

第5回精密工学会国際賞 記念講演

技術と経営

平成17年12月2日

ファナック株式会社

名誉会長
工学博士

稲葉 清右衛門

ご挨拶

本日、精密工学会会長の板生先生から、『精密工学会国際賞』を頂戴致しました。身に余る光栄で心より感謝申し上げます。

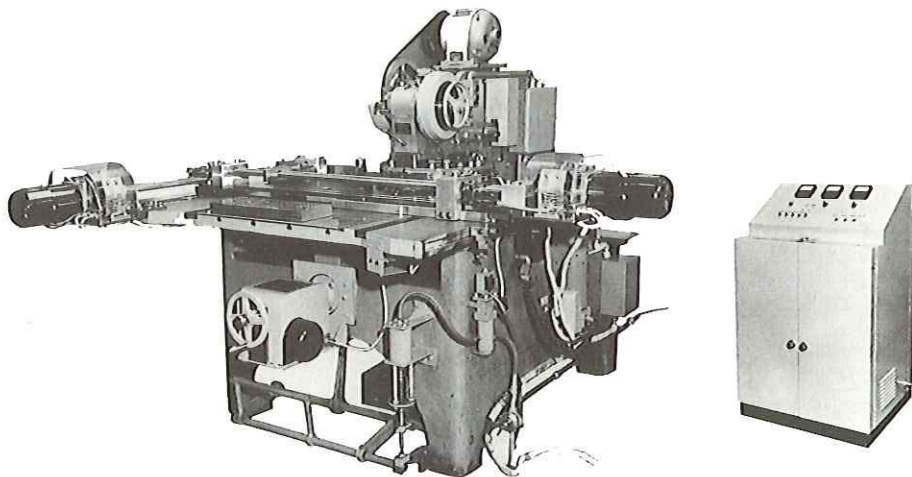
私は、昭和21年（1946年）9月に東京帝国大学第2工学部精密工学科を卒業し、現在の富士通である富士通信機製造株式会社に入社致しました。

そして、10年後の昭和31年（1956年）に工作機械のNCシステム（頭脳部とサーボ機構部）の開発を会社から命じられました。

そして、16年後の昭和47年（1972年）に私が部長をしていた計算制御部が富士通から独立して、現在のファナック株式会社となりました。自動制御課長から、計算制御部長の16年間は、大体技術者としての仕事が多かったように思います。その後は、今に至るまで33年間、経営者として、CNCシステムおよびその応用としてのロボット、電動射出成形機、更にロボットとCNC工作機械を核とするFMSの開発、企業化に努力を致しております。

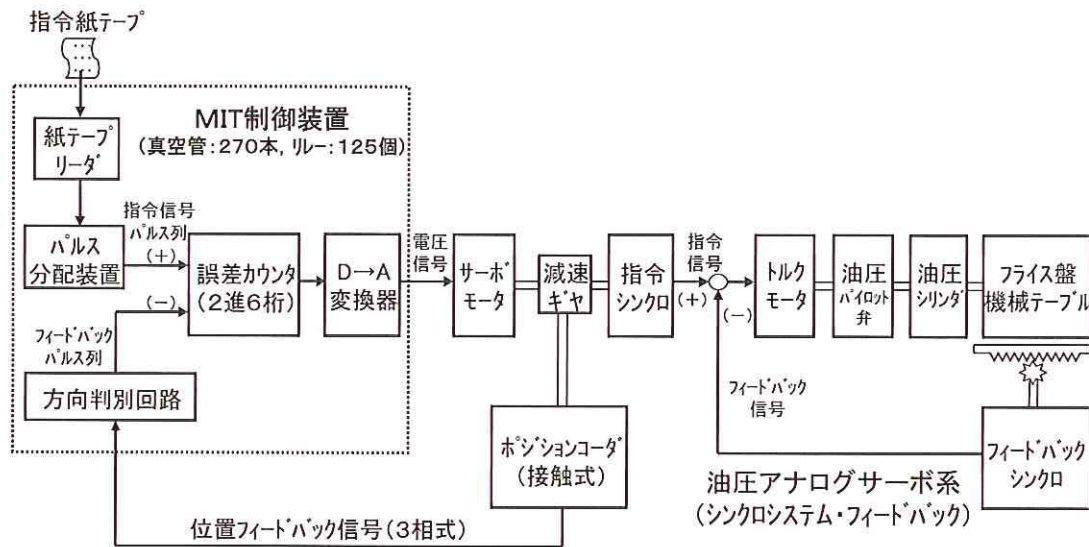
それでは、歳のかたまりが記憶が彷彿としておるのですが、私が若き日に技術者として、その開発に苦勞をした電気・油圧パルスモータをやや詳しく、それから簡単に創業時代のNC（CNC）システムについて、お話しをしたいと思います。

NCタレットパンチプレス



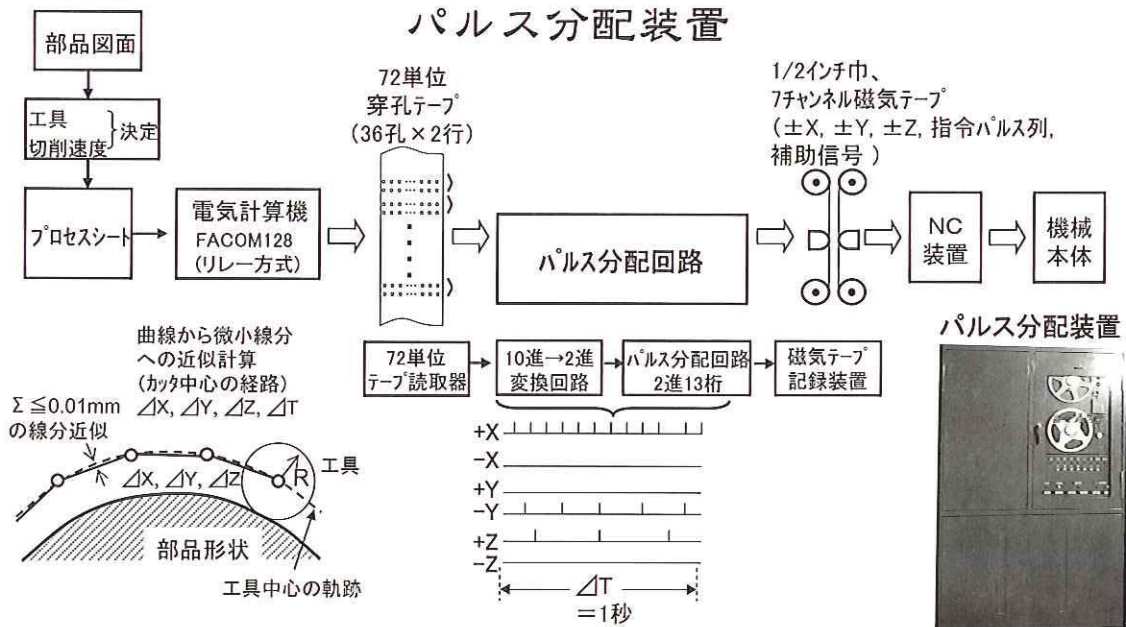
昭和31年（1956年）の12月に、牧野フライス、池貝鉄工、日立精機の社長をはじめ幹部の方々、機械試験所の杉本所長はじめ幹部の方々、東工大の中田孝先生、池辺洋先生などをお招きしまして、試作NCでNC化したパンチプレスの実演を見ていただきました。NCの頭脳部にはパラメロン素子、サーボ機構にはDCサーボモータと電磁ストッパーを使った、今考えると極めて簡単なものでした。それでも動いたことで、私共は元気が出て、NCシステムの次の開発を検討し始めました。

MITのNCシステム



まず、MITレポートを全員で精読し、その中から最も実用の可能性がある方針を決定致しました。NC工作機のNCシステムは、なるべく簡単にし、信頼性のあるものにしたいと考えました。その時、富士通に新しく電子技術部ができて、電子交換機課、電算機課、自動制御課の3つの課がありました。私が自動制御課長、池田敏男君が電算機課長で、ファコム計算機はここから誕生しました。自動制御課はNCシステムを開発し、今日のファナックがここから誕生しました。

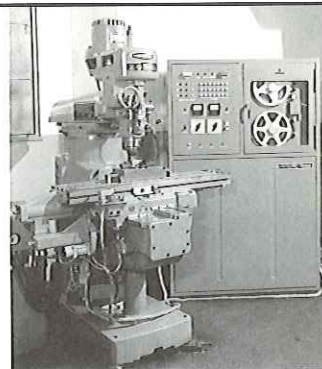
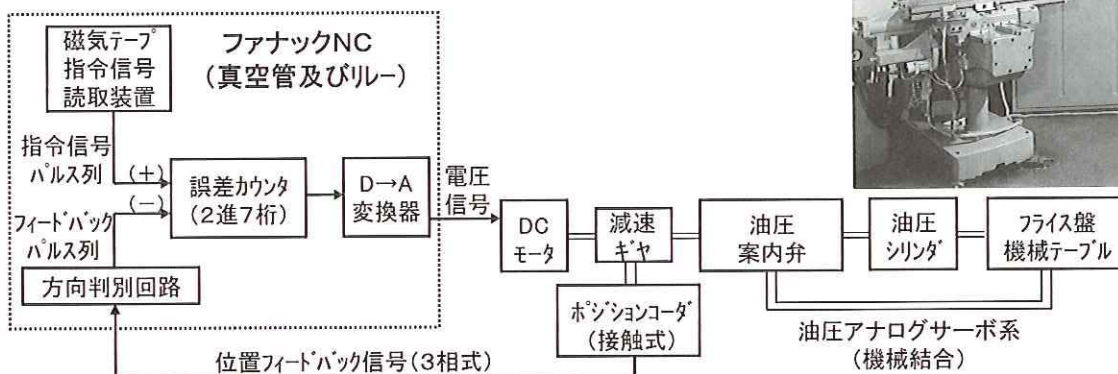
パルス分配装置



この図は、部品図面から各軸への指令パルス列を作り出すまでの流れを示していません。部品図から工具中心の動きの微小線分に分割する計算は電気計算機FACOM128が分担し、『パルス分配回路』では各軸の移動量指令をパルス列に変換し、磁気テープ上に記録します。磁気テープ上に記録された各軸のパルス列がNC装置への入力指令信号となります。この『パルス分配回路』の試作のための研究開発費用には通産省から補助金を頂きました。昭和32年(1957年)のことです。

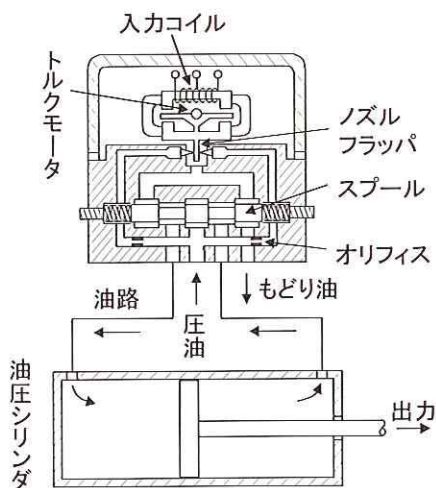
牧野のNCフライス盤

NCフライス盤 (牧野フライス盤+ファナックNC)



たまたま、牧野フライスの牧野常造社長が、日本工作機械工業会会長としてインドをご訪問され、明るる年の昭和33年（1958年）4月に大阪で開催される国際見本市にNCフライス盤の出品をお約束されたそうです。その結果、牧野社長からNCシステムの協力を求められました。私共は初めての受注に喜びましたが、時間はなく、大変ですが、全力を挙げて協力することをお約束致しました。このNCシステムは、デジタルサーボ（指令系）と油圧サーボ（駆動系）の2つのサーボ機構をタンデムにして使いました。サーボ系の安定性、精度に少々問題がありました。そのため、私共は次のサーボ系として、電気・油圧サーボ弁で油圧シリンダを制御すべく、電気・油圧サーボ弁の試作開発を始めました。

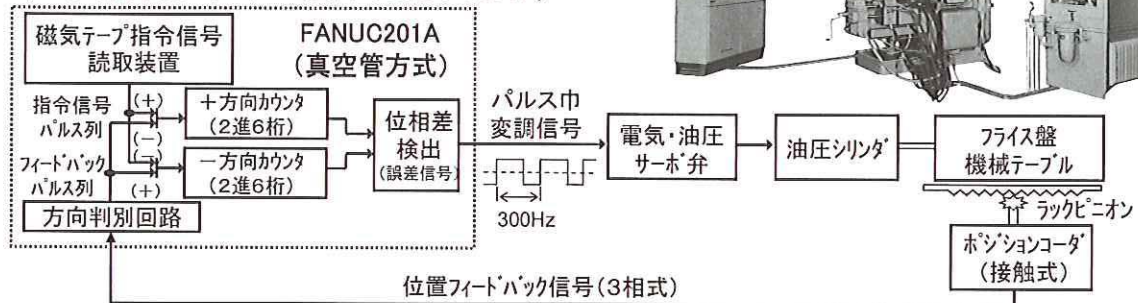
電気・油圧サーボ弁



サーボ弁を構成する主なものは、微小入力電流によってトルクを発生するトルクモータといわれるもの、オリフィス・ノズル・フラップより成るいわゆるノズル・フラップ機構、および圧油を制御する案内弁といわれるものです。幸い、我共つまり富士通が高感度有極リレーの技術を持っており、これをサーボ弁のフラップに利用することができました。このサーボ弁の製作には高精度の加工が必要でした。昭和32年（1957年）に東京大学の電気工学科の元岡達先生（後名誉教授）と山口楠男先生（後名誉教授）と共同研究中であったパルス巾変調方式のデジタルサーボが昭和33年（1958年）に完成しました。

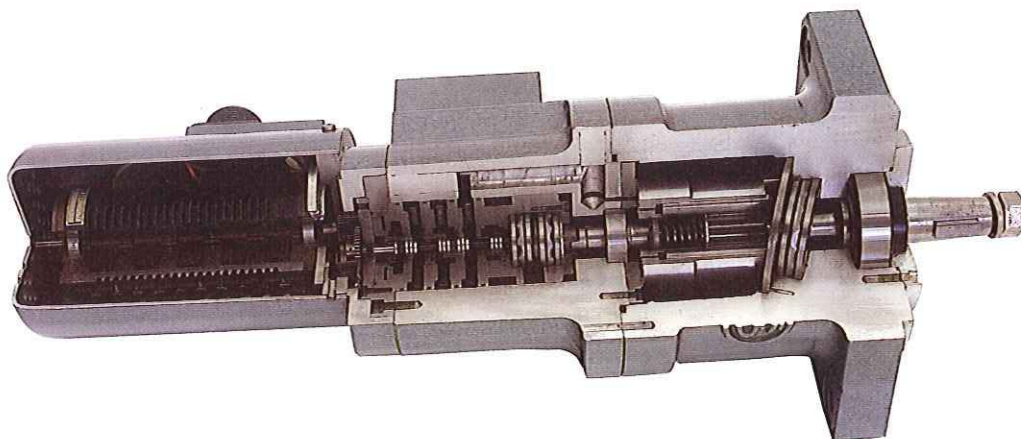
日立精機のNCフライス盤

NCフライス盤
(日立精機フライス盤+FANUC 201A)



この年に、三菱重工業から日立精機のNCフライス盤が発注されました。このNCでは、牧野フライスのNCフライス盤と同じく、入力指令には磁気テープを使用しましたが、サーボ系には、パルス巾変調回路と電気・油圧サーボ弁が使われました。初めての實用機で、戦闘機の翼桁加工に使われました。従来のMIT、牧野フライスなどの制御方式は、電気系と油圧系の二つの閉ループ系がありましたが、本方式は新規に開発した電気・油圧サーボ弁を活用すると共に、単純で高精度を目指して最終端のテーブルの移動量を検出するフィードバック系を採用しました。ただ、サーボ系の安定性を得るための調整が困難なことに加え、回路素子が真空管であり、入力装置が磁気テープ方式のため信頼性が低く、NCの更なる普及には、サーボ機構と頭脳部に新しい開発の必要性を痛感しました。

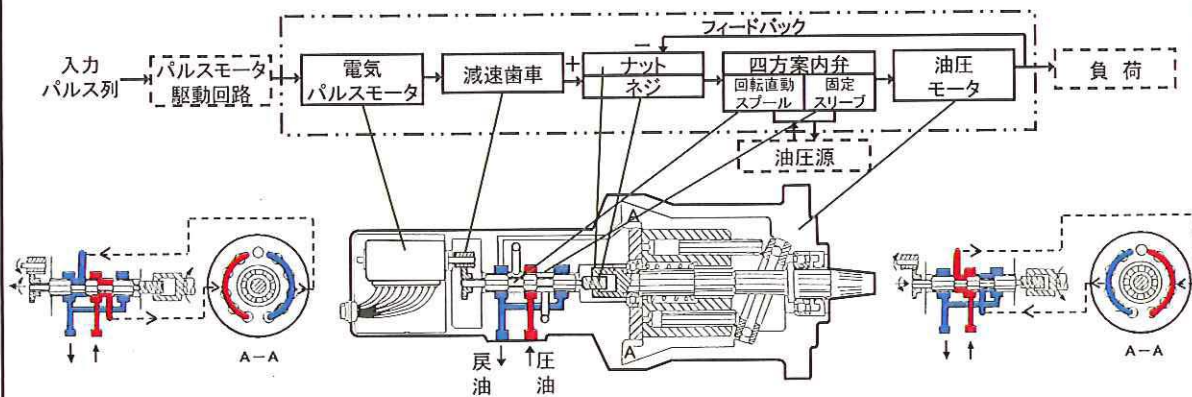
電気・油圧パルスモータ



サーボ機構として、私共は、電気パルスモータのトルクを油圧モータで増幅しようと考えました。電気パルスモータと四方案内弁と油圧モータがタンデムに繋がっております。

このモータの開発に私共は全力投球致しました。少し詳しく説明します。

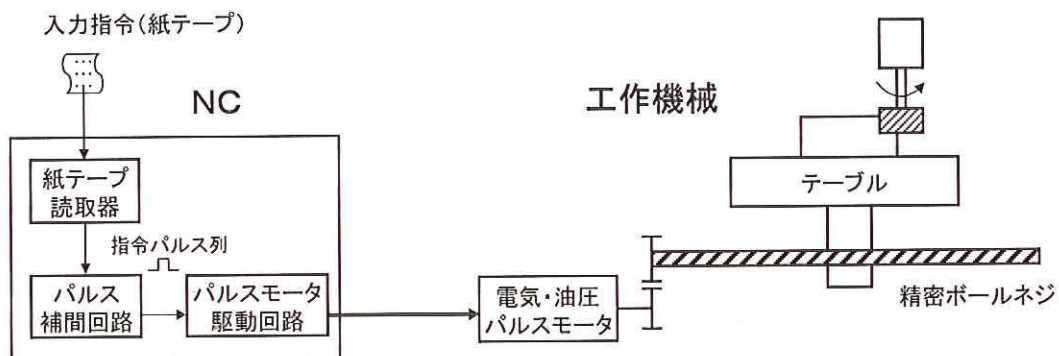
電気・油圧パルスモータ



指令パルス1つにつき電気パルスモータが微小角度回転すると、スプールが回転します。スプールはその先端のネジが、油圧モータの出力軸に結合しているナットから、抜き出るように左方向に移動します。その結果、圧油は油圧モータに供給され油圧モータが回転します。油圧モータが回転するとナットも回転するので、フィードバックがかかり、スプールは右方向に戻されて再び油路を遮断します。従って、1パルス入ると油圧モータが電気パルスモータと同じ角度だけ回るといふ訳です。四方案内弁のスプールとスリーブの径のギャップは4～6 μ 、オーバーラップは0～1.5 μ 、各端面のかどはダレ、キズ、面取りは厳禁で、まさにブロック・ゲージ級の加工が要求されました。最後に、電気・油圧サーボ弁、電気・油圧パルスモータの製造にあたって、ブロック・ゲージ加工の精密加工技術を持つ黒田精工に大変お世話になりました。黒田彰一社長は、私と精密工学科の級友であり、設計構想の時からご指導を頂きました。なお、電気・油圧パルスモータの油圧系は池辺洋教授に、駆動回路は池辺潤教授にご指導を頂きました。

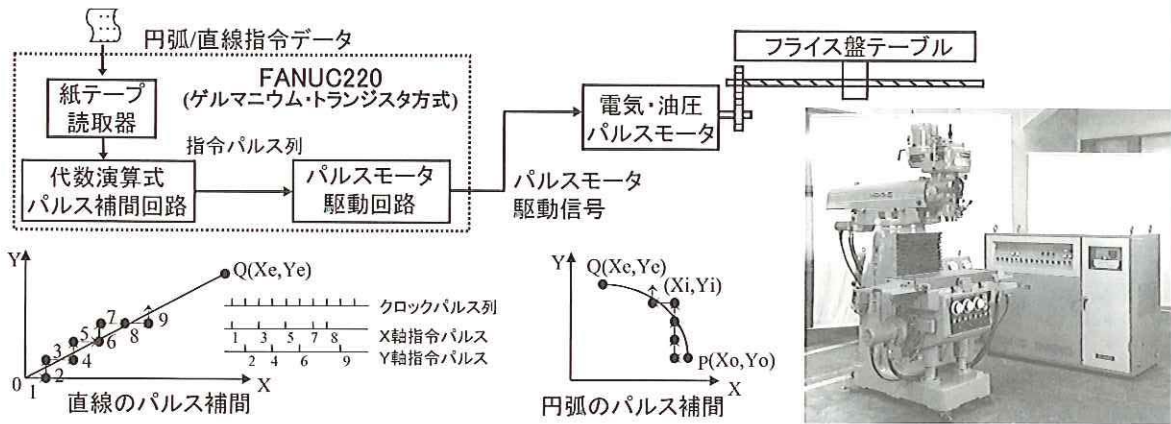
電気・油圧パルスモータ

— オープンループ方式 —



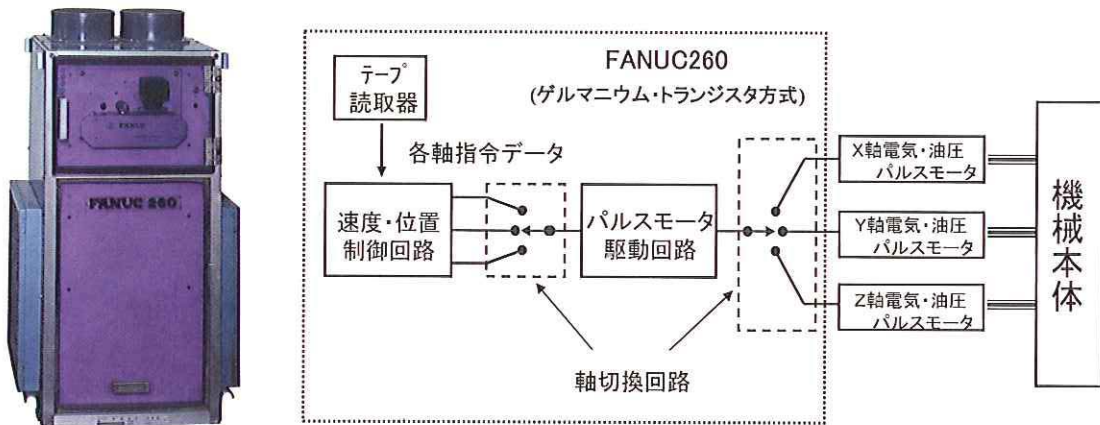
電気・油圧パルスモータを用いた制御方式では、工作機械とNCとの接続部が一本であるため、工作機械の負荷変動の外乱がサーボ系に入らず、容易に工作機械に取り付けることができ、機械側との結合は殆ど無調整で短時間で済むようになりました。この制御方式では、送りネジの精度が重要になりますので、日本精工の今里社長に大変お世話になり、精密ボールネジを供給して頂きました。

代数演算式パルス補間回路と電気・油圧パルスモータの構成



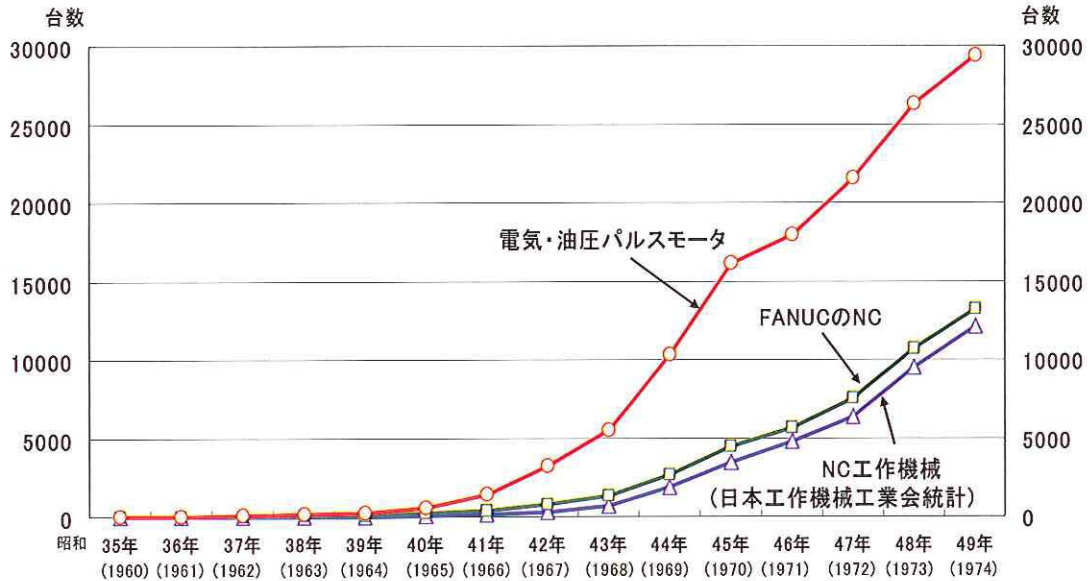
次は、NCの頭脳部の開発について述べたいと思います。巾変調方式のサーボ回路でご指導頂いた、東大の元岡達先生、山口楠男先生は、NC頭脳部にも大変興味を持っておられました。機械図面の大部分は直線と円から構成されていることに着目して、所定の直線と円から1パルス以上ずれないように、パルス分配をする必要があります。私共は、両先生ご指導の元に、代数演算式パルス補間回路を開発しました。当時、真空管に代わってゲルマニウム・トランジスタが実用化され、信頼性が向上しました。この新しいNCには、代数演算式パルス補間回路が内蔵されているため、図面上の円弧、直線に関する数値データを直接入力することが出来るため、従来のNC装置に比べて信頼性が向上し、かつ、使い易いシステムとなりました。写真は頭脳部に代数演算式パルス補間回路、サーボ機構に電気・油圧パルスモータを使ったNC FANUC 220と牧野のNCフライス盤です。

直線切削NC FANUC260



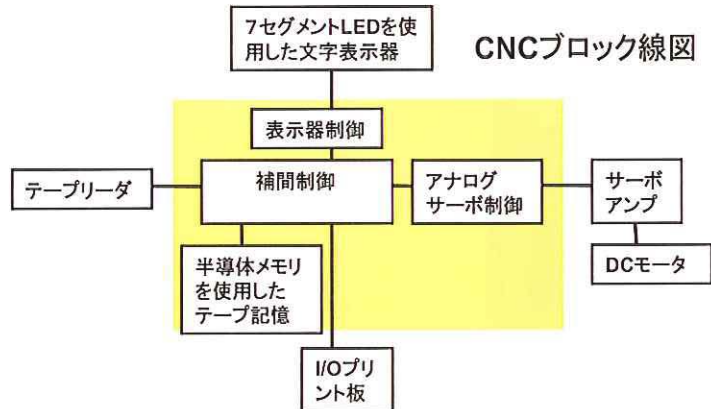
工作機械の加工を調査すると、直線切削と穴あけの位置決め加工が大半です。そうであれば、直線切削と位置決め専用のNCを開発すれば良いと考えました。素子の数も少なく価格も下がり、信頼性は向上します。そこで、直線切削NC FANUC 260が誕生いたしました。このNC装置 FANUC 260は、コストを下げるべく、色々の工夫がなされています。制御仕様を同時1軸とすることで、制御回路は最小限に絞り、またパルスモータの駆動回路は1軸分のみで、切替え回路により、3軸分のモータを制御する方式を採用しています。また、大型プリント板を採用し、プリント板数、コネクタ个数、配線本数を大幅に減少することが出来ました。制御装置のキャビネットも、小型化と共に標準化されたアルミ引抜材を採用するなど、大巾な低価格化を実現しました。

FANUCのNCと電気・油圧パルスモータの製造台数の推移



連続切削NCのFANUC 220、直線切削NCのFANUC 260など、ほとんど全てのNCのサーボ機構には電気・油圧パルスモータを使っております。この図から分かるように、電気・油圧パルスモータは、日本におけるNC工作機械の発展にお役に立ったと思います。

FANUC 2000C/3000C



昭和49年(1974年)頃になると、回路素子も個別ICからLSIなどが開発され、CNCの回路も大幅に変化しました。

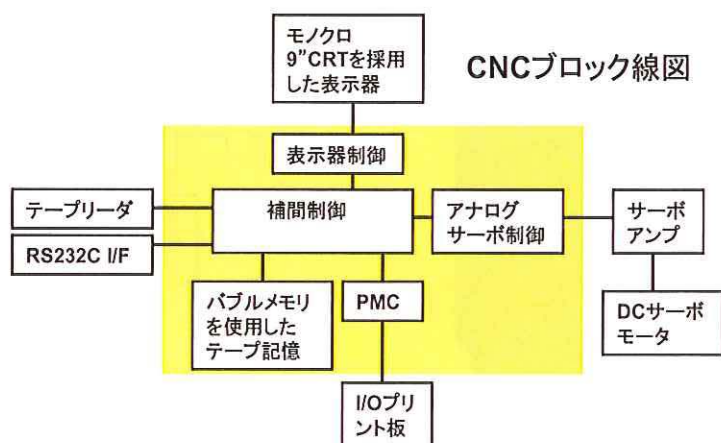
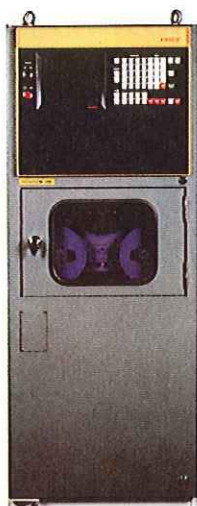
昭和49年(1974年)の日本国際工作機械見本市に出品されたFANUC 2000C/3000CはDCサーボモータを使用する最初のCNCとして開発されました。CNC回路には複数の汎用LSIから構成されるマイクロプロセッサを使用し、マイクロプロセッサで補間演算を実行しました。これ以降、代数演算式パルス補間回路に変えて、DDA補間方式を採用しました。これからは、NCをCNCと呼びたいと思います。

FANUC DCサーボモータ



昭和48年（1973年）のオイル・ショックで、油の値段が急騰し、電気・油圧パルスモータがお客さんに敬遠されたため、昭和49年（1974年）にアメリカのゲティスというメーカーから電気サーボモータのライセンスを導入しました。写真は、これを元に昭和50年（1975年）にファナックが拡張かつシリーズ化したものです。

FANUC SYSTEM 6



昭和54年（1979年）に開発したFANUC SYSTEM 6は、汎用の1チップマイクロプロセッサを採用したCNCで、現在のCNCの原型となりました。CNC用カスタムLSIを開発することで、CNCを構成する半導体の素子数を大幅に削減いたしました。合計8万9千台が出荷され、工作機械のNC化の発展に大きく貢献しました。

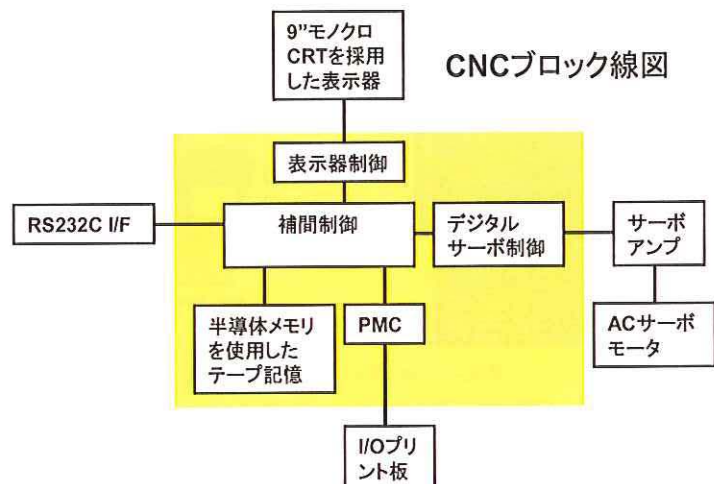
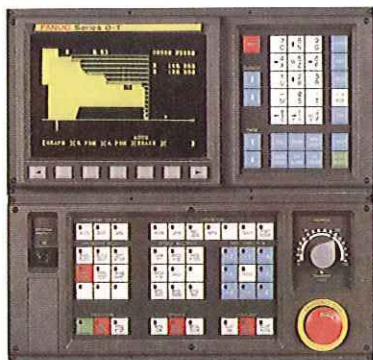
FANUC ACサーボモータ



昭和57年（1982年）には、工作機械の高速化のため、DCサーボモータに変えてACサーボモータを開発しました。DCサーボモータは、重切削時のロータ巻線温度上昇が大きいこと、整流用ブラシからの火花により最高回転数が制限されることが問題でした。パワー半導体の進歩、高性能希土類磁石の出現もACサーボモータへの転換を容易にしました。

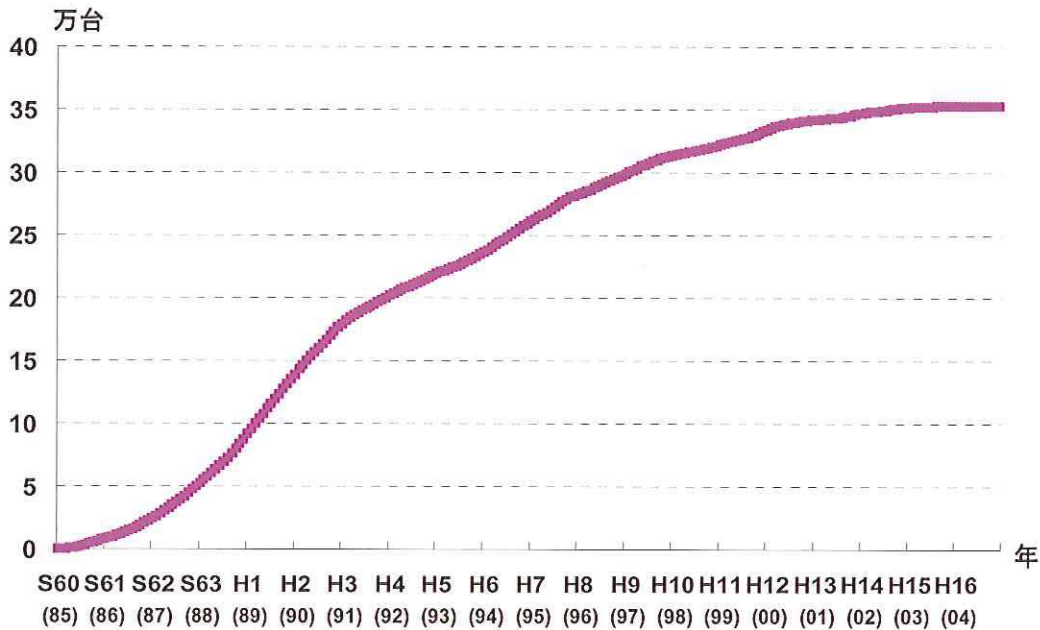
昭和61年（1986年）には、サーボ制御をデジタルサーボ化しました。サーボ制御を全てデジタルシグナルプロセッサで演算することによって、アナログサーボの分解能の低さ、温度ドリフトの悪影響を解消すると共に、工作機械の一層の高速・高精度化を推進することが出来ました。

FANUC Series 0



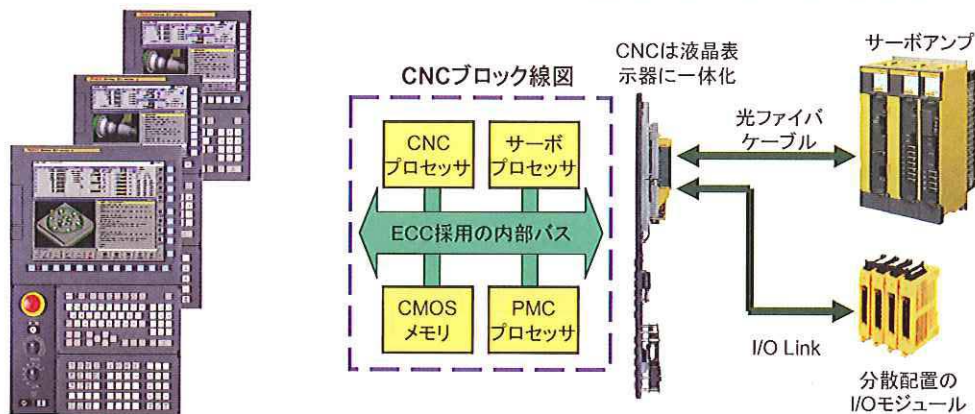
台数が出るローエンドの市場を狙った低価格CNCとして、FANUC SYSTEM 6の技術を基本にFANUC Series 0を昭和60年（1985年）に開発しました。大規模なカスタムLSIを開発し、加工指令の記憶に半導体メモリを採用するなどして部品点数の大幅削減を実現しました。旋盤用、マシニングセンタ用、研削盤用、パンチプレス用モデルも開発し、世界のベストセラーCNCとなりました。

世界のベストセラーCNC



Series Oは平成16年（2004年）9月に生産終了するまで、実に19年の長期間にわたって、合計35万台が出荷されました。

FANUC Series 16i/18i/21i および30i/31i/32i

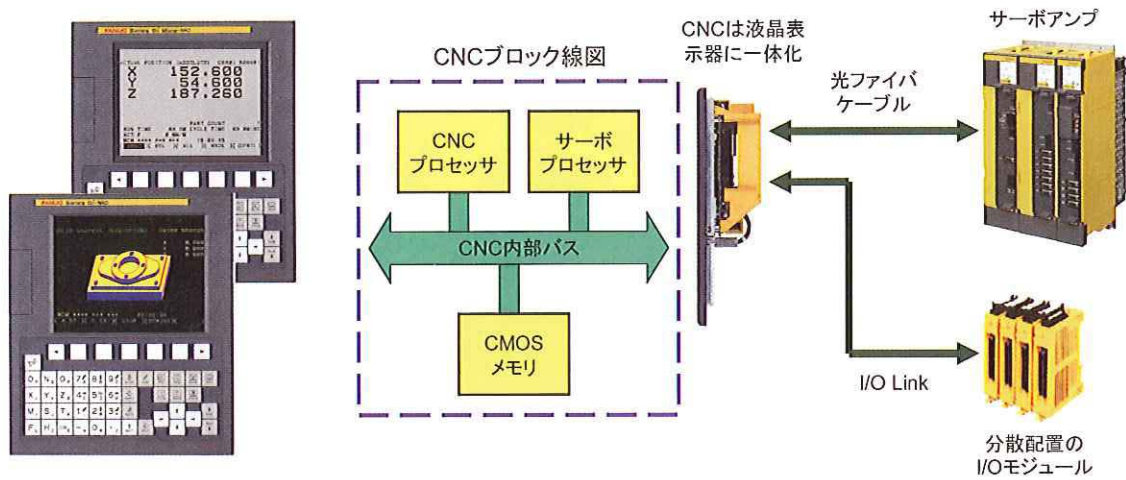


次に、ファナックの次世代CNCをご紹介します。平成8年（1996年）に開発したFANUC Series 16i/18i/21iは、過去40年に亘るCNC開発の経験とノウハウを蓄積したソフトウェア資産が特長です。旋盤、マシニングセンタ、研削盤などあらゆる工作機械に対応できます。このCNCは基本ハードウェアは共通で、ソフトウェアを変えることでモデルの違いを出しています。

更に平成15年（2003年）には高性能を指向したFANUC Series 30i/31i/32iを開発しました。これは5軸加工機、複合加工機、多系統旋盤など最先端の工作機械の制御に最適なナノCNCです。最大10系統、40軸制御まで対応できるように、高性能のプロセッサ、高速なCNC内部バスを採用しています。

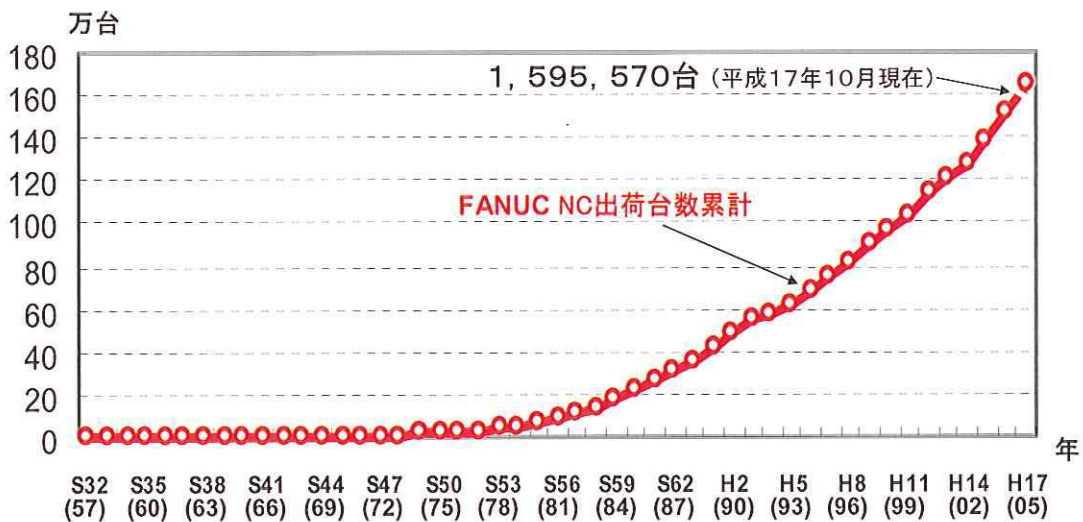
15”の大型液晶表示器など操作性も抜群です。CNC、サーボ、検出器でナノメータ単位の制御をおこなって、高速で高品位の金型加工ができます。

FANUC Series 0i/0i Mate



FANUC Series 0i/0i Mateは信頼性、コストパフォーマンスに優れたローエンドCNCです。かつてのベストセラーCNC FANUC Series 0が、最先端技術を採用して生まれ変わりました。液晶表示器と一体化された超小型CNCで、プログラミング、設定、調整も容易です。

FANUC NCの出荷台数の推移

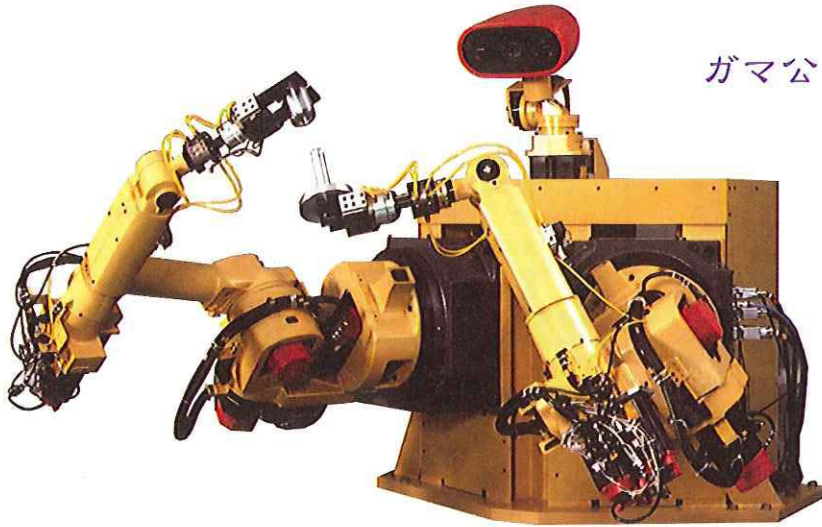


この図は、FANUC NCの出荷台数の推移です。

私は、CNCシステムの最大のお客様である工作機械メーカーと競合することを避けました。そして、CNCシステム（CNCユニットとサーボモータ）の開発と製造に全力を挙げました。次に、CNCシステムの応用としてロボットを考えました。ロボットの頭脳部はCNCユニットを、駆動部はサーボモータを使います。異なるのはソフトとメカだけです。

知能ロボットのプロトタイプ

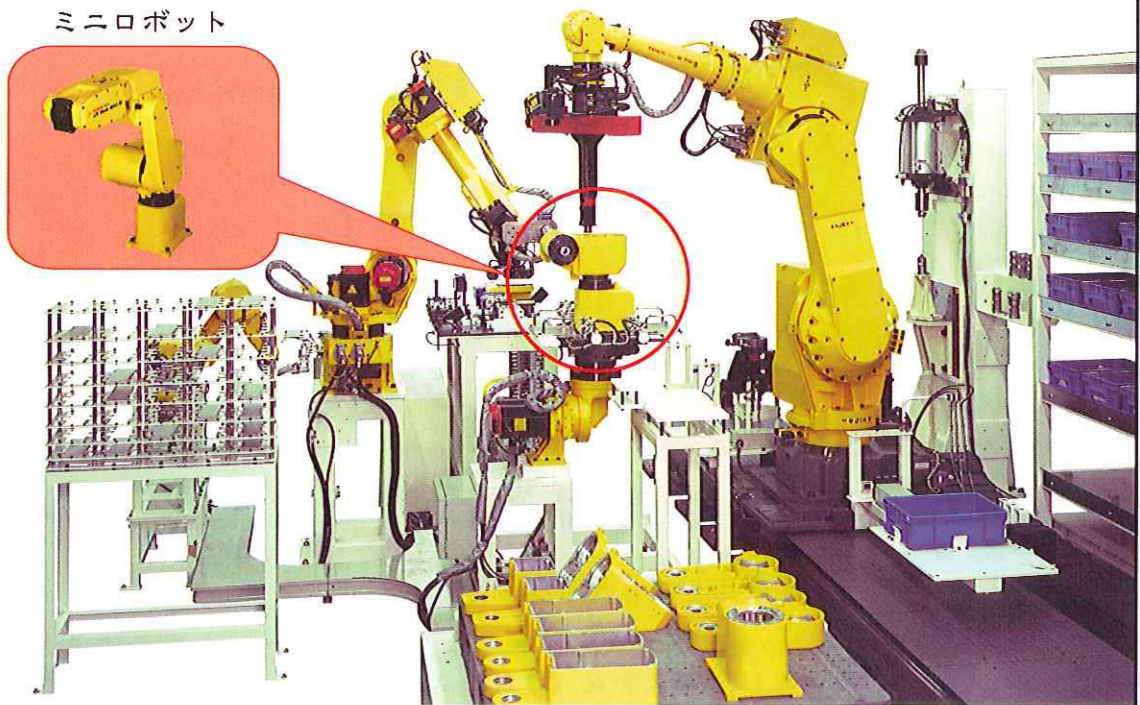
ガマ公



私は、ロボットが高度な作業を行えるようになるためには、ロボットの知能を高める必要があると考え、昭和60年（1985年）に基礎研究所に、知能ロボットの開発を命じました。人間が作業をする際に重要な働きをするのが、目と手先の感覚ですが、目に相当するビジョンセンサと手先の感覚に相当する力センサを持った知能ロボットのプロトタイプを平成4年（1992年）に完成しました。これは、それぞれ7軸の腕を2本持つ双腕構造で、見掛けがガマ蛙のようなので「ガマ公」という愛称で呼ばれました。

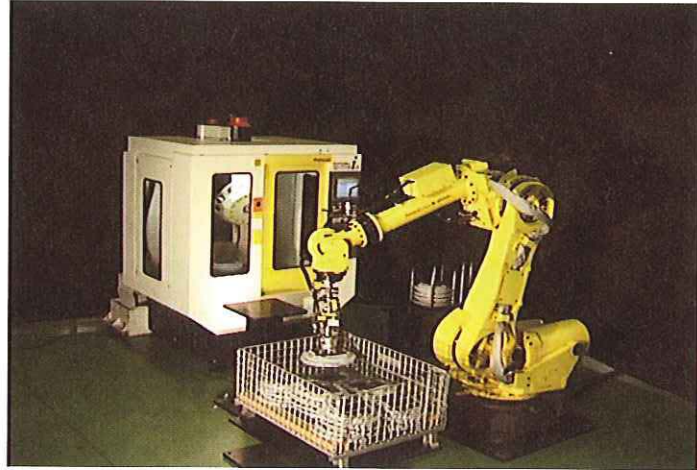
組立ロボットセル

ミニロボット



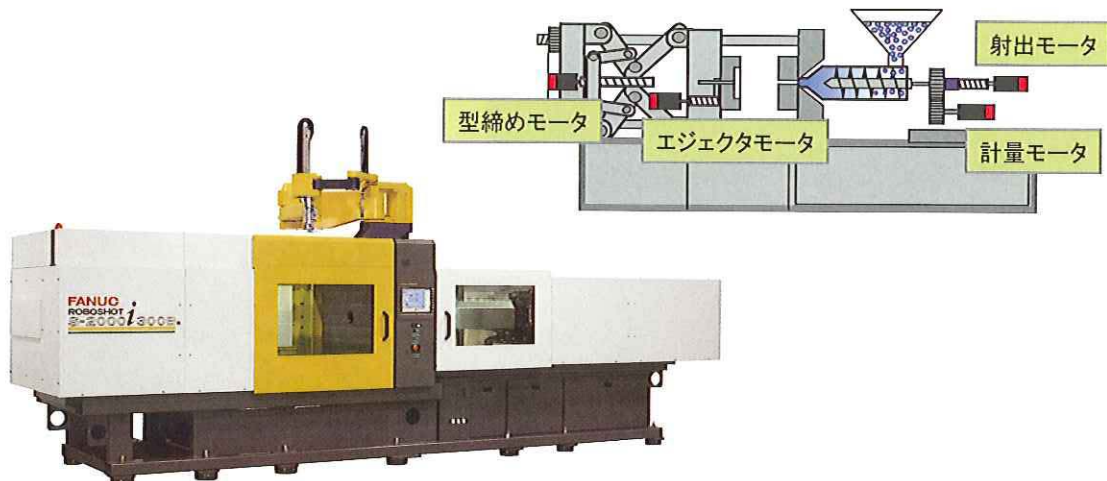
このガマ公の技術をベースに、知能ロボットがミニロボットを組み立てる組立ロボットセルを開発し、社内に導入しました。このセルは、月に200台のミニロボットを生産する能力があります。

万能知能ロボット R-2000iA



これらの経験を元に、平成13年（2001年）に万能知能ロボットR-2000iAを完成することができました。このロボットは、ビジョンセンサにより、カゴの中にバラ積みされた複雑形状ワークを取り出すことができ、力センサにより、JIS規格のH7/h7クラスの嵌め合い作業を含む、機械部品の高精度組立作業を行うことができます。

電動射出成形機 FANUC ROBOSHOT S-2000i300BR



次にCNCシステムの応用機として、電動射出成形機を始めました。これもCNC工作機械と異なるのはソフトとメカだけです。電動射出成形機ROBOSHOTS-2000i300BRは、安定した精密成形性能を実現し、かつ、圧倒的な省エネ性を実現しました。この電動射出成形機の精密成形能力により、精密非球面レンズのプラスチック化や超小型精密コネクタなどが実現され、商品の軽量・小型化に大いに貢献しています。

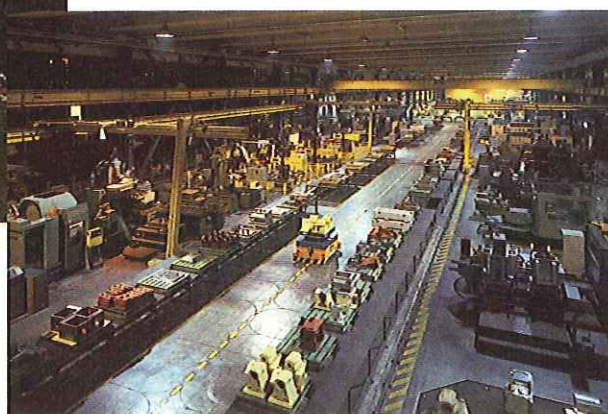
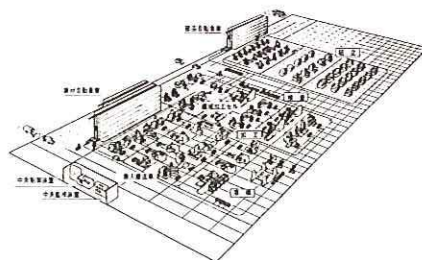
DNCシステム（群管理システム）



さて、これまでは、CNC工作機械、ロボット、電動射出成形機についてお話してまいりましたが、工場の生産性を上げるためには、これらを構成要素とする生産システムを考える必要があります。特に、ユーザからの多様な要求に応えることができるFMS、すなわち、フレキシブル・生産システムについて、これまでの発展を簡単にご紹介したいと思います。

昭和46年（1971年）に、通産省の重要技術開発補助金で工業技術院機械技術研究所の指導のもとに、工作機械メーカー5社とファナックがDNCシステムT10を共同開発しました。これを使って21台の工作機械を制御し、電気パルスモータ、電気・油圧パルスモータの部品加工をファナックの東京工場で行いました。

富士工場



昭和55年（1980年）に、ロボット部品の機械加工および組立のための工場を富士山麓の山中湖畔に作り、大規模で統合されたFMSを導入しました。完成当時の工場は、29システムの加工セルを中心として、素材自動倉庫、部品自動倉庫、無人搬送車、それに、これらの管理と監視を行う中央管理室から構成されておりました。

第一世代機械加工システム

昭和55年
(1980年)

24時間連続無人運転

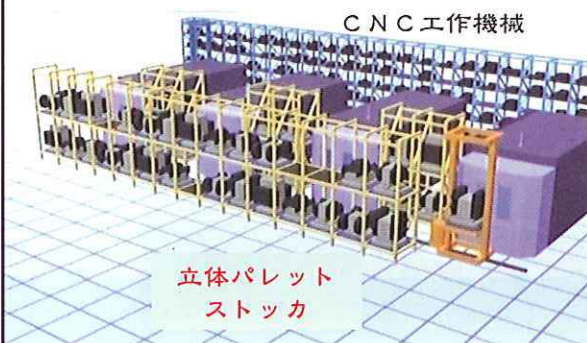


これは、昭和55年（1980年）に導入した第一世代機械加工システムの一例です。作業者が、ワークを搭載した加工工具をパレットマガジン装置に取り付けています。24時間の連続無人運転を実現しました。

第二世代機械加工システム

平成2年
(1990年)

72時間連続無人運転

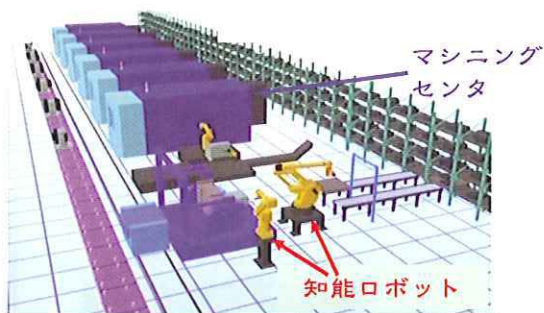


これは、平成2年（1990年）に導入した第二世代機械加工システムの一例です。作業者があらかじめワークを取り付けた多くの加工工具を立体パレットストッカに格納し、CNC工作機械に供給します。金曜日の夜から月曜日の朝までの72時間の連続無人運転を実現しました。

第三世代機械加工システムーロボットセル

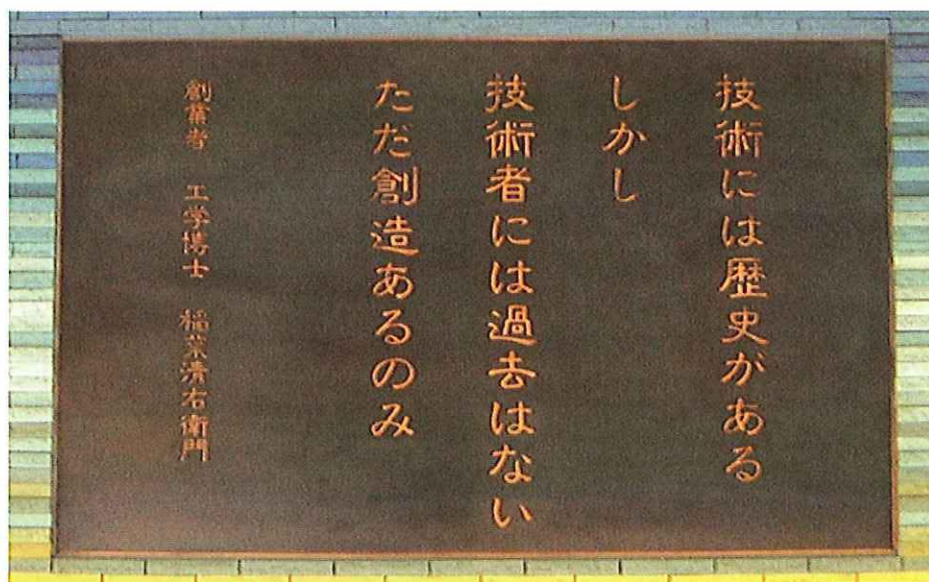
平成13年
(2001年)

720時間連続稼動



これは平成13年(2001年)に導入した第三世代機械加工システム、ロボットセルです。このロボットセルでは、加工治具へのワークの取り付け、取り外しを作業者に替わって知能ロボットが行います。牧野フライス製作所、ヤマザキマザックほか各社の協力を得て開発し、月当たり720時間の連続稼動を達成しました。

研究所入口 ブロンズ陶壁画の写真



最後に、経営者として一言申し上げたく存じます。

私は、経営の基本を研究と開発に置いております。その為、身分不相応の10の研究soを持ち、全社員の30%が研究員であります。研究員の姿勢が大事であると思っております。

研究所の入口にブロンズの額を掛けております。創造の重要性を先ず示しております。

各研究所入口の扉の写真

RELIABILITY UP
COST CUT
WENIGER TEILE

各研究所入口の扉には、この図にありますような、高信頼性と低価格の商品開発の目標、その為に不可欠な少ない部品という手段を示しております。

役員会議室 「厳密」の写真



更に、企業全体の精神として、『厳密』を掲げております。
この図は、役員会議室にある手島右卿先生書の『厳密』です。

今まで開発し、企業化した商品は、多くの部下達の献身的な協力とご専門の先生方のご指導によるものであることを申し上げ、改めてここに感謝を致しまして、終りとさせていただきます。有難うございました。