

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560263

研究課題名（和文） NC加工シミュレーションに基づく  
高速高精度加工用制御システムの構築研究課題名（英文） Development of hi-speed and hi-accuracy machining system  
based on geometric cutting simulation

研究代表者

藤尾 三紀夫（FUJIO MIKIO）

沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・教授

研究者番号：70238541

研究成果の概要：加工情報の生成から加工中の誤差の予測補正まで，NC加工シミュレーションに基づいて予測補正制御することにより，高速高精度加工を実現するシステムを構築した．加工データの生成には形状補間，誤差の予測補正には工具のたわみと切削負荷を対象とし，最新鋭の加工システムと比較検証を行った．その結果，構築したシステムの高速高精度加工における優位性を確認すると同時に，実用化における予測補正精度の課題が明らかになった．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	800,000	0	800,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	420,000	2,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：精密機械システム・CAM・CNC工作機械・金型加工

## 1. 研究開始当初の背景

日本の金型加工技術は，精度，品質，納期において世界のトップレベルの位置にあり，日本が世界に誇れる加工技術のひとつである．しかし近年，中国や韓国，台湾などアジア諸国の加工技術の向上はめざましく，箱物と呼ばれる比較的簡単な金型においては日本と同等の品質で安価に製造できるようになり，日本市場の脅威となってきた．

今後，さらに価格競争が激化してくると，日本の国有財産である金型加工技術の衰退が懸念され，ひいては日本のものづくり産業そのものの衰退を招くことになる．この状況を打破するには，アジア諸国ではいまだ困難である複雑な形状や

小型精密金型など日本が得意とする領域において，品質，納期，価格におけるさらなる技術的優位性を保つことが必須であると考えられる．

高精度化を妨げる要因として，現在の加工システムでは，CAMにおいて幾何形状計算からのみ工具経路を生成しており，加工中の切削負荷や工具のたわみなどが考慮されていない事があげられ，これが加工誤差を生じる原因となっている．また，工具経路が円弧や直線で近似されたNCプログラムで表現されると同時に，CNC工作機械の特性なども考慮されていないため，加工形状や制御装置に適した補間や加減速処理ができず，加工時間の長大化や加工精度低下の要因となっている．

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、加工情報の生成から加工中の誤差の予測補正までNC加工シミュレーションに基づいて制御し、加工精度1ミクロンに対応した高速高精度加工用制御システムの構築である。具体的には、幾何形状から直接サーボモータを駆動する指令データを生成する形状補間とそれにより得られたサーボデータを基にNC加工シミュレーションを行い、切削負荷と工具のたわみを予測補正することにより、高速高精度加工を実現する。

提案するシステムの実現により、汎用の工作機械や低剛性の工作機械であっても、高速高精度加工が実現可能となり、低価格で品質の良い製品を消費者に短い納期で供給することが可能となる。

## 3. 研究の方法

### (1) システム構成

現在の加工システムでは図1に示すようにCAMによりNCプログラムを生成した後、NC加工シミュレーションを実行する。この際、熟練工が勘に頼ってたわみや熱変形の発生など様々な要素について工具経路を繰り返し修正しており、工具経路生成時間、加工時間、加工精度の向上が難しいのが現状である。

一方、本研究ではこれらの問題点を解決するため、図2に示すCAM, CNC, 工作機械を統合したシステムを提案している。形状補間により得られたサーボデータに基づいて切削した場合の切削負荷、たわみ、磨耗あるいは運動誤差などをNC加工シミュレーションにより求め、得られた情報に基づいて速度を制御することにより、誤差を予測補正したサーボデータを生成し、高精度化を実現する。

### (2) 形状補間

現在の工具経路は図2(a)に示すように、トレランスの範囲内で折れ線として与えられる。この際、CAMが持つ高精度な幾何情報は円弧と直線で表現されたNCプログラムとなり、劣化する。実際にCNC内で補間・加減速処理されると図2(b)のように指令点を通らず、さらなる精度の劣化を招いている。高精度加工を実現するためには図

2(c)に示すように、幾何形状表面に合った加減速と補間処理を行い、形状に最適化されたサーボデータを幾何情報から直接生成する形状補間を行う。これにより、NCプログラム利用による幾何情報の劣化と補間処理後加減速による指令誤差の発生を防ぐ。

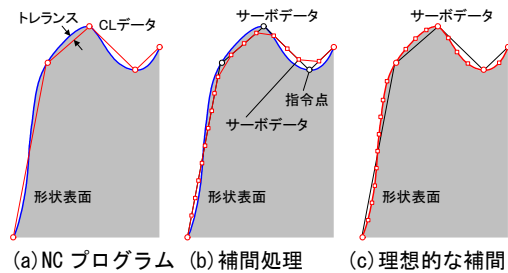


図2 CAMとサーボデータ

### (3) 運動誤差の予測補正

サーボ駆動系は一次遅れで表現できるため、形状補間により得られたサーボデータをもとに工作機械を動かした場合の軌跡を運動誤差シミュレーションにより求め、シミュレーション結果と指令値との誤差から運動誤差補正量を求める。例えば、図4に示すあるサンプリング周期  $i$  における補正指令位置  $P_o$  に対してシミュレーションした結果、位置  $P_s$  が求められた場合、 $P_o$  と  $P_s$  との誤差 ( $dx, dy$ ) を求める。この誤差を目標とする位置  $P_i$  に足し合わせた点  $P_c$  を補正指令位置とする。この処理を各サンプリング周期における全てのサーボデータに対して行う。そして、さらに  $P_c$  を補正指令位置  $P_o$  としてこの補正処理を行い、誤差が設定された閾値に達するまで繰り返し、補正されたサーボデータを生成する。

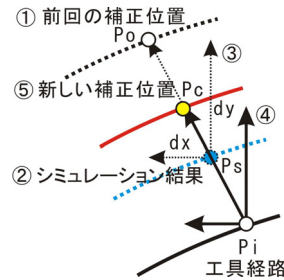


図4 運動誤差補正

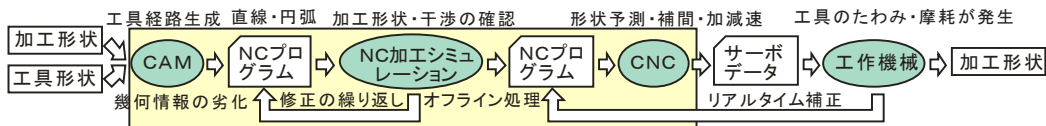


図1 現在の加工システム

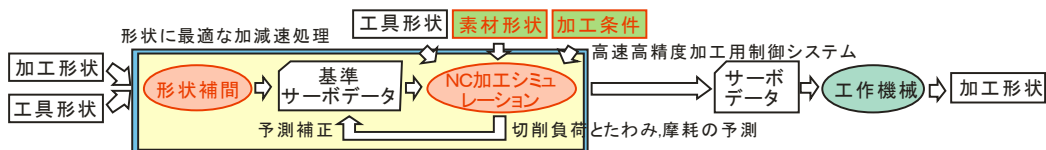


図3 NC加工シミュレーションに基づく高速高精度加工用制御システム

### (3) 切削負荷の予測

切削負荷は除去体積に大きく依存すると想定し、本研究では工具移動毎に工具高さ別の除去体積を求め負荷相当とした。具体的には、図5(a)に示すように、工具を高さ方向に対して一定間隔で分割し、各分割区間について、切削時の除去量を算出する事で切削位置を判定する。図5(a)では、1及び2の部分で切削を行うと判定する。

工具が移動する際には、図5(b)に示すように、工具の各分割区間の境界点の軌跡と、工具移動により生成される Swept Volume によって除去される素材とのスキャンライン上の交点を求める。スキャンラインの長さが除去体積となる為、各交点間の長さが各分割区間における除去量となる。図5(b)において切削を行った場合、図中の Swept Volume を構成する1本のスキャンラインでは、1~6の区間で切削が行われており、この区間の除去体積を対応する工具分割区間の除去体積に加える。この処理を Swept Volume を構成する全スキャンラインについて行う事で、各移動区間の工具の各高さ位置での除去体積を求める事ができる。

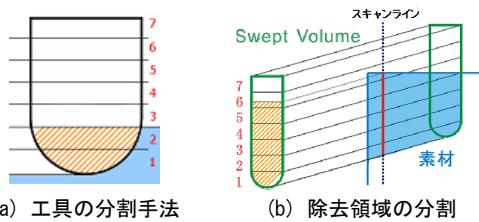


図5 切削情報の算出方法

### (4) 工具たわみの予測

加工中の工具のたわみは、図6に示すように簡易的に片持ち梁に集中加重を掛けた状態にモデル化することができる。ここで、切削力は1刃1回転当りの移動量の除去体積から経験的数値より得られる式(1)より簡易的に求めることができる。この切削力Fを用いて式(2)より先端からx[m]の位置にあるたわみ量zを求める。

ここで、 $V[\text{mm}^3/\text{rev}/\text{tooth}]$ はシミュレーションにより求めた1刃1回転当りの除去体積、 $L[\text{m}]$ は工具突き出し長、 $E[\text{GPa}]$ は工具材質の縦弾性係数、 $I[\text{m}^4]$ は断面2次モーメント、a及びnは被削材の材質及び硬さにより決定される係数である。

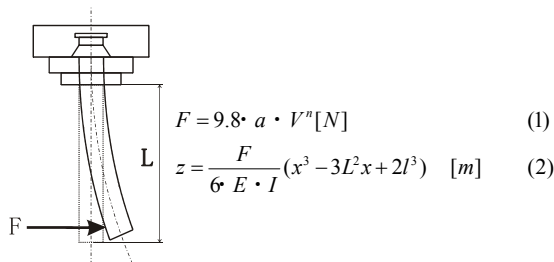


図6 工具のたわみ

工具のたわみ方向は簡易的に、素材と工具の接触点の方向ベクトルから予測を行う。具体的には図7に示すように1刃1回転当りの移動により生成された工具の Swept Volume と素材の境界にある接触点における方向ベクトルの総和である合成ベクトル  $F_a$  を工具の切削力方向として求める。そして、その反力の方向ベクトル  $F_c$  をたわみの発生する方向とする。

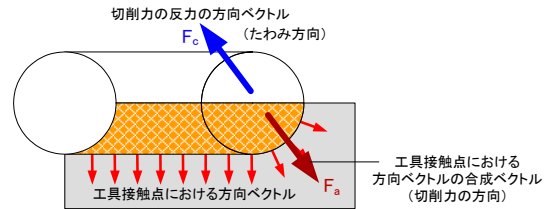


図7 たわみ方向の予測

## 4. 研究成果

### (1) 速度制御による加工誤差の予測補正

切削負荷が工具移動によって削り出される除去体積に依存することから、サーボデータのサンプリング周期当りの移動をもとに除去体積を求め、この除去体積を負荷変動相当とする。また、加工中の工具のたわみは切削力、つまり切削負荷に依存するため、1刃1回転当りの移動量の除去体積から切削力を求め、この切削力を用いてたわみ量を求める。そして切削負荷、たわみがともに除去体積に依存することから、NC加工シミュレーションにより除去体積を求め、単位時間当たりの除去体積が一定になるように速度を制御することで誤差の補正を行う。

### (2) 検証条件

提案した手法の有効性を検証するため、図8(a)に示す円錐台形状を直線と円弧からなる工具経路(A-F)を用いて加工した場合について、シミュレーションと加工実験を行い、通常のNCプログラム(G01,G02)を用いた場合と主軸負荷とたわみ量について比較した。図8(b)に示す断面形状(半径16.7mm)のC-E間は楕円形状をもち、2つの形状の繋ぎ目となるC,Eには切削負荷の急激な変化を起こすための0.2mmの段差がある。図8(c)はシミュレーション後の形状で工具経路の円弧部の半径は20.1705mmとする。加工条件として工具は半径5mmのボールエンドミル(ハイス)、突出量80mmを用い、切削時の送り速度1500mm/minとした。

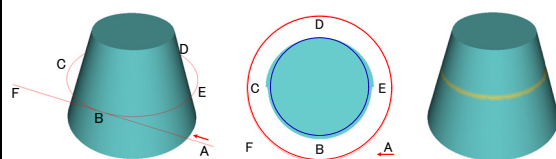


図8 検証用簡易モデル

### (3) 検証結果

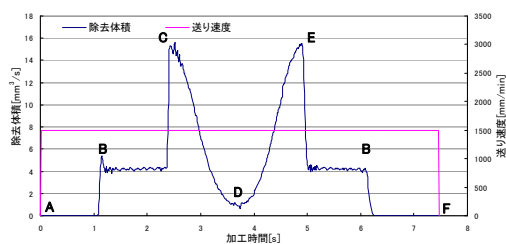
#### ①速度制御による切削負荷の低減

図9(a)は通常のNCプログラムに従い、従来手法による加工を行った場合の除去体積と送り速度のシミュレーション結果を表している。加工対象形状の段差のある C,E 部分で除去体積の急激な増加が起こり、切削負荷とたわみ量の増大が予測されている。

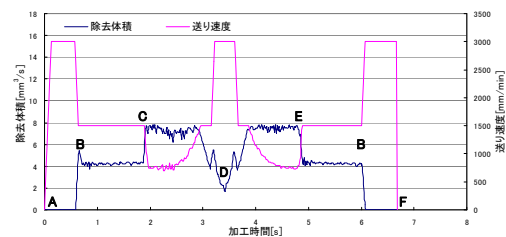
一方、図9(b)は同一条件で提案する手法により単位時間当たりの除去体積が従来手法の最大値のおよそ半分になるように単位時間あたりの除去体積の閾値を  $8\text{mm}^3/\text{sec}$  以下とし、補間周期  $16\text{ms}$  で速度制御を行った場合の除去体積と送り速度のシミュレーション結果を示している。段差の部分 C,E において除去体積を閾値以下に抑えるために減速を行っていることがわかる。これにより切削負荷の急激な増加を防ぎ、たわみ量を低減することが予測される。また、最大速度を  $3000\text{mm}/\text{min}$  としているため、切削を行っていない部分および除去体積が閾値以下となる D 部分で高速送りとなり加工時間が約 10%短縮されている。

提案システムの効果を検証するため、上記で示した検証条件で CNC 工作機械による加工実験を行い、 $48\text{ms}$  毎に主軸負荷と送り速度を CNC 装置の API を利用してサンプリング測定した。

図 10(a)は従来手法による加工を行った場合の加工実験結果を表している。図9(a)のシミュレーション結果と比較するとほぼ同様の変化をしていることから、除去体積の変動が実際の加工では主軸負荷と同等であることがわかる。図 10(b)は提案システムによる加工を行った場合であり、段差のある C 部分において従来手法とほぼ同値の切削負荷のピークが見られるが、減速を行うことで図9(b)のように主軸負荷の急激な変動を抑えていることがわかる。

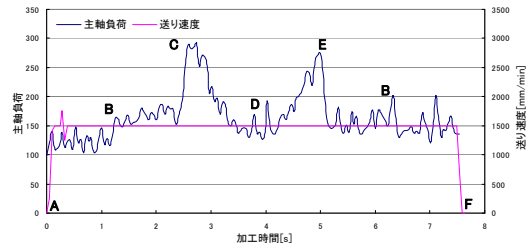


(a) 従来手法によるシミュレーション結果

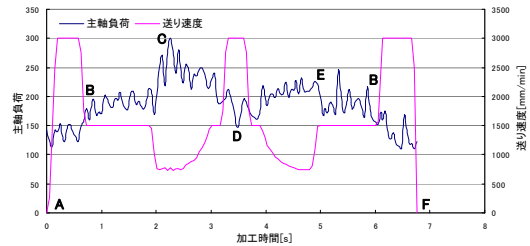


(b) 提案システムによるシミュレーション結果

図9 シミュレーションによる除去体積と速度の結果



(a) 従来手法による加工実験結果



(b) 提案システムによる加工実験結果

図 10 加工実験による速度と負荷の測定結果

#### ②速度制御によるたわみ変形の予測補正

提案するシステム利用によるたわみ量の減少効果を検証するために、加工後の形状表面を 3次元測定器で測定し、工具を完全な剛体として得られる半径  $15.27\text{mm}$  の円弧との半径誤差をたわみ量とした。

図 11 は切削を開始する B 部分を  $0^\circ$  とし、工具経路に合わせて時計回りに 1 周させたときのシミュレーション結果と実加工物の測定結果のたわみ量の推移を示している。同図の場合、工具のたわみ量を先端での最大たわみとし、工具たわみを考慮せず剛体工具として除去処理を行った。シミュレーション結果と実際の測定結果を比較すると全体的なたわみ量の数値に差はあるが、除去体積が急激に増加する C,E 部分でたわみ量が増大していることから、誤差量の傾向については一致しており、たわみ量が除去体積に依存していることがわかる。また、提案する速度制御によるたわみの予測補正により、加工誤差が小さく、たわみ量を減少させ、高精度に加工できていることがわかる。

また、図 12 は図 11 に示したようにたわみ変形量を先端のたわみ量固定とした場合と、式(2)に基づいて工具をたわみ量だけ変形させ、工具のたわみを考慮して除去した場合の、予測量及び実測値について形状誤差を比較した図である。ここで、シミュレーションと実測した結果が、たわみを考慮しない場合のたわみ予測量の約 50%となったことから、一時的に予測量の 50%の値を用いて比較した。全体的に工具のたわみ変形を考慮した方が予測した誤差量が小さくなり、実測値に近いことがわかる。しかし、B 点付近ではたわみを考慮しない方が実測値に近く、D においては、実測した誤差量が予測と大きく異なっており、検討の余地を残している。

#### (4) 結論

切削負荷を低減すると同時に工具のたわみ変形を少なくするため、切削負荷や工具のたわみを予測し、速度制御することで高精度化を実現するシステムを構築した。そして、加工実験により、構築したシステムの有効性を検証した。その結果、切削負荷を低減し、負荷が少ない箇所では速度を上げることにより、加工時間を短縮できることが明らかになった。また、加工誤差を低減できることも明らかになった。しかし、より有用性を高めるために、今後はたわみ量予測の精度向上を行う必要がある。

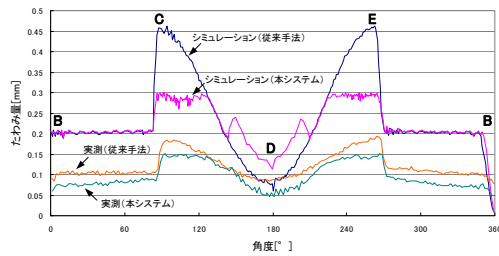


図 11 たわみ量比較 (工具経路)

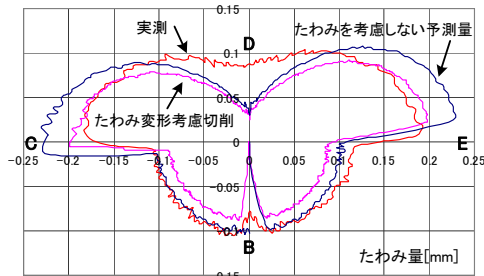


図 12 たわみ量比較

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Mikio Fujio, Seiji Shirai, Shouta Kuroyama, Development of Advanced NC Geometric Cutting Simulator, Progress of Machining Technology, 248-251, 2009, 査読有
- ② Mikio Fujio, Toshifumi Muramatsu, Hiroshi Suzuki, Development of Hi-speed and Hi-accuracy Machining System based on Servo Data Control-Constitution and Evaluation of Prototype System-, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Positioning Technology 2008, 153-158, 2008, 査読有
- ③ 藤尾三紀夫, 黒山翔太, NC 加工シミュレーションの高精度化に関する研究 - 工具のたわみと摩耗量の予測, 沼津工業高等専門学校研究報告第 42

号, 229-234, 2008, 査読無

- ④ Mikio Fujio, Hukuzo Yagishita, Hiroshi Suzuki, Development of Geometrical Model Kernel based on Boundary-Map data structure, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Progress of Machining Technology, 305-308, 2006, 査読有
- ⑤ 藤尾三紀夫, 黒山翔太, 柳下福蔵, 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, 日刊工業新聞社型技術 7 月号, 21, 62-63, 2006, 査読無

[学会発表] (計 8 件)

- ① 藤尾三紀夫, 植松邦成, NC 加工シミュレータの高機能化に関する研究 - たわみ方向の予測 -, 2009 年度精密工学会春季大会, 2009 年 3 月 13 日, 東京
- ② 藤尾三紀夫, 村松稔文, 宮代佳奈, 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 年度精密工学会春季大会, 2009 年 3 月 13 日, 東京
- ③ 藤尾三紀夫, 植松邦成, NC 加工シミュレーションに基づく高速高精度加工用制御システムの構築 - 工具のたわみ変形への対応 -, 2009 年度精密工学会春季大会, 2009 年 3 月 13 日, 東京
- ④ 藤尾三紀夫, 村松稔文ほか 2 名, 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 - NURBS 補間との比較検証 -, 2008 年度精密工学会秋季大会, 2008 年 9 月 17 日, 仙台
- ⑤ 藤尾三紀夫, 宮代佳奈ほか 2 名, NC 加工シミュレーションに基づく高速高精度加工用制御システムの構築 - 基本システムの検証 -, 2008 年度精密工学会秋季大会, 2008 年 9 月 17 日, 仙台
- ⑥ 藤尾三紀夫, 五十嵐啓介ほか 2 名, 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 - 速度制御と位置制御を統合した工具経路生成 -, 2007 年度精密工学会秋季大会, 2007 年 9 月 12 日, 旭川
- ⑦ 藤尾三紀夫, 宮代佳奈ほか 2 名, NC 加工シミュレーションに基づく高速高精度加工用制御システムの構築 - 基本概念の提案 -, 2007 年度精密工学会秋季大会, 2007 年 9 月 12 日, 旭川
- ⑧ 藤尾三紀夫, 黒山翔太ほか 2 名, 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, 2006 年 9 月 22 日, 宇都宮

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤尾 三紀夫 (FUJIO MIKIO)  
沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・教授  
研究者番号: 70238541