

# アメリカにおける数値制御工作機の動向

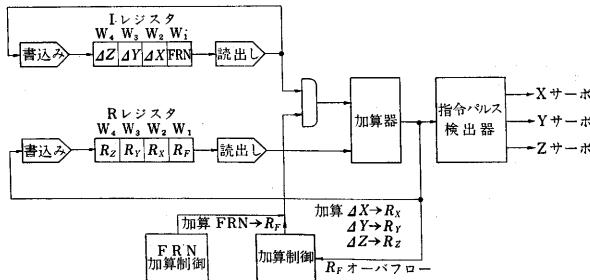
大 島 康 次 郎

## はじめに

1963年8月スイス国バーゼルで国際自動制御連合(IF-AC)の第2回国際会議が開催され、筆者もこの会議に参加したが、スイスへの往路アメリカに約4週間滞在し計算機・数値制御工作機・工業計器・油圧機器等に関係した主要工場を視察することができた。数値制御工作機に関してはBendix Industrial Controls Div, Kearney & Trecker Corp., Gidding & Lewis Machine-tool Co., Ex-Cell-O, Moog Servocontrols の5工場を視察したが、これらの工場はアメリカにおける数値制御工作機に関係した代表的工場であるので、その視察内容を記して、アメリカにおける数値制御工作機の動向を伝えることができれば筆者の幸いとするところである。限られた時間内の視察であったから、視察内容はある程度断片的にしか記述できないことを予め断わっておく。

### 1. Bendix Industrial Controls Div

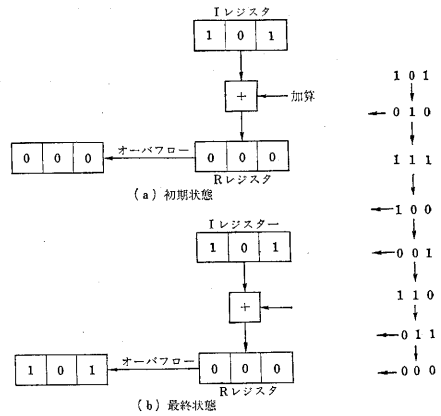
Bendix Corp の数値制御装置専門の Div で、Detroit にあり、従業員 280 名程度の小規模の工場であるが、GE とともにアメリカにおける主要な数値制御装置メーカーである。ここで製作している数値制御装置は位置決め(positioning)用がDynaPoint, 連続輪廓制御(contouring)用がDynaPath の商品名で呼ばれている。DynaPath について紹介すると、その特徴は DDA (digital differential analyzer) 方式を採用していることである。DDA 方式の直線補間の原理を第1図を参照しつつ説明する。



第1図 DDA 方式の直線補間の原理

図の I レジスタ、R レジスタとはともに磁歪形の遅延線(delay line)でパルス信号が連続的に循環している。遅延線に記憶されるビット数はクロック周波数に遅延時間を掛けたものになる。400 μs の遅延線で 200 kc のクロック周波数とすると 80 ビットが、記憶されることになる。この 80 ビットを 20 ビットずつの  $W_1 \sim W_4$  の 4 語に分け、各語は遅延線を循環しているとき語時間信号

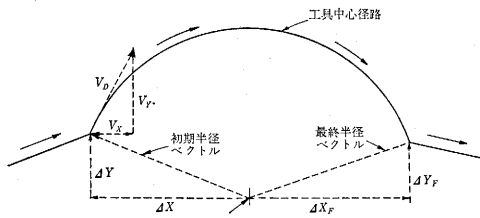
によって識別されるようになっている。I レジスタの  $W_1$  には送り速度数(feed rate number) FRN の指令が記憶され、 $W_2 \sim W_4$  には加工物輪廓上の主要点間の移動距離の X, Y, Z 成分である  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  の数値指令が記憶される。DDA の普通の動作のように、I レジスタの内容  $W_1 \sim W_4$  はそれぞれ R レジスタの内容  $W_1 \sim W_4$  に周期的に反復加算されてゆく。I レジスタの内容は 1 ブロックの指令が出され終わるまで不変のまま遅延線を循環しているが、R レジスタの内容は I レジスタの内容が反復して加算されるので変化してゆき、R レジスタからのオーバフローが指令パルス (Bendix 方式では 1 パルスが 0.0002" の移動量に対応) となるのである。このことを簡単な例について説明する。第2図(a)に示すように、I レジスタの内容が 2 進数で 101



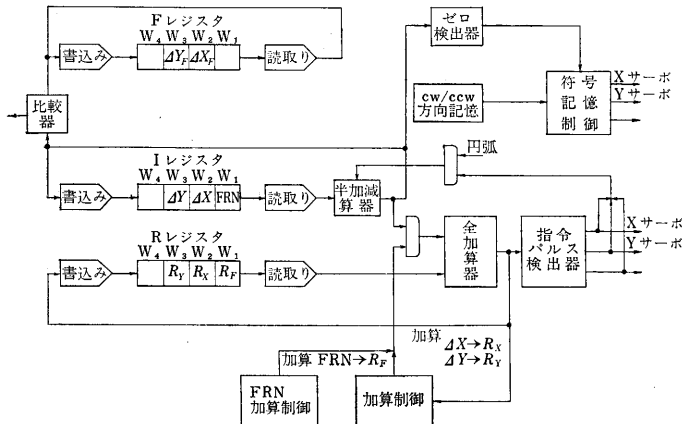
第2図 DDA の原理

(10 進数の 5) であったとし、R レジスタの内容が最初 000 であったとすれば、I レジスタの内容を R レジスタに反復加算すると、同図右側に示すような経過をへて R レジスタの内容が変化し、8 回の加算で R レジスタの内容は最初の 000 に戻るが、その間に R レジスタからは 5 個のオーバフローパルスが出されることになる。すなわち I レジスタの内容である 2 進数の数値指令に相当する数のパルスが数値指令パルスとして発生されることになるのである。 $W_2 \sim W_4$  の反復加算の周期は FRN の反復加算で発生するオーバフローパルスによって制御される。

つぎに円補間の場合について説明する。円補間においては、第3図に示すように、初期半径ベクトルの X, Y 成分  $\Delta X, \Delta Y$  と最終半径ベクトルの X, Y 成分  $\Delta X_F, \Delta Y_F$  と回転の方向(時計方向か反時計方向かの別) が与



第3図 円弧状径路



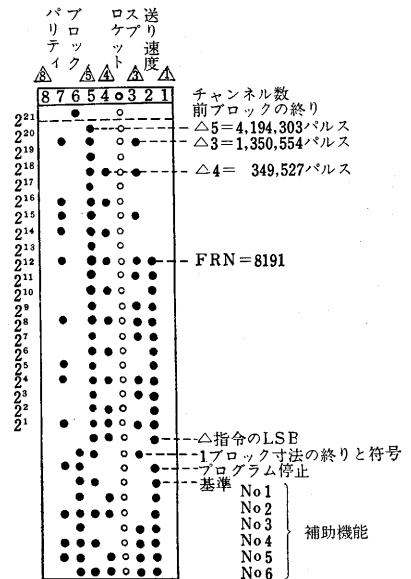
第4図 DDA方式の円補間の原理

えられる必要がある。直線補間の場合と同じく、円補間においても、第4図に示すように、Iレジスタに記憶された \$\Delta X, \Delta Y\$ 成分が周期的にRレジスタに反覆加算される。円弧の接線である速度ベクトル \$V\_D\$ の傾斜は半径ベクトルの傾斜の負の逆数である。したがって \$\Delta X\$ を \$R\_x\$ レジスタに反覆加算して発生されるオーバフローパルスは Y 方向の指令パルスとなり、\$R\_y\$ レジスタからのオーバフローパルスは X 方向の指令パルスとなる。円に沿って動作点が移動するにつれて速度ベクトルの傾斜は連続的に変化するため、半径ベクトルの傾斜も連続的に変化しなくてはならない。このため指令パルスが発生されるたびごとに \$\Delta X, \Delta Y\$ が回転する半径ベクトルの成分を表わすように I レジスタの内容を修正する必要がある。この1パルスの \$\Delta X, \Delta Y\$ に対する必要な修正は第4図に示す I レジスタ循環回路の半加減算器 (half adder/subtractor) によって行なわれる。最終半径ベクトルの X, Y 成分 \$\Delta X\_F, \Delta Y\_F\$ は第4図の F レジスタに記憶されており、補間期間のあいだ一定に保たれている。I レジスタの変化する内容 \$\Delta X, \Delta Y\$ は F レジスタの内容 \$\Delta X\_F, \Delta Y\_F\$ と連続的に比較されており、両者が一致したとき補間操作は完了する。速度ベクトルはそれが X, Y 各軸をよぎるとき符号を変化させるから、第4図に示すように、ゼロ検出器による符号制御が必要である。

Bendix 方式の 2 進コード指令テープの形式は第5図に示すようになっていく。ここで直接補間の場合の送り速度数 FRN について説明する。FRN の公式は

$$FRN = \frac{K \cdot 2^n \cdot FR}{60 \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}} = \frac{K \cdot 2^n}{\Delta t_c}$$

で与えられる。  
ここで、



第5図 Bendix方式指令テープ

FR: 毎分インチで表わした送り速度

\$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z\$: インチで表わした移動量の X, Y, Z 成分

\$\Delta t\_c\$: 必要な工具運動に要する時間。単位は秒

$$\Delta t_c = \frac{60 \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}}{FR}$$

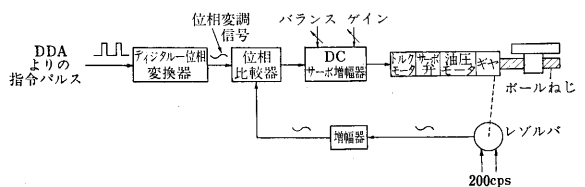
n: \$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z\$ のうちの最大の大きさを1指令パルスの対応移動量 (インチ単位) で割った2進ビット数、\$\Delta M\$ をパルス数で表わした \$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z\$ の最大値とすれば

$$2^n > \Delta M \geq 2^{n-1}$$

K: 特定の制御装置で決まっている定数

Bendix 制御装置の駆動パワーサーボは、第6図に示すように、位相制御アナログサーボである。油圧モータは Vickers のアキシャルプランジヤ形か Bendix のベーンモータを利用している。油圧パワーユニットは 3,000 psi で 25 gpm の Denison ポンプを用いている。

Bendix 方式のもう一つの特徴はオプションな装置も含めて非常に融通性に富んだ機能を有していることで



第6図 Bendix方式の駆動パワーサーボ

ある。これらの機能はつぎのとおりである。

**標準機能**

- 1) 送り速度オーバーライド オペレータがプログラムされた送り速度を自由に変更できること。
- 2) 過剰誤差非常停止 工具の切れ味が落ちたり材料の硬度が大きすぎたりして指令と実際位置との誤差が大きくなったとき非常停止する。
- 3) 対称形加工 各軸に符号スイッチがあり、これにより同じプログラミングで対称形が加工できる。
- 4) 標準加減速 標準加減速機能があって指令テープに加減速ブロックを設ける必要がない。
- 5) 内部テスト テスト機能が内蔵されていて、実際の加工の前に制御装置の動作がチェックできる。
- 6) パリティチェック 指令テープにはパリティチェックがあり、誤った読取りのとき機械を停止する。

**オプション機能**

- 1) 円補間 前述
- 2) 工具補正 工具サイズがプログラミングのときと異なっても加工が可能。
- 3) 指令テープ形式 2進コードでも4要素10進コードでも可。
- 4) ダイヤル入力 ダイヤリングで手動操作可能。
- 5) 位置表示器 各軸の位置をデジタル表示する。
- 6) ゼロ同期化 サーボのフィードバック用レゾルバの電気—機械的ゼロ点をセットアップ点と正確に一致させる。
- 7) シーケンスナンバ読出し シーケンスナンバを指令テープに用いれば、これを表示することができる。
- 8) 工具選択 工具の自動選択交換装置を用いることができる。
- 9) スピンドル速度選択 スピンドル速度を自動的に選択できる。

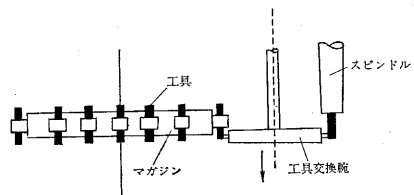
オプションな装置にもよるが、Bendix 制御装置の価格は \$ 35,000~\$ 70,000 とかなり高価である。すなわち Bendix 制御装置は汎用性、融通性をもったデラックスで高価な数値制御装置のアメリカにおける代表例とみなすことができる。

なお筆者の視察したときより数カ月以前に Bendix 社は、連続輪廓制御と絶対位置形または移動量形の位置決め制御のいずれもが可能な非常に汎用性をもった数値制御装置をユーザに納入したとのことであった。このような汎用機械は高価にはなるが、連続輪廓制御用と位置決め用の制御装置を別個に購入するよりは経済的になるとのことであった。

**2. Kearney & Trecker Corp**

Milwaukee にある従業員約 1,600 名の工作機メーカ

である。この工場で生産している工作機は総製品価格のパーセンテージで 50% が数値制御工作機、40% が標準工作機、残り 10% が専用工作機である。視察当時までに Profiler 24 台、Skin miller 9 台、Milwaukeeematic 190 台の数値制御工作機を生産し、そのうち 70% が輪廓制御用、30% が位置決め制御用とのことであった。製品の納入先は航空機・ミサイル工業・工作機工業・繊維工業・エレクトロニク工業やディーゼルエンジン・印刷機械・自動車氧化器の製造工場等で、うち 60% が航空機・ミサイル工業とのことである。Kearney & Trecker 社は工作機メーカであるから、数値制御装置は GE, Bendix, Pratt & Whitney 社等から購入し、これを付加して数値制御工作機として納入している。Milwaukeeematic は数値制御用として製作した工具自動交換をもった汎用数値制御工作機で Model II, III が生産されている。制御装置は GE の Mark Century Contouring Control Unit が多く用いられている。価格は Model II が \$ 185,000, Model III が \$ 400,000 と非常に高価である。Model III は X, Y, Z 3 軸とテーブルの回転軸の 4 軸制御のもととテーブルの傾き運動軸を加えた 5 軸制御のものがある。位置検出器には GE 製の直動形インダクトシン、回転形インダクトシンが用いられている。サーボ系は位相制御方式で、数値指令から処理されてきた指令位相信号と検出器からの位相信号とを位相比較器で比較し、両者の差に応じた直流信号を発生させ、これを増幅のちサーボ弁でタコメータ発電機つきの油圧モータを駆動するようになっている。工作機駆動にはボールねじが用いられている。Milwaukeeematic の特徴はその工具自動交換にあり、Model III では 30 本の工具を収めることのできる工具自動交換機構が設けられている。これは大きな回転テーブル形のマガジン周辺に工具を収めておいて、第 7 図に原理を示すように、工具交換腕の両



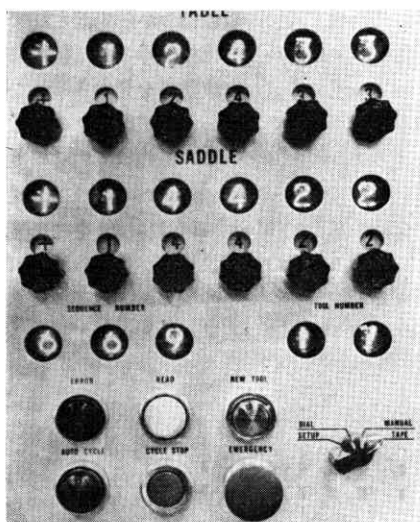
第 7 図 Milwaukeeematic の工具自動交換機構

端にある工具保持具がスピンドルの使用済み工具とマガジンの新たに使用する工具とをそれぞれ喰え、図の矢印の向きに工具交換腕が前進のち、点線の軸のまわりに 180° 回転して、後退し、新たな工具をスピンドルにセットし、使用済みの工具をマガジンに収めるようになっている。工具選択は指令テープのコードにより、マガジンが回転することにより行なわれる。Milwaukeeematic の精度は 5/10,000", 繰返し精度は 1/10,000" である。Kearney & Trecker 社の視察でえた特に強い印象は工

作機部品の加工に自家製の Milwaukeeematic を 3 交代制で活用していることである。製品価格が高価なので、高価な自家製機械を使用しても pay するのではないかという妙な感じを受けた。

### 3. Gidding & Lewis Machine-tool Co

Fond Du Lac にある従業員 350 名の大型工作機メーカーである。月産 12~20 台程度で、うち 60% は数値制御工作機とのことであった。視察当時までに 230 台の数値制御工作機を納入し、その納入先は大部分が航空機・ミサイル工業で、その他は自動車工業や食品加工機械・農業機械・弁・クラッチ・印刷機械などの製造工場とのことであった。ここも工作機メーカーであるので、数値制御装置は GE, Bendix, TRW 等から購入しているが、簡単な位置決め用制御装置には自社製のものも用いられている。Gidding & Lewis 社製の位置決め用数値制御装置は Numeripoint の商品名で呼ばれ、X, Y 2 軸制御用で、位置検出には Inductosyn Corp 製のインダクトシンを用い、駆動にはボールねじを使用し、対称形加工、テープ指令による切削液オンオフ・工具補正・警告灯表示（テープ誤差・加工誤差・シーケンス誤差・エレクトロニク回路誤差等故障箇所を表示する）・位置表示等の機能を備えている。

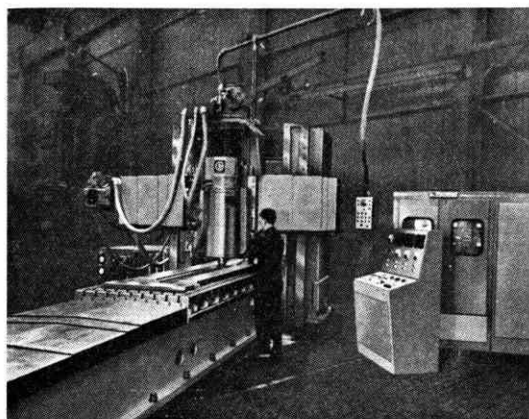


第 8 図 Numeripoint の位置表示パネル

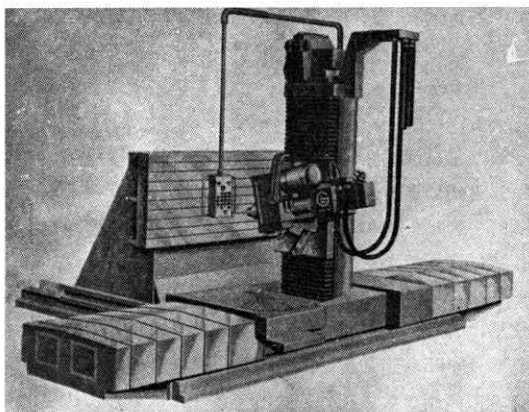
この装置の位置表示パネルは第 8 図に示すようになっている。Numeripoint を制御装置に用いた整形ボール盤 Numeridrill の写真を第 9 図に示す。また数値制御ボール盤には Bendix の DynaPoint を制御装置に用いた NumeriMite がある。連続輪廓制御では Bendix の DynaPath を制御装置とした DiMil 数値制御フライス（第 10 図）、GE の Mark Century を制御装置とした航空機工業用の特殊フライス Variax（第 11 図）等がある。Gidding & Lewis 社で印象深かったのは数値制御工作機の実用化第 1 号である GE, MIT との協同で



第 9 図 Numeridrill



第 10 図 DiMil 数値制御フライス

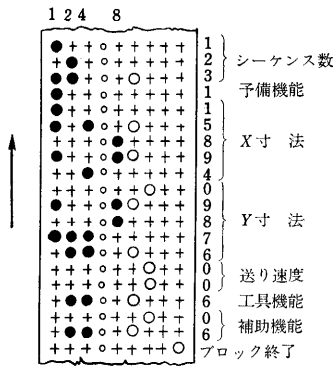


第 11 図 Variax

10 数年前開発された数値制御フライス Numericord が現場でいまだに稼動しており、外部からの下請け加工でバンケルエンジンのケースを、加工していたことであった。

### 4. Ex-Cell-O

Detroit にある工作機メーカーで、1959 年以来視察当時までに約 60 台の数値制御工作機を納入した実績をもっている。Ex-Cell-O 社の数値制御工作機は Numera-Trol の商品名で呼ばれ、精度は  $1/10,000''$  を保証し、分解能



第 12 図 Hydra-Point 方式の入力指令テープ

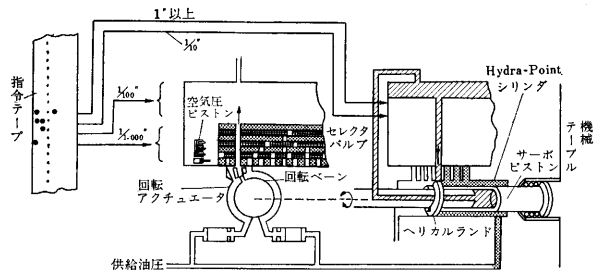
は 2/100,000" の高性能の機械である。制御装置は Bendix DynaPath を使用し、価格は機械の種類にもよるが、\$ 120,000 ~ \$ 240,000 である。Numera-Trol の位置検出はテーブル駆動ねじから精密歯車を介して動かされるレゾル

バを利用している。テーブル駆動ねじはボールねじで、精度はインチ当たり 5/100,000" フート当たり 1/10,000" である。Numera-Trol 922 は非常に融通性に富んだ機械で、基本になるのは X, Y 2 軸の運動をするテーブルをもったベッドで、これに旋削・中ぐりヘッド・研削ヘッドさらに Z 軸の運動をもったミリングユニットが取り付けられるようになっており、これらのヘッド、ユニットを交換することにより各種の作業が行なわれるようになっている。これらのヘッド、ユニットのスピンドルは可変速度油圧モータによって速度制御が行なわれるようになっている。数値制御研削においては砥石のドレッシングがテープの補助機能指令により周期的に行なわれ、ドレッシングが行なわれると、それによる砥石寸法の減少分だけ砥石が前進するようになっている。

5. Moog Servocontrols, Inc

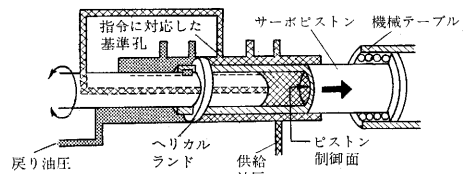
ナイアガラの近くの East Aurora にあり、サーボ弁のメーカーとして有名であるが、最近、空気一油圧を利用した純機械的数値制御装置 Hydra-Point を開発し、Hydra-Point Div を従来の Industrial Div および Military Div に加えた。Moog 社が Hydra-Point 制御装置を適用した工作機は Bridgeport のフライス盤で機械本体の価格が \$ 1,600 という安価な機械である。Hydra-Point の入力指令テープは 8 単位、幅 1" の EIA 標準テープで、指令コードは第 12 図に示すようになっている。X, Y 軸の数値指令は 4 要素 10 進符号で 10 進 5 桁まで与えられる。図の場合、X=15.894", Y=09.876" を示している。このせん孔テープがテープリーダーに掛けられて指令が読みとられるのであるが、テープリーダーは空気式作動のもので、テープの各単位に孔があいているかいないかによって、リーダーの各単位の圧力が変化するようになっている。この圧力変化は空気圧作動の小さなピストンを動かすようになっており、このピストンのオンオフによってセレクトバルブの金属板が動かされるようになっている。第 13 図に示すように、X, Y 各数値指令の 1/10" 以上の各桁の指令によるテープリーダーからの空気

は 2/100,000" の高性能の機械である。制御装置は Bendix DynaPath を使用し、価格は機械の種類にもよるが、\$ 120,000 ~ \$ 240,000 である。Numera-Trol の位置検出はテーブル駆動ねじから精密歯車を介して動かされるレゾル

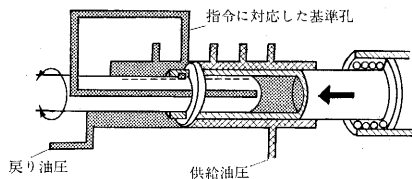


第 13 図 Hydra-Point 方式の原理

圧変化は同図右側に示した Hydra-Point シリンダに付属したセレクトバルブを駆動するようになっており、1/100", 1/1,000" 各桁の指令によるそれは、同図左側に示した回転アクチュエータに付属したセレクトバルブを駆動するようになっている。セレクトバルブは適当なコードに従って孔をあけられた金属板の重ねあわせからなっている。Hydra-Point シリンダには 1/10" おきに ±0.0002" の精度で孔があげられており、これが機械的な基準点となる。さて 1/10" 以上の各桁の数値指令によって、セレクトバルブが駆動され、Hydra-Point シリンダの指令に対応した基準孔からの油路が貫通するようにセレクトバルブ金属板の孔が、配置するようになっている。したがって、第 14 図に示すように、Hydra-Point



第 14 図 ヘリカルランドが指令に対応した基準孔より左にある場合



第 15 図 ヘリカルランドが指令に対応した基準孔より右にある場合

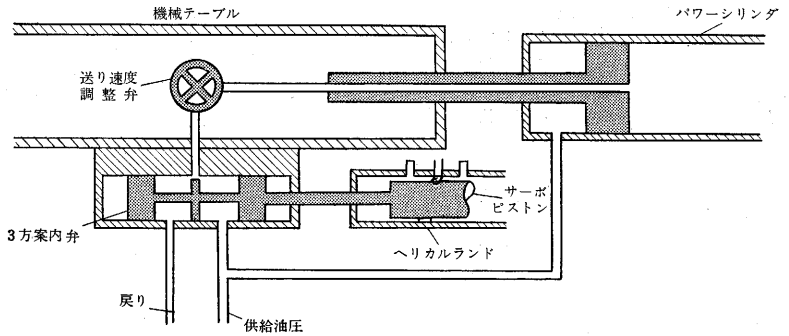
シリンダのヘリカルランドが指令に対応した基準孔よりも左にあれば、供給油圧がサーボピストンのピストン制御面に作用し、サーボピストンは機械テーブルとともに右側へ駆動される。第 15 図のように、ヘリカルランドが指令に対応した基準孔より右にあれば、サーボピストンのピストン制御面には戻り油圧が作用するようになるから、サーボピストンは機械テーブルとともに左へ動かされる。そしてヘリカルランドが指令に対応した基準孔をふさぐようになると、その位置でサーボピストンはロックされることになる。同様に 1/100", 1/1,000" の各桁の

数値指令によって、回転アクチュエータが駆動され、回転ベンが指令に対応した基準孔（回転アクチュエータの円筒面に設けられている）をふさぐ位置まで回転させられる。回転アクチュエータは Hydra-Point シリンダのヘリカルランドを回転しているから、ヘリカルランドのヘリックスのピッチを適当とし、回転アクチュエータの基準孔を100等分の位置に設けておけば、この回転により、Hydra-Point シリン

ダの基準孔をふさぐ位置は  $1/10''$  以下が  $1/1,000''$  までに分割されることになる。このようにして  $1/1,000''$  までの位置決めが可能になるのである。位置決めにおけるテーブルの送り速度は  $300\sim 500\text{in/min}$  である。Hydra-Point 制御装置で直線ミリング加工をする場合には、上記の位置決めの場合とは異なった Hydra-Point シリンダを使用する。すなわち、第16図に示すように、サーボピストンは機械テーブルに直接結合されず、3案内弁の弁スプールに結合される。3案内弁の制御ポートは送り速度調整弁を介して、パワーシリンダに結合されている。サーボピストンが指令によって動かされると3案内弁の弁スプールが動かされ、その制御ポートが開かれるので、油圧源からの圧油は送り速度調整弁によって流量が制御されてパワーシリンダに導かれ、その操作ピストンを機械テーブルとともに指令によって与えられた送り速度で駆動することになる。3案内弁のスリーブは機械テーブルに固定されているので、機械テーブルの運動により3案内弁の制御ポートが閉じる位置まで機械テーブルが動かされると、そこで機械テーブルが停止することになる。このようにして機械テーブルは与えられた速度で与えられた寸法だけ運動することになるから、直線ミリング加工が可能となるのである。ミリング加工における送り速度はテープ指令によって送り速度調整弁を調整することによって行なわれ、 $1/2\sim 25\text{in/min}$  の範囲で調整可能である。

Hydra-Point 制御装置の一つの特徴としてテープパンチユニットをあげることができる。このユニットを付加すると操作員が手動操作によって機械を運転するとき、その機械テーブルの運動をせん孔テープにパンチされた数値情報として記録することができる。すなわち模範手動操作で指令テープが作成できるのである。

Hydra-Point 数値制御工作機の価格は位置決めだけのものが \$ 9,945、直線ミリング可能のものが \$ 13,995、テープパンチユニットを付加すると \$ 2,500 増である。Moog 社では Hydra-Point 数値制御工作機十数台を実用試験もかねて自社の部品生産に使用していた。この使



第16図 直線ミリング加工の場合の Hydra-Point 制御装置

用実績から経済性その他のデータがまとめられるとのことであった。

### まとめ

アメリカにおける数値制御工作機関係の工場視察の内容は上記のとおりであるが、視察を通じて認識された傾向のいくつかをまとめてみる

1) アメリカの数値制御工作機には Kearney & Trecker の Milwaukeematic によって代表されるような工具自動交換をもち制御装置も非常に汎用性に富んだ高価デラックスなものと Pratt & Whitney の Tape-O-matic (Kearney & Trecker 社の現場で使用されているのを見たが、これは2軸位置決め制御のボール盤で、価格は \$ 9,000) や Moog 社の Hydra-Point のように簡単で安価なものとの二つのタイプがある。

2) 従来は数値制御工作機を複雑な型やカムなどの手動で加工することが困難なものの加工に利用することが強調されていたが、最近ではふつうの部品加工にどんどん活用する傾向がみられるようになった。

3) 指令せん孔テープから発生した指令信号を処理して工作機駆動用パワーサーボを動作させる数値制御系の一連の信号経路の途中に磁気テープを介させ、工作機に付属する制御装置の入力には、この指令磁気テープを使用し、工作機付属の制御装置を簡単にする方式が一時かなり使用された。この方式に関連して指令磁気テープの作成をメーカーがサービスするいわゆるテープサービスの方式が行なわれたが、現在アメリカではこの方式はほとんど行なわれていない。その理由としてアメリカ企業は独立性を保持したいということ、遠隔の地でのテープサービスは非能率的なこと、複雑な装置を使いこなすには自分のところですべてを熟知していなければならないことなどがあげられていた。

4) 現在アメリカにおいては約3,000台の数値制御工作機が稼動しており、うち350台が連続輪廓制御用とのことであった。数値制御工業の将来は有望視されており今後2,3年のうちに年間 \$ 70~90 million の売上げが予想されている。

(1964年4月22日受理)