NC 加工シミュレーションに基づく CAM システムの高度化*

Improvement of Advanced CAM System Based on NC Geometric Cutting Simulator

藤尾三紀夫** 鈴木 裕***

Mikio FUJIO and Hiroshi SUZUKI

Key words

NC geometric cutting simulation, geometric interpolation, servo data control, CAM, CNC, prediction and compensation, machining error

1. はじめに

日本の CNC 工作機械技術は、産業界のマザーマシンとして長年にわたり世界をリードしてきた日本のナンバーワン技術の一つである。しかしアジアを中心とする諸外国の技術力向上等により、平成 21 年度の工作機械生産額では 27 年間維持してきた世界第 1 位の座を中国に譲り、ドイツに次いで第 3 位となる状況になっている。一方、CAD/CAM 技術の向上と並行して、切削加工に関するシミュレーション技術も著しく向上してきている。切削の状態を正確に再現する切削シミュレーションや工具経路の検証および最適化のための NC 加工シミュレーション、そしてリアルタイムで機械の衝突を防止する干渉シミュレーション技術などが開発され、実用化されている¹⁻³⁾。

アジアや欧米諸国に対して日本の優位性を維持し、今後さらなる高速高精度加工を実現するには、これら CNC 工作機械技術とシミュレーション技術の融合が重要であると考えられる⁴⁾。特に、これまで各メーカーで別々に開発されてきた、工具経路を生成する CAM 技術、工具経路から機械を駆動する CNC 制御技術、そして加工中に生じるさまざまな誤差の抑制および補正技術の融合が鍵となる。そこで本解説では、CAM 技術に CNC 制御技術、NC 加工シミュレーションに基づく誤差の予測補正技術を融合することで、高速高精度加工を実現する新たな CAM システムの

高度化技術について紹介する。

2. 現在の加工システムの問題点

2.1 NC 加工シミュレーションの加工現象への未対応

現在の加工システムでは図 1 に示すように CAD がもつ形状データから直線と円弧で表現された NC プログラムを CAM により生成している。そして NC 加工シミュレータにより、工具と素材等の干渉チェックや加工中の形状確認を行い、NC プログラムの検証を行っている。CNC 装置はこの NC プログラムに基づいてリアルタイムに補間と加減速処理を行い、数ミリ秒の補間周期での位置データであるサーボデータを生成し、サーボモータ等により工作機械を駆動している。

しかし、現状の NC 加工シミュレータでは実加工で生じる工具のたわみや摩耗、熱変形等および運動誤差を予測することができず、また NC 加工シミュレーション後の形状に対してこれらの誤差を再現することができない⁵⁾。

2.2 NC プログラムによる幾何情報の劣化

高精度な加工を実現するには、CAD がもつ幾何情報から高精度な位置データである NC プログラムを生成する必要がある。ところが現状の CAM では CAD がもつ曲面の高精度な幾何情報は微小線分に変換され情報の劣化を招いている。CNC 装置はこの劣化した線分からトレランスに基づいて曲線を再度予測し、サーボデータをリアルタイムに生成している。しかし、一度離散化された線分から元の曲面形状を予測することは難しく、不要な加減速処理が多く生じ、加工時間の長大化を招くと同時に加工面のエッジダレや打痕を招き、結果として仕上げ時間を多く要する原因となっている。

3. NC 加工シミュレーションに基づく CAM システム

高速高精度加工を可能にする加工システムを実現するため、提案する CAM システムでは図 2 に示すように CAD がもつ幾何情報から形状に適したサーボデータを直接生成する形状補間を行っている。これは加工対象形状面から工具半径分をオフセットしたオフセット面を直線、円弧、曲

*原稿受付 平成 22 年 5 月 21 日

**正 会 員 (独)国立高等専門学校機構沼津工業高等専門学校 (静岡県沼津市大岡 3600)

***正 会 員 九州工業大学情報工学部機械システム工学科 (福岡県飯塚市川津 680-4)

藤尾三紀夫

1987 年豊橋技術科学大学大学院工学研究科修了。同年三菱電機(株)入社。1991 年沼津高専機械工学科助手を経て 2007 年より制御情報工学

科教授。博士(情報工学)(九州工業大学)。工作機械の高速高精度加工に関する研究に従事。

鈴木 裕

1981 年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。同年豊橋技術科学大学生産システム工学科助手を経て 1995 年より九州工業大学情報工学部機械システム工学科教授。金型を中心とした幅広い分野の研究に従事。型技術協会理事。

図1 現在の加工システム

図2 NC加工シミュレーションに基づくCAMシステム

(a) 加工対象形状

(b) 軌跡のフィードバック

図3 形状補間と運動誤差の予測補正

線のエレメントに分割し、それぞれに適した接続速度を決めた後、各要素について加減速処理することで実現している。NCプログラムを用いる場合に比べ膨大なデータ容量を必要とするが、現在のストレージ容量と転送速度を考慮すると十分実用可能である。さらに提案するCAMシステムでは、この得られたサーボデータに基づいてNC加工シミュレータにより切削力や工具のたわみ、摩耗等を予測し、その誤差量をサーボデータ（工具経路）に反映させ、最適なサーボデータを用いることにより高精度加工を実現する。

4. 形状補間と運動誤差の予測補正

形状補間の効果を確認するため、図3(a)に示す平面、円筒面、自由曲面から構成されるアルミ素材形状に対し、汎用のCAMを用いた場合と形状補間を用いた場合について加工実験を行い精度を比較した。CAMではトレランス $1\mu\text{m}$ 、半径 5mm のボールエンドミルを用いて切り込み

量 0.5mm で表面をX軸方向に 6000mm/min で移動させる微小線分とNURBS（Non-Uniform Rational B-Spline）補間のNCプログラムを作成した。また、制御方式としてCNCのもつ高精度モードおよび高速高精度モード（金型用多ブロック先読み制御）を用い、フィードフォワード50%で立型MCを駆動した。一方、形状補間では同様の加工条件で補間周期を 1ms としてサーボデータを形状補間により生成し、補間とサーボ系を一次遅れとした場合の運動誤差をNC加工シミュレーションで予測補正し、フィードフォワードの代わりに用いた。

図3(b)は自由曲面間にエッジをもつ図3(a)中のエッジA部に相当する位置におけるモータのフィードバック位置軌跡を示している。同図よりNURBS補間および高速高精度モードでは微小線分から曲線を予測しているため、エッジを認識できず位置がずれていることがわかる。このとき、加工時間は共に約38秒であった。また高精度モードでは比較的良い精度で加工できているが、多くの箇

図4 除去体積と切削力

所で加減速を生じ、加工に要した時間は約 140 秒となった。一方、形状補間のみと形状補間に運動誤差補正を行った場合はエッジを認識し減速することでエッジが再現されており、加工時間も約 47 秒と短くその効果が確認できた⁶⁾。

5. 加工中の誤差の予測

5.1 切削力の予測

切削力の予測については切削シミュレーションとしてこれまでにさまざまな手法が検討され、切削力を正確に表現する手法が提案されている。しかし本研究では加工現場で利用される NC 加工シミュレーションでの利用を検討しているため、比較的短時間で計算できる 1 刃 1 回転あたりの除去体積から実験的に式 (1) により切削力 F を求める手法を用いた⁷⁾。

$$F = 98 \cdot a \cdot V^n \quad (1)$$

ここで V [$\text{mm}^3/\text{rev/tooth}$] は工具 1 刃 1 回転あたりの除去体積、 a , n は被削材の材質および硬さにより決定される係数である。

この計算式を用いて実際に切削力が求められるか半径 5 mm のフラットエンドミル (2 枚刃ハイス) を用い、送り速度を 10 mm/min から 10 刻みで 60 mm/min まで変化させ、主軸回転数を 400, 800, 1200 rpm、切り込み量を変化させた際の切削力と除去体積の関係性を求めた。素材には S50C を用い、側面加工、溝加工、円弧の輪郭加工を行った場合の切削力を切削動力計により測定した。図 4 は各加工における除去体積と切削力の関係性を示しており、切削力は切り込み量や送り速度、主軸回転数に関係なく、1 刃 1 回転あたりの除去体積から近似的に求められ、この加工条件では $a = 46.99$, $n = 0.33$ であることがわかった。

5.2 工具のたわみ予測

工具のたわみ量の予測についても多くの研究がなされているが、NC 加工シミュレーションに組み込むため、切削力により生じる片持ちはりとして近似した。図 5 は半径 50 mm の円筒から半径方向に 1 mm、高さ方向 5 mm の切り込みで時計回りに円弧を輪郭加工した後の形状輪郭を 3 次元測定器で測定した結果である。また同時に、NC 加工

図5 各送り速度ごとのたわみ量比較

図6 NC加工シミュレーション後の形状

シミュレーションで得られた加工後の形状の断面輪郭も示している。このとき、工具は半径 5 mm のフラットエンドミル (2 枚刃ハイス)、突出量 80 mm、主軸回転数 400 rpm で、送り速度を 20, 30, 40, 50 mm/min に変えた場合の半径 49 mm との半径誤差をたわみ量として比較した。ここで素材は S50C、測定位置は加工面上面から 2.5 mm の位置とした。同図より、たわみの予測精度は低いながら NC 加工シミュレーション結果と実際の工具のたわみの傾向が一致した⁸⁾。

また、図 6 (a) は現在一般的に用いられている工具を剛体とした場合の NC 加工シミュレーション後の形状輪郭、図 6 (b) は工具のたわみを組み込んだ NC 加工シミュレーション後の形状の輪郭を拡大表示した図である。同図より切り込み 1 mm に対して工具たわみによる削り残しが生じ、より現実に近い結果となっていることが確認できる。同時に、工具経路と加工形状表面に工具のたわみ量をグラデーション表示できるため、加工前に切削負荷が多い場所や多くのたわみが発生する箇所を加工前に簡単に見つけることが可能となる。

5.3 工具摩耗の予測

加工時に生じる工具摩耗は、主に加工時間、切削距離や切削量に依存すると考えられ、一般的に工具寿命は加工距離を基準とされることが多い。しかし実際にはエアカットや工具の加工部位により切削した距離は異なるが、これら

図7 加工対象形状

図8 工具摩耗の予測と測定結果

図9 除去体積と工具逃げ面摩耗の散布図

は考慮されていない。そこで工具を高さ方向に細かく分割し、分割した高さごとにNC加工シミュレーションにより除去体積を求め、工具摩耗相当として扱うことができるか確認するため加工実験を行いその関係を調べた。

加工実験は図7に示す工具半径8 mmの2枚刃ボールエンドミル（超硬コーティングチップ）を用い、S50C素材に対してY方向、Z方向共に2 mm切り込み、送り速度300 mm/min、主軸回転数4000 rpmでX軸方向に加工を行った。図8は36 m加工後の工具摩耗の写真と工具の高さ方向に0.1 mm刻みでNC加工シミュレーションした除去体積および測定した工具の逃げ面摩耗量を示している。同図より、工具下部において50 μm程度のオフセット摩耗量が生じているが、工具上部の除去体積増加に伴い、工具磨耗が増加していることがわかる。図9は加工長さを24, 36, 48 mとした場合の工具の高さ方向での除去体積と工具逃げ面摩耗量との関係を示した散布図であ

図10 加工実験用工具経路

図11 通常加工における送り速度と主軸負荷

る。同図より、積率相関係数は $r=0.836$ で、正の相関関係があり、除去体積から工具摩耗を予測することが可能であることがわかった⁹⁾。

6. 加工中の誤差の予測補正

切削負荷は単位時間あたりの除去体積に大きく依存しており、これまでの研究で、除去体積と主軸切削負荷に相関関係が認められた。また切削力が除去体積に依存することから、除去体積を制御することにより切削負荷や工具のたわみを低減することが可能となると考えられる。そこでNC加工シミュレーションで求めた1刃1回転あたりの除去体積を制御する手法として速度を制御する速度制御法と工具経路を制御する経路制御法を開発した¹⁰⁾。

速度制御の有用性を検証するため、図10(a)に示すワークから図10(b)のA点を始点とするオフセット面を基準経路として与えて比較した。加工条件として半径5 mmのボールエンドミル（2枚刃ハイス）を用い、S50Cの素材に対して通常加工では送り速度120 mm/minで、速度制御加工では除去体積の閾値を11 mm³/sec、最高速度180 mm/minとなるよう速度制御を行った。図11は従来のNCプログラムを用いた実加工によって得られた主軸負荷と送り速度を示している。データはCNC装置からネットワークを介して64 msごとにサンプリングして得られた値である。B点とC点でNC加工シミュレーション予測では急激な除去体積の変動が生じたが、加工実験の主軸負荷には現れていない。しかし、加工後に工具先端の破損を確認した。一方、図12は速度制御で生成された工具経路による実加工で得られた切削負荷と送り速度の推移である。B点とC点におけるピークを減速することで抑えており、工具の破損は生じなかった。さらに負荷が少ない箇所は加速するため、加工時間は従来の加工で200 sec、速

図 12 速度制御に基づく送り速度と主軸負荷

度制御では 165 sec と速度制御により加工時間を短縮できた。

7. ま と め

本稿では NC 加工シミュレーションに基づいて従来の CAM から CNC 装置のサーボデータ生成までを統一し、NC 加工シミュレーションで得られた誤差を予測補正することで高速高精度加工を実現する新たな CAM システムの提案と基礎的な実験結果について解説した。これまでの研究において形状補間の有用性は認識できたが、切削力や工具のたわみ、摩耗など個々の予測精度や予測方法については基礎的な段階で、まだ不十分な状態であり改良を必要とする点が多く存在している。しかし今後の高速高精度加工を実現するには、CAM、CNC 工作機械そして NC 加工シミュレーションを統合した新たな CAM システムという考え方は重要な技術となると考えられる。今後はこれらの予測精度の向上と補正手法の改良を目指すと同時に、多くの研究者や技術者のノウハウを組み込み、複数の誤差に対応

できる CAM システムの開発を行うことで、日本の CNC 工作機械の発展に寄与したいと考えている。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究（C）, 課題番号 14550251, 1856026, 21560283）を受けて行われたことを記し、ここに謝意を表明する。

参 考 文 献

- 1) 松村隆：切削課程シミュレーションとその可能性，機械と工具，**51**，2（2007）16-20.
- 2) 青山英樹：CAD/CAM・制御システムの動向，機械と工具，**53**，1（2009）46-50.
- 3) 山田聡：マシンシミュレーションの行方，機械と工具，**52**，2（2008）40-44.
- 4) 中本圭一，河野智之，小山智，坂口龍彦，白瀬敬一：ボクセルシミュレータを用いヴァーチャルマシニングシミュレータの開発，精密工学会誌，**74**，12（2008）1308-1312.
- 5) 成田摩耶子：5 軸制御/5 軸加工機対応のソリッドシミュレータとその活用，ツールエンジニア，1 月号（2006）98-102.
- 6) 藤尾三紀夫，村松稔文，黒山翔太：サーボデータ制御に基づく高速高精度加工システムの開発—試作システムの検証—，2009 年度春季大会学術講演会，E67.
- 7) ツールエンジニア編集部編著：でか版技能ブックス 2 エンドミルのすべて，大河出版，（1991）56.
- 8) 藤尾三紀夫，宮代佳奈，中村幸平：NC 加工シミュレーションに基づく高速高精度加工システムの構築—工具のたわみ変形補正の検証—，2009 年度精密工学会秋季大会学術講演会，D63.
- 9) 藤尾三紀夫，黒山翔太，村松稔文，白井清二：NC 加工シミュレータの高機能化に関する研究，2008 年度精密工学会秋季大会学術講演会，B14.
- 10) 藤尾三紀夫，黒山翔太，有水精英，鈴木裕：NC 加工シミュレーションに基づく工具経路生成に関する研究—走査線工具経路と等高線工具経路への適用—，2006 年度精密工学会秋季大会学術講演会，H75.