

工 作 機 械 の 数 値 制 御

Numerical Control of Machine Tools

小 川 正 典* 阿 武 芳 朗*
Masasuke Ogawa Yoshiro Anno

内 容 梗 概

米国、英国における数値制御工作機械の最近の進歩について概論し、数値制御方式を工作機械に適用する場合の技術的問題点をあげた。特に機械技術者の立場よりプログラミングとパルス分配の問題、アナログ方式とデジタル方式の得失、パワーサーボ機構の選定上の問題点を明らかにした。あわせて工業技術院機械試験所が試作研究し、日立製作所の協力した数値制御型フライス盤の内容を紹介した。

1. 緒 言

従来工作機械のオートメーションとしては、連続自動動作を行う自動専用工作機、トランスファマシン、またアナログなフィードバック機構を有するならい削り工作機がその主たるものであつた。最近の機械工作のオートメーションでもつとも注目を集めているものは工作機械の数値制御となつている。特に航空機工業で強い関心と呼んでおり、AIAレポートによれば米国空軍よりスキンミラー、プロファイルミラーなどの数値制御工作機約140台が発注済であり、1957年半ばで多くの航空機工場、実用運転に入り、1958年末までにはならい工作機の大部分が数値制御方式に置換されるであろうと報ぜられている。

数値制御方式の利点としては

1.1 汎用性が広い

作業段取りはテープの交換ですみ、治工具が不要で、作業、準備時間が短い。テープ、穿孔カードなどの保存、輸送が簡便である。したがって多量生産もさることながら、多機種少量生産に大きな偉力がある。指令装置を工作機械より距離的に離すこともできる。たとえばテレタイプ回線により遠隔地の工場の工作機械を制御することも可能である。

1.2 加工能率の増大

加工手順における作業者の誤差が絶無となり、汎用工作機におけるアイドルタイムが短縮でき、送りの数値制御プログラムにより純切削時間が理想的に計画できる。二次曲線など人間の操作、作業の困難なものも容易かつ数値的に正確に加工できる。AIA(Aircraft Industries Association)の数値制御分科会の調査によれば、数値制御方式と従来のならい工作機の所要時間の比較の一例は下記のごとくである。

ならい制御方式

事務所でのペーパーワーク	3 時間
テンプレート製作	97.5

* 日立製作所川崎工場

ならい加工	3.6
孔あけ加工	0.5
合計	104.6 時間

数値制御方式

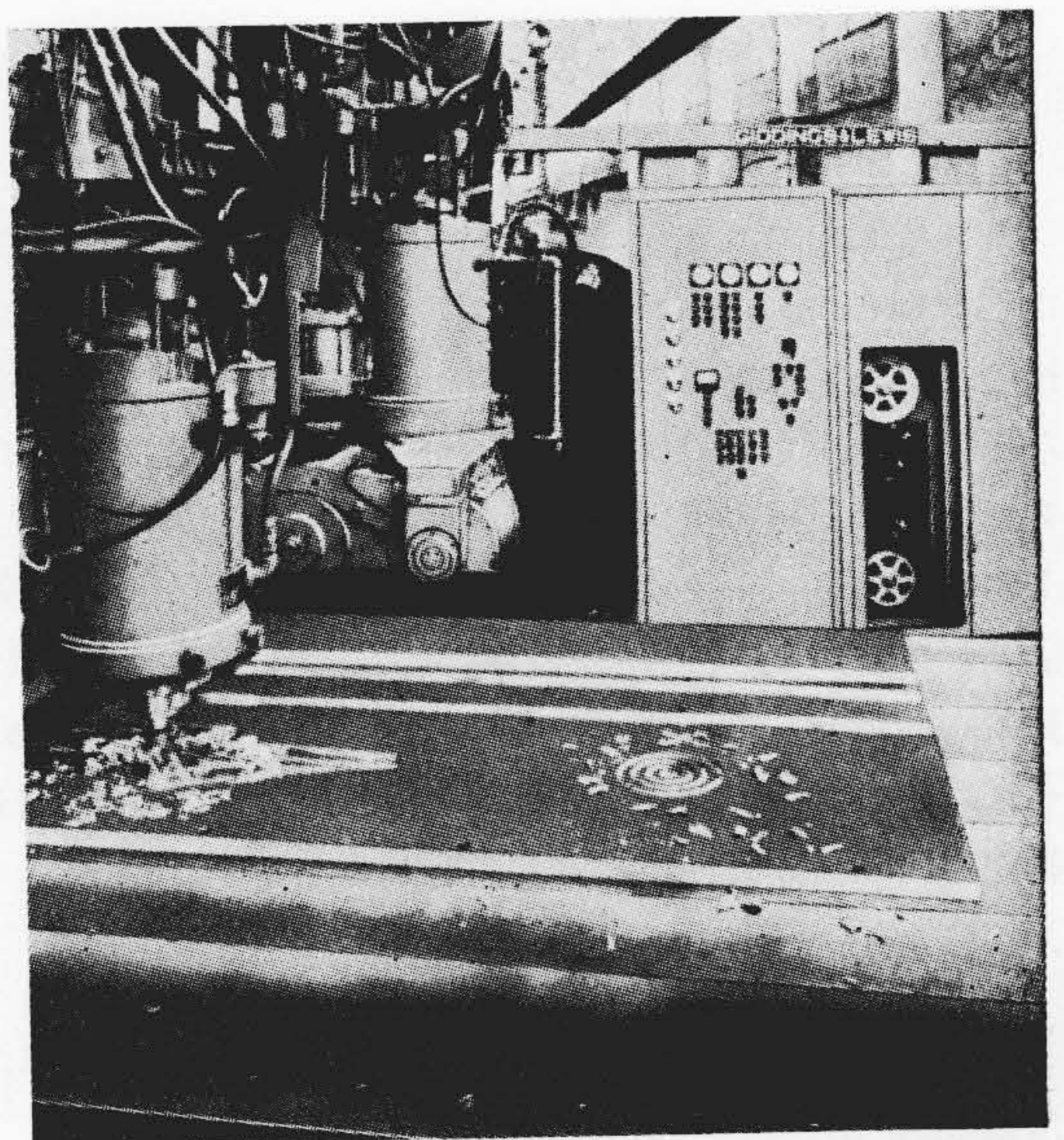
事務所でのペーパーワーク	1.0 時間
計算機によるデータ処理(テープ作成)	1.5
磁気テープによる加工	0.9
磁気テープによる孔あけ加工	0.1
合計	3.5 時間

1.3 精度の向上

従来のアナログならい方式に比してモデル製作誤差が入らず、パルス数とフィードバック機構の精度を増大すれば比較的容易に精度の向上が計り得る。

1.4 経 済 性

従来の MIT 方式などはスキンミラー、特殊大型工作機に応用されたため高価であるとの印象があるが、テ



第1図 数値制御方式スキンミラー
(米国ギッデング・ルイス社)



第 2 図 数 値 制 御 工 作 の 手 順

作成までのプログラミング用装置，デジタル計算機などを別とすれば，実際工場で使用するテープリーダ以後の制御装置は従来の多次元自動工作機に比べて高価にならない。1 台の制御ユニットを切換えて旋盤，フライス盤などの異種の汎用工作機に使用も可能であり，また 1 台の制御ユニットで，多数の工作機群を同時運転，遠隔運転することもできる。したがってテープ作成までの装置を共用として，個々の機械に比較的安価なテープリーダ以後の制御装置を取り付けることにより，従来の自動化に比べて経済性は決定的に有利となる。

2. 数値制御工作機械の現況

本来の意味での工作機械の数値制御は，比較的新しく 1949 年 6 月より，MIT の Servomechanism Lab において基礎研究が開始され，数値制御フライス盤が完成

された。Gidding Lewis 社と GE 社は，この MIT 方式を，航空機製作用，スキン，スーパーミラーに応用し，ニューメリコード方式として 1955 年に発表し実用化した。さらに 1952 年にイギリスにおいて Ferranti 社は NPL で開拓した回折格子を使用してフライス盤その他の工作機械に応用する高精度制御装置を 1956 年までに完成した。米国においては，USAF の後援のもとに少なくとも 50 種類以上の数値制御方式が存在し，応用範囲は，旋盤，フライス盤，ドリル中グリ盤よりアセンブリングマシンに拡大されようとしている。

特に形状切削数値制御工作機械は，米国英国において主としてジェット生産の一台数万点に及ぶ型板と複雑な翼桁などの切削を必要とする航空機工業を中心として発展し，数値制御工作機械とは，スキンミラー，スーパーミラーと同一語というほどの普及をみた。今日ではソ連，フランス，日本において，研究が開始された。第二次大戦後の急激な数値制御の発展はその背景に，エレクトロニクス技術の発展のあることが大きな特長と

なっている。

わが国では機械試験所で，1955 年に位置制御実験機が完成され，東大生研は 1956 年に，計数型サーボの試作の成果をあげた。実用面では富士通信機は，ターレットパンチプレスの数値制御を 1956 年末に完成発表し，1957 年に入り，東工大精研は MIT 方式に準じた本格的数値制御のならい旋盤の成功をみた。1958 年 3 月に入り機械試験所は，1956 年以來の工作機械のオートメーション研究の一端として，わが国最初の数値制御フライス盤の研究を発表し，日立製作所は，ベースミーリングマシンおよびパワーサーボ部において，これに協力したのである。現在，国内の主要工作機メーカーは欧米の進歩に早く追いつくべく工作機械の革命に値するこの命題に取り組んでおり，将来の急速な発展が望まれている現状である。

第1表 数値制御自動機と従来の汎用自動盤の本体の比較

	駆 動 部	制 御 部
数値制御三次元自動制御	油圧回転サーボモータまたは DC サーボモータと送りネジまたは油圧往復シリンダ	一次元ごとにフィードバック装置
三次元機械的自動サイクル	数十本の駆動シャフト 数十枚の歯車 駆動電動機 または油圧回転モータ(変速用)と数枚の歯車、数本の駆動軸	一次元ごとに遠隔制御で きる自動クラッチおよび 一次元ごとに段取、順序 を決定する電気装置または 機械的カムまたはドック 装置

3. 数値制御工作機械と汎用工作機械の位置

工作機械の数値制御には明らかに重大な革命的意味がある。作業者の代りに電子頭脳が仕事を行い、生産能率が增大するのみならず、多種の目的に応ずる汎用性が最短時間で遂行できるということである。したがって数値制御工作機は、その発展の過程からいつても、従来のならい型彫り、スキンミラーのみでなく、一般汎用工作機への適用が主なる目的となつてくるであろう。たとえば、膝型フライス盤において三次元自動サイクルを行わす場合、従来の機械連続式自動サイクルと数値制御による方式は本機に取付く部分が第1表のように異なってくる。

数値制御自動フライス盤としては、歯車軸のない構造のものも製作し得て、その必要部品は従来の $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 以下に減少してしまう。したがって近い将来汎用工作機の新規設計また設備購入に関して下記のような新しい選択上の認識が必要とされるであろう。

- (1) その汎用工作機械は数値的入力信号によつて制御しうるか。
- (2) 最終駆動部にはただちにサーボモータが取り付けられるか。
- (3) 必要に応じていつでも機械運動部の誤差の修正を行うフィードバック機構が取り付けられるか。
- (4) 工場の作業者が、その制御系の電気操作を容易に行えるか。
- (5) 各駆動部はユニットシステムになつているか。

以上のように、汎用工作機は従来のメカニズム万能思想に対して大いなる反省を迫られる時期にきていると考えられる。

4. アナログ方式とデジタル方式

4.1 アナログ制御方式

工作機械に適用されているアナログ制御の例は、いわゆるサーボ機構であり、従来のならい削り方式と新しい磁気テープを用いる記録方式の二つである。後者は熟練

工の行う模範操作を磁気テープにアナログ量で記録しこれを再生して同じ動作を繰り返さすもので、レコードプレイバック方式とも呼ばれている。

このアナログ方式の検出部としては、ポテンショメータ、シンクロ、マグネシン(テレコン)差動変圧機(マイクロシン)、インダクトシン、フォトトランジスタ光電池、光学格子による光学的検出が行われ、増幅部としては、真空管、継電器、回転増幅機、磁気増幅器、サイラトロン、クラッチ、油圧装置などの適宜の組合せにより行われる。操作部としては、サーボ電動機(直流サーボ電動機、交流サーボ電動機、特殊サーボ電動機)油圧サーボモータ、空気圧サーボモータなどがある。磁気録音方式には直接記録方式、周波数変調信号方式、位相変調信号方式などが考えられ、下記のような得失をもっている。

- 特長 (1) プログラム信号の整型編集が容易である。
 (2) 各種工作プログラムを記録蓄積し工場作業管理に新しい方式を与える。
 (3) テープによる自動繰り返し可能である。
 (4) 高速度複写可能である。
 (5) 多くの信号チャンネルがとれる。
 (6) 必要に応じ音声信号を加え得る。
- 欠点 (1) 非線形性のため振幅信号は用いられない。
 (2) 温度、時間経過による信号のひずみ曲りがある。
 (3) 偶発的信号喪失がある。

4.2 デジタル指令方式

入力デジタル量で与えられ、これをアナログ情報に変換すれば、後はアナログ制御と同じになる。その過程においてパルス列を用いるものと用いないものとの二つに分かれている。デジタル量で入力を与えることはアナログのテンプレート、モデル、磁気テープ方式に比較して電子計算機と組合せれば、いつそう汎用性を増し、情報伝達の正確性、計算の精度からも将来性に富んでいる。デジタル制御工作機は、第4図ブロック線図のように、適宜アナログ変換がとられる場合が多く、したがってD→A変換器は重要な要素となつている。これらはコーダドラム、電磁的検出変換器、インダクトシン、光学格子、コーダプレートなどでデジタルの検出が行われる。

デジタルの記録方法は、図面を解析して、カードやテープにパンチし、これを計算機に入れてその結果を磁気テープまたは孔明きパンチテープにとる方法が用いられ演算符号としては、二進符号、交番二進符号、4要素10進符号が用いられている。操作部は、一般にアナログサーボ方式を用いるが、純デジタル方式では(デジタル指令によるデジタルサーボ)特殊なステップモー

タが用いられる。

その他テープ制御としてプログラマーの指令によつて従来の開ループの自動盤、アセンブリマシン工程の選択などに用いられる。

4.3 アナログ方式とデジタル方式の比較

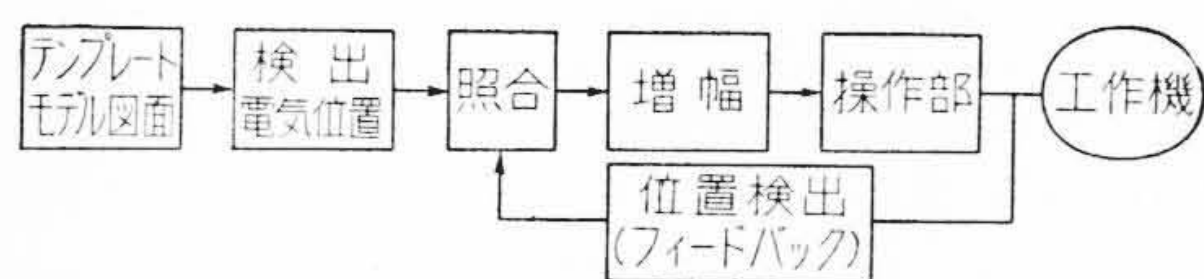
4.3.1 精 度

加工上の要求精度からはいずれも、現在 $0.0001''$ (2.5μ) 程度を目標としている。しかし、デジタル方式は、一般に取り扱う桁数を増すことにより精度の向上が期待できるが、アナログ方式には限度がある。また本来デジタル方式は、司令パルス数を計えるのが本旨でパルスの大きさ、波形のひずみは本質的に精度に影響を与えない。アナログ方式におけるノイズは精度に影響し、また操作特性においては、ドリフト誤差を生ずる場合が多いが、これは機械作動部分の重量、慣性、摩擦抵抗などが相当の影響を与えるのである。

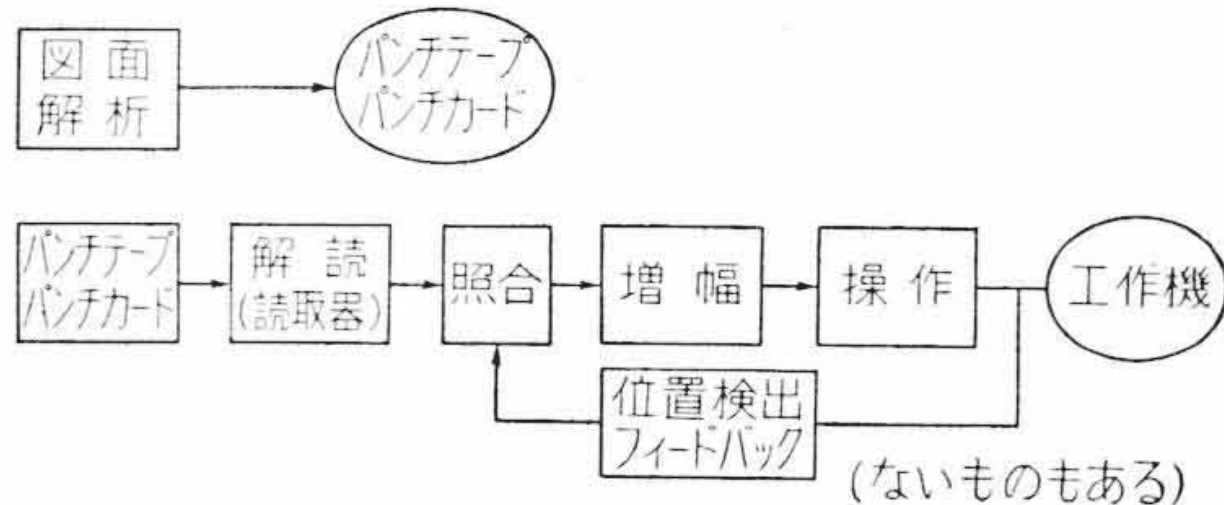
第2表 ポジショニング形状切削の各方式

	ポジショニング	形状切削
1 デジタル指令——デジタルサーボ方式	Ferranti	MIT
2 デジタル指令——アナログサーボ方式	B.T.H.	EMI
3 アナログ指令——アナログサーボ方式		GE

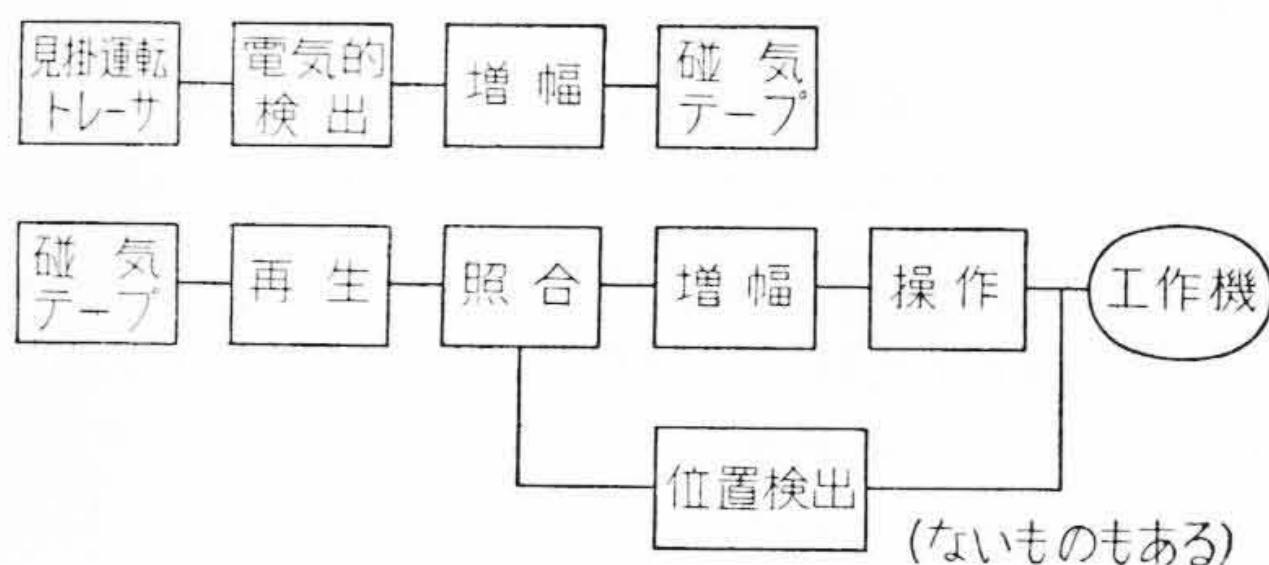
(A) トレーサ制御方式(従来のならい削り方式)



(B) パンチテープ(カード)制御方式

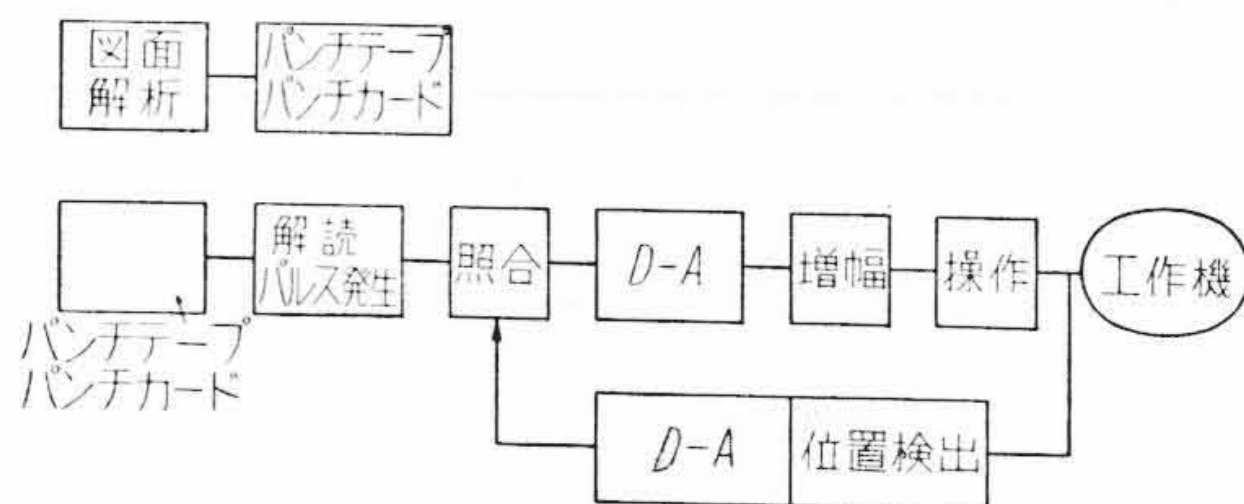


(C) 磁気テープ制御方式

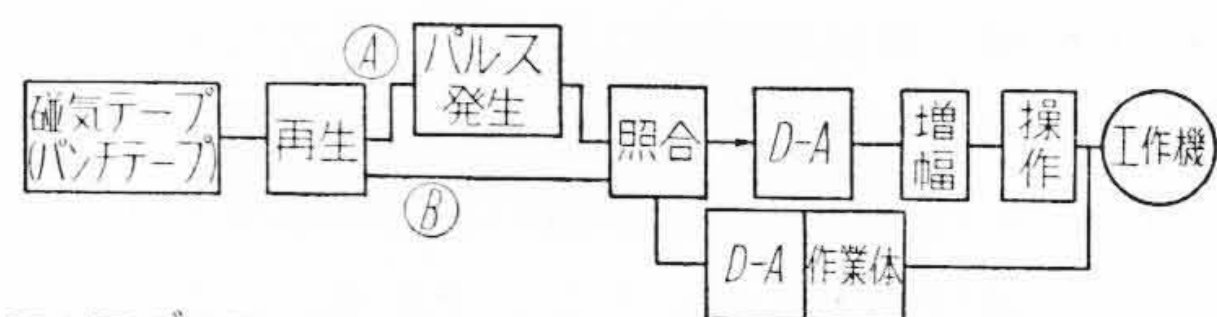
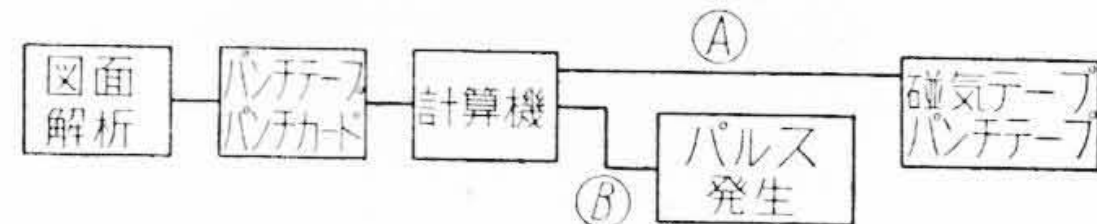


第3図 アナログ方式ブロック線図

(1) パンチテープ(カード)制御方式



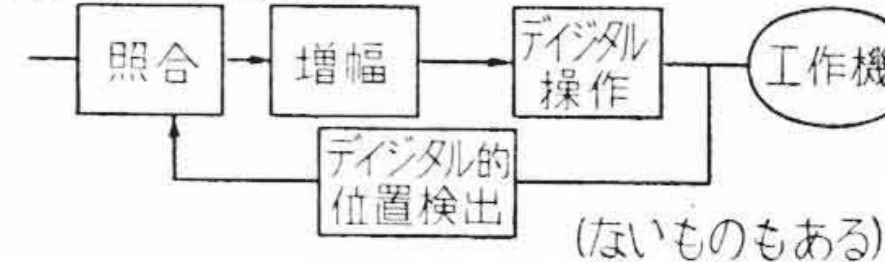
(2) 磁気テープ制御(パンチカード制御)方式



(3) アナログ併用制御



(4) 純デジタル制御



第4図 デジタル方式ブロック線図

4.3.2 汎 用 性

司令を変えて各種動作を行わせる場合は、その準備操作の簡単で融通性のある点では、デジタル方式がはるかにまさっている。特にデジタル計算機と組合せたデジタル方式はフレキシビリティが大きい。

4.3.3 情報の位置

工場内外へ指令情報を伝達連絡する場合、デジタル方式のパルスではきわめて容易に行える。

4.3.4 経 済 性

価格の点では、アナログ方式が安い。

以上のような観点から使用目的によりそれを選択せねばならないが、実際問題としてデジタル方式のみでなくアナログ、デジタル方式の種々の組合せがあり、将来、指令部としては、計数型電子計算機の普及にともなつてデジタル方式に移行していく可能性が考えられる。

5. プログラミングとパルス分配

プログラミングは、加工用設計図をもとにして数値制御指令部入力となるコントロールテープを作成するまで

工 作 機 械 の 数 値 制 御

第3表 ポジショニング一覧表 (位置制御一覧表)

グ デ サイ ジ ボ タ ル 方 式 指 令 — ア ナ ロ グ	工 作 機 械	制 御 対 象	最 大 移 動 量	設 定 精 度	保 証 精 度	指 令
	BTH (英) 中ぐり盤	テーブル位置	横 57" 上下 42"	0.0001"	±0.0005"	6 個のダイヤル 例(12.3456") またはパンチカード
	PW 治具 (米) 中ぐり盤	テーブル位置	60"	0.0001"	0.0001"	パンチテープ
	GE ターレット (米) プレス	テーブル位置 ターレットヘッド				パンチカード " 10進5桁 " 10進4桁

ル デ サイ ジ ボ タ ル 方 式 指 令 — デ ィ ジ タ ル	メーカ	工 作 機 械	制 御 対 象	最 大 移 動 量	設 定 精 度	保 証 精 度	指 令
	Kearfott (米)	ボール盤	テーブル位置 ドリルヘッド			±0.0025"	パンチカードまたは12個 の押ボタン(コードは2 進法である)
	富士通信機 (日)	ターレットプレス	テーブル位置 ターレットヘッド	テーブル x, y 600mm ヘッド 18種	0.1mm	0.05mm	パンチテープ
	機 (日) 試	治具ボラ	テーブル位置		0.001mm		パンチテープ
	Ferranti (英)	治具ボラ	テーブル位置				

第4表 形状切削一覧表

ボ ア ナ ロ グ 方 式 指 令 — ア ナ ロ グ サ ー	メーカ	工 作 機 械	制 御 対 象	設 定 精 度	保 証 精 度	テープの記録	指 令
	GE (米)	旋 盤 スキンミラーその他	三次元速度方向 Cutter 発停		0.001"		磁気テープ
	Gidding & Lewis (米)	Skin miller その他(ニューメリ コード)	速 度 5 軸 速 度 22 種 指 令			位 相 変 調	磁気テープ
	Maico Co. (米) Factool 方式	旋 盤 フライス盤 そ の 他	速度方向		±0.01"	磁 気 変 化	磁気テープ
	Gisholt (米)	ターレット旋盤	キャレージ位置 主軸変速		±0.01"	磁 気 変 化	磁気テープ
	EA (米)	旋 盤	ターレットインデックス 速度変換			振 幅 変 調	磁気テープ

サ ー デ ィ ジ タ ル 方 式 指 令 — デ ィ ジ タ ル	メーカ	工 作 機 械	制 御 対 象	設 定 精 度	保 証 精 度	指 令
	MIT (米)	フ ラ イ ス 盤	三次元速度方向	0.0005"		紙 テ ー プ
	Ferranti (英)	フ ラ イ ス 盤	三次元速度方向 そ の 他	0.0001"	±0.0005"	紙 テ ー プ 磁 気 テ ー プ
	Naca	堅 型 切 削 旋 盤	半径方向の位置			パンチカード
	Electrome Control Co. (米)	フ ラ イ ス 盤	三次元速度方向			磁 気 テ ー プ
	Gidding & Lewis (米)	ス キ ン ミ ラ ー (フライス盤)	三次元速度方向			磁 気 テ ー プ

ボ ナ 指 デ ィ ジ タ ル 方 式 指 令 — サ ー ア ナ ロ グ	メーカ	工 作 機 械	制 御 対 象	設 定 精 度	保 証 精 度	アナログ量	指 令
	EMI (英)	カムフライス盤	テーブル位置			電 圧 変 化	パンチテープ

の過程である。各社種々の方式があるが、根本はパルス分配の方法によりプログラミングの方式が決定される。プログラミングは、生産技術、工程管理上のまったく新しい技能であるから特に数学技術者、工作技術者の密接な協力が必要であり、数値制御工作機実用化の大きな

問題点となつてゐる。

5.1 プログラミングで問題となる点

- (1) パルス分配の方式
- (2) デジタル計算機は汎用か専用か
- (3) 計算機は計算センタに置くか、各工場に置くか、

第5表 プログラマ — 覧 表

メーカ	工作機械	制御対象	サーボ機構	指令
Monarch (米)	旋 盤	サイクル変換 主軸速度変換 その他	デジタル指令 ——デジタルサーボ	
Jones & Lamson (米)	タレット旋盤	サドル位置 速度変換 タレットインデックス	デジタル指令 ——デジタルサーボ	プラスチックテープ 押ボタン
Alfred Herbert (英)	Heald Bormatic 中ぐり盤	テーブル, その他, 位置, 縦横スライドの送り 主軸発停	オープンサーキット開ループ (精度の高いときは デッドストップ併用)	熟練者の作業を可聴周波数の 変化にかえてテープレコー ダに記録 磁気テープ

または専門計算会社に依頼するか

(4) コントロールテープはデジタルか、アナログか

以上の点については米英国においても種々の方式があり統一はとれてなく、また、画一的に結論はつかないが、わが国の現状では少なくとも次のことが推測されている。

(1) プログラミング方式はデジタル計算機の発達により支配される傾向にある。

(2) 大企業は別として一般企業内で個々にデジタル計算機を所有することが困難で、計算機センタが別に生まれる必要がある。

(3) 工作機用数値制御装置のメーカーが、使用者側に工作用テープを供給する。

(4) 計画はデジタルプログラミングで、実際の工作機取付け用テープは生産管理方式を従来と変えないですむアナログ方式が簡便なものとして歓迎される。

(5) 純粋にデジタル制御の工作機械を設置した数値制御の生産管理をするモデル工場の出現が期待される。

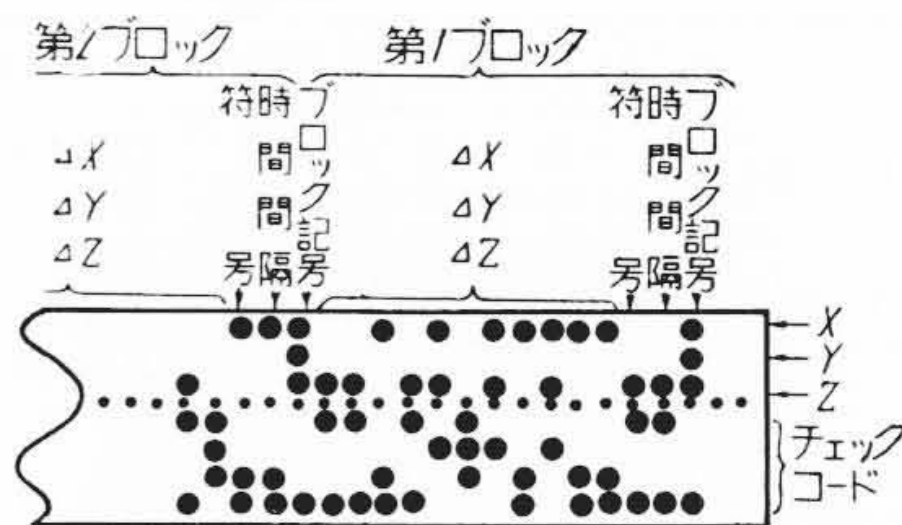
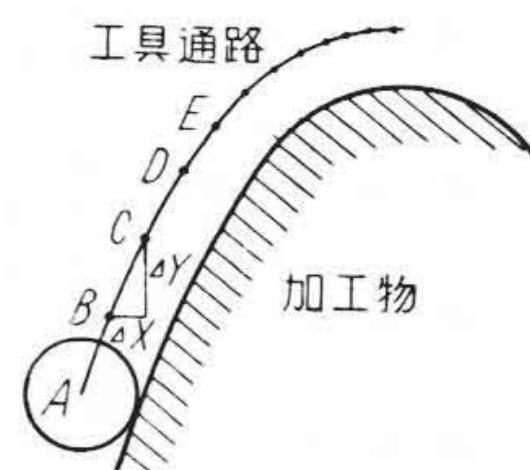
5.2 パルス配分

通常コントロールテープは、工作形状中の主要点に関する情報を入れてあるが、実際の補間は、パルス列による、デジタルなものと、補間をアナログに行うものとに分かれている。前者ではパルス分配の後でD-A変換して、軸の回転運動とし、これを新しいアナログ指令とするかあるいは、パルス列をそのまま指令に用いて機械を制御する方法がある。

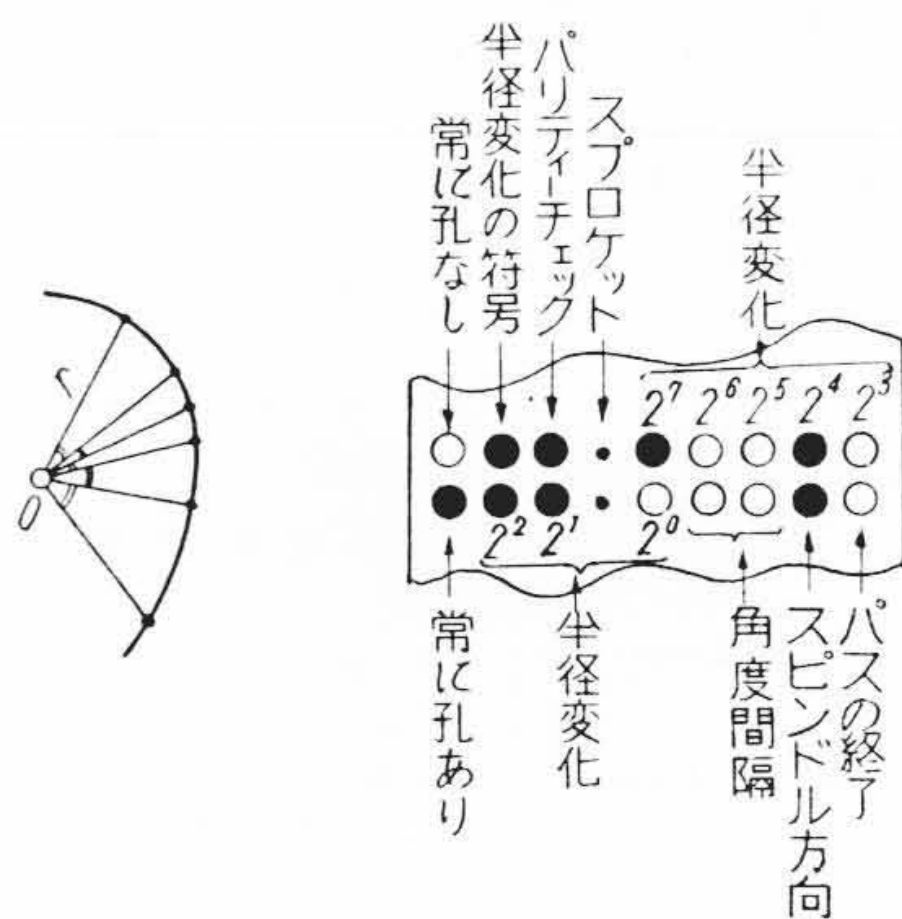
(1) パルス列を用いる形状制御

(a) MIT 方式^{(1)~(4)}

MIT 方式は工具中心の通路を直線の連続として近似し主要点の間をブロックと呼んで分けてゆく。第5図のように ΔX , ΔY , ΔZ を求めブロックを進行するに要する時間 Δt , 土進行方向を示す符号, ΔX , ΔY , ΔZ に相当するパルスの数値をテープにパンチする。MIT 方式の特長はカッタの中心移動が、パルス数で規定されることで、1パルスは 0.0005" に選んであり、 ΔT は 2, 4,



第5図 MIT 方式

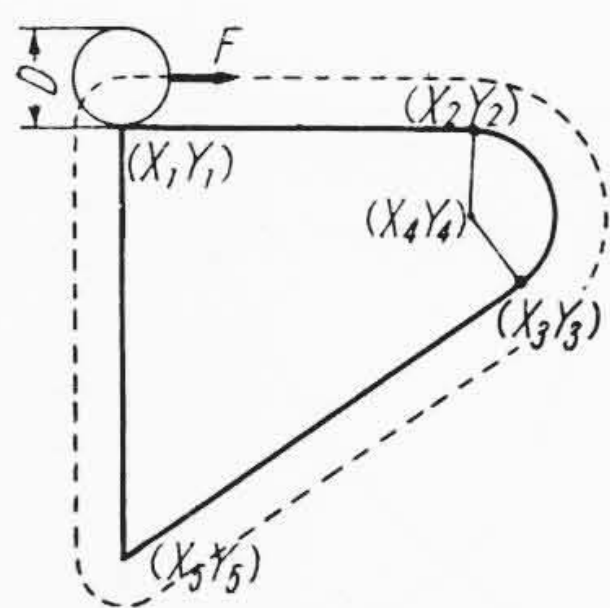


第6図 Bendix 方式

8, 16, 32, 64, 128, 256 秒のいずれかに選びパルス/秒は 512 パルスである。

(b) Bendix 方式^{(3)~(4)}

Bendix 方式は本質的に MIT 方式と同様で、もともとジェットエンジン燃料弁用三次元カムのために考えられ加工品は極座標で表わされる。パルス分配は MIT 方式と同様でクロックパルスのかわりに 5 度の角度で 256 PPS



第7図 Ferranti 方式

のスピンドルパルスを作り，これをクロックパルスのかわりに用いて，パルス列を取出し，工具の横送りを制御する。1ブロックは5, 10, 20, 80度のいずれかを選ぶようになり，1ブロック間の半径変化は回転角に対して直線的で1パルスは半径変化 0.0002" 相当となつている。

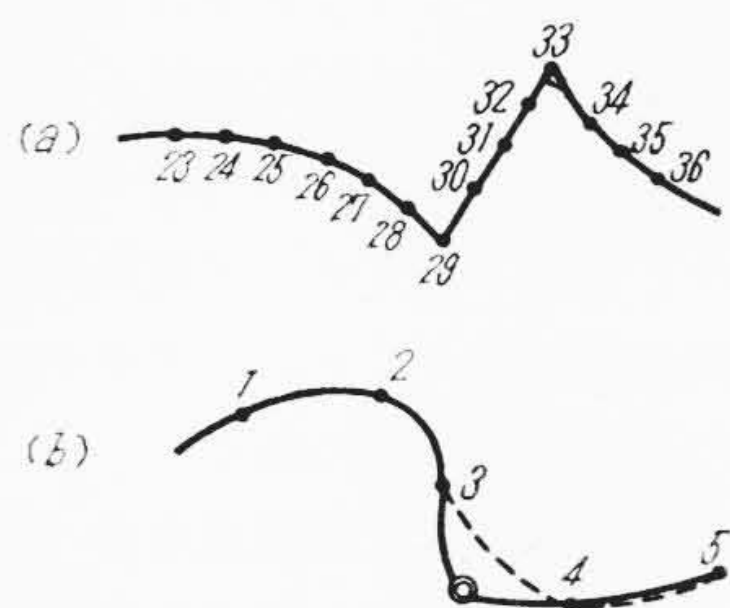
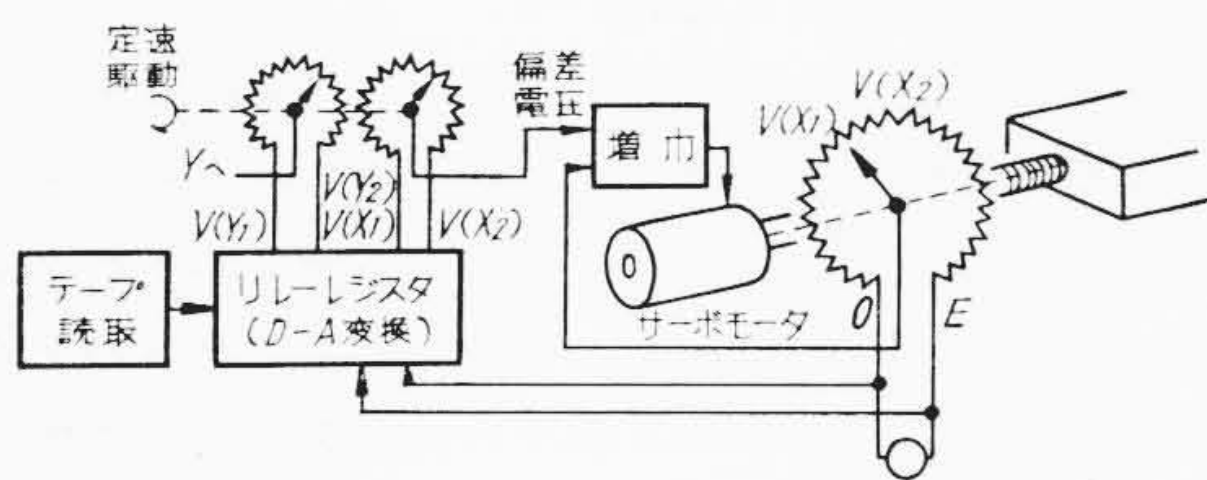
(c) Ferranti 方式^{(3)~(4)}

Ferranti 方式は一般フライス盤に用いられた方式で第7図のように加工形状を直線と二次曲線の連続として近似し，これらをつなぐ点，および二次曲線の極座標 X_i , Y_i , 工具直径 D , 送り速度 F , 曲線の種類その他若干の情報をパンチして専用デジタル計算機にかけると，工具中心の通路を決定するパルス列（1パルス 0.0002"）が作成される。したがって加工物の形状は2次方程式を指定すればよく，曲線の変化点を指定すればよい。この場合パルス列は実際の加工に必要な10倍の速度で作られ，いつたん磁気テープに記録して $1/10 \sim 1/8$ の速さで再生して実際の制御を行い，高能率的である。

(2) パルスを用いない形状制御

EMI 方式^{(3)~(4)}

EMI 方式は穿孔テープに入れられた主要点の間をアナログ量で補間し，パルス列を使わない代表的なものである。工具中心の通路を直線で近似し，各折点の座標値



第8図 EMI 方式

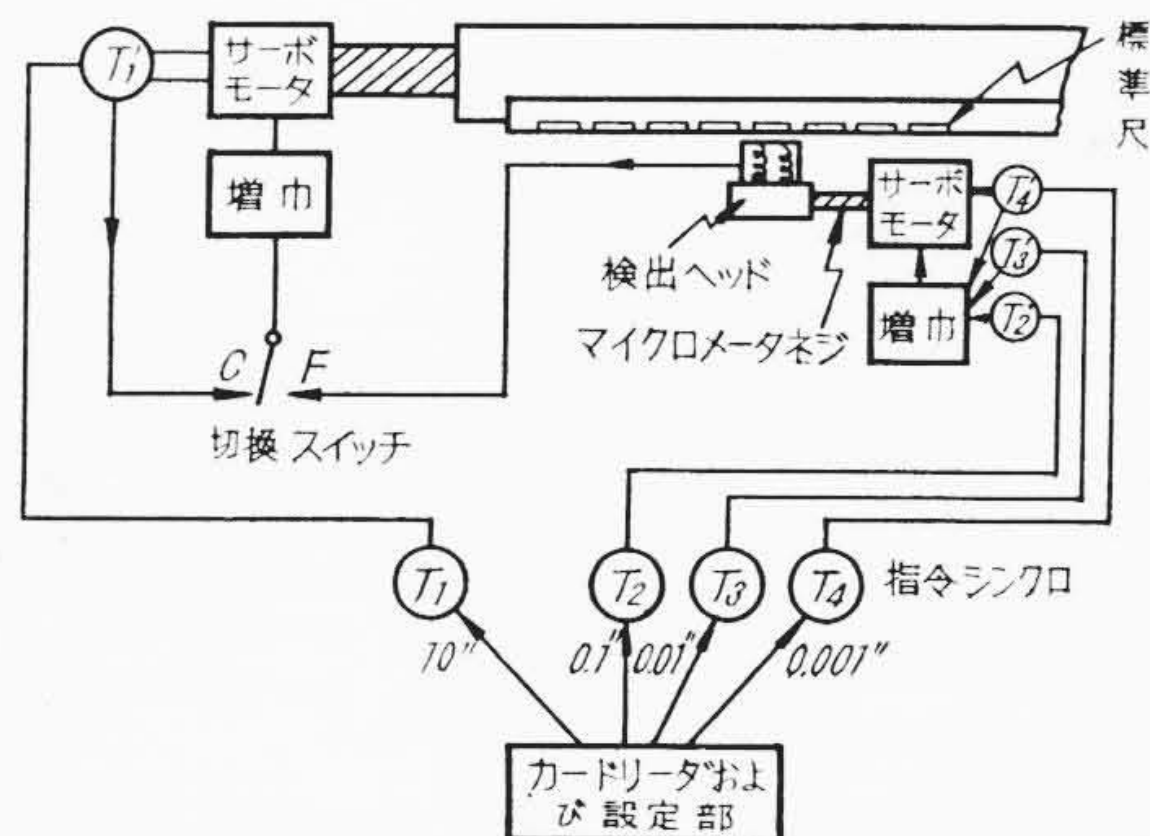
を順次テープにパンチする。これを読取つてリレーで構成されるレジスタに送り込み，レジスタは記憶数値に比例した電圧を出す $D \rightarrow A$ 変換器となつており， $V(X_1)$, $V(Y_1)$, $V(X_2)$, $V(Y_2)$ などを作り出して図のようにサーボの入力側ポテンシオメータに加える。実際は補間器の構造に工夫がこらしてあり相隣れる三点間を拋物線で補間が行われている。単巻変圧器によつて拋物線ブリッジを形成している。第8図で 23—24—25, 25—26—27 のように，奇数→奇数番の三点を用いるから，29, 33 点のように急に曲ることもできる。

(3) パルスを使う位置決め制御⁽⁵⁾

Ferranti 方式は，ディジタルサーボ法に相当する位置決めで，1パルスが一定の長さに相当することは変りなく，指令パルス列を作らずに，所要のパルスの数をカウンタにセットしておき，ディジタルの検出器からの，フィードバックパルスでこれから減算してゆき，残りが0になつたところで停止させている。この場合閉ループ制御は，カウンタ容量が正負合せて二倍となり $D \rightarrow A$ 変換が複雑となり他の方向，検出系を簡素にし，バックラッシュの影響を除くことが困難なことから，カウンタ内容に応じて2, 3段階の駆動指令を発して停止位置の少し前で駆動を減速させ，ゆきすぎを生じないようにして停止させる開ループ制御法を採用している。Ferranti は，デカトロンカウンタを用いてこれをジグ中グリ盤に適用し，検出には回折格子を用い，1パルスは 0.0001" である。

(4) パルスを用いない位置決め制御⁽⁵⁾⁽⁶⁾

アナログサーボを用いる位置決めであり，原理的に最も簡単なものは EMI 方式から補間部分を除いて，リレー回路の出力電圧をそのまま入力として，アナログサーボを制御すればよい。ポテンシオメータの代りに多速シンクロ系と差動変圧器とを併用して精度の向上を計っている。B. T. H. (British Thomson-Houston Co.) ジグ中グリ盤はその代表例である。第9図のように差動変圧器の可動鉄片の作用をする小片を正確に 1" の間隔で



第9図 BTH 方式

長い棒に取り付け、これを標準尺としてテーブルに固定する。差動変圧器の本体（検出ヘッド）はテーブルと無関係なマイクロメータネジで別に駆動されるが、その行程は 1" 以内でよい。シンクロは 4 個あり、それぞれの 1 目盛 ($1/10$ 回転) は、10, 0.1, 0.01, 0.001" である。カードを読取つて指令用シンクロをセットし起動すると、はじめは切換スイッチは C 側にあり T_1 シンクロでテーブルは所定の位置まで 0.2" の精度で駆動される。

その間に T_2, T_3, T_4 などにより検出ヘッドは、0.0001" の精度をもつて 1" 以下の端数値だけ駆動されている。これらが終ると、スイッチは自動的に下側に切り換り、テーブルの駆動は差動変圧器を検出器とするサーボとなり、最も近い鉄片を選んで検出ヘッドとの相対位置が 0 になるまで、精密にテーブルが送られる。

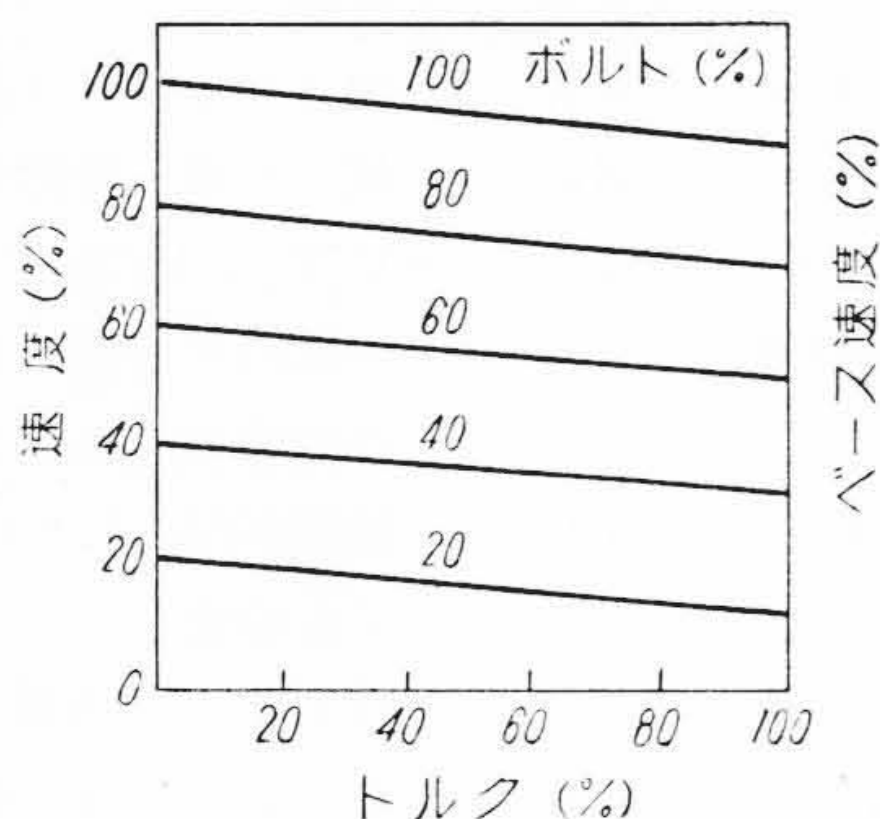
Pratt & Whitney のジグ中グリはシンクロのかわりに、ポテンショメータを使うだけで大体の原理は B.T.H のものと同じである。

6. サーボモータ選定上の問題⁽⁷⁾

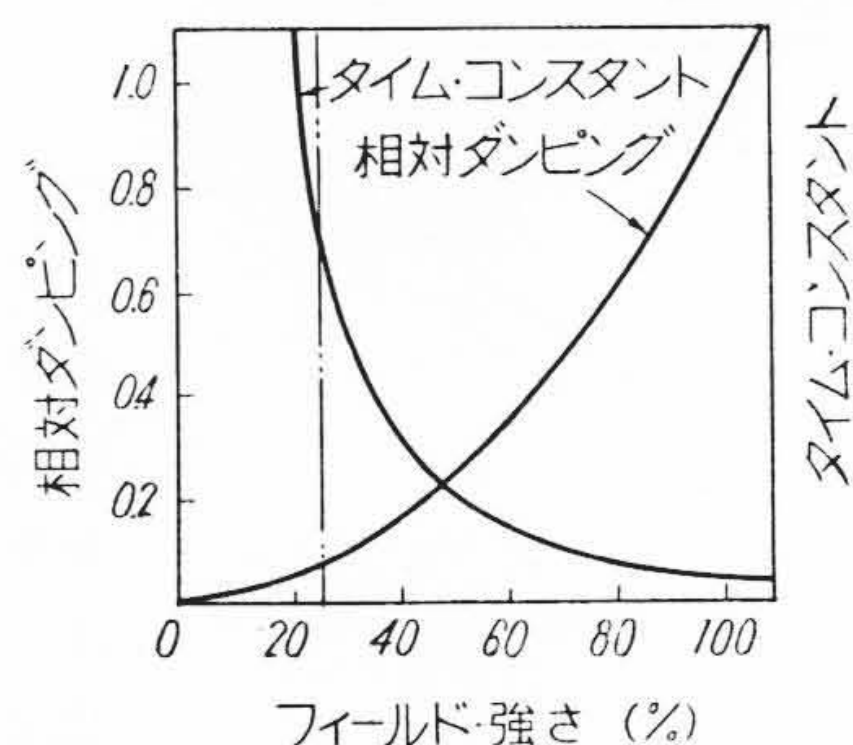
アナログ方式の自動制御はもちろんであるが、デジタル方式も、デジタル—アナログ変換を行つて、最終駆動部にサーボモータの用いられる場合が多い。これは主としてステッピングモータによるデジタル駆動の技

第 6 表 電気油圧式サーボの比較表

電気方式サーボ	油圧方式サーボ
トルク慣性比が油圧方式より小 (強力にするには大型となる)	トルク慣性比が大きい (比較的小型となる)
タイムコンスタント例 一定フィールド、アマチュア可 変電圧 DC 電動機 (5HP 程度) $T_o=0.035\text{sec}$ (ほぼ一定) 可変フィールド、アマチュア可 変 DC 電動機 (5HP 程度) $T_o=0.035\sim 0.055\text{sec}$ (フィールド強さで変化する) 単相 AC 電動機 (低トルク測定機用) $T_o=0.01\sim 0.06\text{sec}$ (トルク速度で変化)	タイムコンスタント例 可変吐出量ポンプによる油圧回転 モータ $T_o=0.004\text{sec}$ (ほぼ一定) 油圧操作シリンダの場合はさらに T_o は低い
従来の汎用工作機への取付改造 容易	改造取付は油圧操作シリンダの場 合電気方式よりやり難い
油洩れの心配なく、配線は美麗 で体裁よし	油圧配管の油洩れ防止が必要、配 管が面倒である。火災の危険を防 止する必要あり
安定性の補償が困難	安定性は一般に良好 油の汚染、温度変化に対する対策 が必要である
馬力が大きいほど不利である	低馬力ではほぼ同等、馬力が大き くなると電気サーボモータ方式よ り安価となる



第 10 図 DC 電動機、速度—トルク線図



第 11 図 DC 電動機のフィールド強さ—タイムコンスタント線図

術上の制限からもくることである。サーボモータの形式としては従来から電気方式と油圧方式が用いられているが、その優劣の判定を一概に決定することは困難であり、性能特性、安定性、価格、耐久性、保守の難易、要求精度、構造スペースよりの制約、現在の研究段階などより総合的な考察が必要とされる。電気サーボモータは高精度のものとして数分の 1 馬力以内は製作容易であるが、数馬力以上の高精度駆動はその制御方式とともに今後の研究がさらに望まれている。一方油圧の単純切換弁のサーボ方式は 1 馬力以下のものでは、高精度のものが多数実用化されているが、1 馬力以上のものは、現在研究進行中であり、最近油圧電気の組合せによる electrohydraulic servo valve の実用化により急速な進歩がみられるようになった。

6.1 電気サーボモータ方式

直流、交流電動機ともに用いられるが、一般にトルク—慣性比を大きくするため、径の小さい長さの大きい形状となる。直流分巻電動機の場合、速度の増大とともに、逆起電力が増大し、電機子電流の減少により、トルクが速度に比例して減少する特性がある。また単相誘導電動機は、回転子の電気抵抗を増大させて、トルクが速度により減少する特性をもたせてある。これらのトルク—速度曲線の傾きは、サーボモータのダンピング係数を決定することになる。典型的な DC サーボ電動機はアマチュア電圧調整式の場合第 10 図のごとくスロープは平行に近く機械的タイムコンスタント値は良好で、作動範囲で変化が少なく、特性的に油圧サーボ方式に酷似した性能である。

フィールド電流とアマチュア電圧で制御される DC サーボ電動機の機械的タイムコンスタントはフィールド強さの 2 乗に逆比例の関係にある。

単相誘導電動機は通常同期速度の 60~70% で作動されるがスロープは比較的急激であり低ダンピング特性である。

一般には小型にのみ使用され低慣性体のため、タイムコンスタントは 0.01 秒前後になるが作動範囲で 1:6 程度の変化がある。その他エディカレント・カップリング、電磁クラッチによるサーボ特性は非常に大きい範囲に変化するから、できるだけ低速度にし、かつブレーキなどの特殊な補正装置を用いて、特性の向上を計っているが一般に油圧方式よりタイムコンスタントははるかに悪くなる。

6.2 油圧サーボモータ方式

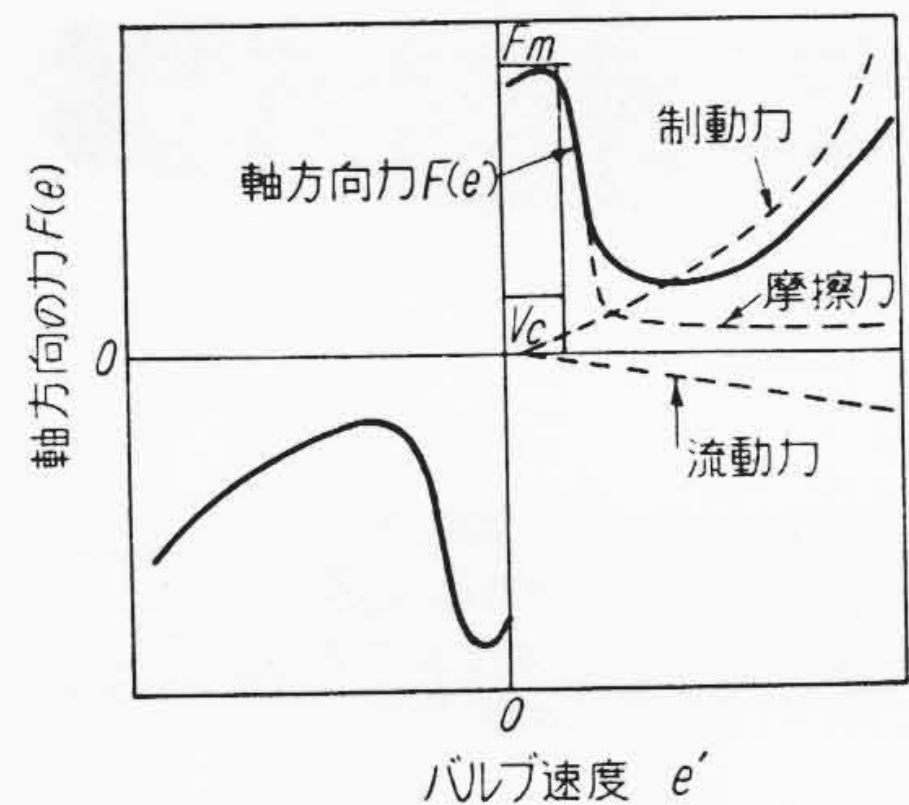
油圧サーボ方式の利点としては、同種馬力で強大なトルク発生力があり、常時連続操作の必要な場合最少の大きさの装置ですむこと、また間歇操作では動力蓄積器などにより、数倍のパワーが放出することができ、トルク—慣性比は電気サーボ方式に比べて良好であり、タイム・コンスタント値が僅少であることが、サーボ系には有利な要素となつている。油圧系は一般に電動機とほぼ同じ効率であり、最大トルク、最大速度で 85~95% にあり、定格負荷で 90% 以上、25% 負荷で 85% 程度の効率であり、平均馬力はピーク馬力の 45% 程度である。

一方油圧サーボ系は次の欠点をもっている。油圧配管は電気配線に比べて複雑不かつこうになりやすく、長距離配管は抵抗損失を招き、油洩れは付近の装置を汚し、高熱部では発火の危険がある。また駆動管制部のタイムコンスタントは良好であるが、配管の膨脹、油粘度の値、大容量操作シリンダ内の油の圧縮性（圧縮率は $60 \sim 108 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{kg}$ ）のために、過渡特性において時間おくれを生ずることがある。

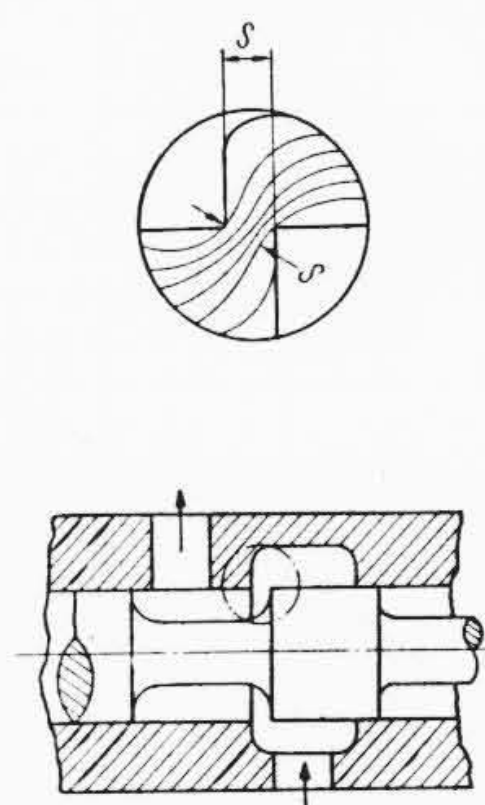
現在油圧サーボ方式としては次のものがある。

- (1) 単純切換弁と油圧シリンダ
- (2) 正逆可変吐出量ポンプと油圧シリンダ
- (3) 正逆可変吐出量ポンプと油圧回転モータ
- (4) 叩子型増幅弁と油圧シリンダ
- (5) 叩子型増幅弁と油圧回転モータ

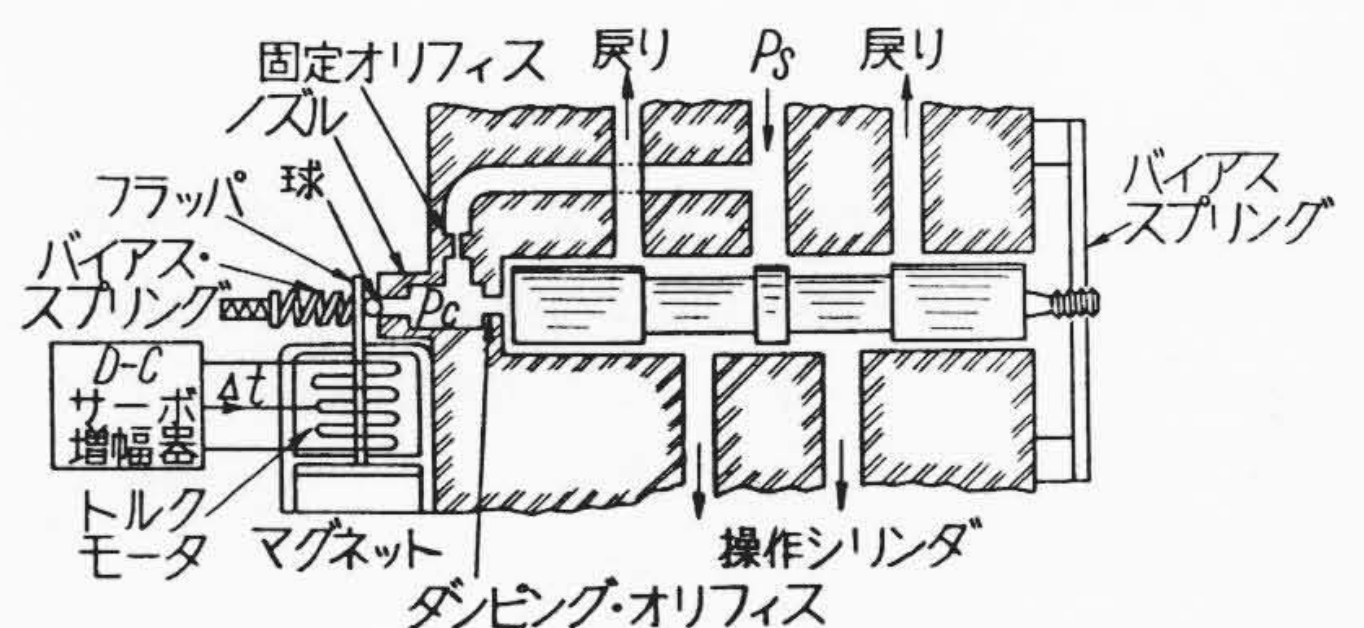
現在まで油圧サーボ方式の問題点としては単純切換弁



第 12 図 切換バルブの流動力による推力発生



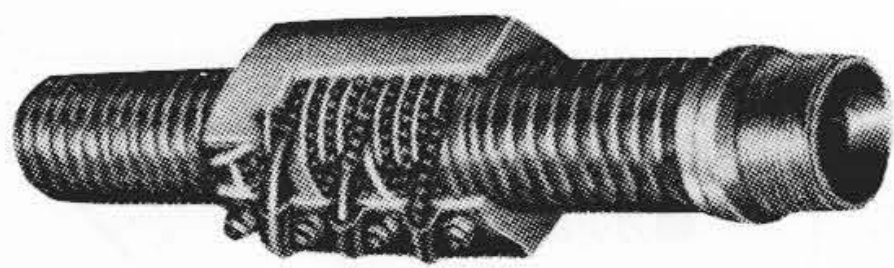
第 13 図 バルブのポート——ランド間の縮流効果



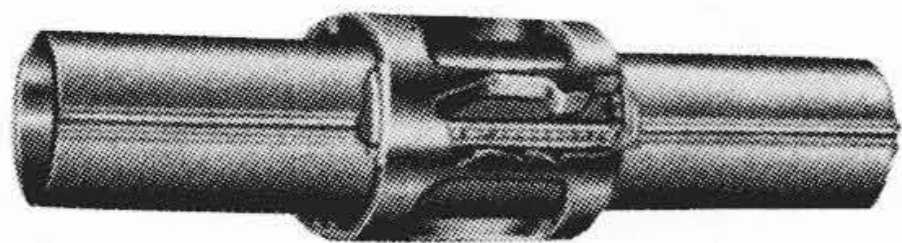
第 14 図 叩子型増幅弁

第 7 表 Electro-Hydraulic Servo valve の 実 例

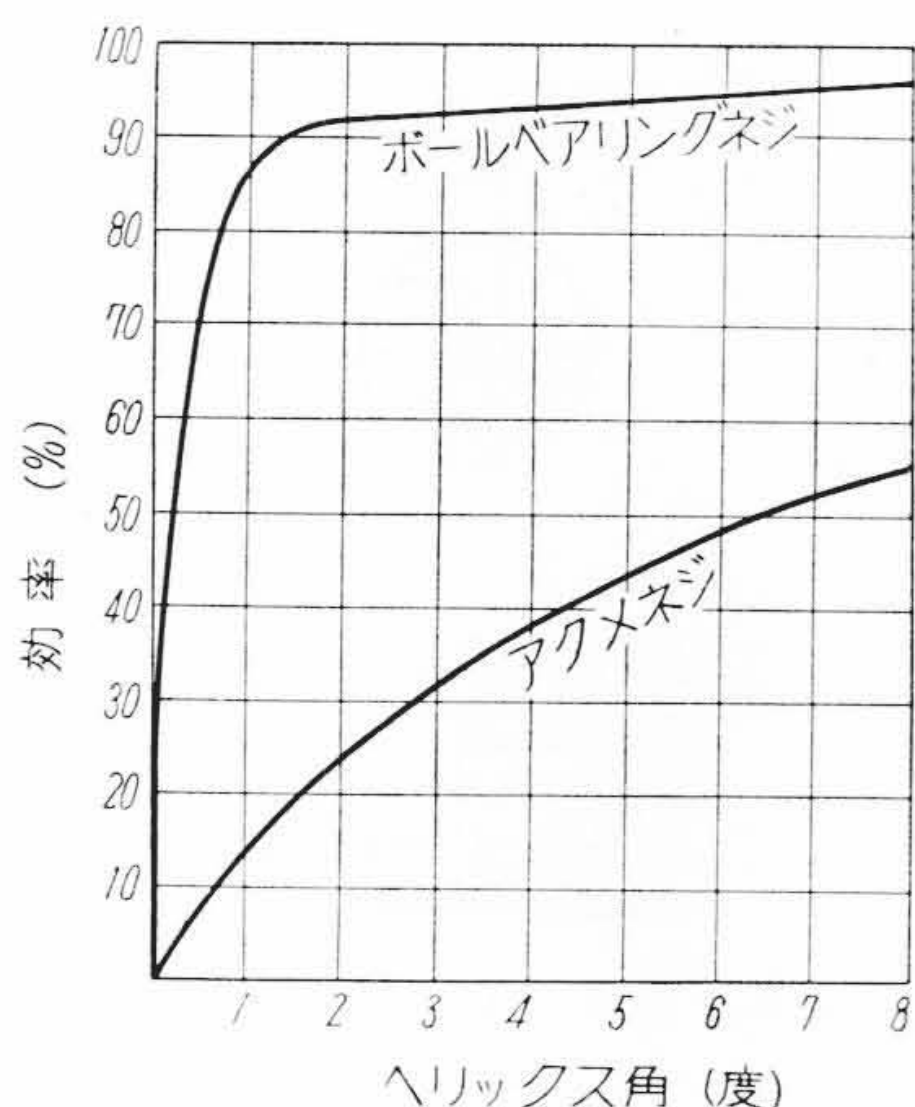
商 品 名	寸 法 (in ³)	重量 (lb)	最大差動電流 (mA)	負荷流量 (gpm)	周波数応答 (cps) 90° lag にて
MOOG 500	1.75×2.5 ×3.06	0.8	2~40 (平均 8)	0.5~8.0	92
MOOG 900	1.75×2.5 ×3.06	0.8	2~40 (平均 8)	0.2~5.0	193
MOOG 2000	1.75×1.9 ×3.06	0.7	2~40 (平均 8)	0.5~8.0	100
CADILLAC FC-2	1.9 ×1.9 ×3.7	1.1	8~10	4.0	145
CADILLAC PC-2	2.0 ×2.0 ×3.2	1.3	8.0	7.7	180
BENDIX PAC. HR SERIES	2.32×2.65×2.14	0.91~0.99	6~20	最大 9.0	170~270
PEGASUS 120B	2.0 ×2.0 ×6.0	2.0	30	5.0	135
PEGASUS 160	3.0 ×3.0 ×9.0	15.0	40	20.0	—
MIDWESTERN 3	3.3 ×3.25×4.6	5.0	40	6.8	66
MIDWESTERN 7	2.4 ×2.3 ×3.4	2.3	40	2.1	52
BELL SV-6C	1.4 ×2.6 ×3.3	1.0	10	2.0~7.5	90
BELL SV-14C	1.4 ×2.6 ×3.3	1.0	10	0.17~2.0	90



ボールベアリングネジ



ボールベアリングスプライン



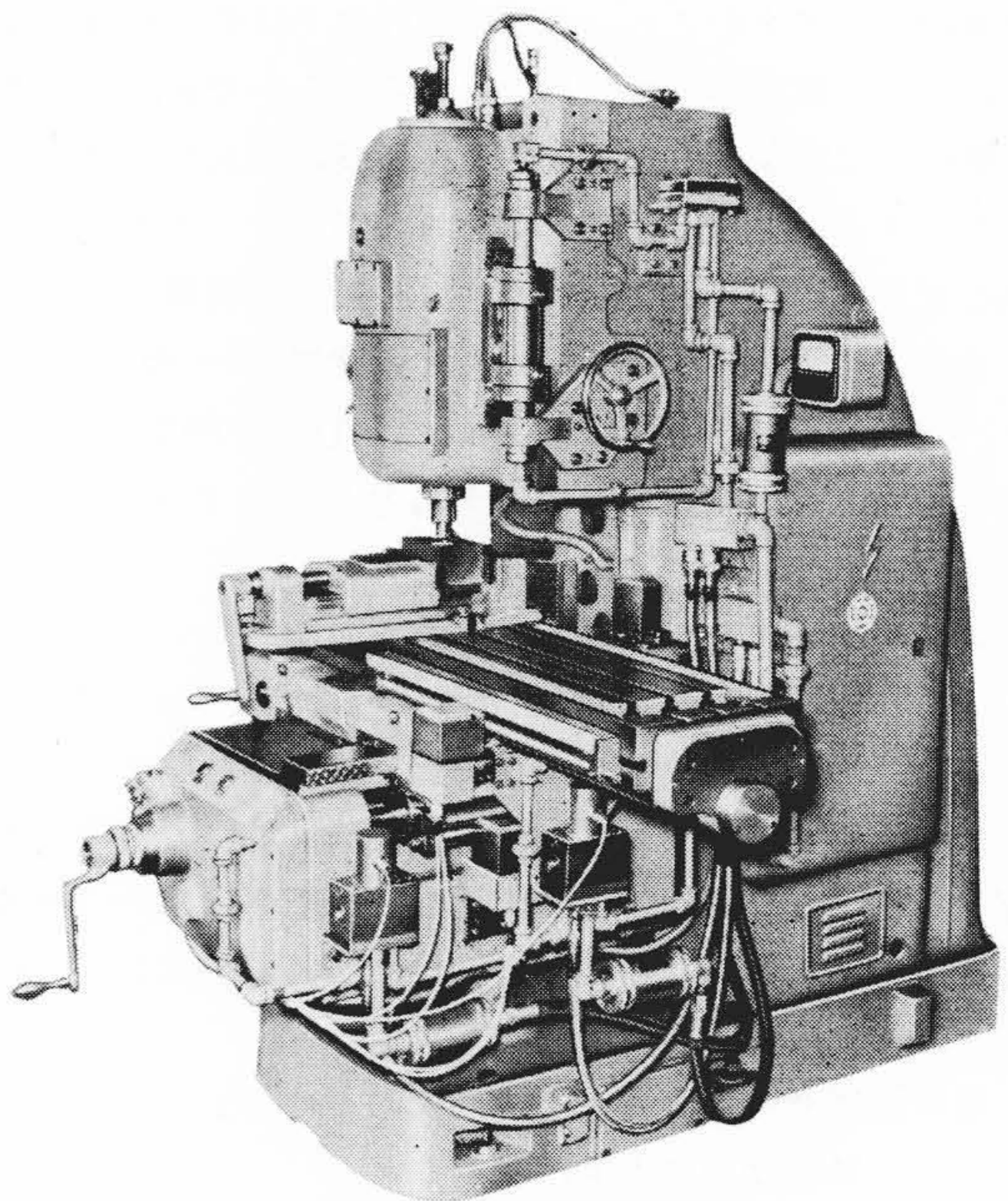
第 15 図 ボールベアリングネジと効率

方式では高圧 (30 kg/cm² 以上), 大容量 (20 l/min 以上) となると, 切換流動力による推力の発生, 高精度切換の時のバルブのポートとランド間の境界層による縮流効果, 側圧発生による摩擦力増加などでサーボ特性上一定の出力限界があつた。最近はこの種の問題を解決するために, 叩子型増幅弁, いわゆる Electro-Hydraulic servo valve により高圧, 大油量の制御が行えるようになった。通常 2~40mA の電気入力に対して 5~10g.p.m. 圧力 500~2,000 p.s.i. の大出力が比例限界内で期待できるもので後述の機械試験所の油圧方式もこの方式を採用している。各社の商品化された Electro-Hydraulic servo valve の特性は下記のごとくである。

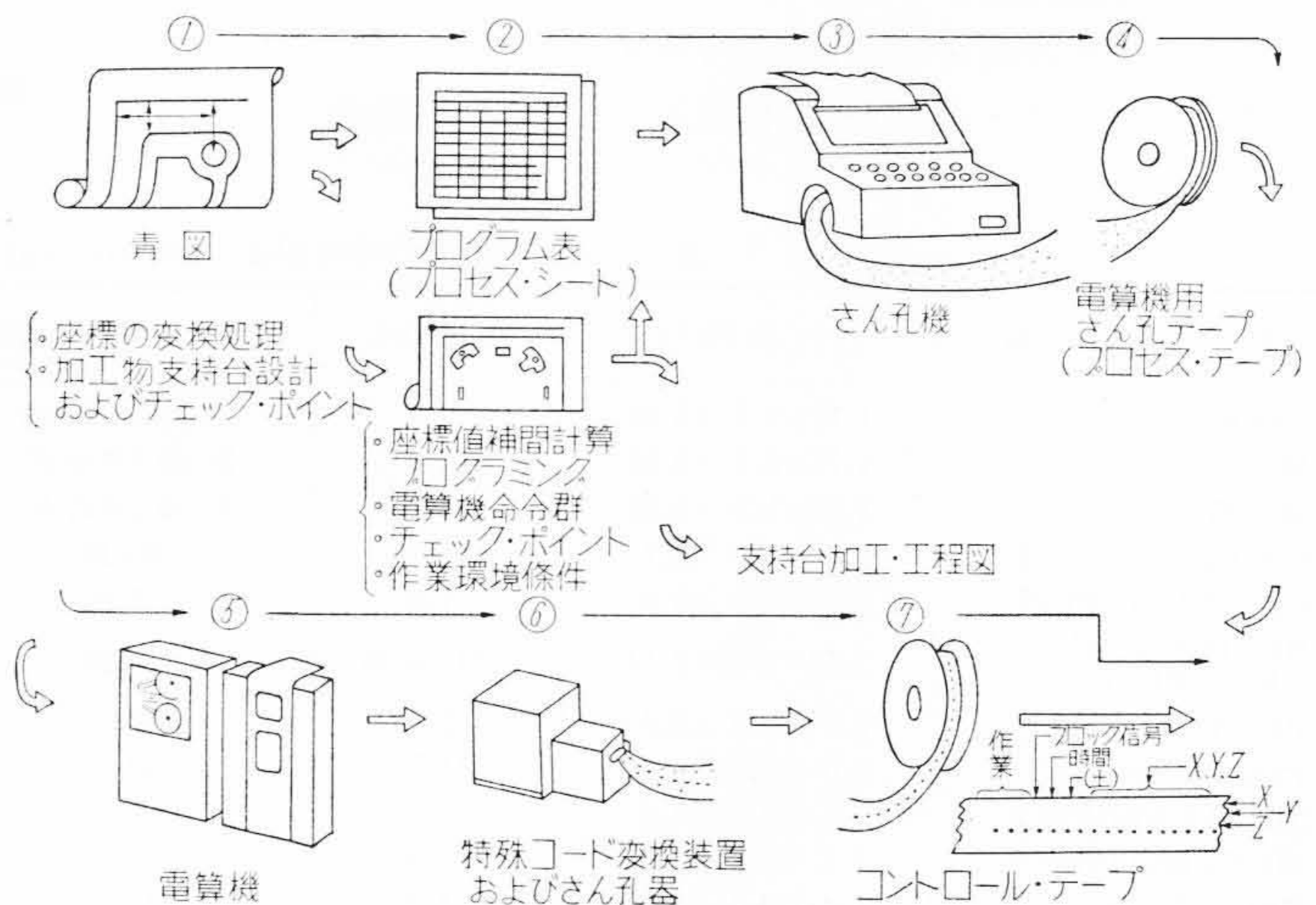
6.3 その他の問題点

電気サーボ方式, 油圧回転サーボ方式を問わず最終駆動部は回転

体よりスクリーまたはラック駆動となるが, 中型までの工作機ではスクリー駆動が望ましい。この場合, 従来の機械効率, 10~55%であつたが, ボールナット, スクリューの出現により機械効率は, 50~95%程度にまで, 高められるようになった。したがって平均すると駆動モータのトルクは従来の $\frac{1}{4}$ 以下ですむことになり, 小型モータでこと足りることになり, 特にサーボ電動機の場合に有利となる。バックラッシュはダブルナット方式の距離調整で取り得る構造となつている。ただ精度的に優秀であるかは今後の問題点となる。



第 16 図 機械試験所試作の数値制御フライス盤 (日立製作所 #21/2 縦フライス盤)



第 17 図 機械試験所方式のプログラミング

最終駆動部より位置検出してアナログサーボする発信機としてシンクロを用いるのが、機械的に最も簡便であるが、シンクロの精度が保証されなければならない。オートシンなどは、 $\pm 5'$ 以下の精度を有しているが、現在のわが国では $\pm 30' \sim \pm 15'$ 前後で、この範囲の精度向上にはいまだ、開発の余地がある。

7. 数値制御フライス盤⁽⁸⁾

数値制御方式は一般にプログラミング、パルス分配器、D—A変換（ディジタルサーボ）、パワーサーボ、ベース堅フライス盤の5部門より構成されている。説明の関係上、機械試験所が試作研究を行い、日立製作所が、一部（ベース堅フライス盤、パワーサーボ部）協力した数値制御フライス盤を中心に説明する。本方式は本質的にMIT方式に準拠したものである。したがって数値制御方式としてはいわゆるオーソドックスな方式であり、装置も他方式よりやや複雑となるが、本方式で研究すれば、数値制御の始まりより終りまでが一貫して研究でき、実用化への応用はいかなる型でもただちに变换できる特長がある。なお、本装置はすでに運転実用化研究段階に入っており、昭33年3月18日機械試験所において公開運転発表された。

7.1 プログラミング

パルス分配はもちろんMIT方式で第19図は汎用電子計算機への入力はいかにあるべきか、汎用電子計算機の出力をいかにテープ上に符号化して蓄積するかの研究目的で作成した、コントロールテープおよびこのテープで実際切削を行つたテストピースである。

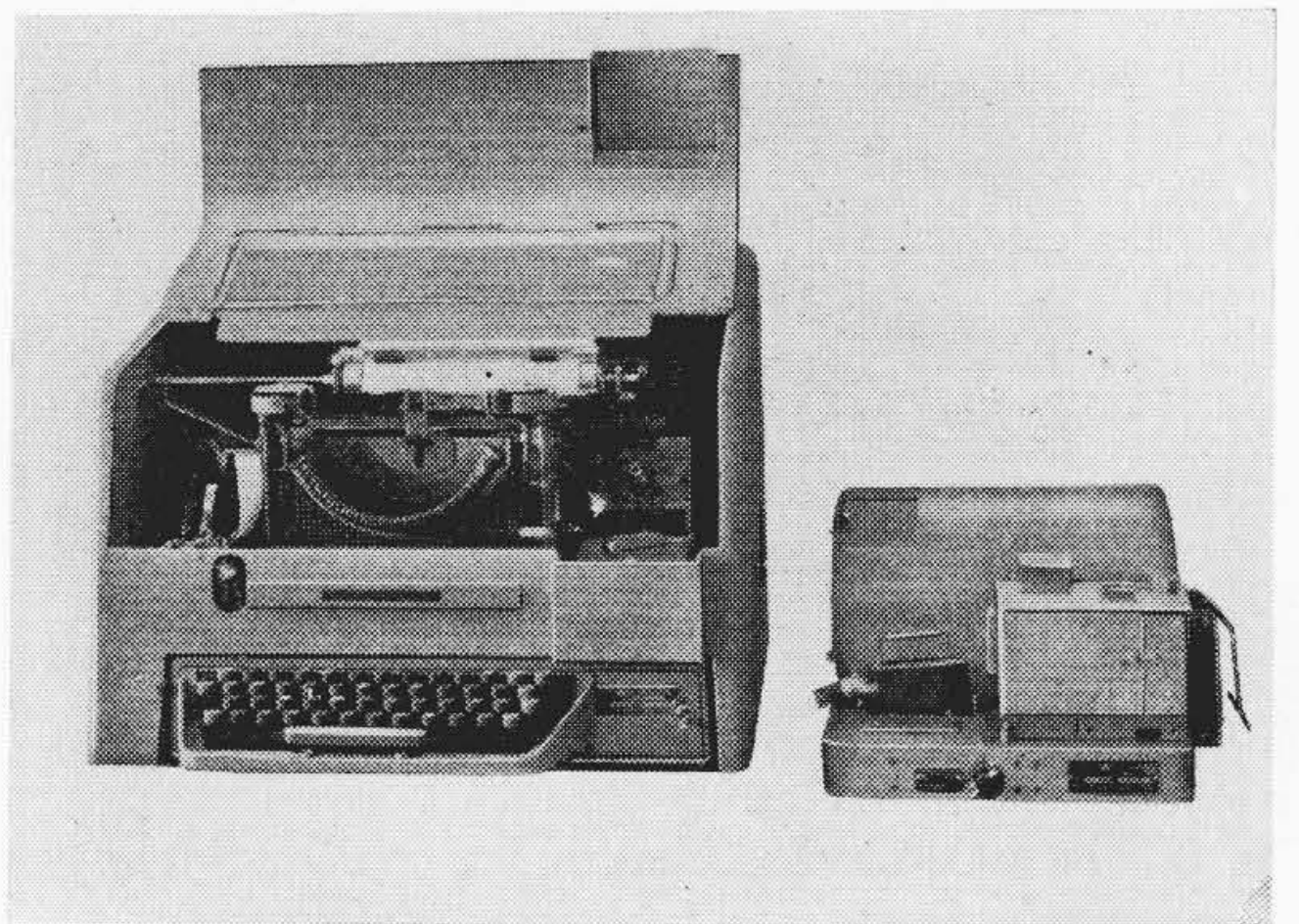
7.2 電子頭脳部

コントロールテープより必要な指令信号を作るまでのパルス分配器およびその指令信号とフィードバックパルスを加減算してその差が常に0になるようなサーボ系で、その偏差パルスに比例した電圧を発生するD—A変換部分よりなる。第20図はそのブロック線図を示す。

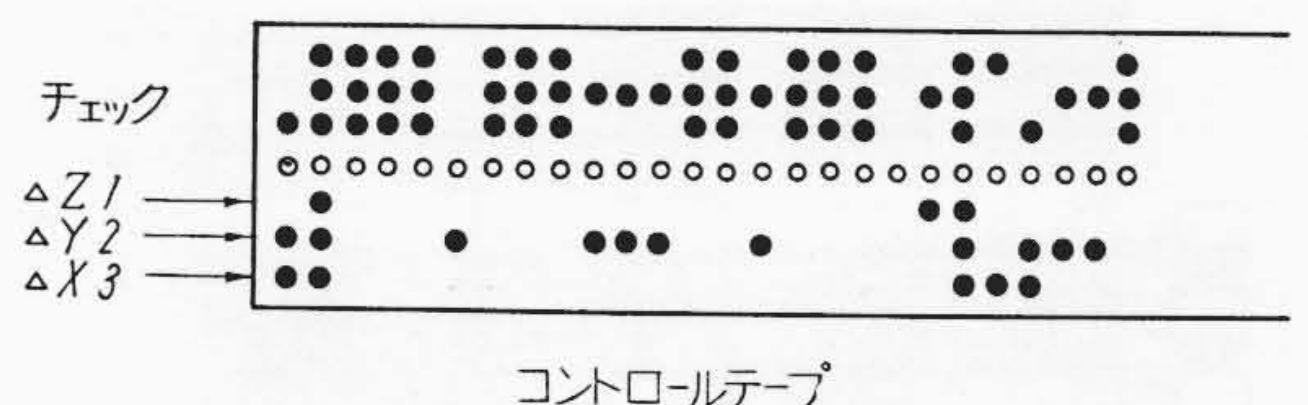
(1) テープリーダーは毎分540字が読める高速メカニカルなリーダーでコントロールテープ穿孔位置を読取る部分である。

入力レジスタはテープよりの $\pm 50\text{V}$ 信号をそのまま通過してパラメترونTBMに入り入力信号を記憶する部分である。テープの1ブロックずつを記憶してゆくから、レジスタ内容が0のシフトパルスでテープリーダーのクラッチ制御をして自動スタートさせる。リーダーのエラーにてリーダーをストップさせることもできる。

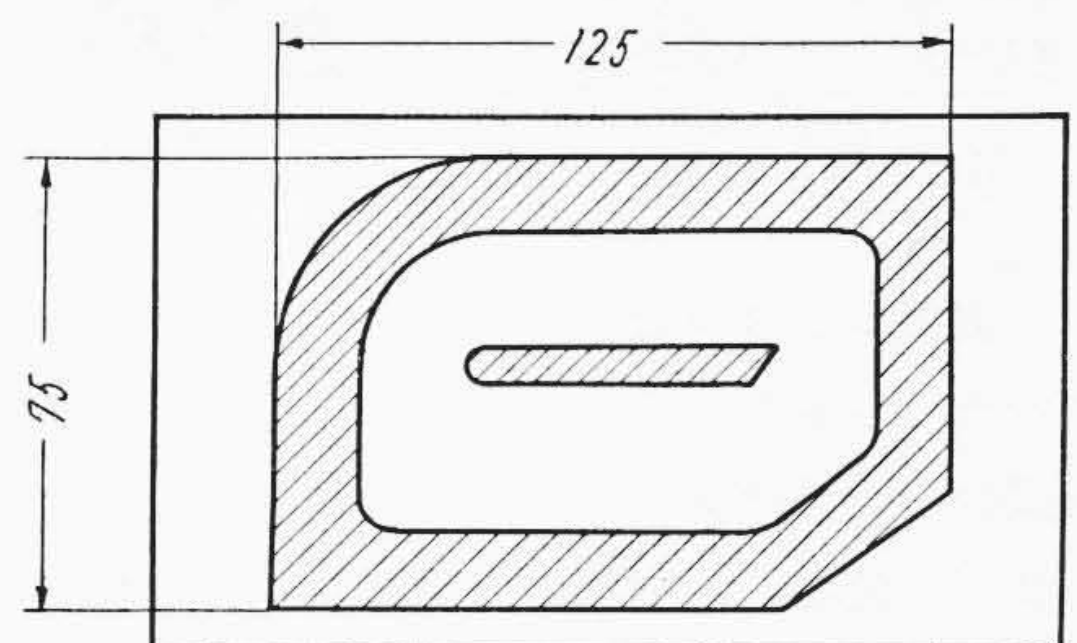
(2) パルス分配器はゲートを制御して ΔT 秒間に Δx , Δy , Δz のパルス列を等間隔に分配する部分である。機械試験所方式はレジスタとともに約900個から



第18図 テープ穿孔機

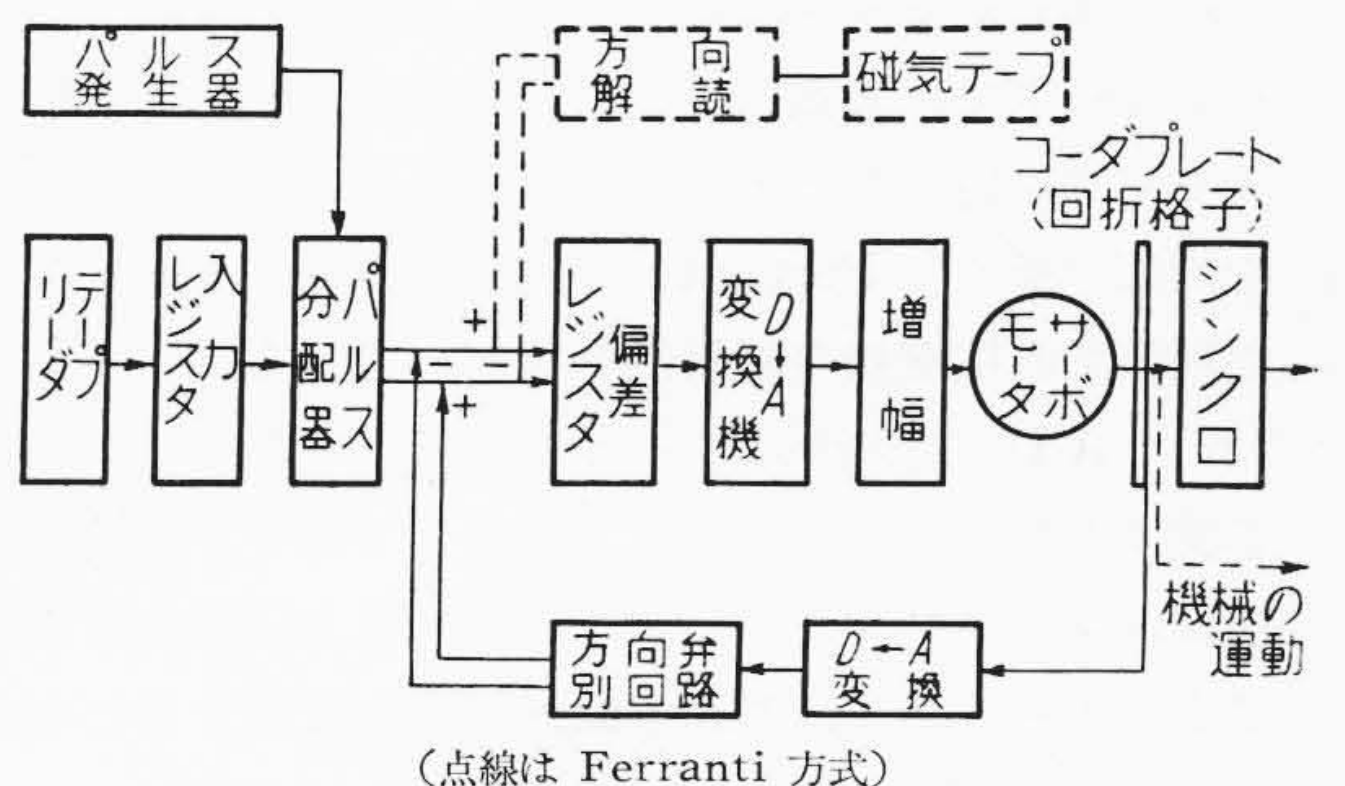


コントロールテープ



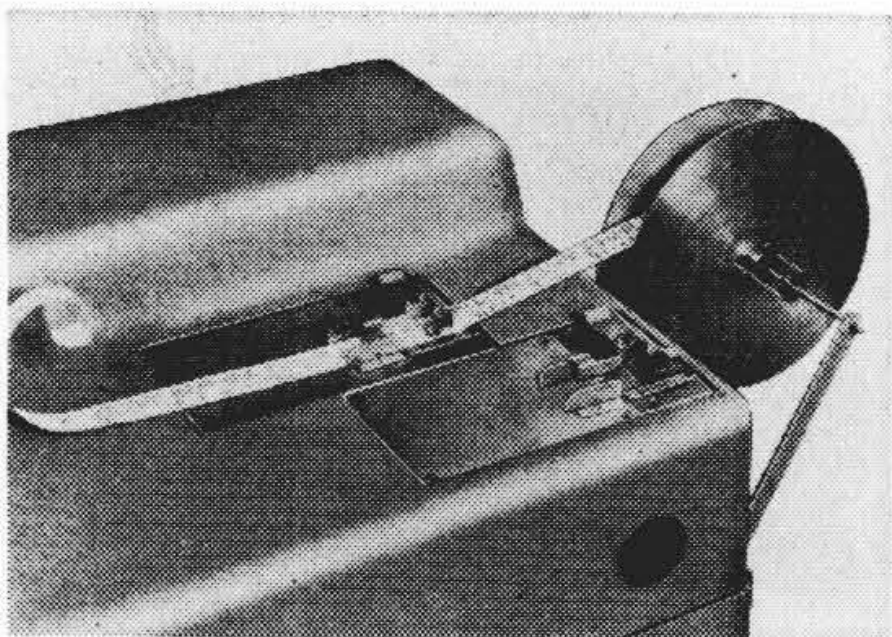
テストピース

第19図 コントロールテープとテストピース形状

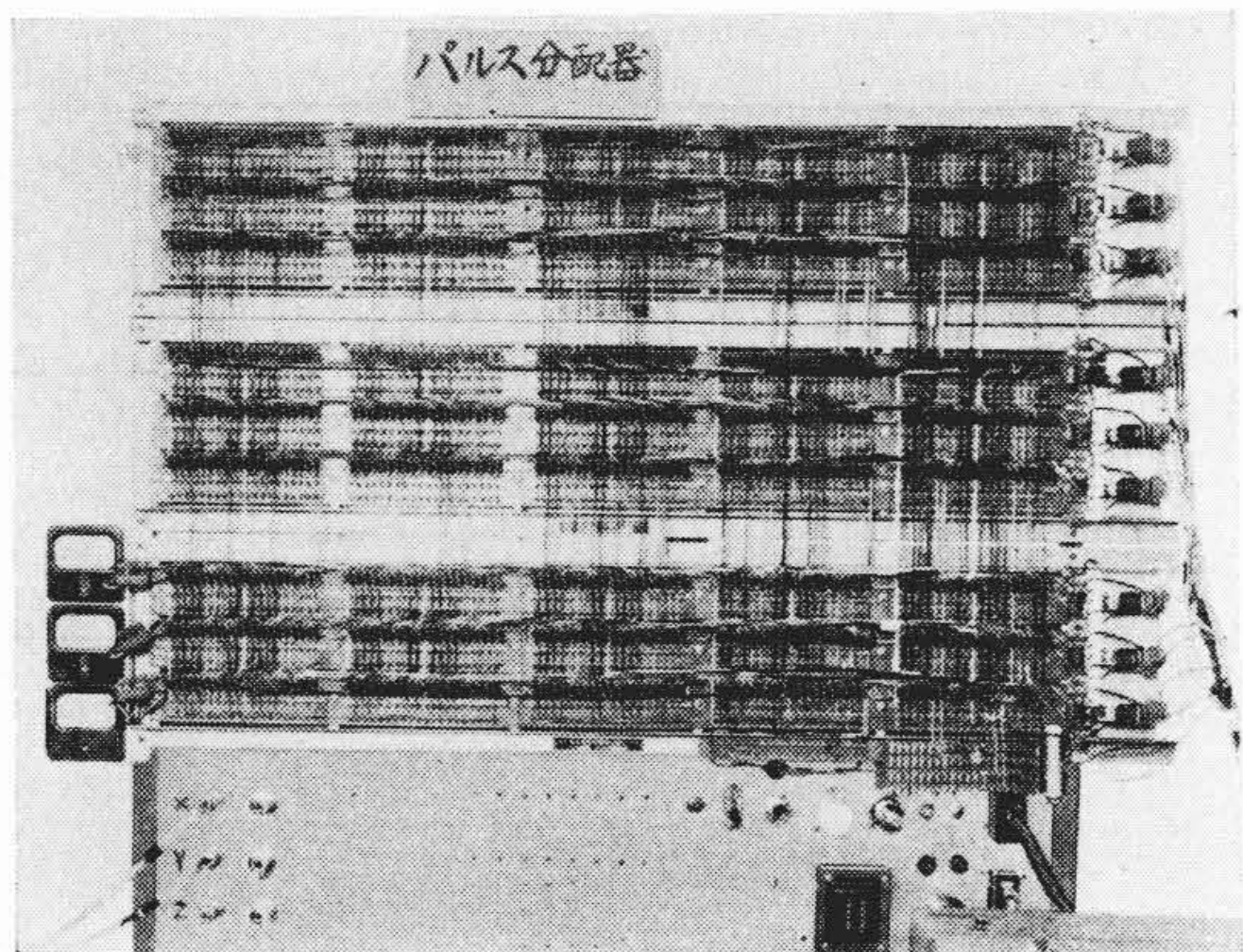


第20図 電子頭脳部のブロック線図

のパラメترونよりなり2進レート乗算器（フリップ・フロップを有する2進カウンタとゲート回路）MITは真空管によるフリップ・フロップ方式であるが、容積の点ではトランジスタによる方式も有利に考えられる。



第 21 図 テーブルリーダー



第 22 図 パラメトロン式パルス分配器

(3) 偏差レジスタは入力パルスとフィードバックパルスをカウントしてその偏差パルスを記憶する部分、機械試験所方式はダブルパルス計数放電管（デカトロン）2 個を使用し、回路の記憶容量を 100 個とした可逆カウンタである。

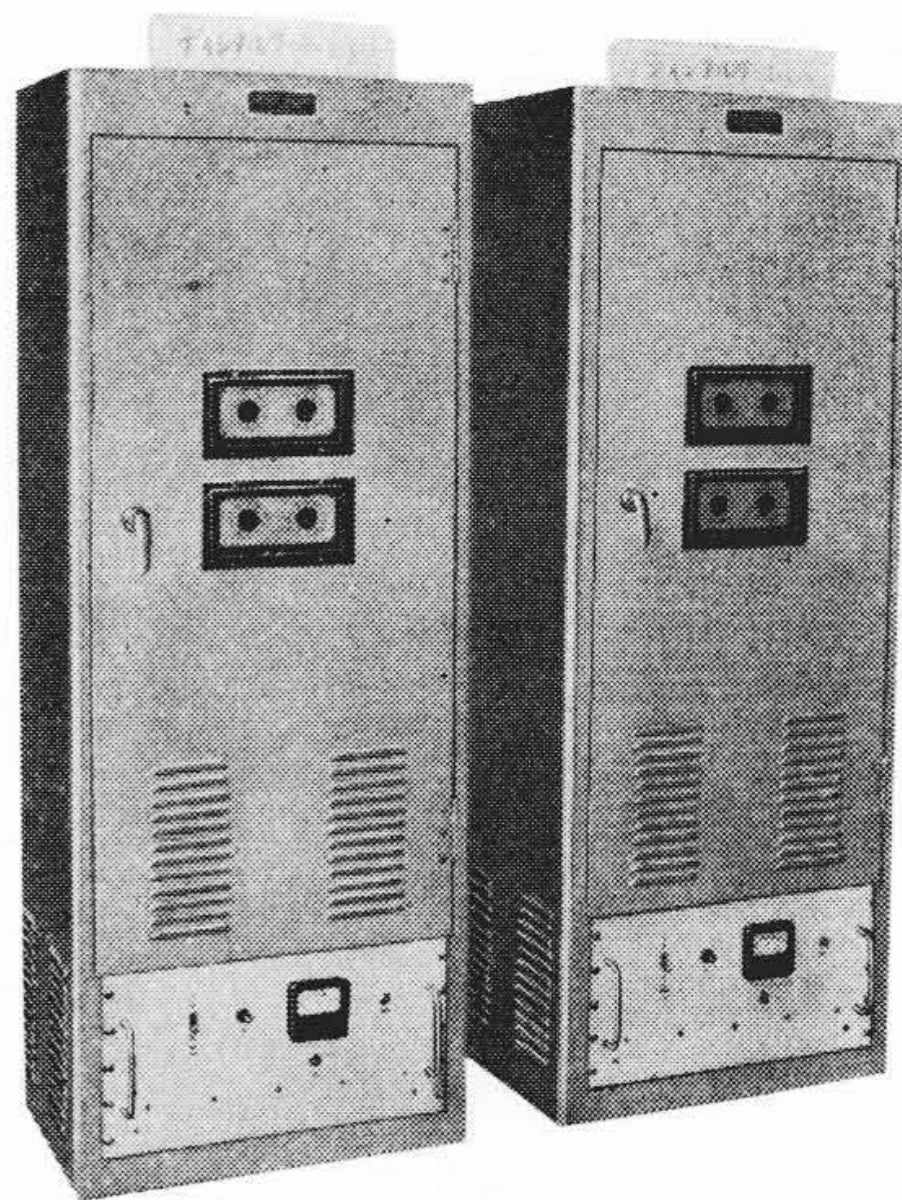
(4) D-A 変換器は加減算回路の蓄積に応じた比例直流電圧を発生し、これを増幅して、サーボモータを指令に応じた方向に駆動する。

(5) サーボモータは偏差信号に比例して回転するサーボモータで、機械試験所方式、MIT 方式は二相交流モータを使用してアナログサーボのシンクロ発信器を回転させる。Ferranti 方式は直流サーボモータを使用して直接機械の駆動部を制御している。

(6) A-D 変換器はサーボモータの出力角をパルスに変換してフィードバックする部分である。機械試験所は、コーダプレート方式をとり、出力回転角度 2 度ごとに 1 パルスを、しかも回転方向を検出するためには 2 個の光電管を用いている。

このデコーディングサーボは、機械的なものを用いて指令シンクロを回転して信号を送るのであるが、このシンクロの回転により生ずる信号を電子管により作り出すことも可能である。MIT はコンピュータ方式を用いて上記の操作を行わしている。

7.3 パワーサーボ



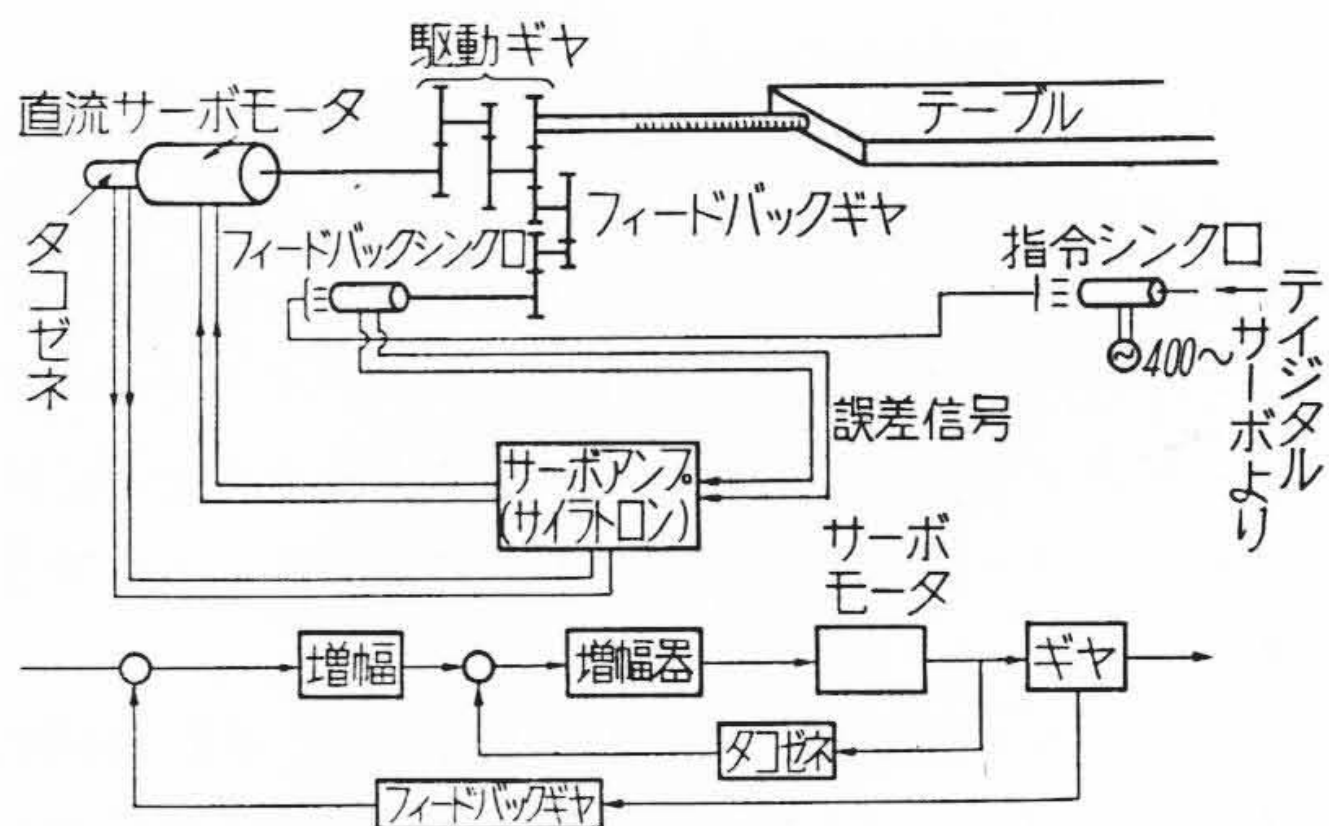
第 23 図 デジタルサーボ部

パワーサーボは直接機械の運動部分を制御するサーボ系である。これはデジタルサーボを用いて直接運動部分を制御する方式 (Ferranti, Bendix) とデジタルサーボと別個にアナログパワーサーボを設ける方式 (MIT 機械試験所方式)。アナログパワーサーボの代表的な 3 つの例についてその構成用ブロック線図を第 24, 25, 26 図に示す。

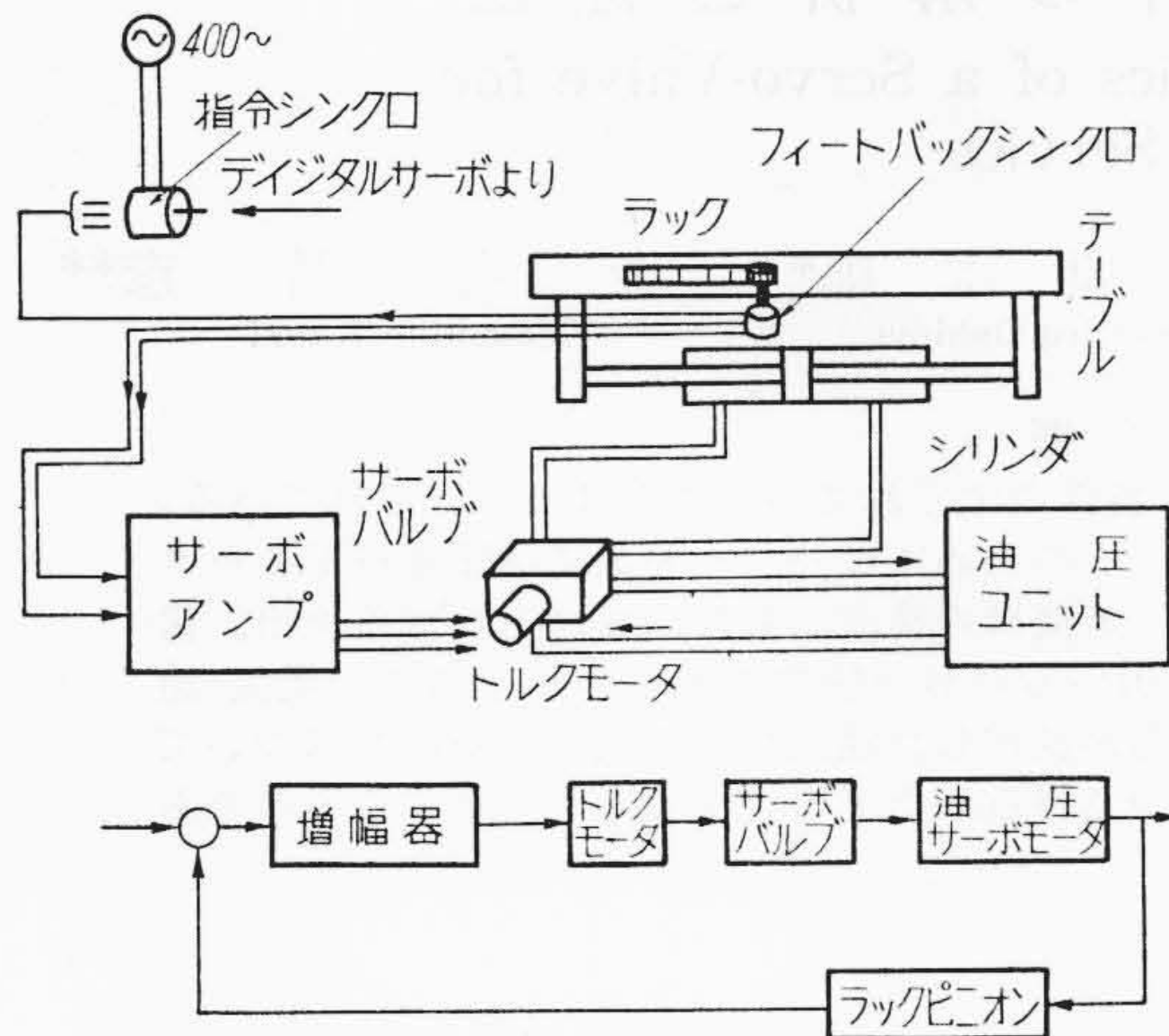
いずれも、フィードバックシンクロは 1 パルス 1/100mm に対応させるために、テーブルまたはサドルの 1/100mm の変位で 2 度の回転を生ずるような歯車列で駆動される。

第 24 図の全電気式は安定化のためにタコメータフィードバックがかかっており、また時定数の向上は、サーボモータ以外にサーボアンプ(サイラトロン)回路の時定数も今後の研究が重要である。

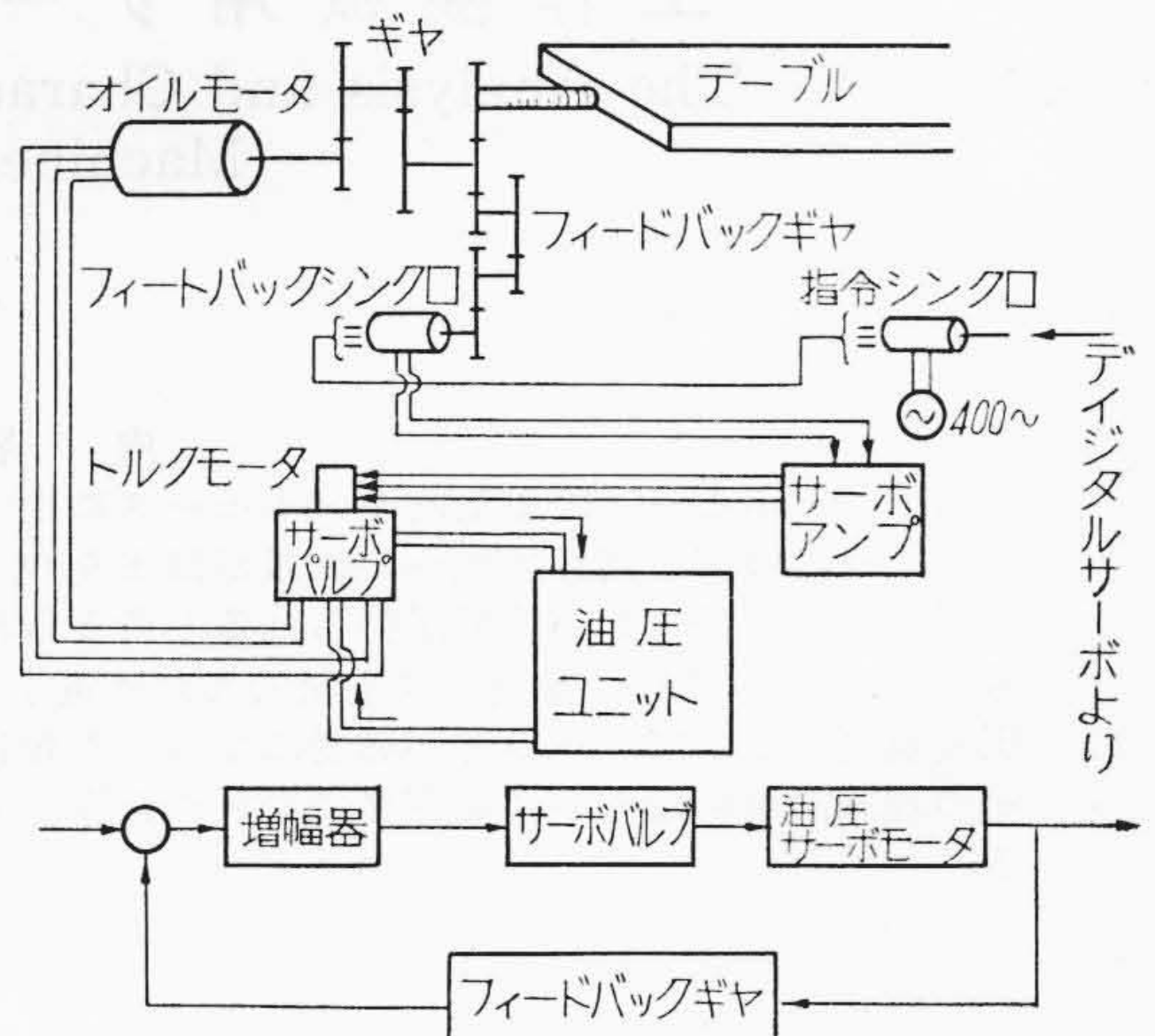
第 25, 26 図はいずれも電気油圧方式であり、時定数が低く、強力な出力が望めるが研究の焦点はサーボバルブであるが、その詳細については、サーボバルブの章を参照されたい。



第 24 図 サイラトロン・パワーサーボ系



第25図 油圧直動式サーボ系



第26図 油圧モータ式サーボ系

8. 結 言

以上数値制御方式はわが国においても実用研究の段階にあるが、すみやかに実用化をはかり、将来は方式の統一化まで進む必要があると考えられる。また数値制御方式は、特殊部品の加工によつて従来のアナログサーボにかわるのみでなく、将来は一般部品の汎用加工に普及する可能性もあり、生産加工方式の革命に移るであろう。

日立製作所は、われわれの有する電機、機械総合技術を十分に発揮して数値制御方式の急速なる実用化に今後

の発展を期している次第である。

参 考 文 献

- (1) 中田： マシーナリ，Vol.19 No.8
- (2) 大島： 機械の研究 Vol.8 No.2
- (3) 大島： 生産研究 Vol.8 No.9
- (4) 研野： 計測，Vol.6 No.6~7
- (5) 佐治木： OHM Vol.44 No.8
- (6) Aircraft Production Vol.18 No.2
- (7) Ahrendt： Servomechanism Practice
- (8) 工業技術院機試験所編： 工作機械の数値制御 (1958年3月 機械工業振興協会)



特許第236798号

特 許 の 紹 介



阿 武 芳 郎

旋盤のテールストックのセンタ抜取装置

一般に旋盤のテールストックにセンタ、ドリルなどをいつたんはめ込むと、これを抜取るのに相当大きな力が必要とし、このため従来は、テールストックの後方側より丸棒をはめ込み、丸棒の後端部をハンマなどでたたいて抜いていた。この発明は、テールストックに2段管制方式による油圧増圧装置およびセンタ送り出しピストンを設け、強力な油圧力により、自動的にかつ容易にセンタ、ドリルなどを抜取るようにしたものである。図示のごとくセンタ(8)を抜取るときは、油給排口(6)を閉塞し、油給排口(5)より圧油を給入すれば、ピストン(2)は図の右方向に移動して一次プランジャ(9)の後端部と、プラグ(12)の先端部とが衝接し、油道(11)と油圧シリンダ(3)との連結が断たれるので、ピストン(2)の移動に伴つて、油室(13)内の圧力が急速に上昇し、この圧力を油道(15)を介して油室(14)に及ぼす。油室(14)内の圧力が上昇すると、両プランジャ(9)、(10)の面積差に

より強力な力で二次プランジャ(10)を左方向に移動し、押棒(16)を介してセンタ拔出棒(7)を押すので、センタ(8)は容易に抜取ることができる。

