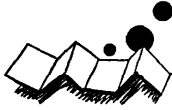


解説

フレキシブル生産システムの技術的課題†



佐田 登志夫†

1. 序 論

この 20 年から 30 年にかけての機械生産の生産性の飛躍的向上は、自動化、オートメーションの導入によるところが大きいことは周知の通りである。機械生産の自動化は、初め 1950 年頃より大量生産の分野で導入され、シーケンス制御による生産設備、とくに自動車産業に見られるようなトランスフェラインの設置によって生産能力を著しく高めることができた。そしてこのような一連の自動化は高度成長の波に乗って 1960 年代一杯進められてきた。

ところで機械生産の全生産量の中で、前のような限られた品種を一時期に大量に生産する少品種大量生産方式によって造られる生産量は、高々 30% にしか過ぎず、他の 70% は一つのロットの中の製品数が 500 以下という多品種小量生産によるものであり、大量生産による自動化が普及するにつれて、1960 年代の後半から自動化の関心は当然後者の方へ向けられてきた。ただ多品種小量生産の自動化の困難な点は、取り扱う製品、部品の種類が多く、したがって加工法、工具、取付具が多岐多様になり、処理しなければならない生産の情報量が大量生産の場合に比べてけた違いに多いことである。しかしその後の計算機の発達、とくにその機能の向上と価格の低下や、数値制御工作機械や工業ロボットなどのようなプログラマブルな自動化生産機械の普及、とくにそのフレキシビリティの増大と信頼性の向上などにより、機械工場においても大量の生産情報を余り多くの人手をかけずに自動的に処理し、また生産情報から生成した加工指令情報により多様な形状、材質、精度を持つ部品を自動的に加工、組立が行えるようになった。中でも複数の数値制御工作機械を一台の中央処理計算機により集中管理する加工システムが 1960 年代後半より実用化し、それに部品

の自動搬送機能、工具の自動搬送機能が付加され、1970 年代の中ばには小規模なシステムながら夜間無人運転が実現し、1980 年代のはじめに至って相当大規模なシステムが設置されて、多品種小量生産の生産向上に大きな貢献をし始めた。このシステムはその機能から最近ではフレキシブル生産システム (Flexible Manufacturing System, FMS) と呼ばれるようになり、さらに機械加工だけでなく、溶接、塗装、組立、検査などへも自動化を広げ、工場全体の物品管理、運営管理なども一つの計算機で行わせようという提案も出され、これをフレキシブルな工場自動化 (Flexible Factory Automation, FFA) と呼ぶようにもなった。

この小文では、多様な自動化機械加工の中心であるフレキシブル生産システムを取り上げ、その発展の歴史的経過、システムの計画と構成、システムに要求される機能、将来の発展などについて機械工学の立場からの解説を試みる。

2. フレキシブル生産システムの発展の歴史

(1) 数値制御工作機械の誕生

機械加工の分野で多様な加工が自動的に行えるようになったのは、1952 年の MIT における数値制御工作機械の開発に始まる。その後の数値制御工作機械の目ざましい発展によることは誰も異論のないところであろう。数値制御情報の処理とそれによる工具あるいは工作物の運動の制御という情報処理能力を、工作機械が持つようになったことに、この開発の歴史的意味がある。

(2) 数値制御工作機械の計算機制御

この数値制御工作機械が機械工場の中で一つのシステムとして考えられるようになったのは、一群の数値制御への数値制御情報の供給を、一つの中央処理計算機と結合して、そこから一括して行わせようとしたことから始まった。当時はこのシステムは計算機による数値制御工作機械の群制御、群管理あるいは直接 (Direct Numerical Control, DNC) などと呼ばれて

† Technical Tasks of Flexible Manufacturing Systems by Toshio SATA (University of Tokyo, Faculty of Engineering, Department of Precision Machinery Engineering).

†† 東京大学工学部精密機械工学科

いた。このような DNC システムがいつから稼働したかはあきらかではないが、アメリカでは1963年にすでに国防者主催で DNC システムのシンポジウムが行われている。

わが国における最初の DNC システムは 1966 年機関車の保全工場である国鉄の大宮工場に設置された 7 台の数值制御旋盤からなる旋削加工システム¹⁾である。このシステムは機関車の保全期間の間に、必要な補給部品を発見し、加工指令を出し、加工して供給しようとするもので、事前に加工部品の選定、システムの構成などについて関係者の周到な準備が行われ、これによって結果として補給部品の在庫の大幅な削減に成功した。図-1 にこのシステムの構成図をあげる。このシステムは国鉄の公共的な性格のゆえをもって広く一般に公開され、わが国の機械加工の発展に大きなインパクトを支え、その後数年のうちに小規模なものから、さらに大規模なものまで、おそらく 10 システム近くが開発され、設置されたものと考えられる。

このようなシステムでは計算機は工作機械からの要求に応じて必要な数值制御情報を供給するだけでなく、システム全体の運転をあらかじめスケジューリングしておき、素材、工具、数值制御情報の準備もしておいて始めて有効に機能するものであり、その意味で生産システムといつてよいであろう。

(3) 素材の搬送機能を持つ生産システム

これまでのシステムでは素材が工作機械に装着されれば、以後の加工はすべて自動的に実行されるが、素材の着脱やシステム内での移動はすべて人手に頼っていた。1967 年アメリカの White Sundstrand 社に設置されたシステムでは、すべての数值制御工作機械がコンベヤで結合されていて、素材は人が着脱ステー

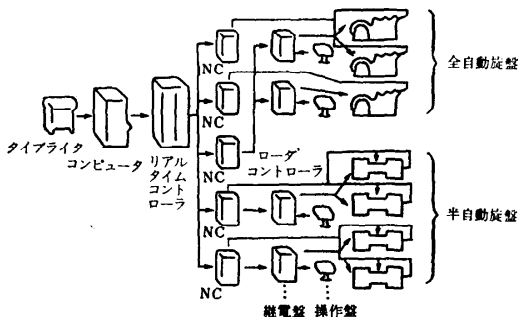


図-1 計算機制御生産システム

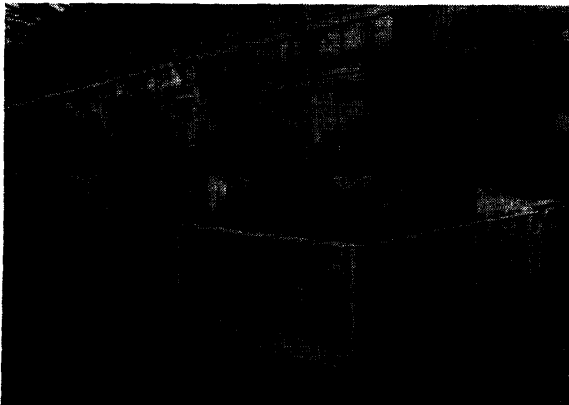


図-2 コンベヤラインを持つ計算制御生産システム

ンでパレットと呼ばれる標準取付具の上に装着すれば、それ以後の素材の工作機械までの移動、装入、取り出しは計算機制御により自動的に行うようになり、自動化のレベルは著しく高くなった。当時アメリカではいくつか類似のシステムが設置され、一社がこのシステムにフレキシブル生産システム (Flexible Manufacturing System, FMS) という商品名をつけ、これが最近になり急に一般化した名称として使われるようになった。

わが国でも 1972 年にヤンマディーゼル社に 50 種類近くの異なるエンジンブロックを加工する図-2 のような 4 台のマシーニングセンタとコンベヤラインとを主とするフレキシブル生産システム²⁾が初めて設置された。このシステムでは、これまで 50 台程度の汎用工作機械で行っていた仕事を 4 台のマシーニングセンタで代替でき、作業員も 1 シフト 3 人で担当でき、2 シフトで運転するとしても 1/10 近い省人化が計られ、また加工を始めてから終までの生産のリードタイムも 1/10 程度に短縮できるなど経済的にも大きな成果をあげた。これに続いてその数年後のうちにいろいろな形態こそ違え搬送システムを持ったフレキシブル生産システムが多数開発され、それぞれに大きな成果をあげた。このシステムの中には、工場の床面上に素材を搭載したカートが誘導されて複合化したループの上を走行するもの、自動倉庫を持ち、機械待ち、あるいは作業員待ちの能力を持つものなども現われ、システムが次第に大規模化の方向に向っていった。

(4) セル型フレキシブル生産システム

しかしこのような比較的大規模なシステムは中央計算機、搬送装置を含め多額の設備投資を要し、またその後の不況などのために経済的効果をおげる対象が急

速に少なくなっていた。その頃マイクロコンピュータの普及の時代に入り、数値制御装置もマイクロコンピュータによる CNC (Computerized Numerical Control) 化され、また工業ロボットも開発され、これを組合わせて 図-3 に示すような小規模なセル型のフレキシブル生産システムが実現するようになった。このような加工セルでは中央にあるロボットがその周りに配置された3~4台の数値制御工作機械への素材の供給の仕事をそれぞれのマイクロコンピュータ相互のリンクによって実行するので、投資額は少なく高い経済性が得られる。このため、その後このセル内だけで一応の加工のできる比較的単純な部品を対象としてこの型のシステムが多く導入されるようになった。

(5) 工具マガジン交換機能と夜間無人運転機能の付加

このセル型フレキシブル生産システムの開発に続いて、1976年頃に規模としてはそれほど大きくなくても、注目すべき新機能を持った二つのシステムが開発された。一つは 図-4 に示す加工システムで工具を納めておく工具マガジン自体を自動交換できるようにしたことである。一つのシステムで多様な加工を行おうとすると自然と使用工具数が多くなってくるが、この工具マガジン交換機能は使用工具数の制約をはずしたことに意味がある。

他の一つは 図-5 に示すように一台のマシーニングセンタにパレットを貯えておくパレットステーションをつけ、また制御装置に機械の運転と加工状態を監視する機能を付与して、夜間の2シフトの無人運転を可能にした世界でも初めての画期的なシステム³⁾が開発されたことである。これにより人の労働と機械の運転とが切り離され、システムの稼働率が飛躍的に向上させる素地ができた。

(6) 大規模フレキシブル生産システム

以上のような技術的進歩によって、1980年末から1981年にかけて大規模なフレキシブル生産システムが相ついで設置されるようになり、また夜間無人運転も単一の機械だけでなく、複数の機械からなるシステム全体について実施できるようになってきた。その一つは 図-6 に示すように 30 台近くの数値制御工作機械、その間を送る複合ループ型の搬送ライン、搬送用カート、自動倉庫よりなるもので、それを一つの中央処理計算機で制御するフレキシブル生産工場⁴⁾として

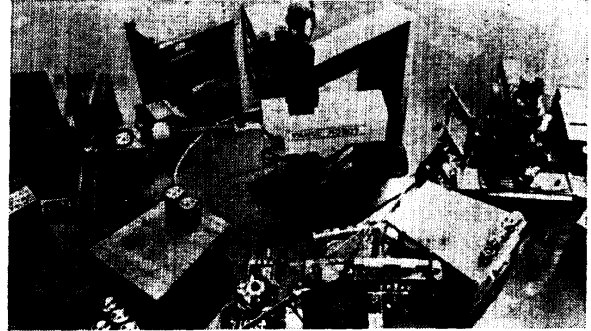


図-3 ロボットを持つ加工セル

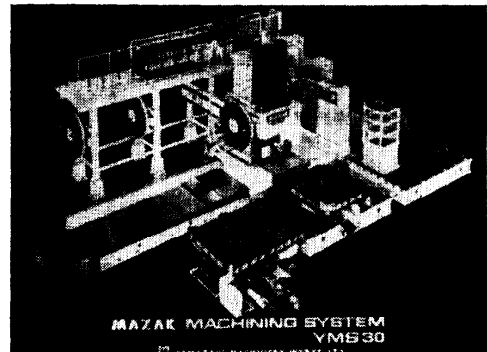


図-4 工具マガジンの自動交換

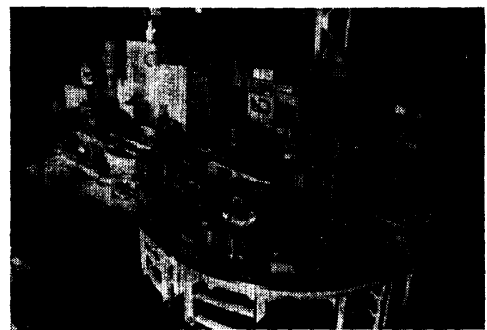


図-5 マシーニングセンタの夜間無人運転システム

実現した。したがって、これまで初期にはスポット的なフレキシブル生産セルであったものが、次にはライン化し、ここに至って面的な広がりを持つようになったといえる。このシステムの一部では完全な無人運転が可能となるような機能を持ち、まだまだ完全に無人運転が行えない部分についてはモニタテレビをおき、集中監視を行うようにしている。ほかのシステムで

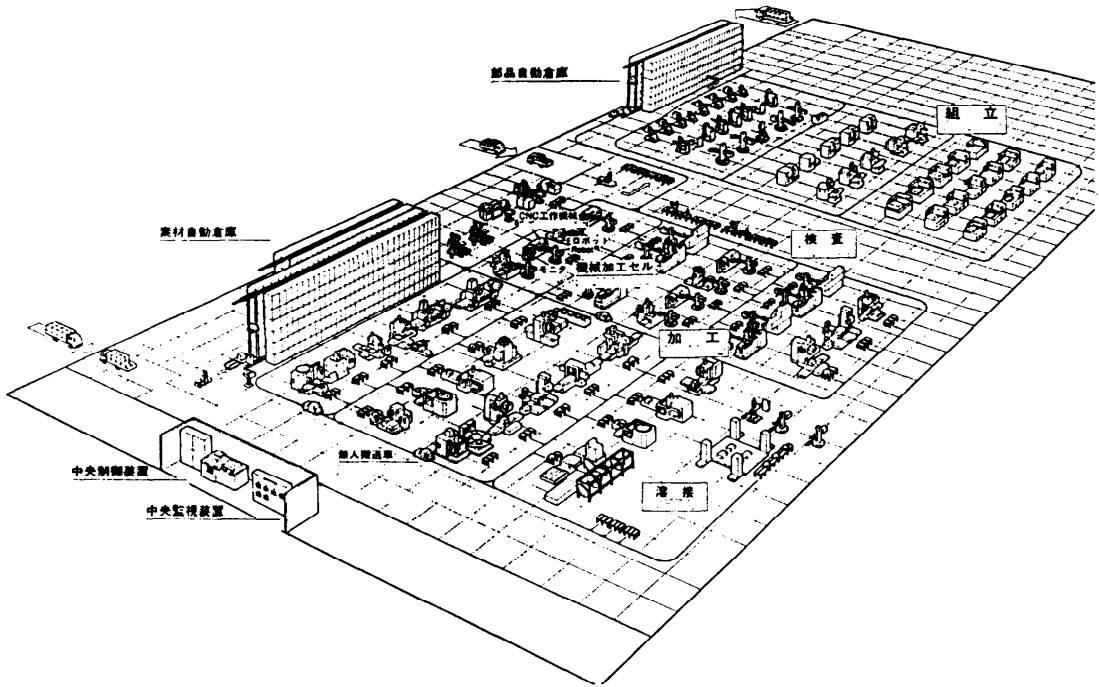


図-6 複合ループ型のフレキシブル生産システム

は、素材をパレットに自動的に着脱できるオートパレタイジングの設備を開発し、省人化とパレットステーションの面積を削減しているものもある。

3. フレキシブル生産システムの計画と構成

(1) システムの計画

これまでいろいろなタイプのフレキシブル生産システムを紹介したが、一つのシステムですべての種類の部品を加工することはできない。むしろ、フレキシブル生産システムのもっとも重要な課題は、計画にあたって加工の多様性をどの範囲に限定し、効率の良いシステムを作り上げていくにあるとよいであろう。そのためには、まず加工すべき部品設計の標準化を計ること、類以部品ごとに類別するグループテクノロジー³⁾の手法を使って、部品をグループ化し、対象部品を選定すること、各グループにつき加工方法、加工技術情報を検討することである。つぎに一つのシステムでカバーしようとする各部品グループのロットサイズ、全生産量、加工手順、加工精度、各工程の加工時間などの分析から、システム内の工作機械の候補の種類と数、必要工具数の案がいくつか考えられてくる。それと同時に部品素材の工作機械への取付方法、取付

具、その搬送方法、搬送装置も検討し、場所的な制約、将来の変更、拡張などの考慮からシステム構成についての複数の案が立てられるであろう。

(2) システムの機能

フレキシブル生産システムとしてできるだけ効率良く多様な部品加工を自動的に行うためには、次のようないくつかの機能を付与しておかなくてはならない。すなわち、1) 工具あるいは工作物の運動の数値制御機能、2) 工具自動交換機能、3) 工具自動搬送機能、4) 部品素材自動交換機能、5) 部品素材自動搬送機能、6) 部品素材自動着脱機能、7) 工具寿命監視機能などが必要であろう。ただ上の一つ一つの機能にしてもまた対象により実現の方法は変わってくる。たとえば部品素材搬送装置としてはベルトコンベア型のもの、床に電線を敷き電機的にカートを誘導するもの、レールを敷きその上をカートを走らせるものなどがあり、床面積の有効利用、拡張や変更の自由、カートの全重量、位置ぎめ精度などから、その時に応じもっとも適したものを選択すればよい。

(3) システムの分類

システムの全体の配置、レイアウトについては基本的に図-7 にあげるような5種類のタイプがあり、

システムの規模、加工の多様性、工作物の大きさ、加工の特色によってそれぞれに適合したものがある。すなわちセル型システムは小型で、比較的少ない工程で加工の終了する単純な部品加工に適し、単一ライン型システムは類似度が高く、加工の順序が良く似たもの、あるいは一方所での加工時間の長い加工に適し、フレキシビリティのある専門ライン化することが可能で、自然高い生産性を得ることができる。また加工を多様化のためラインを分岐しなければならない場合には複合ライン型システムをとる。ライン型システムではパレットあるいは部品素材を余り往復させることはできず、したがって工数の多いもの、加工シーケンスの余り異なるものはこの型には適しない。これに対しループ型システムでは機械間を巡回する自由度が高く、また工作機械台数を増やすことが可能で、加工工数の多いもの、形状の異なる多様な部品群の加工に適している。しかし規模が大きくなれば、スケジューリングは難しくなり、また最適化したとしても各機械の有効利用率は単純なものに比べて低くなるのは止むを得ない。

(4) システムの構成

システムの計画では、部品加工の多様性や加工工数、ロット数、生産量を考え、工作機械の種類と台数、システムのタイプ、備えるべき機能、システム内の工作機械、その他の設備の配置の案を決め、複雑な場合にはシミュレーションの技法を使って、システムの構成、パレット数、バッファ容量、搬送カート台数などの最適化を計る。ハードウェアがこのようにして決定すれば、次にそれを制御するための計算機システムが決定する。ある程度の規模の計算機制御システムでは図-8のような構成をしており、中央計算機は、バスを介して各工作機械の数値制御計算機、シーケンス制御計算機、その他の設備のシーケンス制御計算機、インタフェースと結合している。中央収理計算機は、各サブシステムの運転モード制御、運転制御、シーケンス制御を行い、監視パネル、作業指示パネルへの表示情報の伝達、部品素材着脱ステーション、工具室、工作機械操作部からの入力データの受信とそれによる工程管理を行っている。またこの計算機はオフラインあるいはオンラインでスケジューリング、数値制御のプログラミング業務実績の集計も行うのが普通である。

4. 機械加工無人化のための機能

工作機械の運転、素材の搬送、着脱、工具の交換などは自動化され、人の肉体的作業はほとんどなくなっ

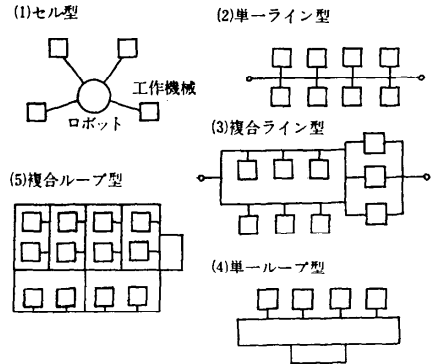


図-7 フレキシブル生産システムの種類

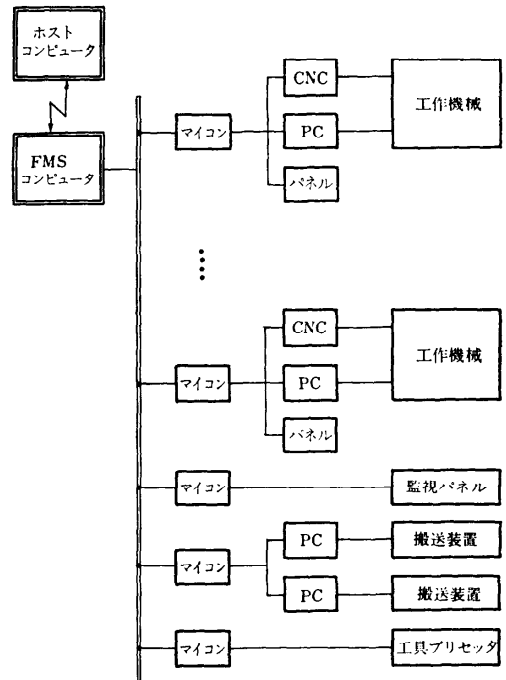


図-8 フレキシブル生産システムの計算機制御システムの構成

たが、工作機械を完全な無人状態で運転するためには、人がこれまで加工作業中に果してきた知能的な機能、すなわち加工状態、加工部品の加工精度、機械の運転状態を絶えず監視し、不具合が生じたと判断した場合には適切な処置をとるようにしておかなければならない。

加工状態の監視のためには、現在は工作機械の主軸モータの電機子電流がほぼ切削トルクに比例していることを利用し、その平均値を監視して大きな異常状態

の検出⁹⁾を行っている。すなわち図-9のようにある定まった作業に対しあらかじめ正常状態の加工時の電流値パターンとその許容範囲を叙示しており、実測値がその範囲を越えることにより異常を検出し、工作機械に停止信号を送るという処置をとっている。ただこの方法は工具の小さな欠損や小径の工具の欠損などを検出できないという欠点があり、電流変動の分析⁶⁾、あるいは接触式プローブとの併用などにより異常検出を行おうと試みられている。

部品の加工精度の監視とその制御には図-10に示すような二つの方式、加工寸法をインプロセスがポストプロセスで直接測定し、その結果を運動系にフィードバックして制御する方式と、加工誤差を生む原因である工作機械—工具—工作物系の幾何誤差、熱変形、弾性変形について数学モデルを構成し、工作機械の座標位置、切削抵抗、機械系の主要位置の温度などを入力として加工誤差を推定し、数値制御命令を修正する方式⁷⁾とが考えられている。ただこれらの方法は現在研究開発中で、実用的にはわずかに工具の代りに接触式プローブを取り付け、工作機械の座標値より平面位置、穴径、穴位置を測定しているだけで、多くの無人運転システムでは経験的な加工条件設定で加工精度を得ようとしている。

工作機械の運転はシーケンス制御で行われているので、図-11に示すようにあらかじめそのシーケンス信号の時間関係を知っておけば、実際の信号との時間比較により運転状態の異常を検出でき、また故障個所の同定、機械停止などの処理をとることができる⁸⁾。工作機械の各機械部分は信頼性が非常に高く、所定の定期検査だけで十分で、特別な配慮を扱う必要はない。

現在の機械加工の無人化で大きな障害となっているのは銅や軟質金属の旋削、穴あけなどの加工時に連続して排出してくる切くずの検知とその排除の方法である。これに対しては適切な切くず切断方式の考究に待つか、連続した切くずを検出し、切削を一時中断するという方法をとるしかないが、いずれにしても解決には時間を必要としている。

5. フレキシブル生産システムの将来

フレキシブル生産システムの導入、とくにその夜間無人運転の実現は、生産設備の利用時間を飛躍的に上げ、これによって多品種小量生産の省人化、生産性の向上、コストダウン、生産のリードタイムの減少、設備の償却期間の短縮など大きな成果をあげ、今日の機

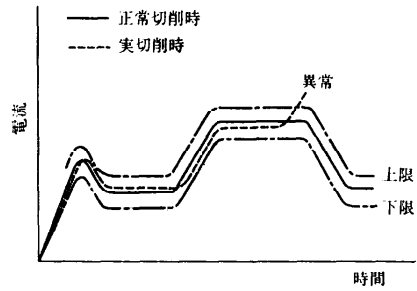


図-9 モータ電流の監視による異常切削状態の検出

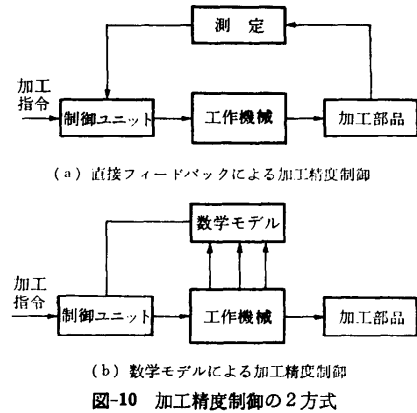


図-10 加工精度制御の2方式



図-11 機械のシーケンス制御信号の監視

械生産に多大のインパクトを与えた。

このような効果から考えて、これからもフレキシブル生産システムは数量的にも増大するとともに、その規模の拡大、システムの充実、技術的充実、応用範囲の拡大、多分野への波及などが見られるものと予測される。

(1) システムの充実

システムの充実としてまず望まれるのはシステムの設計原理の確立であろう。フレキシブル生産システムとして効率向上を考えるならば、部品設計の設計変更

を求めることになり、設計の自由をある意味では拘束することになる。この設計とのトレードオフを考慮したシステムの計画、設計の方策を作りあげていかなければならない。またフレキシブル生産システムは工場全体の生産システムの下位システムとしてその中に組み込まれ、上位の生産管理部門、あるいは関連部門である倉庫、工具室と密接に情報交換しながらシステムの運営を進めていく管理プログラムの充実も望まれる。現在のシステムでは各工作機械を運転するために設計図面より数値制御自動プログラミングシステムを使って大変手間をかけて数値制御情報を生成している。したがって今後は、技術的な上位システム、すなわち設計、生産準備部門より容易に生産技術情報が得られるよう、とくに CAD/CAM システムとフレキシブル生産システムとの統合化が急務の課題であろう。システムハードウェアとしては、より効果的な工具搬送装置、部品素材の自動着脱装置などの開発も求められている。

(2) 技術的充実

技術的充実としては前にも述べたような加工の監視技術の進歩による工具欠損、切くず状態、加工表面状態の検出、識別とその制御、加工精度の監視とその制御方式の実用化、また機械故障のより効果的な検出方法の開発、あるいはその予知、予防技術の進歩などの課題がある。

(3) 適用範囲の拡大

以上のようなシステムの充実、技術的充実により、フレキシブル生産システムは機械加工の他の分野へ適用範囲を広げていくものと期待される。とくに取付具の工夫により従来困難とされていた短時間加工部品の多数同時加工や、旋削、マシーニングセンタ加工だけでなく研削、歯切りなど他の加工法の取り入れ、また大量生産方式への応用、たとえばフレキシブルなトランスファラインの開発、試作部門や生産準備部門へのフレキシブル生産システムの導入とそれによる新製品開発速度の向上と生産準備時間の短縮、さらに補給部品加工用フレキシブル生産システムの設置による旧生産設備の廃却など多くの適用分野がある。

(4) 他の分野への波及

フレキシブル生産システムの考え方は機械加工の分野だけでなく、当然他の生産分野へも波及していくものと考えられる。とくに最近の工業用ロボットの目ざましい発展はスポット溶接、アーク溶接、塗装、プレス加工、組立、検査などのフレキシブル生産システム

化を促進することは間違いないであろう。事実、組立の分野では、自動車用計器の組立で1秒タクト、ロット交換も1秒、250種類以上の異なる計器を一つの組立ラインで組んでいる例もあり、またロボットによるオーディオ部品のフレキシブルな組立ラインでは省人化だけでなく、組立品の信頼性が人手による組立品に比べ一桁向上したという結果もでている。ただ現在の工業用ロボットの作業指示は主として人手による教示によるものが多く、CAD システムにもとづくロボットのプログラミングシステムの開発が求められるようになるであろう。

6. 結 言

以上、フレキシブル生産システムについて、とくにその発展経過、計画と設計の場合の問題点、無人化運転技術、その将来の発展動向について機械工学の立場から解説した。今後フレキシブル生産システムとそれが拡大したフレキシブルな工場自動化 (FFA) は計算機利用の一つの大きな分野として発展していくであろう。この分野での計算機利用、情報処理の特色は他の分野よりもコスト意識が高いこと、一品多様生産であること、また情報処理といっても必ず生産の固有技術と結びついていることである。その意味でフレキシブル生産システムやフレキシブルな工場自動化の将来の発展は情報処理技術者と生産技術者の密接な共同作業に待つところが大きい。

参 考 文 献

- 1) 相原健一, 和泉忠美, 木村 昭: 群管理旋盤およびそのシステムに, 日本機械学会誌 72, p. 1051 (昭和 44 年).
- 2) 鈴木博一, 菅田 稔: 適応制御マシーニングによるトランスファセンタ, 機械技術, 21, p. 59, (昭和 48 年).
- 3) 馬嶋武彦: マシーニングセンタの無人運転技術, 機械の研究, 32, 1, p. 45 (昭和 55 年).
- 4) Inaba, S.: An Experience and Effect of FMS in Machining Factory, Proc. IFAC Triennial World Congress, CS-132 (1981).
- 5) Opitz, H. (鈴木, 三宅訳): グループテクノロジー, 日本能率協会 (1969).
- 6) Matsushima, K., Bertok, P. and Sata, T.: In-process Detection of Tool Breakage by Monitoring the Spindle Motor Current of a Machine Tool, ASME Winter Ann. Meeting (1982).
- 7) 竹内芳美, 坂本正央, 佐田登志夫: NC 旋盤の工具熱変位補正による加工精度の向上, 精密機械 11, p. 1392, 46 (昭和 55 年).
- 8) 佐田登志夫編: 自動化辞典, 産業調査会 (1982). (昭和 57 年 11 月 2 日受付)

