面補間による数値制御方式*

加藤 清 敬**

入口 健 二***

高橋 宣 行***

Numerical Control using Surface Driven Interpolation

Kiyotaka KATO, Kenji IRIGUCHI and Nobuyuki TAKAHASHI

As a conventional method, a numerical control inputs a large amount of NC data from CAM system, and interpolates it in order to machine sculptured surfaces. Recently, NCs with the function of NURBS interpolation have been developed. It seems that some problems are resolved using the technology. However, it is said that both methods have some essential problems, so it is hard for NC to transact these problems to machine sculptured surfaces with high quality. This paper discusses these problems from the viewpoint of relation between CAM and NC. Then, a numerical control with the function of surface driven interpolation is proposed as an ideal system. The conceptual idea, the implementation method and the prototype are introduced. Then, it is shown that the evolution to NC with surface driven interpolation will come true after NURBS-NC.

Key words: CNC, CAM, interpolation, numerical control, surface machining

1. はじめに

従来、金型曲面加工においては多量の微小線分による NC 指令データにより加工する形態が取られてきた。このようなシステムでは中間データとした多量の微小線分を生成する必要があるほか、微小線分を読み込み補間するため高速でかつ滑らかな補間が難しかった。そこで、形状表現性のある NURBS(Non Uniformed Rational B-Spline) 曲線を NC 指令データとして入力する NURBS 補間による数値制御方式を提案した¹⁾²⁾。この方式によれば、従来の微小線分方式と比較しデータ量が削減され滑らかな加工が実現できる。しかし、NURBS 曲線による NC 指令データを出力する CAM システムを使用することが前提であり、CAM システムが出力する NC 指令データにより加工面の状態が左右されるという問題点は、従来の微小線分方式と変わらない問題点として残る。また、加工条件の変更に対しては、その都度 NC 指令データを出力し直さねばならず、現場において加工条件を適宜設定する場面が多く発生する金型加工においては、従来の微小線分による方法と変わらずその不便さは解消されない。このような問題の要因は、所望の形状を加工するための NC 工作機械が直線や円弧や NURBS 曲線を補間する機能はあるにもかかわらず、加工したい曲面を加工するという基本的な機能を有しておらず、CAM システムとの連携によりその機能を実現してきたことによる。

本研究では、まず従来方式の抱える問題点を曲面加工と数値制御装置の内部処理という切り口で検討する。そして、それを解決するために、CAM システムとの連携ではなく、曲面データから直接補間する数値制御方式として、面補間による数値制御方式を提案する。そして、それを実現するための数値制御装置の構成および内部処理アルゴリズムについて説明し、作成したプロトタイプシステムによる補間指令生成について述べる。

そして、点から線、線から面という発展が、微小線分による加工から、NURBS 補間、そして面補間という数値制御方式の進化においてなされることを示す。

2. 従来方式の問題点

微小線分による金型加工方式において良好な加工面を得るためには、数値制御装置内部で CAM システムの出力する NC 指令データに対して、以下のような処理を行う必要がある。

1. 不良な NC 指令データに対する補償

図 1 の上段に示したように、曲面加工用の市販 CAM システムは、各社さまざまなアルゴリズムにより曲面加工用の NC 指令データを生成する。そして、これらの CAM システムは不良な NC 指令データを出力する。例えば、

Fig.1 The methods of numerical control for machining 3D surfaces

*原稿受付 平成 12 年 3 月 2 日

**正 会 員 東京理科大学工学部(東京都新宿区神楽坂 1-3)

***正 会 員 三菱電機機軸産業システム研究所(尼崎市塚口本町 8-1-1)

Fig.2 Construction of surface driven interpolator

Fig.3 Examples of illegal NC data

あるCAMシステムでは、本来滑らかなところに、微小な段差の生じた軌跡指令データを生成する(図3(a))。この場合は、本当の段差が否かを数値制御装置が認識し、そのような部分は排除して補間処理を行わねばならない。また、一部形状の欠落した軌跡指令データをCAMシステムが生成する場合もあり、この場合は形状の推定処理を数値制御装置が行う。この例としては、CAMシステムはトレランスを保証するようにパスを出す、このトレランス制御が禍し、角のある形状において、CAMシステムが角部のNC指令データを出力していない場合がある(図3(b))。

2. 加減速制御処理の複雑化

曲率の大きいところでは、減速しないと機械の許容加速度を超えるほか、補間時の形状誤差が大きくなるという問題がある。したがって、数値制御装置内部で曲率に応じた速度制御をする必要があるが、機械は即座には停止できないため、現在地点から所定量先をみて、この速度制御を行う。多量の微小線分が与えられた場合、そのデータを元にこの曲率を推定する必要がある、局所および大局的な認識が必要となる。この認識が確実にされないと角が出ない、あるいは傷が入るといった不具合発生の原因となる。

以上のような処理は数値制御装置の補間処理の中で負荷となっているほか、市販されている各社のCAMシステムに対応する必要がある、数値制御装置のソフトウェア開発の負担も大きくなる。そして、CAMシステムと数値制御装置が軌跡指令データを介して結合された従来型の方式では、数値制御装置内部で認識処理が必然的に必要となる。CAMシステム側の内部

処理では、必要な情報を有しており、その情報を有効に補間処理に使用すべきであると考えられる。

次に、NURBS補間による金型曲面加工方式について考える。CAMシステムからの出力が正確であれば、情報の欠落はなくなり、曲率推定処理や不連続部の認識は不要となると考えられる。しかし、加工がCAMシステムの出力するNURBS曲線に依存する。すなわち、数値制御装置の内部では市販されているCAMシステムの特質に合わせて補間処理を行わねばならないことに変わりはない。また、CAMシステムでは、内部的に生成された工具軌跡である点群列をNURBS曲線にフィッティングするという処理を行う。フィッティングアルゴリズムに有り勝ちなフィッティング誤差や本来存在しないループ形状を含んだNURBS曲線指令を生成するなどの問題が発生している(図3(d))。このフィッティング処理は、CAMシステムと数値制御装置が疎に結合されていることから必要とされるもので、本来は unnecessary 処理であるといえる。

さらに、いずれの方式にしても工具径やピックフィードなどの加工条件変更が加工作業現場では多々発生するが、時間のかかるCAMシステムによるNC指令データの出力を再度繰り返し返さねばならず、作業効率が悪くなる。特に、磨き作業時間の低減のため、鏡面に近づくような小ピックフィード加工を行う場合においては、CAMシステムによる再計算に莫大な時間がかかる。

以上のように、従来の金型曲面加工における数値制御方式は多々問題を抱えており、根本的に方式を見直し良好な面が効率よく得られる数値制御方式を考える必要がある。

3. 面補間による数値制御の提案

まず、数値制御装置の持つべき機能について考える。2次元加工においては、数値制御装置は与えられた直線や円弧に対してそれに沿った軌跡あるいは工具径補正した軌跡に沿うように補間する機能を有している。これに対して、3次元加工においては、CAMシステムが出力する直線・円弧・NURBS曲線の指令に沿うように補間する方式が取られている。2次元加工と同じように数値制御装置を位置付ければ、数値制御装置は三次元加工においては、与えられた曲面に沿ってあるいはその曲面に対して工具径補正した位置指令を生成する機能を有しているべきといえる。

次に、実際のオペレータのニーズから考える。条件変更に対しては、CAMシステムを使用し、再度新しく多量の微小線分データを生成する必要性があり、作業効率が良くないといえる。ネットワークの普及により現場でCAMシステムを遠隔で操作することも可能になったが、条件変更に対して柔軟に対

応することは難しい。これに対して、図1の中段に示したようにCAM機能を内蔵し、実時間で加工指令を生成するインタープリタ方式*の数値制御装置を開発したが、オペレータは加工中に加工条件を自由に変更できるため、従来方式と比較し、特に金型加工において有効性があると分かった³⁾。しかし、この方式は単にCAM機能部分と補間処理部分を一体化しただけであり、システムとして無駄な部分があり高速性に関して次のような問題が生じた。CAM機能部では精度保証のために与えられたトレランスを保证するように微小線分を生成する。このトレランスを厳しくすると微小線分が細くなる。そして、これを処理する補間処理部の演算が重くなり速度低減を引き起こし、与えられた送り速度での加工が難しくなるという問題点が生じた。

本来、精度誤差は速度指令および数値制御装置と機械により決まるものである。したがって、数値制御装置側の補間処理は、補間のサンプリング周期によって精度が決められているものであるから、その精度限界までの加工が本来実現できるはずである。以上から、曲面データから直接補間する数値制御方式として、図1の下段に示したような方式である面補間による数値制御方式を提案する。曲面データから直接補間するから、CAMシステムの出力するNC指令データに左右されず、かつNURBS補間のように滑らかで高速な加工が可能となると考えられる。また、NURBS補間で必要なフィッティング処理が不要となり、それが原因で発生する不具合がなくなる。さらに、インタープリタ方式で曲面加工するから、加工条件などの変更柔軟に対応できるといえる。従来の直線・円弧・NURBS曲線という線補間から面を直接補間する面補間へという移行は、数値制御装置が与えられた形状を加工するための補間指令値を生成する装置という観点からいって、妥当な形態を提供するといえる。

4. 面補間による数値制御の実現

4.1 数値制御装置の内部構成

図2に本研究の数値制御方式を実現するための数値制御装置の構成図を示した。データ入力部と曲面状態評価部および面補間処理部からなる。データ入力部では、加工する曲面データ、加工パターン、加工工具および基準送り速度を入力するが、加工パターンは、工具を曲面に沿わせる軌道情報として複数のセグメントデータを逐次生成する。曲面状態評価部においては、事前に生成されたセグメントに基づいて曲面の状態を評価し、その評価内容を補間前に蓄えておく。面補間処理部においては、曲面状態の評価結果をもとに実時間で与えられた曲面を加工するための補間データを生成する。面補間処理部は、曲面状態監視部・距離演算部・速度制御部・補間点演算部・工具干渉演算部とからなる。曲面状態監視部は、現在の補間点およびその付近の曲面の状態から所定のトレランスを満たすための速度や機械を破損させないための許容加速度を満たすように速度指令値を生成する。補間点演算部では、与えられた速度 F から $F\Delta t$ 離れた位置の補間点を計算する部分である(Δt はサンプリング周期)。工具干渉演算部は、与えられた

Fig.4 Collision detection within the tool projection

工具位置において曲面と工具との干渉を演算する部分である。補間点演算部から得られた補間点は実時間で各軸サーボアンプに転送される。

4.2 工具軌跡生成方法

3次元曲面加工における工具軌跡生成アルゴリズムの分類は、文献⁴⁾⁵⁾に紹介されている。オフセット曲面を作るオフセット法や多面体モデルなどがあるが、最近のCAMシステムでよく使用される三角パッチ法は多面体モデル法の一つである。本研究の数値制御方式を実現するためには、補間指令生成のためのアルゴリズムとしては、

- ・サンプリング周期以内に補間指令値が得られる高速演算性
- ・機械を直接制御することによる演算の確実性および安全性
- ・NCの最小単位の精度を保証する高精度演算

という要件が満たされる必要がある。これは、サンプリング周期以内に補間指令値が得られなければ機械は急激に止まることになる。突然Z座標値が零となるような軌跡指令データを生成する可能性のあるアルゴリズムでは、高価な金型を台無しにしてしまうことになる(図3(c))。また、安定したアルゴリズムであっても高精度が保証されないアルゴリズムでは実用性に乏しい。

オフセット法は、オフセット面をいったん生成してから工具軌跡を生成するから実時間加工に適するが、精度の良いオフセット面を生成することが困難であり、実用上は使用できないといえる。市販のCAMシステムでよく使用される三角パッチ法では、高精度な工具軌跡を生成するためには、メッシュ分割数を多くしなければならず、データ量の増大という問題があり、また実時間加工は難しい。実時間3次元曲面加工のための干渉回避アルゴリズムは、実時間での補間に耐え得るものであり、また、サブミクロン単位以下の精度で干渉回避された補間点が演算される必要がある。

筆者らは、図4に示すような干渉回避アルゴリズムを以前より提案している。すなわち、曲面と工具の干渉する部分は限定された、工具の投影部分であり、この部分で曲面上の点群を生成し工具との干渉をチェックしようというものである^{6)~9)}。さらに、これを高速化するために、図5に示すように、包含球を使用した高速高精度な干渉回避手段を開発した^{10)~12)}。この手法では、曲面を内容する包含球を曲面を細分化して木構造にあらかじめ持っておき、干渉する末端の包含球をこの木構造から高速に絞り込み、干渉する可能性のある曲面を持った包含球内部で、曲面上の点群を生成し、干渉チェック後工具位

* いったん軌跡指令データを生成した後数値制御装置にそのデータを読み込ませる方式はコンパイル方式と呼ぶ。これに対して、軌跡指令を計算しつつ実時間で補間処理する方式をインタープリタ方式と呼ぶ。

Fig.5 Fast collision detection by the method of bounding spheres

置を計算するものである。この方法は、高速にかつ高精度に工具位置が演算でき、演算速度と精度面での問題を解決した。ここでは、このアルゴリズムを、本研究の面補間による数値制御装置の干渉回避部分に適用する。

このアルゴリズムを使用した工具軌跡生成モジュールをそのまま利用しただけでは、高品位な加工面は期待できない。図6に、一般のCAMシステムが行っているトレランス制御による工具軌跡生成と、本研究の数値制御方式において必要な理想的補間点生成について示す。トレランス制御によれば、図のようにトレランス以内になるように軌跡が生成される。したがって、線分長が不ぞろいになり、機械をそのまま駆動可能なデータではない。このトレランスは、CAMシステムが工具軌跡を生成するための基準として内部演算上の都合からユーザに設定させていたものである。形状的な精度は、機械を動作させる際の数値制御装置のサンプリング周期で決まるものである。したがって、同図(b)のように数値制御の持つサンプリング周期で機械が滑らかに動くように、補間指令を生成するという考え方が必要である。

4.3 補間指令生成

工作機械を制御する際には、機械に振動や衝撃を与えないように加減速処理を滑らかに行う必要がある。従来から行われている数値制御装置における加減速処理は、補間前加減速と補間後加減速の2つの方式に分類できる。補間前加減速は、サーボ指令を作る補間部の入力である速度指令を加減速する方式であるが、オーバーライドや非常停止などの送り速度変更や終点までの残距離計算などによる加減速制御が複雑になる欠点はあるが、精度の良い加工が実現できる。一方、補間後加減速は補間後の速度指令に対してフィルタを介して加減速するもので、簡単な構成で加減速処理ができる反面、各軸での遅れが生じ加工精度が悪くなるという欠点がある。

本研究では、加工精度重視から補間前加減速方式を採用するが、数値制御装置で一般的に行われるようなフィルタリング処理ではなく、3次元の形状処理的に曲面情報から直接加減速処理を行う方法を取る。これにより、速度制御処理の一元化が実現でき、速度制御部が曲面情報を直接利用できることにより処

Fig.6 Path generation by tolerance control and ideal path generation

Fig.7 Surface evaluation and feed control

理の拡張性が優れたものになる。

図7は曲面評価と送り制御について示したものである。曲率の大きい部分においては、精度や許容加速度が得られるように送り速度が設定される必要がある。本研究の数値制御方式においては、曲面状態評価部と面補間処理部の2つの大きな処理部から構成される。曲面状態評価部では、工具を沿せる軌跡であるセグメント単位に事前に曲面の状態を調べていき、そのセグメント各位置における速度（クランプ速度）を記憶しておく。与えられた送り速度が F_m とする。すると、図7に示したように1セグメントに沿ってAからFまでの部分で F_a から F_b のようなクランプ速度が設定されるが、それぞれの部分でクランプ速度が保証される必要がある。面補間処理部では、曲面状態評価部が生成したクランプ速度データを基に加減速処理する。それぞれのクランプ速度は、その領域に至るまでに減速する必要がある、常に次のクランプ点までの距離を監視し速度を保証する必要がある、これは距離計算部と曲面状態監視部が担当する。

Fig. 8 Flow of speed control

図 8 は、本研究の数値制御方式の速度制御部の処理の流れを示したものである。まず、ユーザの設定した送り速度、オーバライド、非常停止などから現在の設定速度 F を得る。次に、現在の機械の送り速度 F_{cur} を得る。次のステップでは、最も近いクランプ点までの距離 L を算出する。そのクランプ点の送り速度と距離 L からクランプ点に向けて減速すべきか否かを判断し、減速と判断されたら距離 L に応じて送り速度を設定する。減速すべきと判断されなかった場合は、設定速度 F と現在送り速度 F_{cur} を比較し、等しいと判断されたら等速、 $F < F_{cur}$ の時は加速度 Acc により減速、 $F > F_{cur}$ の時は加速度 Acc により加速する処理を行う。得られた送り速度から $F\Delta t$ を計算し、サーボ系に出力する。もし、クランプ点を越えたらクランプ点の更新を行う。以上が、面補間における加減速制御であるが、この処理を 1 サンプル周期で行う。

以上の処理においては、曲面補間は現在の補間点から次の補間点を計算するが、 $F\Delta t$ を計算し、現在補間点からその $F\Delta t$ 離れた位置を求める計算を行う。この計算には、図 9 に示したような繰返し演算により実現する。すでに求められた補間点が $IP-2$ 、 $IP-1$ 、 IP_0 とし、現在の補間点は IP_0 であるとする。 IP_0 の位置にある工具の位置 TP_0 から $F\Delta t$ 離れた位置 TPN を求めるために、 TP_1 や TP_2 のように所定誤差以内になるまで計算を繰り返す。この繰返し演算を高速化するために、曲面評価部において初期点を与えるための前処理を行っておく。

5. 補間指令値生成例

本研究の数値制御方式の検証実験は、パソコン (Pentium2 333MHz) と、改造した三菱電機数値制御装置 (MELDAS M64) およびマザック製縦形マシニングセンタ (FJV-20) を使用したプロトタイプシステムで行った。パソコン側に作成したシステムを搭載し、数値制御装置側ソフトウェアは従来の処理部分を一部バイパスするように改造した。補間指令データは 2 ポートメモリを介し、非常停止やデータ不足により機械の

Fig. 9 Iteration for getting interpolation points

異常な停止が生じないように、所定量補間点をバッファリングするといった安全策を取った。現在は、すべての数値制御装置の内部処理は完成しておらず、いったん補間指令を溜め込み数値制御装置側に転送し、その補間指令で直接機械を起動しているが、問題なく機械が動作することを確認した。

次に、このプロトタイプシステムによる測定結果について述べる。電話台 (277.97mm × 219mm, 曲面数 66 枚) をボールエンドミル 5φ により、指定送り速度 (5000mm/min = 83.333mm/s) にて加工するための補間点計算に、一点あたり 1.11ms が得られた。なお、 $F\Delta t$ を求める際のトレランスは 0.1μm、曲面精度および工具と曲面間干渉チェックのトレランスは $0.707 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ という条件で行い、位置情報としては十分な精度で補間点を出力した。したがって、本研究の数値制御方式を実現するために十分な測定データが得られたといえる。

図 10 が補間点の出力結果例である。図 11 は、角部を一部拡大した図で不連続部分において良好な加減速が行われている様子が分かる。金型加工においては、角部のような微細な部分で精度良く加工が行われる必要がある。このような微細な部分では送り速度を減じる。この図から分かるように、本研究の数値制御方式では面情報から直接補間点を生成するから、送り速度をいくら減じても高精度な補間指令データが本質的に得られる。これに対して、微小線分方式による加工では、送り速度を減じると（微小線分間のデータはないから）情報欠落のため精度が悪くなる。したがって、本研究の数値制御方式では特に金型加工で問題となる不連続部においても精度の良い加工が可能といえる。これは、トレランス制御をする CAM システムと NC を一体化させた形態では実現が難しく、面情報を元に補間点を実時間で生成する面補間による数値制御方式の利点である。図 12 は図 10 の中央ラインにおける送り速度の様子を示したものである。指定送り速度がなだらかな部分では出ており、曲率の大きいところでは加減速処理がなされていることがわかる。

以上から、精度やリアルタイム性という観点から、実用面でも問題なく面補間による数値制御方式が実現できるといえる。

6. おわりに

本報告では、金型曲面加工における従来の数値制御方式の問題点を調査分析し、問題点を解決するために、面補間による数値制御方式を提案した。そのコンセプトと、これを実現する

Fig.10 Example of surface driven interpolation

Fig.11 Example of surface driven interpolation (Zoomed)

ための数値制御装置の構造や内部アルゴリズムについて述べ、プロトタイプシステムによる評価を行い、その結果以下のことを示した。

- 3次元加工で行われていたトレランス制御を行わず、包含球による干渉計算により補間処理を行い、実時間で補間指令値が生成できた。
- 面補間処理において、距離計算に繰返し演算を使用した、十分な計算速度で高精度に補間点計算ができた。
- 3次元の形状処理的に加減速制御を行い、機械を駆動させることが実時間で可能である。

また、本方式はインタープリタ方式としてのメリットは当然のことながら享受できるが、

- 推定や認識に頼っていた数値制御装置の内部処理が、面情報から直接補間する内部処理となり、トータルとして、無駄のないシステムが提供できる。
- 面情報を有するから、送り速度を減じても高精度な補間指令が得られるため、不連続部においても高精度な加工が実現できる。
- 市販のCAMシステムの出力するNC指令データに依存しないため、不良なNC指令データによる不具合を排除でき、またCADデータから直接加工するから均一な加工ができる。そして、与えられた形状を加工するため機能を提供する数値制御装置の本来あるべき形態を提供している。

Fig.12 Speed control by surface driven interpolation

という知見が得られた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、数値制御装置の改造などご協力いただいた三菱電機(株)名古屋製作所NCシステム部、三菱電機メカトロニクスソフトウェア名古屋事業所第1技術部の方々、および、貴重な情報をご提供いただいた三菱電機産業システム研究所FAシステム開発部第2グループの方々にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 高橋健二, 加藤清敬: NURBS 補間機能を持った CNC の開発, 1993 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1993)57.
- 2) 数値制御装置, 日本国特許庁, 特許公報, 第 2718260 号
- 3) K.Kato, M.Oshama and H.Maruyama, The DDI-CNC for Machining Sculptured Surfaces, IECON '84, (1984)551.
- 4) T.Sata, F.Kimura, N.Okada and M.Hosaka: A New Method of NC Interpolation for Machining the Sculptured Surfaces, Ann. CIRP, 30, 1, (1981)369.
- 5) B.K.Choi, J.S.Hwang and C.S. Jun: Compound Surface Modelling and Machining, Computer Aided Design, 20, 3, (1988)127.
- 6) 加藤清敬, 大島道隆: ソリッドモデルをベースとした金型加工システムの開発 (第1報), 1985 年度精機学会秋季大会, (1985)645.
- 7) 加藤清敬, 大島道隆: ソリッドモデルをベースとした金型加工システムの開発 (第2報), 精機学会春季大会, (1988)799.
- 8) 加藤清敬, 入口健二, 大島道隆: ソリッドモデルをベースとした3次元曲面加工技術, 三菱電機技報, 65, 7, (1991)80.
- 9) 数値制御装置および数値制御方法, 日本国特許庁, 特許公報, 第 2561908 号
- 10) 入口健二, 加藤清敬: 曲面分割による工具経路生成方法, 精密工学会誌, 64, 11, (1998)1618.
- 11) 入口健二, 加藤清敬: 曲面分割による実時間工具経路生成方法, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1994)283.
- 12) 入口健二, 加藤清敬: 曲面分割による実時間工具経路生成方法, -トリム曲面への対応-, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996)383.