三次元模型加工機*

荒木 洋** 石井久夫**

3 dimensional Model Profiler / Hiroshi ARAKI and Hisao ISHII

Key words 3 dimensional model profiler, high speed cutting, data transmission, direct NC, feed forward control

1. はじめに

工業生産現場への NC 工作機械の普及は、少量生産品向けの加工セル等常識化している。それに対し、大量生産に不可欠な金型の製作については、単品生産で複雑な形状が多いため、従来手作業に頼っていたところか、コスト低減の意欲は手作業を例外なく排除しようとしている。幸いにも、メモリーとプログラム作成コストの低下は従来手作業でしか仕上げ得なかった複雑な曲面も NC プログラムで表現する可能性を大きくした。この結果、いままで人間の目と手で加工されていた自由曲面を含む金型か、倣いや自動プログラム発生機で作られた長大なプログラムテープを基に NC 加工で製作されている。

2. 三次元模型加工機の必要性

一般に金型の製造個数は少量である。多くは、1 個限りである。その加工を NC 工作機械で行う場合、一般部品のように試切削を行いテハノクをしていては、完成品のコストは非常に高いものになってしまう。それだけでなく、1 回たけても長時間を要する加工を何回も繰り返すのは効率が悪い。

試切削でテハノクするのは、細部形状・相互位置等ほとんど NC プログラム上の問題である。

すなわち、NC プログラム単位で完全なチェノクかできていれば、機上での試切削は不要であり、効率の良い加工かてきる。

さて、NC プログラムのチェノクの方法であるか、

文法ミスやテータエラー等はソフトウェア上で簡単に実行できる。問題となるのは、形状の誤りである。図面その他の指示の解釈が違っていたり、指示自体か所要形状と相違していたりしたままプログラムか作成された場合である。この場合、そのプログラムで加工した結果得られる形状を提示して、確認する以外に方法かない。

従来この目的のために、クラフィノクティスプレイや XY プロノタ上での二次元描画像が使われてきた。しかし、二次元画像では、少し複雑な形状になると詳細か判別し難く、それを補うためには多数枚の画像を見比へる必要かある。

一目見て所要形状とおりにあるかどうかの判定をするには、仕上がり形状と同じ形状を三次元で提示するのかが一番確実である。

この判定のために使用する模型を簡単に加工するのが、三次元模型加工機である。

模型であり、形状か判別できればよいので、被加工材には、切削性の良いワノクス等を用いる。たたし、細部形状か必要な場合には、軽金属(アルミニウム等)の加工も必要である。

このような性能を備えた三次元模型加工機は、単にプログラムチェノクのための模型の製作たけてなく、計算機処理等から得られた三次元形状のプロノタとしても利用できる。

いすれにしても、従来二次元画像としてしか提示できなかった三次元情報を即座に立体像で提示することを可能にするものである。

* 原稿受付 昭和 63 年 1 月 13 日

** ファナノク(株) (日野市旭ヶ丘 3-5-1)

3. 三次元模型加工機の技術

三次元模型加工機の目的は、希望する形状を容易に得ることにある。このためには、(1) 実加工で使用するデータをそのまま使って、(2) 簡単な設定・操作で、(3) 早く、(4) 実加工と同じ形状加工が、可能でなければならない。

これらの目的を実現するための技術課題は、

- ・主軸速度の高速化
- ・三次元曲面切削送りの高速化
- ・高速切削時の加工形状精度確保

という、工作機械一般での今日的課題に集約される。

3.1 高速主軸

曲面切削で一般的なボールエンドミルでの切削を考えてみよう。 n ：刃数、 f ：切削送り速度、 s ：主軸速度とすると、1 刃 1 回転当たりの送り量 v は、

$$v = \frac{f}{n \cdot s}$$

となる。すなわち、2 枚刃のボールエンドミルを使った場合、切削送り速度 5 m/min とすれば、主軸速度が 5 000 min⁻¹ であったとしても、1 刃 1 回転当たりの送り量は 0.5 mm になってしまう。これでは、例えば平均長さ 1 mm のブロックで作成されているプログラムに対する仕上がり形状としては、荒さの点で不十分である。

このため、主軸速度は、切削送り速度に比例して十分に高速であることが必要である。

但し、高速側でも被削材・切削工具の点から限界がある。ワックスのような被削性の良いモデル用材料では、切削速度が速くても切削は可能であるが、切削時の発熱のため材料の部分的な溶解が発生する。また、細部の再現性を良くするため軽金属を被削材とした場合、高切削速度に十分耐える工具材種が存在しない。研削工具を使用すれば高切削速度は可能であるが、加工能率の点から切削加工を選択するとすれば、現状では 20 000 min⁻¹ 程度が上限となる。

逆に、20 000 min⁻¹ 程度の主軸速度があれば、前の条件でも 1 刃 1 回転当たりの送り量は 0.125 mm となり仕上がりとしても許容出来る程度となる。

3.2 高速切削速度

切削速度の高速化の際に制約になるのは、(1) NC プログラムの指令値から実際の移動量を求める NC 演算処理速度、(2) サーボ系の遅れで生じる加工形状誤差がある。

3.2.1 NC 演算処理速度

ここで問題となるのは、微小長さのブロックが連続

した場合の演算処理速度である。長い直線のブロックで 10 m/min の切削送り速度を得るのは難しいことではない。しかし、同じ直線であっても、短い長さ（例えば、1 mm）のブロックの連続になっていると 10 m/min の切削速度を得るのは難しい。それは、実時間内での NC 演算処理速度に限界があり、微小長さのブロックが連続すると、その移動中に次の演算処理を完了できないためである。

この対策として、あらかじめ演算処理を済ませたプログラムを作成してデータを与える方法がある。しかし、この方法では、加工中に送り速度を変化させたり手動介入することが出来ず、プログラムにも汎用性が乏しくなってしまう。

また、この演算処理を行うために、外部に専用プロセッサを用意することも考えられる。しかし、操作性やコストを考えると必ずしも得策とは考えられない。

結局、従来と同じ NC プログラムのフォーマットで速い切削送り速度を得るためには、NC 自身の NC 演算処理速度を高速化するのが最良である。

三次元模型加工機では、長さ 1 mm の連続するブロックでプログラムが作成されていても実際の切削送り速度として 15 m/min が得られる程度の NC 演算処理速度が必要である。

3.2.2 加工形状誤差

NC がいくら理論的に正確な位置を計算して指令していてもそれだけでは正確な形状は得られない。実際にワークや工具を移動させるサーボ系で遅れを生じるためである。直線の切削のみであれば、遅れが生じていても同じ線分上を進むので誤差は生じない。しかし、次の直線と角度を持ってつながっている場合、そのコーナー部で実際の工具通路と指令通路の間に誤差を生じる。

これは、サーボ系で発生するトルクが有限であることに起因する。発生トルクは有限であるので加減速時には多少なりとも時定数を必要とする。2 個の線分が角度をなして接している場合、その接点部では、各軸ごとに加減速の大きさに差異が生じる。この結果、工具通路はコーナ角のダレる方向への誤差を生じる。

この誤差は、送り速度の 2 乗に比例する。速度が遅い場合はほとんど問題にならない程度であるが、速くなるにつれて無視出来ない大きさになる。

この問題の解決のために、従来から移動系のイナーシャを減らす（軽量化）、駆動系のトルクを大きくする（高出力化）等の方法で時定数を小さくする努力がなされてきた。しかし、それらの方法では、時定数を完全にゼロにすることは出来ないで、一定の速度ま

では誤差が許容できても、それ以上の速度が必要になるとまた誤差の問題が生じていた。

ところで、この誤差量はその時の条件によりその量を計算することができる。すなわち、サーボ系の遅れによる影響分を、あらかじめ補正して指令することができる。これはフィードフォワード制御と呼ばれる方法である。

速い切削送り速度が要求される三次元模型加工機では欠くことの出来ない機能である。

3.3 高速データ転送

加工プログラムをすべて NC 内部のメモリーに記憶させておけば、加工の際には転送速度が問題になることはない。しかし、プログラム時の形状精度をよくするために 1 ブロック当たりの加工長さが短くなり、プログラムの長さは長くなる傾向にある。例えば、A4 サイズの平面を長さ 1 mm のブロックに分割して NC プログラムを作成した場合、そのテープ長は 5 000 m (≒ 2 M バイト) 程度になる。

このように長大なプログラムをメモリーに転送した上で加工するのでは効率が悪い。そこで、データを転送しながら加工する方法 (DNC 運転) が必要になる。

その場合、データ転送速度が遅いと得られる加工速度に制約を生じる。例えば、長さ 1 mm の連続するブロックのプログラムで切削送り速度 15 m/min を得ようとすると、85 k ボー (1 ブロック 31 文字として) 以上の転送速度が必要となる。

このような条件での加工を考えると、データ転送速度の高速化は三次元模型加工機には必須であると考えられる。

3.4 NC 機能

実加工と同じ NC プログラムで模型加工を行うためには、各種加工条件を変更するための NC 機能が必要不可欠になる。主軸速度・切削速度のオーバーライド、特定の M 機能 (補助機能)・S 機能 (主軸機能)・T 機能 (工具選択機能) のスキップ、ミラーイメージ・軸回転・スケーリング等が容易に設定できなければならない。

3.5 安全性

高速で加工を行うため、安全性には特に注意が必要である。

表 1 三次元模型加工機の仕様

移動量	400 mm (X 軸)×300 mm (Y 軸)×200 mm (Z 軸)
主軸電動機	出力 2 kW (15 min 定格)
主軸回転速度	200~20 000 min ⁻¹
切削送り速度	1~24 000 mm/min 1~15 000 mm/min ; 長さ 1 mm の連続したブロックの場合
同時制御軸数	3 軸 (X, Y, Z 軸)
最小設定単位	0.000 1 mm
CNC	FANUC SERIES 15-MA (32 bit マイクロプロセッサ使用)
デジタルサーボシステム (フィードフォワード制御を含む)	
リモートバッファ (転送速度: 86.4 k ボー)	
機械の大きさ	1 425 mm (幅)×1 200 mm (奥行)×1 545 mm (高さ)

表 2 加工データ例

a) プログラム	
作成方法	ディジタイジング
ディジタイジング範囲	200 mm (X)×130 mm (Y)×50 mm (Z)
方 向	-Y 方向の表面往復削い
ビックフィード	0.5 mm
ブロック間隔	最小 0.18 mm
テープ長	9 344 m (≒ 3.5 M バイト)
b) 加工条件	
被削材	アルミニウム鋳物 (AC 4 A-T 6)
工 具	ボールエンドミル (材種: 超硬 G 種/刃先: R 2×φ 4 mm)
切削液	水溶性切削油剤 W 1 種 1 号 (エマルジョン) 20 倍希釈
主軸速度	20 000 min ⁻¹
切削送り速度	3 000 mm/min
c)	
所要加工時間	3 分 33 秒

加工領域は完全に覆われている必要がある。また、加工中に誤ってドアが開閉されたら速やかに動作を停止する必要がある。

更に、プログラムミスによる過大切削やジグとの干渉が発生しないように、常にチェックしている必要がある。

4. 加 工 例

表 1 に示すような性能を持った三次元模型加工機 (FANUC AUTO PROFILER-MODEL A) で加工したデータを表 2 に示す。また図 1 にその外観を示す。

5. お わ り に

以上、三次元模型加工機の機能と必要な技術について述べた。これらの技術は、いずれも近年の NC 制御技術の進歩、特に高速化対応技術の進展により可能となったものである。NC 加工の普及によりその必要が生じた三次元模型加工機の実現には、より高度な NC が必要だったのである。この三次元模型加工機で実践

図1 三次元模型加工機

された技術はやがて NC 工作機械一般のものとなり、

模型加工機にはより一層の高速性が要求されるだろう。実物ではなく単なる模型を加工する機械でしかないのだが、精密な模型を実物より速く加工するという目的が、工作機械一般の進歩の方向と一致しているのである。模型加工機には、常に最先端の NC 工作機械技術が集約され続けなければ価値がないのである。

三次元模型加工機は市場に供給されてまだ日も浅いが、今後更に開発されなければならない技術として、(1) NC プログラムの完全シミュレーションのため、高主軸速度に対応する工具交換技術、(2) より高速な主軸を小型に実現する軸受・モータ技術、(3) 高切削速度に耐える工具技術、等が考えられる。これらの技術もそのまま、一般の工作機械で応用されるものである。

技術から見ると最新の高速 NC 工作機械であるが、三次元模型加工機は希望する形状を容易に得るための機械に過ぎない。NC プログラムのチェックを目的として作られたものではあるが、それだけではなく、広く三次元プロッタとして応用されることを切望する。

情報

振動解析による機械加工技術の向上についての報告書

財団法人工作機械技術振興財団（東京都千代田区鍛冶町 1-6-15、共同ビル、電話 03-252-2042）では標記の件についての報告書を発表した。

この研究は豊橋技術科学大学の星鉄太郎教授ほか 3 名によって昭和 60 年より 2 年にわたって研究してきたもので、初年度は主として切削加工において生じる振動の実用的診断法、工作機械据付方法と基礎の振動特性、工作機械の構造設計における計算機シミュレーションの応用、振動特性を考慮した薄肉工作物取付具の CAD システムについて研究が行われ、その成果を報告した。

2 年目の試験研究は研削加工における振動現象の解明に発展させ、それを抑制することによって加工精度と加工能率を向上させるために、加工現場、生産技術、設備設計などに実用するのに適した技術を開発しようとしたものである。大要、次のとおり。

第 1 年度の結論

- (1) 板状ないしは箱状の薄肉工作物のフライス加工において、有害な振動を発生せずに加工できる送り速度を高めるためには、工作物の振動特性を考慮して工作物保持具を設計することが有効である。
- (2) 動特性を考慮した設計の基本的な原理は、加工面のすべての位置における直接コンプライアンスを、目標とする送り速度に対応した許容基準値以下にすることであり、そのために示した 3 段階からなる基本手順に従うことが有効である。
- (3) 基本手順に従って、実在する工作物について加振実

験により工作物保持点を探索する方法と、図面段階の工作物について有限要素解析とモード合成解析により探索する方法を編み出し、実施例によりそれぞれ有効なことが確かめられた。

- (4) 多くの実施例を積み上げることににより、加工状況の種類に応じた許容基準値を定めることができる。

第 2 年度の結論

砥石の動的アンバランスにより生じる強制的な機械振動が、研削中のびびり振動に及ぼす影響を明らかにし、すでに明らかにされている砥石速度変動の方法とあわせて、びびり振動の発達を抑制する実用的な方法を示すことを目的として、理論的考察と研削実験による研究を行った。

その結果、砥石台・工作物センタ間に砥石の回転に伴って生じる相対振動振幅のドレッシング時と研削時における差が小さいほど、研削時に生じる周波数の高い振動が小さく研削時間の経過に伴って発達してびびり振動となる過程も緩慢となることがわかり、その差を小さくするために、3 段階の手順からなる砥石バランス調整の実用的指針が示された。

また、砥石速度変動は、本研究のように普通砥石を用いる場合には、変動幅を $\pm 10\%$ として矩形波状に周期 4 min で変動させるのが適当である。砥石の動的バランス調整と合わせて使用すれば、砥石のドレッシング寿命の延長にさらに効果的である。（服部 敏夫）