁左右の油圧が相違して、パイロット弁が動かされるが、(a)と異なりスプリングによって釣合

ことなく、パイロット弁の動きによる制御オリフスの開きの変化で左右の油圧が平衡するようになっている。

(c)は Midwestern 社製のもので油の前段増幅を行わず、トルクモータの動きで直接2個のパイロット弁ピストンを動かす方式である。そのためパイロット弁の構造は油の流動による軸方向の力を軽減するような特殊な形状²⁾を弁ピストンに与えている。これらはいずれも1,000~3,000p. s. i. ((c)だけ 200~3,000p. s. i.) の油圧で、電流入力 10~40mA 程度で動作するから、真空管出力で駆動ができ、しかもその応答特性は時定数が数 ms の高性能のものである。

最近工作機械制御の検出部に特に適した精度の著しく高いインダクトシン³⁾(Inductosyn)と呼ばれる検出器が考案された。これは2相シンクロ(レゾルバ)の原理に基いたもので、回転式にも直動式にも作られ、工作機械用には後者が適しているが、便宜上、前者についてその原理を説明する。これは誘導形の検出であるが、コイルを使用せず、固定子も回転子もガラス板に銀メッキしたものに刻みを施して櫛歯状の電気的通路を設けたものである(第2図)。回転子は例えば54個の櫛歯をもち、これに交流電圧(例えば10kc)を加える。交流が櫛歯状の通路を流れることによって交番磁束が紙面に垂直な方向に生ずる。この磁束は一つの櫛歯の中ではほぼ正弦状に分布する。固定子も回転子と同じような櫛歯をもっている



第2図 インダクトシン

が、これらはスペースによって8個の扇形状の櫛歯群に分けられている。相隣る各群は相互に90°だけ電気角がずれている(スペースの幅は一つの櫛歯の1/4)。固定子と回転子とは対向してごく接近した位置に置かれる。固定子の8個の櫛歯群は一つおきに接続して sin および cos の回路を形成する。回転子の交番磁束によって、この二つの回路に回転子の一つの櫛歯以内の回転角の sin および cos に比例した電圧が発生する。この両回路では数多くの櫛歯が直列に入っているため、刻みのピッチ誤差が平均化されることと、円周の例えば 1/4 が電気角の360°に相当する高い分解能のためにインダクトシンの精度は回転式で5秒、直動式で0.0001"という驚異的なものである。

直動式は一樣な櫛歯をもった scale と電気角が90°相

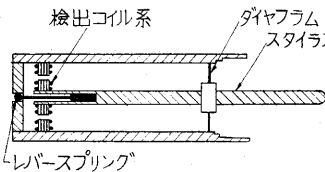
違した二つの歯輪回路をもった slider とから構成される。一つの歯輪の巾は例えば 0.1" である。インダクションを偏差検出に用いるには、その 2 個を組合わせて使用し、両方の固定子を相互に接続しておいて、一方の回転子を交流電圧で付勢し、他方の回転子から両者の相対的角変位を電圧として取出すのである。この場合普通のシンクロ系と組合わせていわゆる 2 速度系として用いるのである。

ここでアナログサーボを用いた工作機械の各種制御方式について述べることにする。

(1) ぬい削り制御方式

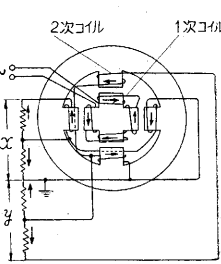
工作機械の制御で現在最も多く用いられているのはこの方式であるが、そのなかでも一番普及しているのは全油圧方式のぬい旋盤である。これらは縦送りを一定にしておいて双物台の動きだけをサーボによって制御し(1次元制御)、その運動の方向を主軸に対して適当な角度(45°乃至60°)傾斜させることによって、工作物の段付き部分を削れるようにしたものである。しかしこれでは双物台の運動方向の傾きと同一の向きのテーパ部分が削れないという欠点が生ずる。そこで最近 S. E. A. の Duplicatron⁴⁾ や Raytheon の Duplicator⁵⁾ のようにスタイラスと双物台とを一体に主軸方向およびそれと直角方向にサーボによって制御し(2次元制御)、スタイラスがテンプレートに対して接触しつつ一定の周辺速度で運動するようになったものが現われた。

この後者のものについてその動作原理を説明する。スタイラスは第3図に示すように、ダイヤフラムによって

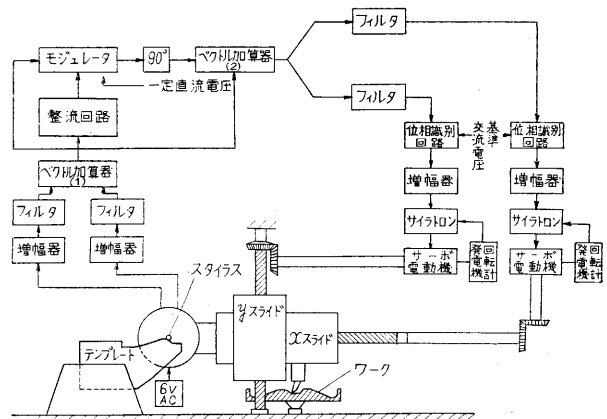


第 3 図 スタイラス

支持され他端にレバースプリングが復原力が与えられるようになっている。検出コイル系は第4図に示すとおりである。1次コイルを付勢しておいて、スタイラスの動きの x, y 成分によるギャップの変化によって、各成分のそれぞれ差動的に接続された2次コイルから信号電圧を取り出すようになっている。スタイラスがテンプレートに接触してその支点に関して傾くと、その傾斜の方向はテンプレートの曲面に対して垂直である。したがって x, y 方向の信号電圧よりテンプレートの接触点における切線の空間ベクトルの方向に対応する位相をもった電気的ベクトルを合成することができる。それには x, y 成分の交流信号電圧を相互に 90° 位相をずらして差動増幅

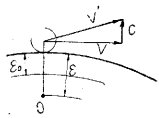


第 4 図 検出コイル

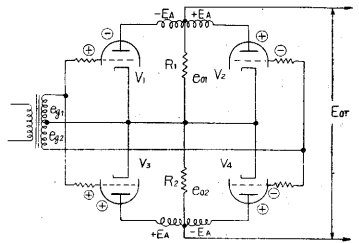


第 5 図 Raytheon の Duplicator

器で加え合わせることによって行い。全体の制御系を示す第5図のベクトル加算器(1)がこの部分である。このサーボ系はスタイラスをテンプレートの切線方向に駆動するように速度の x, y 成分を制御する速度制御系であるから、スタイラスの支点に対する変位量はずれていくおそれがある。そこでこの変位量が規定値からはずれたときそれを修正する必要がある。第6

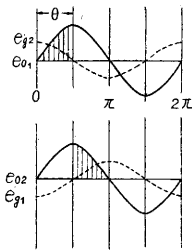


図において e_0 がこの規定値で、 ϵ が実際の変位量とすると $(\epsilon - e_0)$ に比例したベクトル C を切線ベクトル V に対して直角方向に加え、この合成ベクトル V' の方向に x, y 速度成分を制御するのである。それにはベクトル加算器(1)の出力を整流して ϵ に相当する直流電圧を出し、 e_0 に対応する一定直流電圧との差を再びベクトル加算器(1)の出力でモジュレートする。このモジュレータの出力を 90° 位相をずらしてベクトル加算器(1)の出力と再び加え合わせると(第5図のベクトル加算器(2)による)、その合成電圧はベクトル V' の方向に対応する位相をもつ。この電圧から x, y 両成分の速度制御サーボの入力を生じさせるには、この電圧をフィルタに通すことによって、相互に 90° 位相のずれた二つの電圧に分け、これを



第 7 図 位相識別回路

第7図に示す位相識別回路に加えて、それぞれの位相の \cos に比例した直流電圧とするのである。第7図の回路は各真空管のプレートに基準交流電圧 E_A を、グリッドに信号電圧に対応する電圧を加え、両者が+のときだけ真空管が流通するのを利用している。この回路の原理は第8図に示される。 x, y 成分の各位相識別回



$$E_{OT} = e_{o1} - e_{o2}$$

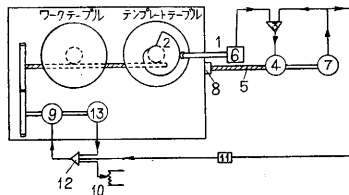
$$= \frac{K}{\pi} \left\{ |EA| \int_0^\theta \sin \theta d\theta - |EA| \int_0^\pi \sin \theta d\theta \right\}$$

$$= -\frac{2K}{\pi} |EA| \cos \theta$$

第 8 図 位相識別回路の原理

の速度は大きく変化せざるをえなかった。そこで輪廓に
 応じて送りを変化し双物の速度をなるべく一様にしよう
 とする考案が E. M. I. Eng. Dev. Ltd. によつてカムミ
 リングマシンに対して具体化された⁶⁾。これの構成は第

9 図に示すように、送りねじで左右
 に動かされる主テ
 ーブルの上に同一
 駆動機構で回転さ
 れるワークテー
 ブルとテンプレート
 第 9 図 E. M. I. Eng. Dev. Ltd.
 カムミリング制御装置



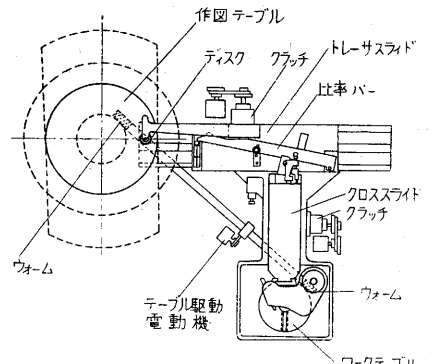
て、テンプレートに接触するスタイラスの動きで電氣的
 サervo系（光電検出：スタイラスでミラーが傾き二つの
 光電管に入る光量が相違する方式）が動作し、主テー
 ブルの送りねじ機構を駆動する。この系の特性改
 善用の回転計発電機（7）の出力は同時にテー
 ブル回転用の速度制御サervo系の入力に導かれる。
 すなわち速度設定用ポテンショメータ（10）
 の電圧からこの（7）の電圧を差引いたものと
 速度制御サervo系の回転計発電機（13）の出力
 が一致するようこのサervo系（ワードレオナ
 ド方式）が動作するのである。したがってカム
 輪廓の変化の大きなところではテーブル回転速
 度は遅くなり、ほぼ一様な切削速度がえられる
 ことになる。

倣い削りではテンプレート製作が面倒な
 ので、作図に倣わせてこれを自動的に切削する
 という目的で、New England Model 104 ミリ
 ングマシンのが作られた。作図は導電性の金属イ
 ンクでテンプレートの輪廓をある程度の幅をも
 った線によって描く。この線の一方の縁が輪廓
 を正確に拡大してあらわすようにする。この作

路の出力はベクトル
 V' の方向の \sin およ
 び \cos に比例するから
 これをそれぞれの速度
 制御サervo系の入力と
 するのである。このよ
 うにこの制御方式は 2
 次元の複合制御系を採
 用している。

従来の倣い旋盤では
 送りが一定であったた
 めテバの大きなところ
 と小さなところとで
 はサervo制御の双物台

図の線に倣
 うサervo系
 はクラッチ
 サervoで、
 その検出は
 トレーサの
 円板（これ
 の径とカッ
 タの径とは
 正規の拡大
 率の關係に
 なければな
 らない）と

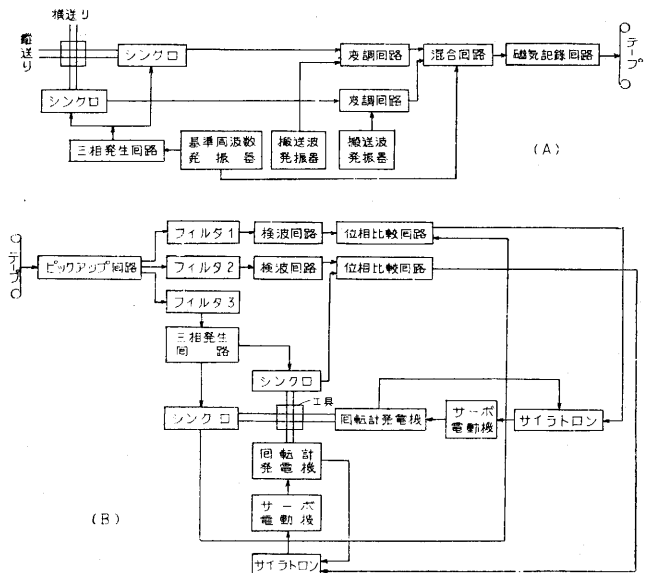


第 10 図 New England Model 104 ミリ
 ングマシン

導電性の線との間にスパークをとばせてその間の電圧降
 下によって行っている。すなわちサervo系はスパーク
 ギャップを一定に保つよう動作するのである。全体の構成
 は第 10 図に示すように、作図テーブル、ワークテー
 ブルともにウォーム歯車機構で回転され、追従サervo系
 は二組あって、一方は作図に追従してトレーサスライドを
 動かし、他方はトレーサスライドに取付けた比率バーに
 追従してトレーサスライドと直交したクロススライドを
 動かすようになっている。後者のサervo系も前者と同一
 原理のものである。拡大率の変更は比率バーの傾きを変
 えて行う。

(2) 磁気記録制御方式

熟練工の模範操作を磁気テープに記録し、その play
 back を指令とする制御方式である。これの一例⁸⁾ の原
 理を第 11 図に示す。工作機械のテーブルの動きを磁気
 テープに記録するには、テーブルの動きに連動するシン
 クロによって変位を電圧の位相変化に換えて行ってい

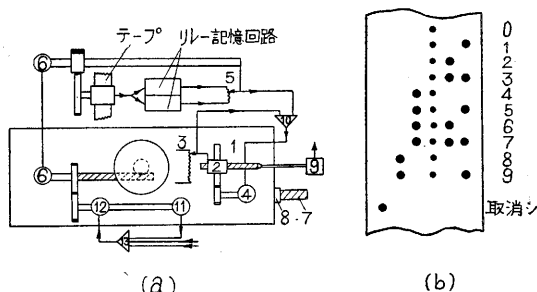


第 11 図 磁気記録制御装置

る。すなわちシンクロの三相固定子巻線に三相交流を加えて回転磁界を生じさせておき、回転子巻線に誘起する交流電圧の位相が回転角に比例するのを利用するのである。このようにしてテーブルの x, y 二成分の動きがそれぞれ信号電圧の位相に変換されるから、この信号電圧で搬送波（テープ記録に適した周波数）の振幅変調を行い、これをテープに記録するのである。再生に際しては検波によって信号電圧を取出し、これと現在位置に対応する信号電圧の位相とを位相比較回路で比較し、それが一致するようサーボ系が動作するのである。

(3) 数値指令によるアナログサーボ方式

アナログサーボ系に対する指令を穿孔テープまたは穿孔カードによって数値の形で与える方式である。この数値指令からアナログサーボ系の入力となるアナログ信号電圧が導かれる。以下この方式の若干の例につき説明する。



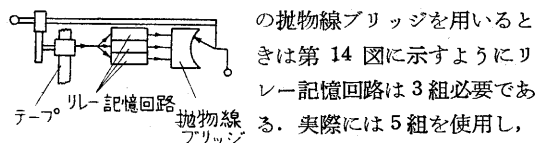
第 12 図 E. M. I. Eng. Dev. Ltd. のカムミリング制御方式

第 12 図は E. M. I. Eng. Dev. Ltd.⁹⁾¹⁰⁾ によって考案されたカムミリングマシンに対する制御方式を示す。指令はカムの輪廓を一定角度おきの半径方向の寸法として 5 単位のテープに binary-decimal のコードとして穿孔される。このコードは同図(b)に示すように 4 単位の孔あき位置によって与えられるから剩った 1 単位は穿孔ミスのあったときの取消しに使う。テープの読取りはテレタイプのリードによって行すが、これはワークテーブルの回転とシンクロナスリンク (6) によって連動している。相隣る 2 点の寸法は次々とリードによって読取られリレーで構成された記憶回路に保持される。このリレー回路は同時にデジタル信号をアナログ電圧に変換する役目もする。この 2 点の寸法に対応する電圧がポテンショメータ (5) の両端に加えられる。ポテンショメータの摺動子もワークテーブルの回転と連動するから、この摺動子から取り出される電圧は相隣る 2 点間をインターポレートすることになる。実際には一組の 2 点についての指令が出されているとき、次の点のコードを記憶し、前の 2 点の指令が出され終わったとき次の 2 点の指令に切換えるために記憶回路およびポテンショメータ (5) はもう 1 組余計に設けておく必要がある。ポテンショメ

ータ (5) の電圧がポテンショメータ (3) のフィードバック電圧によって平衡されるまで、サーボモータ (4) はナット (2) を回転し送りねじ (1) を駆動する。この送りねじの動きが第 9 図の場合のテンプレートに対応する。主テーブルの送りねじ駆動およびワークテーブルの回転に対するサーボ系は第 9 図の場合と同じである。この方式は相隣る 2 点だけを使ってインターポレートしているが、相隣る 3 点



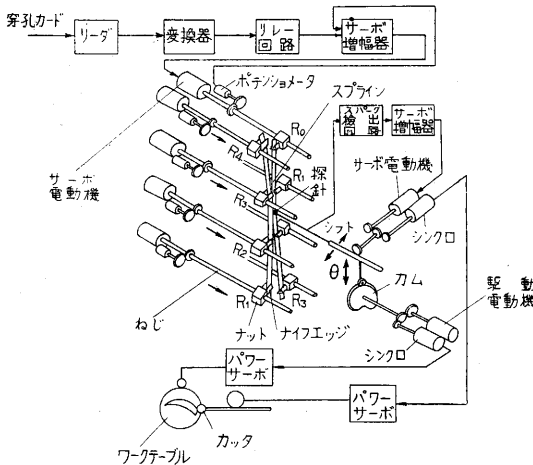
を利用し、これを滑らかな曲線で結ぶ方法も考案されている。これには第 13 図(a)に示すような拋物線ブリッジが用いられる。同図 (b)はカムの輪廓を角度に対する半径寸法のプロットとして示している。等角度隔った 3 点 A, B, C が与えられたとき、これらをつなげる曲線として、拋物線近似の曲線を用いる。これに対応する電圧を発生するのが拋物線ブリッジである。A, B の寸法に対応する電圧がオートトランス AB の両端に加えられる。中点 M の電圧は (b) 図における M 点に対応する。トランスの中点 M には第二のトランスの 1 次巻線の一端が接続され、他端には C 点に対応する電圧が加えられる。トランス AB の各タップには、この 1 次巻線に対する 2 次巻線の一端が接続される。1 次巻線の巻数を例えば仮りに 5^2 とすれば相次ぐ 2 次巻線のそれは $5^2-1^2, 5^2-2^2, 5^2-3^2, 5^2-4^2, 5^2-5^2 (=0)$ となるよう選ばれている。このようにすれば各 2 次巻線他端の電圧は A CB をつなげる曲線上の点に対応する。これらの点の間はポテンショメータによってインターポレートする。この



第 14 図 3 組が指令を出しているとき、他の 2 組が次の 2 点のコードを記憶するようになっている。

次に Lewis Flight Propulsion Lab. においては、タービン翼の翼形の研究などで、工作の能率をあげ、研究の迅速化をはかることを目的として、数値指令アナログサーボの制御方式¹¹⁾ を実現した。これは工作物の輪廓を一定角度おきの半径寸法で与え、その相隣る 4 点を滑らかな曲線で結ぶインターポレーションの方法を採用している。指令は IBM カードに 3 デジットの 10 進数で穿孔し、これをリードにかけて、ダイオード変換器で binary decimal のデータに変え、リレー回路に記憶させる。リレー回路は同時にデジタルデータをアナログ電圧に変換する役目をする。インターポレーションの方法

は第 15 図に示すように、相隣る 4 点の半径寸法に対応するアナログ電圧をそれぞれ入力として 4 個の独立のサーボ系(ポテンシオメータ検出)を動作させ、ねじとナットの機構でナイフエッジを移動して、それに半径指令に応じた位置をとらせる。この 4 個のナイフエッジに支えられたフレキシブルなスプラインがインターポレーションの曲線を与えることになる。一方カム機構によって等



第 15 図 Lewis Flight Propulsion Lab. の数値指令アナログサーボ方式

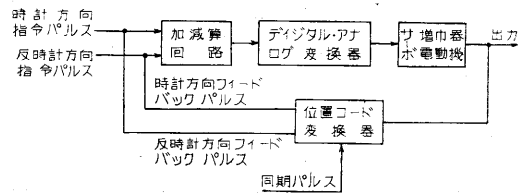
速度で上下に送られる探針があって、これとスプラインとの間の放電の電圧降下を検出量とするサーボ系によって、この放電ギャップを一定値 (0.003") に保つよう探針をスプラインに追従させている。ここで探針の上下方向の送り角が極座標の角度に対応し、サーボによる水平方向の追従が半径寸法に対応するから、これらに連動したシンクロの動きを指令として、それぞれのパワーサーボを動作させ、ワークテーブルの回転とカッタの移動を行わせる。実際にはスプラインおよびナイフエッジを動かす 4 個のサーボ系は 2 組あって、一方が探針を動かしているとき、他方が指令に応じたポジショニングをするようになっている。また輪廓上の 4 点を利用してインターポレーションを行っているが、使用する曲線は中央の 2 点間のそれである。例えば 0, 1, 2, 3 の 4 個の点のインターポレーションで 1, 2 間の曲線を出し、次の 1, 2, 3, 4 各点のインターポレーションで 2, 3 間の曲線を出すといった具合である。したがって探針は中央の 2 個のナイフエッジ間しか動かない。図において探針は 1→2 と下方に送られ、横にシフトされたのち 2→3 と上方に送られる。

3. デジタルサーボ方式

アナログ方式では信号が物理量の形 (例えば変位, 電圧, 油圧等) で伝えられるのに対してデジタル方式ではパルスの数として伝えられるためノイズによって汚される心配が少ない。また指令も穿孔テープ等のコードに

よって数値の形として与えることができるので、設計図から直接指令を作製することができ、テンプレートや play back 方式の模範操作等がはぶかれる利点がある。デジタル方式では第 16 図に原理を示すデジタルサーボ機構が用いられる。

デジタルサーボ機構の入力はパルス列で与えられ、その数がサーボ機構の移動量を指定する。入力パルスは移動の向き (時計方向または反時計方向) に応じて別々



第 16 図 デジタルサーボ機構の原理

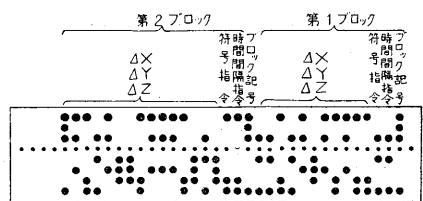
に与えられる。サーボ機構の実際の移動量もパルスの数として検出される。このフィードバックパルスは同じく移動の向きに応じて別々に取出されるようになっている。指令パルスとフィードバックパルスは加減算回路 (可逆カウンタ) でその数が比較される。両者の相違が偏差のデジタル量を与えるから、これをデジタルアナログ変換器で電圧に変換し、増幅後サーボモータに加えてサーボ系を動作させるのである。指令パルスとフィードバックパルスが同一瞬間に生ずるとカウンタが誤動作をするおそれがあるので、フィードバックパルスとしてはサーボ機構の移動量に応じて同期パルスの中から適当な数が取出されるようになっている。指令パルスとしてはクロックパルスが適当に分配されるのに対し、同期パルスがクロックパルスとは重ならないようそのパルス列が作られているからである。穿孔テープから指令パルスを作る方法は方式によって相違する。

(2) MIT 方式¹²⁾

フライス盤の 3 次元制御として試作された。

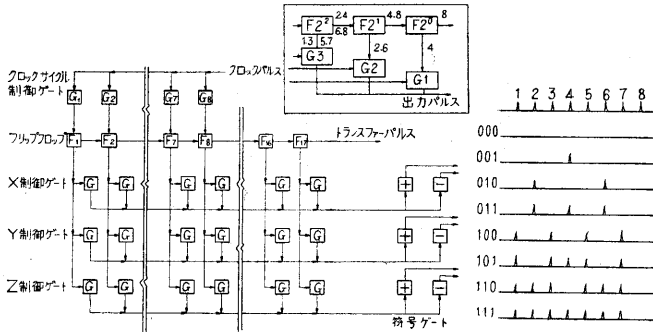
指令は x, y, z 成分の移動量を 2 進法のコードとして与える。穿孔テープは例えば第 17 図に示すようにコードされる。上 3 行が主要コードで下 4 行がチェック用 (single error correcting, double error checking) である。

移動量 Δx , Δy , Δz の数値はそれぞれ 1, 2, 3 行の



第 17 図 穿孔テープのコードの一例へ読む 2 進法コードでかえられている。

穿孔テープからの指令パルス (この 1 パルスが 0.0005" の移動量に対応) 作製は次のようにして行う。穿孔テープをリーダーにかけテープのコード指令を一旦リレーで構成



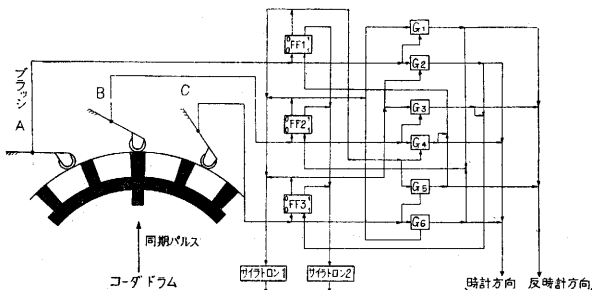
第 18 図 パルス分配回路

されたレジスタに記憶させる。レジスタは2組あって一方が指令を出しているとき他方がテープから記憶するようになっている。レジスタに記憶されたテープデータによって指令パルスを支配するのが第 18 図に示すパルス分配回路である。これには 512pps のクロックパルスが導かれている。クロックパルスから指令パルスがどのように分配されるかを簡単のため3個のフリップフロップの場合(第 18 図枠内)で説明する。フリップフロップ(F)にパルス列が到来するとその通流状態の移り変わりによって2群のパルス列がえられるから、これの一方は次段のフリップフロップへ、他方はゲート(G)へ導く。図の3個のゲートの開閉の仕方でのどのようにパルスが分配されるかを第 18 図右に示す。このゲート開閉はレジスタに記憶されたテープデータによる。

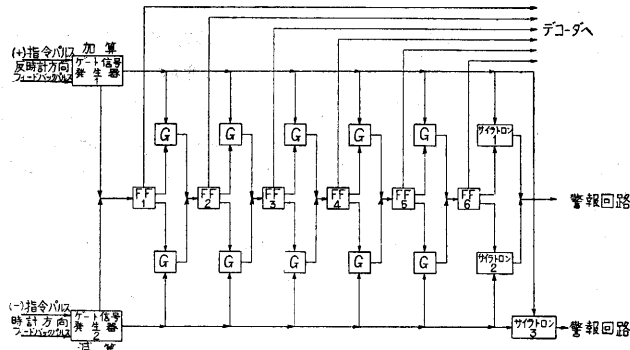
パルス分配回路には G1~G8 の8個のクロックサイクル制御ゲートがあってテープの時間間隔指令によってそ

のいずれか1個が開き、パルス分配にあずかるフリップフロップの数を10個から17個まで8段階に変え、最後のフリップフロップからでるトランスファーパルス(これがレジスタの交換、リーダーの始動を支配する)の時間間隔を8段階に変えるのである。また符号ゲートはテープの符号指令によって開閉し、符号に応じてパルス出力回路を切替えるようになっている。

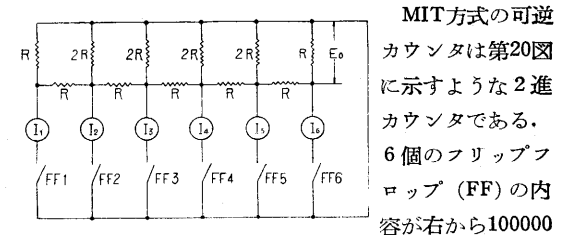
フィードバックパルスは第 19 図に示す方法によって発生される。コードドラムには3個のブラッシがあって、一時にはそのうちの1個だけが導体セグメントに接触するようになっている。回転の向きはこの3個のブラッシの接触の順序から識別される。同期パルスの中からセグメントと各ブラッシの接触ごとにその1個のパルスだけをフィードバックパルスとして取出し、回転方向に応じてその出力回路を切替えるのが position-code converter の回路である。



第 19 図 position-code converter



第 20 図 可逆カウンタ



MIT方式の可逆カウンタは第20図に示すような2進カウンタである。6個のフリップフロップ(FF)の内容が右から100000の状態のときにこれが

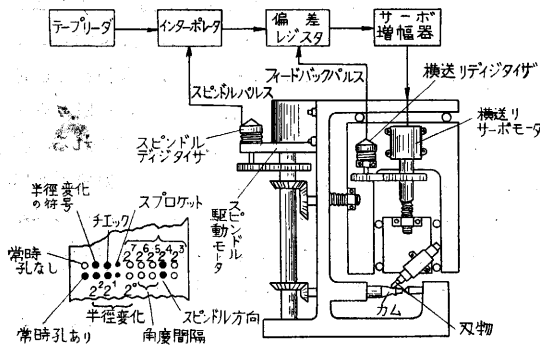
この零位置で加算側、減算側にパルスが入るとにその内容が2進法の加減算に相当して変る。デジタル-アナログ変換は第 21 図に示す定電流源 $I_1 \sim I_6$ (真空管回路) と抵抗回路によって行われる。定電流源は可逆カウンタの FF でスイッチされる。対応する FF が1のとき接続され、0のとき遮断される。 I_1 が挿入されると E_0 端子に単位電圧、 I_2, I_3, I_4 等によってそれぞれ2, 4, 8単位等の電圧が生ずるようになっている。このようにして FF の状態により E_0 端子には0~63単位の64段階の電圧が生ずることになる。

MIT 方式はこのような要素から構成されたデジタルサーボ系(第 16 図)にアナログサーボを縦続に接続しこれにパワーを受け持たせている。なお Giddings & Lewis¹³⁾ ではこの方法によってデジタル量を電圧の位相信号に変換し、磁気テープに記録したのち、play back 方式の工作機械を制御する方式をとっている。

(2) Bendix 方式¹⁴⁾

カムミリングマシンに対して実施された。第22図に示すようにスピンドル駆動と縦送りとを歯車結合することによって3次元を2次元に帰着している。すなわち立体カムの輪廓を中心軸の周りに一定角度隔たりまた縦方向に一定距離隔った点の半径寸法の

変化として、2進法8ディジットの数値（この1単位は0.0002"に対応）として与えている。角度間隔は2ディジットにより5, 10, 20, 80度と指定される。テープデータはインターポレータに送り込まれる。これには2組のレジスタがあって1組が指令を出しているとき、他方がテープデータを記憶するようになっている。スピンドル回転と連動するスピンドルディジタイザはスピンドル回転5°に対して、256パルスを発生し、インターポレ



第22図 Bendix方式

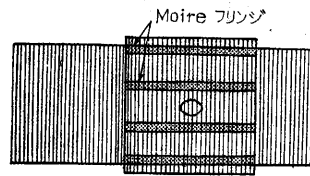
ータのパルス分配回路に導かれる。これはレジスタに記憶された半径変化のテープデータに応じて分配され指令パルスとなる。偏差レジスタの可逆2進カウンタはこの指令パルスと送りリジタイザからのフィードバックパルスを受けてその引算を行い、偏差を2進数値であらわす。これは decoding matrix でアナログ電圧に変換され、増幅後サーボモータに加えられる。サーボモータは油圧モータで、サーボ弁を利用している。

(3) Ferranti方式¹⁵⁾

フライスの3次元制御に実施されたFerranti方式では加工物の輪廓を点の座標および曲線の方程式(2次まで)の形で与え、これらの情報を穿孔テープにコード化し計算機(専用)の入力とする。計算機はこれらの情報に基づいてx, y, z 3成分の移動量を各成分ごとのパルス列(1パルスが0.0001"に対応)として与える。このパルス列を工作に必要な他の指令とともに磁気テープに記録する。したがってFerranti方式では工作機械に対する指令を計算機で個別に作製しておいて、この指令磁気テープで工作機械のデジタルサーボ機構を駆動するのである。このようにすれば工作機械には data handling の設備を一々付属させる必要がなくなり経済的となる。Ferrantiのデジタルサーボ機構の検出には光学的な回析格子(1"に500, 2,500および5,000本)を利用している。

その方法は第23図に示すように回析格子を2個ほとんど密着させて、その一方を固定に、他方を移動用として使用している。両者の格子が相互に若干傾いていると、いわゆる Moire フリンジが格子と直角の向きに生

じ、格子の移動に応じてこれが上下方向に大きく移動する。この動きを光電管



第23図

で検出すると、格子の1ピッチ移動ごとに1パルスが取出せる。このようにすると光電管の視野を大きくできる

ので感度もよく、またその平均化の作用で格子の個々のピッチ誤差がそれほど影響しなくなる利点がある。移動の向きを識別するには光電管を90°位相をずらしてもう一本設け、両方の光電管からのパルスの順序を利用して行っている。

Ferranti方式では工作機械の駆動に用いている送りねじにボールナットねじを使用しそのバックラッシュを除去する等細かい注意を払っている。(1956. 7.16)

文献

- 1) B.A. Johnson, L.D. Schmid & J. Warshawsky : Control Eng., June, 1956, p. 84.
- 2) S. Y. Lee & J. F. Blackburn : Trans. ASME, Aug., 1952, p. 1005.
- 3) Farrand Controls, Inc. のカタログによる。これについては機械試験所 研野和人氏のご好意を受けた。
- 4) A. Jeudon : Control Eng., Apr., 1956, p. 65.
- 5) A. J. Carr, Jr. : IRE Trans. on Ind. Elec., Mar. 1956, p. 87.
- 6) Machinery (Eng.), Jan. 22, 1954, p. 193.
- 7) Aircraft Production, Mar., 1955, p. 102.
- 8) Leaver & Mounce : Electronics, vol. 27 (1954), p. 124.
- 9) R. H. Booth : Aircraft Production, July, 1955, p. 262.
- 10) P. J. Farmer : Aircraft Production, Apr., 1956, p. 126.
- 11) Aircraft Production : Aug. 1955, p. 294.
- 12) MIT Report : A Numerically Controlled Milling Machine, Part 1 (July, 1952), Part 2 (May, 1953) この資料の入手については高橋安人教授のご好意を受けた。
- 13) D. A. Findlay : Electronics, Feb., 1956, p. 122.
- 14) E. C. Johnson : IRE Trans. on Ind. Elec., Mar., 1956, p. 80.
- 15) Machinery (Eng.), Apr. 13, 1956, p. 451.