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 — 加工中の誤差予測 —

Development of hi-speed and hi-accuracy machining system based on NC geometric cutting simulation - Estimation of Machining Error -

正 藤尾 三紀夫 (沼津高専)   ○ 非 小林 亮太 (沼津高専)
学 宮代 佳奈 (沼津高専)   学 中村 幸平 (沼津高専)

Mikio FUJIO, Ryouta KOBAYASHI, Kana MIYASHIRO, Kouhei NAKAMURA,
Numazu National College of Technology

The servo data is directly generated by geometric model interpolation without NC program. In this research the tool path generation system that is able to predict and compensate the tool deflection and fluctuation of cutting load is proposed. It is assumed that the cutting force and its direction of tool are leading cause of machining error. This report refers to the algorithm to calculate the cutting force and its direction of tool based on removal volume. The estimated cutting force and its direction are validated by machining test using by flat-end mill. Moreover the equation of cutting force is elicited by the machining test and measurement.

Key Words: CAM, NC geometric cutting simulation, cutting load, cutting force, Tool deflection

1. 緒 言

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、世界に誇れる加工技術のひとつである。しかし近年、アジア諸国の加工技術の向上はめざましく、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を保つことが必須であると考えられる。

そこで本研究では、さらなる高速高精度加工を実現するため、加工中に生じる誤差を NC 加工シミュレーションにより予測補正し、機械を制御する新たな高速高精度加工用制御システムの構築を目的としている。そして、このシステムの NC 加工シミュレーションにおける加工誤差予測において、切削負荷や工具たわみ等の大きな要因となっている切削力に注目し、まずは切削力の予測を目的とした。本報告では切削除去体積から切削力とその方向について予測する手法を検討して加工実験を行った結果について報告する。

2. 高速高精度加工用制御システムの基本概念

図 1 は現状の加工システムの構成図を示している。加工対象形状と工具経路が与えられると、CAM システムは NC プログラムを作成し、NC 加工シミュレーションを用いて工具経路の検証を行う。しかしこの際、工具のたわみや切削負荷量などはわからないため、熟練工の勘に頼って修正しているのが現状である。また、評価された NC プログラムを用いて加工した際も、微小点群となった工具経路から形状を認識し、最適な加減速処理で加工することは難しいため、加工後の形状にスジや打痕が生じている。また同時に工具のたわみや工具摩耗など加工中の誤差が生じ、加工誤差の増大を招いている。

一方、図 2 は本研究で提案している CAM、CNC、工作機械を統合した高速高精度制御用加工システムの基本概念である。幾何情報から直接サーボデータを生成し、得られた基準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では従来考慮されなかった素材形状、加工条件を考慮した NC 加工シミュレーションにより求め^{[1][2]}、得られた情報に基づいて速度を制御、あるいは工具経路を修正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。この一連の処理はオフラインで行う。

Fig.1 Present machining system

Fig.2 Hi-speed and hi-accuracy machining system based on NC geometric cutting simulation

3. 切削力の予測方向

3.1 切削力の予測

加工を行う際に生じる切削力は、主に工具及び被削材の材質・硬さに依存している。そのため切削力 F は、1 刃 1 回転当たりの除去体積に依存することが知られており、工具経路を 1 刃 1 回転当たりの送り量毎に分割し、分割された各工具経路区間の **Swept Volume** (工具掃引形状) により除去された除去体積の総和から求める。具体的には、過去に実験的に得られた式(1)より切削力 F を簡易的に求める^[3]。

$$F = 9.8 \cdot a \cdot V^n \quad [N] \quad (1)$$

ここで、 $V[\text{mm}^3/\text{rev}/\text{tooth}]$ は 1 刃 1 回転当たりの除去体積、 a 及び n は被削材の材質及び硬さにより決定する過去の実験から得られた係数である。

3.2 除去体積の算出方法

NC 加工シミュレーションに用いる工具形状が定義されると、図 3(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を行う。また、工具が移動する際には、図 3(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** により除去される素材とのスキャンライン上の交点を求める^[4]。スキャンラインとその交点の長さが除去体積となるため、各交点間の長さが各分割区間での除去量となる。図 3(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 L では、1~6 の区間で切削が行われ、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、各移動区間での工具高さ方向の除去体積を求める事ができる。

Fig.3 Removal volume

3.3 切削力の方向予測

本研究において切削力は工具移動における **Swept Volume** と work との論理積である除去体積から求めているため、除去体積の形を知ることができる。一方、切削力は工具 1 回転当たりにおいて、大きさ、方向は逐次変化している。本研究では、切削方向の導出を実用的な計算量で収めるため、この切削方向を近似的に求める。具体的には図 4 に示すように除去体積を工具が 1 回転したときの区間で区切り、それぞれ接線方向のベクトル N_t を求める。この N_t の合計を切削方向ベクトル N_c として算出する。そして、 θ を切削方向とする。

Fig.4 Direction of cutting force

4. 実験および結果

提案する切削力と切削方向の予測手法の精度を検証するため、図 5 に示す工具経路でフラットエンドミルを用い、加工長 44mm で図 6 に示す切り込み量と、表 1 に示す加工条件のもとで、送り速度を 10~60mm/min に変化させて加工を行った。そして、切削動力計を用いて測定した結果と本研究のシミュレーション結果を比較した。ここで、切削力の予測式におけるパラメータは、 $a=52.54$, $n=0.63$ を用いた。工具突き出し長さは、たわみ量を増大させるため L/D が 8 となる 80mm とした。

Fig.5 Toolpath of machining test

Fig.6 Cutting parameter

Table 1 Cutting condition(Exp.1)

パラメータ[単位]	値
フラットエンドミル(ハイス):D[mm]	φ10
主軸回転数:S[rpm]	400
突き出し長さ:L[mm]	80
切り込み[mm]	横方向(y)
	z方向
送り速度:F[mm/min]	10~60

図 7 は、各送り速度における除去体積と切削力の関係、図 8 は、除去体積と図 4 に示す切削方向を比較した図である。

Fig.7 Variation of cutting force

Fig.8 Variation of direction of cutting force

図 7 より、測定値と予測値に誤差がみられた。これは、使用した経験式が古いものであり、現在の加工環境とは一致しないためであると考えられる。図 8 より、切削方向は予測値では変化が見られないが、測定値では送り速度により変化していることがわかる。これは、工具と work 間での背分力を考慮に入れていないためであると考えられる。また予測式の形から、切削力の近似曲線は累乗近似を用いた。

そこで、新たな切削力の予測式を算出し、精度を向上させるため、追実験を行った。追実験 2,3 では、除去体積と切削力の関係をさらに検証するために、表 1 から主軸回転数、Z 方向の切り込み(除去体積)を変化させた表 2 実験 2、追実験 3 に示す加工条件のもとで加工を行った。また同時に、図 9 に示す円弧の工具経路と図 10 に示す溝加工の工具経路で表 2 の実験 4、実験 5 に示す加工条件でも加工を行った。

Table 2 Machining condition (Exp.2)

パラメータ[単位]	値(実験2)	値(実験3)	値(実験4)	値(実験5)
フラットエンドミル(ハイス)D[mm]	φ10	φ10	φ10	φ10
主軸回転数S[rpm]	800/1200	400	400	400
突き出し長さL[mm]	80	80	80	80
切り込み[mm]	横方向(y)	1	1	1
	Z方向	5	2/3.5	5
送り速度F[mm/min]	10~60	10~60	10~60	10~60

Fig.9 Circular machining

Fig.10 Groove machining

図 11、図 12、図 13 は、除去体積と切削力との関係と比較した実験結果である。

Fig.11 Variation of cutting force (case of Exp.2)

Fig.12 Variation of cutting force (case of Exp.3)

Fig.13 Variation of cutting force (case of Exp.4 and 5)

図 11 から、Z 方向への切り込みを変化させることにより、除去体積の変化に依存せず、切削力はほぼ変化しないことがわかる。また図 12 から、主軸回転数の変化に対しても切削力が除去体積に依存することが判った。さらに図 13 から側面切削、円弧切削、溝切削と加工方法を変えても切削力が除去体積に依存することがわかった。

これらの結果から、加工条件にかかわらず切削力は除去体積に依存する関係性が見られた。そこで、これらの実験で得られた結果を基に、予測式を新たに補正すると、 $a=46.99$ 、 $n=0.33$ となった。図 14 は、実験 2 に新たに補正をした予測値を重ねた図である。同図より予測値の精度が向上していることがわかる。

Fig.14 Variation of cutting force (Using new equation)

6. 結 言

本研究では、高速高精度加工を実現する加工制御システム構築に当たり、まず NC 加工シミュレーションの高精度化を目指し、切削力と切削方向を予測する手法を提案し、加工実験により評価を行なった。その結果切削力については、従来の予測式では一致しないことがわかり、加工実験により新たな予測式を提案した。一方で、送り速度による切削力の方向ベクトルの予測が正確にできておらず、その原因を検討する必要があることが明らかになった。なお本研究は科学研究費補助金基盤研究(C)14550251,1856026,21560283 により実施された。

文 献

- [1] 入江俊志：MC を生かす加工シミュレーション (2005)，ツールエンジニア 2005 年 9 月号臨時増刊，pp. 78-83
- [2] 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 (2006)，ツールエンジニア 2006 年 1 月号，pp. 98-102
- [3] ツールエンジニア：でか版技能ブックス②エンドミルのすべて，大河出版，1991，pp.56
- [4] 黒山ほか：NC 加工シミュレーションの高精度化に関する研究，2007 年度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文 A15