生産機械制御の基礎

The Basic of Control for Industrial Machine

小島 利夫*

1. はじめに

生産機械は、生産する品物のロットサイズに応じて三つに分けることができる。

ロットサイズが小さく人が操作する汎用機械、ロットサイズが中位の数値制御機械、それに、ロットサイズがきわめて大きいトランスファマシンや専用機械である。

これらの機械の中で、電子装置によって制御される主要な機械は、数値制御機械である。

ここでは、数値制御の技術について、その性能面から解説してみたいと思う。

数値制御は、一般に NC (Numerical Control) の名称が用いられており、NC 化した工作機械を NC 工作機械、マイクロプロセッサと半導体メモリを用いたコンピュータベースの NC を CNC (Computer NC) とそれぞれ呼んでいる。

2. NC 工作機械

Fig. 1 に NC 工作機械の構成概念図を示す。

CNC によって、工作機械などの制御対象を制御する場合、CNC から工作機械に送り出される信号には、二つの種類がある。一つは、工作機械の制御軸を駆動するサーボモータを制御するためのサーボ信号であり、あとの一つは、クーラントポンプや自動工具交換装置 (ATC; Automatic Tool Changer), 自動パレット交換装置 (APC; Automatic Palette Changer) などを制御する

M, S, T, B 機能のためのデジタル信号である。

このうち、M, S, T, B 機能のためのデジタル信号は、CNC システムに含まれる PMC (Programmable Machine Controller) と呼ばれる、CNC と工作機械間のインタフェースをプログラムする機能をもった回路によって必要なパターンのシーケンス信号をつくり出し、強電盤を経て工作機械の工具交換装置などを制御したりしている。

3. CNC

NC 工作機械が、絶えず追及している機械加工についての目標は、高速・高精度加工である。この目標にむかって、工作機械をはじめ、CNC、サーボモータ、スピンドルモータ、工具など、それぞれの部分について技術開発が続けられている。

Fig.1 NC Machine tool

*Toshio Kojima
ファナック/FANUC LTD

Fig.2 CNC with function modules and multi-master bus

高速・高精度加工を実現するための CNC システムに必要な機能を挙げると、次のようになる。

- ①送り速度の高速化
- ②サブミクロン制御
- ③連続する微小ブロックの高速送り
- ④強力な補間機能
- ⑤高度な送り速度制御と自動加減速制御
- ⑥デジタルサーボ制御による高応答性と高精度化
- ⑦高速 PMC

高速・高精度加工用 CNC には、高速演算処理可能なアーキテクチャが必要である。高速 CNC 機能を実現した 32ビットマイクロプロセッサをはじめ、現代制御理論を適用して高速・高精度のサーボ系を実現したデジタルサーボ用高速マイクロプロセッサ、ラダー言語処理のための PMC 専用プロセッサなど、それぞれの機能を発揮するために最適な高速マイクロプロセッサを採用し、各 CPU 相互間の高速データ転送を可能にするために 32ビット幅のマルチマスタバスを採用した CNC の構成を Fig.2に、その外観を Fig.3に示す。

この CNC は、高速の CNC 機能のほか、強力な補間機能、高速度加工を実現するデジタルサーボシステム、高速 PMC 機能、エスキパートシステムを導入した故障診断ガイダンスなどをもっている。

この CNC は、マルチマスタバスを使用しているの、必要に応じて必要な箇所にマイクロプロセッサを配置できるほか、自由に追加もできるため、要求される CNC システムの性能に最適なハードウェアを構成することができる。たとえば、連続した微小移動ブロックを高速に解読して高速加工を行うことが要求される場合には、マイクロプロセッサや演算専用のプロセッサを追加することにより CNC の処理能力が向上する。

サーボモータの制御には、ソフトウェアサーボ技術を

Fig.3 CNC (Series 15)

駆使できるように、独立した高速シグナルプロセッサが使用されている。

ATCやAPCなどの周辺機器におけるシーケンス動作の制御には、ラダー言語を高速で処理するために、論理演算を高速に実行できる PMC 専用プロセッサが使用されている。

3.1 高速加工のための機能

複雑な形状をもった部品を加工するための加工プログラムは、微小な移動量のブロックが連続して使用されることが多い。

したがって、複雑な形状の部品を高速で加工するためには、連続する微小移動ブロックをとぎれなく処理して高速加工することができるようにするか、加工目的にあった補間機能を CNC に持たせるかのいずれかの方法によることになる。

3.1.1 連続する微小移動ブロックの高速加工

微小な移動量のブロックが連続しているプログラム指令をいかに高速でとぎれなく処理できるかは、CNC の重要な性能の一つであり、この評価指数として、1ブロックの指令を読み取り、実行形式のデータを作成するための時間であるブロックプロセッシングタイム (BPT) が用いられる。

CNC の内部では、Fig.4のように、最初のブロック N 1 の補間を行いながら、次のブロック N 2 の指令を読み取り、補間に都合のよい実行形式のデータを作成している。

Fig.4 Break of pulse distribution

Fig.4 (a) のように、ブロック N 1 の補間が終わるまでに、次のブロック N 2 の実行形式のデータが作成されていれば、N 1 の補間に続いて、とぎれることなく N 2 の補間を始めることができる。この機能をバッファという。

これに対して、Fig. 4 (b) のように、N 1 の補間時間、すなわち移動時間よりもブロックプロセッシングタイムが長いと、N 2 の実行形式のデータが作成されるまで、N 2 の補間の開始を待たなければならず、補間がとぎれることになる。N 1 の移動時間は、移動量が小さいほど短く、また、送り速度が早いほど短くなるので、ブロックプロセッシングタイムが短いほど、微小な移動量の連続ブロックを高速で処理することができる。

3.1.1.1 マルチバッファ

移動指令をとぎれなくすぐに実行するために、補間をしながら最大15ブロック先までのバッファリングを行うもので、このマルチバッファ機能により、プログラムの一部分に微小移動量のブロックが連続する場合の、ブロックとブロックの間でのパルス分配のとぎれの防止ができる。

3.1.1.2 高速加工機能

微小な移動量のブロックが多数連続して指令されているプログラムを、連続して高速に実行するためには、マルチバッファだけでは不十分であり、さらにとぎれなく高速加工を行うためには、あらかじめ加工プログラム内の指令データを解釈し、実行形式のデータに変換してメモリに登録しておき、加工中は変換されたデータを読み出し実行する方が効果的である。これを高速加工機能と呼ぶが、CNC のメモリ内の加工プログラムを CNC 自身で実行形式に変換するため、変換中は非加工時間となる。

3.1.1.3 高速リモートバッファ

複雑な三次元加工のプログラムでは、微小な移動量のブロックが連続して指令され、プログラムを記憶するためのメモリは膨大なものとなる。

そのため、ホストコンピュータから移動指令を直接指令して運転できる DNC 運転機能(リモートバッファ)が必要となる。高速リモートバッファには二つの形式がある。一つは、高速加工を行うために必要であった実行形式の変換作業を、あらかじめホストコンピュータで行っておき、作成された実行形式のデータを CNC へ転送するバイナリデータ入力形式のものであり、もう一つは、CNC 内部にプログラムの解釈処理を助けるサブ CPU を設けておき、NC 文で入力された移動指令を CNC 内部で実行形式に変換するものである。

どちらの場合も高速加工機能での変換時間を考えないですむので、非加工時間の短縮にもつながる。

ここで紹介した CNC では、1 mm ブロックの連続指

Fig.5 Simultaneous 3-axis machining of a Noh mask

令で、NC 文入力の場合 15 m/min、バイナリデータ入力の場合 30 m/min の処理速度となり、これはブロックプロセッシングタイムで表わすと、NC 文入力で 4 msec/ブロック、バイナリデータ入力で 2 msec/ブロックとなる。プログラム指令をとぎれなく実行するためには、ホストコンピュータから CNC に高速でプログラムを転送する必要があり、そのために 86,400 bit/sec の転送が可能なりモートバッファインタフェースが用いられる。Fig.5に、0.2mm のブロックの連続指令を 3 m/min の速度で、能面形状を同時 3 軸加工している様子を示す。

3.1.2 補間機能

加工形状に合った補間機能を CNC に付加することにより、加工形状を微小なブロックで近似することなく、

Fig.6 Spline interpolation

Fig.7 Involute interpolation

複雑な部品の加工を簡単な加工プログラムによって高速に加工することができる。

例えば、Fig.6に示すスプライン補間では、点列を指令すると、各点列を滑らかに結ぶ3次元のスプライン曲線を求め、点列間を曲線で補間することができるため、微小な円弧や直線で点列を接続する必要がなくなり、高速加工ができる。

そのほか、Fig.7に示すインポリュート補間をはじめ、旋盤でのX軸とC軸による正面切欠やカム研削に適した極座標補間、円筒上の溝加工に適した円筒補間、工具研削に適した指数関数補間、SIN 曲線補間なども用いられている。

3.2 高精度加工のための機能

3.2.1 サブミクロン制御

CNCの制御精度を決める基本パラメータの一つに、最小移動単位と検出単位がある。現在、これらの標準的な値は0.001mmであるが、ここで紹介したCNCではデジタルサーボと10万パルス/回転のパルスエンコーダを組合せることにより、0.1 μ mの分解能で、切削送り・早送り共に24m/min、1 μ mの分解能で切削送り、早送り共に240m/minの高速送りを実現している。

3.2.2 高速加工時の形状誤差低減のための機能

高速送りになるほど、コーナ加工部のだれや、Fig.8のような円弧切削の際の円弧の縮みなどが大きくなる。これは、サーボモータや加減速制御回路のもっている遅れ要素のために、指令された通路と実際の工具径路がずれるためである。この影響による形状誤差を低減するために、つぎのような機能が適用されている。

3.2.2.1 加減速制御

形状誤差を減らす方法に補間後直線形加減速がある。この方法では、補間後指数関数形加減速に比べて加減速制御に起因する誤差が1/12に改善されるため、高速加工に適した加減速方式である。

補間後直線形加減速の良い点に加えて、加減速時のショックをやわらげ、形状誤差をより少なくすることができるFig.9のようなベル形加減速も用いられる。

補間前加減速は、補間する接線方向の速度に加減速をかけるため、加減速に起因する誤差を零にすることができる。また、先読み補間前加減速では、減速すべき箇所をCNCが自動的に判断するので、プログラムの負担を軽減することができる。

3.2.2.2 デジタルサーボシステムによる

フィードフォワード制御

サーボの追従誤差、すなわち遅れによる形状誤差を小さくするためには、位置ループゲインを高くすればよいが、あまり高くするとサーボ系が不安定になるので限界

Fig.8 The error in the radius direction when an arc is machined

Fig.9 Bell type acceleration/deceleration

Fig.10 Feed forward control

がある。そこで、高速シグナルプロセッサを用いたデジタルサーボシステムにより、Fig.10に示すフィードフォワード制御を実現することで、等価的に位置ループゲインを高くすることができ、サーボの追従誤差を低減することができる。

また、バックラッシュ加速機能により、方向反転時の形状突起を少なくしたり、オーバシュート防止機能により1パルス送りでの位置決め精度の向上など、従来のアナログサーボでは比較的困難であった制御機能が、ソフトウェアにより簡単に付加することができ、それぞれの

工作機械に最適な制御を行うことができる。

3.3 高能率加工のための機能

加工能率を高めるためには、全加工時間を短縮する必要があるが、そのためには、高速送りでの加工を行い、実加工時間を短縮するとともに、工具交換や主軸の起動・停止、クーラントの制御などの実際に工具が移動しない非加工時間も短縮する必要がある。このような高能率加工のためのいろいろな技術をここで紹介する。

3.3.1 高速・高性能 PMC

最近の NC 工作機械の ATC の回転マガジンやワーク供給装置などは、油圧源を使用せず、PMC により制御されるサーボモータを使用するものが多い。

また、CNC と PNC との間に大きなウィンドウを持たせており、工作機械ごとのオリジナルな機能を簡単に組み込めるようになっている。ウィンドウを通して現在位置の読み取り、工具データの読み取りと書込み、カスタムマクロ変数や CNC パラメータの読み取りや書き込みなど、多くのデータ処理を行うことができる。

PMC のラダー言語の高速処理を行う PMC 専用のプロセッサを用いて、基本命令を従来の10倍の速度の0.2 μsec /ステップで実行できるほか、PASCAL (パスカル) 言語を用いてプログラミングも併用でき、工作機械の周辺機器のより高度で応答性の良い制御を行うことができる。

3.3.2 デジタルスピンドルシステム

高速マイクロプロセッサを採用したデジタルスピンドルシステムによって、高速で、速度変動の少ない主軸制御を実現することができる。

フローティングタッパを使わずに、高速・高精度のタッピングができるリジッドタッパ機能、主軸を定位置で停止させるオリエンテーション機能、送りモータを主軸につながらなくても主軸を任意の角度に位置決めできる主軸位置決め機能なども高能率加工の手段として用いられる。

3.3.3 複合化

マシニングセンタは、フライス加工で使用する工具を自動交換することにより、長時間にわたり複雑な加工を効率良く行うことができるよう考えられたものであるが、最近では旋盤にもこのような傾向が見られ、二つの刃物によるバランスカットや正背面の同時加工をはじめ、外形穴あけや輪郭溝入れなど、従来後工程で行っていたものを、主軸制御 (C軸制御)、回転刃物などを使用して、同時に加工することができ、加工精度と加工効率の向上が図られている。

複合旋盤の一例を Fig.11 に紹介する。

3.4 システム化のための機能

CNC は、それ自身で高速・高精度・高能率加工のため

① 正面 (一次) と背面 (二次) の同時加工

② バランスカット

③ 2つのスピンドルでの長尺物の加工

Fig.11
4-axis NC
lathe

の特性を満たしていることのほか、無人で長時間運転を継続できることや、工場内の他の自動化機器との通信機能も必要なものである。

ここに、そのいくつかを紹介する。

3.4.1 工具管理機能

長時間の連続自動運転を行う場合には、多種類の加工を継続して行うために種類の異なった多くの工具を大容量 ATC に準備しておかなければならない。機械の稼働効率を高めるために複合化された機械が多くなると、この傾向はますます強くなる。これに対処するために、CNC のメモリは大きなものとなる。

つぎに、工具の品質保障機能のうち、寿命管理については、使用回数、使用時間、切削距離のいずれかが一般に用いられている。また、切削の状態を評価して寿命を判断する方法も用いられている。

万一、工具が破損した場合の対応として、触覚センサによる破損検出、切削音の検出、主軸負荷電流による検出などの方法が実用化している。

Fig.12 Trouble diagnosis guidance using expert system

3.4.2 通信機能

生産計画の立案から在庫状況の確認などはもとより、工場全体をコンピュータを使用して管理する CIM（コンピュータによる統合生産）が注目されている。

FA 化された生産工場の CNC 群は、光ファイバケーブルなどによりセルコントローラに接続されており、セルコントローラは MAP（工場自動化のための相互通信手段）などを介して、ホストコンピュータとの通信を行う。

CNC とセルコントローラの間には、加工プログラムのダウンロードをはじめ、加工実績時間、加工部品数、工具データなどの情報が送られ、ワークのみならず、工具ステーションと工具の自動搬送をも行うことができる。

材料の搬入から製品の出荷まで、工作機械を最大限に有効活用し、効率の良い生産スケジュールで作業を行うことが可能である。

3.5 故障診断ガイダンス

万一、不具合が発生した場合に、Fig.12に示すように、CNC に内蔵されているエキスパートシステムが専門家になりかわり、故障箇所を探索するものが故障診断システムである。

機械のさまざまな故障の原因に対する究明と、その処置方法について熟知している専門家の知識を、CNC 内部に知識データベースとして蓄えておき、不具合発生の際には CNC に内蔵された推論エンジンが専門家が行うのと同じプロセスで、機械の故障診断を行う。

知識データは簡単な形式で記述することができるほか、グラフィック表示をはじめ、CNC の内部情報や機械側のスイッチの状態も読み取ることができるので、それぞれの機械に適した故障診断エキスパートシステムを容易に構築することができる。

4. おわりに

これからの CNC は、どのようなものになるのであろうか。予測はきわめて困難であるが、一つの姿として、次のようなものを考えている。

取り扱う情報量のサイズの拡大とそれらの情報を処理する速度の向上の傾向は、今後も続くことはもとよりであるが、これをベースにして構成し、多くの知識データベースを備えた、効率のよい本格的な AI-CNC（Artificial Interigent CNC）が標準 CNC として使われるようになるものと思われる。

また同時に、これら AI-CNC に格納する高度なソフトウェアは、AI コンピュータを駆使した高生産性ソフトウェア開発システムを用いて、従来より短時間で効率よく開発されることになると思う。

このような高度な知識をもった AI-CNC の出現は、CNC の適用技術を一層容易なものとし、その適用範囲はますます拡大されるものと考えている。