高速ミーリング用 CAM ソフトウェアの開発*

坂本哲郎** 竹内芳美*** 高橋一郎+ 加瀬 究+ 安斎正博+

Development of CAM System for High Speed Milling

Tetsuro SAKAMOTO, Yoshimi TAKEUCHI, Ichiro TAKAHASHI, Kiwamu KASE and Masahiro ANZAI

The authors have developed a CAM system for high speed milling. The features of this CAM system are described in the following. An optimum zigzag path for high speed milling was adopted. Paths which prevent large tool load in the groove cutting for long cutting length are generated. At the tool approach area, the slant-cutting method was adopted, and at the same time, the feed speed was decreased. This contributed to the reduction of tool load and prevented chipping of cutting edge. A comparison of cutting results by the CAM developed and a commercially available CAM showed that the CAM developed realizes shorter cutting time, the same tool life and accuracy as the commercially available CAM. These results confirm that the CAM developed is useful for high speed milling.

Key words: high speed milling, CAM software, zigzag path, cutting time reduction

1. 結 論

筆者らは、先に 12 万 min^{-1} の高速エアスピンドルおよび 100 m/min の高速送り駆動系を有し、往復 (Zigzag) パスの特徴とする超高速ミーリング機 (HICART) を開発した^{1) 2)}。ここで往復パスを採用しているのは、従来の加工機で使う微小分割データを用いるパスの不具合 (設定した送り速度に到達しない等) を改善するため、これを考慮した高速ミーリング用 CAD/CAM ソフトウェアは少なく、高速ミーリング用の工具経路生成の研究報告もわずかである³⁾。また高能率加工を重視している加工法^{4) 5)}はあるが、HICART のように 1 種類の小径ボールエンドミルを用いた高速ミーリングによる高能率な金型加工を行うことを前提にした CAM ソフトウェア (以下 CAM と略記) は存在しない。

本研究では HICART を用いて、高速ミーリング用の CAM として往復パスを選択し、以下の項目について検討した。

- (1) 通常のミーリングで往復加工すると、方向転換部分において切削抵抗が大きくなる問題がある。高速ミーリングで往復加工を用いた場合での切削抵抗変動の測定。
- (2) 往復パスの短ストローク部分において、短時間での連続的な方向転換により発生するオーバシュートによる形状精度低下の回避方法。
- (3) 工具進入時の切削抵抗の増加による、工具のチッピングを回避するための切削抵抗の減少方法。
- (4) 溝加工距離における切削抵抗の増加や動的衝撃を抑制するアルゴリズムを付加した往復加工用工具経路生成方法の検討。
- (5) 本開発 CAM により生成した往復パスと、市販 CAM により生成したオフセットパスを用いて金型モデルを加工し、本システムの有用性を検討。

これらの結果に基づいた CAM ソフトウェアを開発し、その有用性を確認したので報告する。

* 原稿受付 平成12年4月4日

** 学生会員 電気通信大学大学院 (現、三菱重工 (株); 名古屋市中村区岩塚町字高道1)

*** 正 会 員 電気通信大学 (調布市調布ヶ丘1-5-1)

+ 正 会 員 理化学研究所 (和光市広沢2-1)

2. 高速ミーリングにおける往復パス

2.1 往復加工パスの提案

高速ミーリングを実現するには、高速送りの実現が不可欠である。しかし、現在、3 次元自由曲面加工のための工具経路は、微小分割された直線加工の連続による擬似的な曲線加工を基本とし、NC 工作機械の 2 軸同時送り制御を用いており、このような曲線加工では、指定送り速度を増大させても工作機械の送りが追従しない。本研究では、この問題を解決する 1 つの方法として、3 次元形状をスライスして得られた各断面を順次往復加工によって塗りつぶすパスを使用した。この往復加工では 1 軸制御の比較的長い直線運動を繰り返すことになり、高速送りが可能になる⁶⁾。また、往復加工を初めに行い、往復加工では除去しきれない削り残しは、輪郭加工パスを付加して除去する。この際の輪郭加工は最終仕上げ加工で、曲線加工になるため高速送りはできないが、加工時間全体に対して占める割合は小さいので問題にはならない。

2.2 高速ミーリングによる往復加工の切削抵抗

往復パスの特徴である直線運動→方向転換→直線運動では、直線部分の切削における切削抵抗はほぼ一定値を示すために安定しているものの、方向転換時には接触弧が増加するために切削抵抗が大きくなることにより工具への負荷が増大すると一般に言われている。そこで、高速ミーリングにおける往復パスの切削負荷を知るため、HICART を用いて切削抵抗の測定を行った。図 1 に示すように、工具動力計 (キスラー製) を設置し、往復加工を行い、切削抵抗の合力を求めた。

Fig. 1 Measurement of cutting force in zigzag path

その際の切削条件を表1に示す。切削抵抗を図2に示す(図1と図2の1, 2, 3, 4, 5は各工具位置に対応)。最大切削抵抗の位置はストロークの中心部分となり、送り速度最大の位置である。また、方向転換部分の切削抵抗は小さくなる。このように、高速ミーリングにおける工具経路の両端で切削抵抗のピークが生じないのは、接触弧が増加したとしても工具は高速回転しているために、1刃送りが十分小さくなり切削抵抗が増加しないためと考えられる。

2.3 短ストローク部分での形状精度向上

往復加工では、ストローク距離(往復加工の端点間の距離)が減少すると、短時間に連続的な方向転換による急加減速が起き、制御装置が追従できないため、面性状が悪化する⁷⁾。そこで、形状精度の改善方法検討のため、HICARTを用い、図3に示す直角三角形形状を、往復加工パス(Pf=0.3mm)で、以下に示す条件(a), (b), (c), (d)を用いて動作させ、工作機械のサーボモータからフィードバック信号を読み取り、軸動作の測定と切削時間の比較を行った。

- (a) : 指定送り速度 = 20 m/min, 設定加速度 = 1 G
- (b) : 指定送り速度 = 20 m/min, 設定加速度 = 0.5 G
- (c) : 指定送り速度 = 1 m/min, 設定加速度 = 1 G
- (d) : ストローク部分 = 20 m/min, 方向転換部分 = 1 m/min, 設定加速度 = 1 G

図4で示すように、(a) : 最大オーバーシュートは 0.3 mm となった。(b) : 加速度を下げててもオーバーシュートの抑制は得られなかった。(c), (d)では方向転換部分で減速され、指示通りの位置に移動可能となるため、オーバーシュートが 0.1 mm 以下に抑制できた。表2に(a) ~ (d)の条件下での切削時間を示す。(a)に比較して、(c)は約4倍であるが、(d)は14%と増加量が小さい。ここで、往復加工における短ストローク部分のオーバーシュートは、方向転換部のみ指定送り速度を減速させることで0.1 mm以下に抑制でき、かつ切削時間の増加も抑制できることが判明した。

3. 工具進入方法

工具進入時は、溝加工や直角な工具進入など工具負荷が大きく、チップングや折損が発生しやすいため、現状では送り速度を下げたり、傾斜切削により対応している⁸⁾。そこで高速ミーリング時の適切な工具進入方法検討のため、前節2.2と同様に工具動力計上にワークを載せ、図5(a), (b)に示す工具進入パスを、以下の条件(A), (B)にて切削実験を行い、前節2.2の図2で示した高速ミーリングによる往復加工時(F = 20 m/min)の切削抵抗と、切込み時の切削抵抗を比較した。また、切りくず排出状況を高速カメラ(フォトリソ製)で、排出された切りくず形状をCCDカメラでそれぞれ観察した。表3に切削条件を示す。

- (A) 減速して直角に工具を進入, 指定送り速度 = 1 m/min
- (B) ストローク全体で傾斜加工, 指定送り速度 = 20 m/min

図6に切削抵抗を示す(図5と図6の1, 2, 3は各工具位置に対応)。(A)では工具進入の部分1の切削抵抗が最大になると推測したが、送り距離が往復加工時の1/20であるため、全体を通じてほぼ同一の切削抵抗となっており、切削抵抗の最大値は通常の往復加工の1/3であった。(B)では切込み深さ半分の位置が、送り速度最大となり、切削抵抗も最大となった。切込み深さ最大の位置では、ストロークの端点であるため送り速度が遅く、切削抵抗の上昇が小さく抑えられた。また、切削

Table 1 Cutting conditions for experiments

Machine tool	HICART (RIKEN)
Dynamometer	Type 9256A2 (KISTLER)
Tool	R = 1 mm Ball end mill (Ti, Al) N coated WC, L = 8 mm
Workpiece	Pre-hardened steel HRC 43 (HPM-1)
Cutting conditions	Rotational speed N = 100000 min ⁻¹ Setting feed speed = 20 m/min, Depth of cut Ad = 0.3 mm, Pick feed Pf = 0.3 mm, Dry cutting

Fig. 2 Cutting force

Fig. 3 Cutter path for measuring form accuracy

Fig. 4 Actual movements of cutting path

Table 2 Cutting time

Path	(a)	(b)	(c)	(d)
Time min	2.17	2.50	8.92	2.47

Fig. 5 Two kinds of entry path

Table 3 Cutting conditions of entry path

Machine tool	HICART (RIKEN)
Tool	R = 1 mm Ball end mill (Ti, Al) N coated WC, L = 8 mm
Workpiece	Pre-hardened steel HRC 43 (HPM-1)
Cutting conditions	Rotational speed N = 100000 min ⁻¹ , Depth of cut Ad = 0.3 mm, Dry cutting

抵抗の最大値は、溝加工であるものの、切込み深さが小さいため、通常の往復加工の1.24倍に留まった。図7に切りくず形状を示す。同図(a)の始めの切込み部分では切りくずが排出されず、ドリル加工時に生成される場合と同様の長い切りくずとなる。また、高速度カメラにより工具進入時に工具の周りに切りくずのつれ回りが観察され、このことから工具進入時はボールエンドミルがドリル加工と同じ切削形態を示すことが分った。直下に進入するとボールエンドミルによりドリル加工され、中心刃への負荷が増加し、表面粗さは中心刃に依存するので⁹⁾、直角進入は良いとは言えない。同図(b)の傾斜切削の切りくず形状は、切込み量に比例して切りくずも大きくなっている。また、高速度カメラより工具から切りくずが連続的に排出されていることが確認された。よって工具進入方法は、切削抵抗を上昇させないためには指定送り速度の減速・傾斜切削が有効であり、中心刃に負担を掛けないためには傾斜切削を実行すれば良いことになる。

4. 工具経路生成アルゴリズム

4.1 往復加工における溝加工距離のしきい値設定

溝加工は工具への負荷が大きく、チッピングが発生する可能性がある。そこで、図8(a)に示すように、往復加工時に溝加工を行わなければならない場面が存在する場合は、溝加工距離にしきい値を設定し、そのしきい値以上の溝加工がある場合は、Z方向に回避し、新たに工具進入を行うことにより、溝加工による工具のチッピングを抑制する経路生成法を考案した。しきい値の決定方法の例として、図8(b)に示すようにストローク距離35mmの往復加工をF=20m/minで行い、図8(c)の下(ii)にその加工時における切削抵抗と時間の関係を、図8(c)の上(i)に工具位置と時間の関係を示す。(i)、(ii)は同じ時間軸である。図8(b)と(c)(i)のA、B、C、D、Eは各工具位置の対応を示している。図8(c)(ii)の切削抵抗の振幅の中間値に線を引き、最大切削抵抗の中間値以下で溝加工を許容すると仮定すると、図8(c)(ii)、(i)から、中間値の工具位置はB、Dに対応し、方向転換部分からの距離は約3mmとなる。よって今回のしきい値は3mmと設定した。

4.2 往復パスの生成

前章で述べたように、各Z層ごとの2次元切削を行う。始めに現在のZ層における切削可能な往復加工範囲を自動認識し、図9(a)に示すように切削可能部分の最下部(B)、最上部(T)、ストローク最長部(L)の3種類の工具の切込み部分を決める。また同図(b)に示すように各切込み部分からの移動方向は4種類あるので、合計12種類の往復パスが得られる。一度ワークと接触したらできる限り長距離の切削を行わせるために、その全往復パスの切削距離を測定し、最大切削距離のパスを選択する。この処理を往復加工可能範囲のすべてが選択されるまで繰り返すことにより、パスの領域分割が自動的に行える。同図(c)に処理の流れを示す。

4.3 工具進入時の処理

前章で工具進入時に、送り速度の減速・傾斜切削により動的衝撃によるチッピングが回避可能であると述べた。市販のCAMでは垂直に工具を進入させるものもあるが、本開発CAMでは切込み時には傾斜切削を行い、図10(a)に示すように、ストロークの長さ全体を用いることで進入角度を小さくしている。しかし、実際の金型切削時には切込み時のストロークが短い場合があり、ストロークの短い部分では工具進入角度が大

Fig.6 Cutting force for entry stroke

Fig.7 Different chip by entry stroke

Fig.8 Setting of threshold

Fig.9 Generation of zigzag path

小さくなってしまい、傾斜切削の利点が薄れてしまう。そこで、同図 (b) に示すように、1 回の切込み深さを減少させ、進入角度を小さくしたパスを使用する。市販のミドルレンジ CAM の多くのオフセット加工では、進入時に工具負荷の小さいヘリカル加工が使用され、ヘリカルパスの進入角度を 5° としているものがある。そこで、進入角度は 5° 未満の値とし、本研究では 3.5° (ストローク 5mm, 切込み深さ 0.3mm で進入角度 3.5°) を採用した。

4.4 市販 CAM より生成した往復加工との比較

図 11 に示す金型モデル形状の往復加工パスを市販の CAM と本開発 CAM より生成する。図 12 に同 Z 値層の切削順を示す (数字は切削の順番, 矢印は切削方向を示す)。領域の分割は市販の CAM では 7 となり、開発した CAM では 10 と増加した。しかし、市販 CAM では波線で示した部分が長距離溝加工となっており、その長距離溝加工を解消するために、本開発 CAM は分割数が増加した。表 4 に往復パスの比較を示す。移動距離 (切削距離 + エアカット距離) では、本開発 CAM は市販 CAM より約 1 割の増加となった。これは、領域増加によるエアカット距離の増加や傾斜切削による切削距離が増加するためであるが、約 1 割の増加で、動的衝撃による工具のチップングが抑制可能ならば十分に許容範囲内であると考えられる。

5. 加工実験

5.1 実験条件

荒加工 (仕上げ代 0.1mm) として市販 CAM で生成したオフセット加工パス (A)、開発した CAM より生成した往復加工パス (B) を、仕上げ加工としては市販 CAM より生成した等高線加工パス (平面部分は往復パスを付加) を用いて、図 11 の形状加工を行った。表 5 にその際の切削条件を示す。

5.2 実験結果

図 13 (A-1) に荒加工 (A) オフセットパスのみ行った加工物、(A-2) に荒加工 (A) オフセットパス→仕上げ加工を行った加工物、図 13 (B-1) に荒加工 (B) 開発往復パスのみ行った加工物、(B-2) に荒加工 (B) 開発往復パス→仕上げ加工を行った加工物の外観を示す。図 14 に図 11 の (a) 範囲、図 15 に図 11 の (b) 範囲を拡大したものを示す。図 13、図 14 (A-2) (B-2) より、荒加工 + 仕上げ加工後のワークにおいて、目視では切削面はほぼ同一であったが、図 15 (A-2) (B-2) では (A-2) の加工面にのみ小さな凹凸が観察された。これは荒加工のオフセットパスの加速度が全て 1G であるため、円のような形状を微小分割直線で加工を行う場合に、最外周の輪郭加工時にオーバシュートが発生し²⁾、その量が仕上げ代 0.1mm を越え、仕上げ加工面に凹凸を発生させたものと考えられる。したがって、荒加工時のオフセット加工でも、輪郭加工時には加速度を減速させないと、仕上げ面に影響を及ぼすオーバシュートが発生する可能性があり、そのため荒加工のオフセットパスでも輪郭加工時には、加速度パラメータを下げる必要がある。表 6 に荒加工のみと、全加工 (荒加工 + 仕上げ加工) の切削時間を示す。荒加工時間は、開発往復パス (B) を用いるとオフセットパス (A) より 51 % 減少した。仕上げ加工時間は、荒加工時間より短いため、同一仕上げ加工を付加した全加工時間でも、開発往復パスはオフセットパスより 36 % 減少した。図 16 に工具摩耗と切削距離の関係を示す。各パスともに 1 本の工具を用い、荒加工→仕上げ加工→新しいワークで 2 回目の

Fig. 10 Difference of entry path by stroke length

Fig. 11 CAD data used for experiments

Fig. 12 Cutting order

Table 4 Comparison of zigzag path

	Conventional CAM	Developed CAM
Moving length m	55.6	62.0
Maximum entry angle °	90	3.5

Table 5 Cutting conditions for experiments

Machine tool	HICART (RIKEN)	
Tool	R = 1 mm Ball end mill (Ti, Al) N coated WC, L = 8 mm	
Workpiece	Pre-hardened steel HRC 43 (HPM-1)	
Cutting conditions	Rotational speed N = 100000 min ⁻¹ Dry cutting	
Rough path	Depth of cut Ad = 0.3 mm, Pick feed Pf = 0.3 mm	
	(A) Offset path (Conventional)	Setting feed speed = 20 m/min Acceleration = 1G, Cutting length L = 64.5 m
	(B) Zigzag path (Developed)	Reciprocating area acceleration = 1G Entry part setting feed speed = 7 m/min Stroke part setting feed speed = 7 m/min Change direction part at short stroke = 1 m/min Contouring area acceleration = 0.5 G, F = 4 m/min, Cutting length = 62.0 m
Finishing path	Acceleration = 0.5 G, F = 20 m/min, Cutting length = 24.9 m	
	Contour cutting	Depth of cut Ad = 0.1 mm
	Horizontal area	Zigzag path, Pick feed Pf = 0.1 mm

Fig. 13 External view of machined workpieces

Fig. 14 External view of (a) area shown in Fig. 11

荒加工を行ったが、荒加工の途中で工具のコート層が無くなり摩耗が急増した。工具のばらつきを考慮すると、オフセットパスと開発往復パスの工具摩耗と切削距離の関係はほぼ同じであると良い。

6. 結 論

本研究では、高速ミーリング用のパスとして往復パスを適用するための切削条件の検討を行い、また開発CAMと市販CAMより生成した工具経路の比較実験を行い、次の結果を得た。

- (1) 高速ミーリングで往復加工を行うと、方向転換部分の送りが遅いため1刃当たりの送りが短くなり、切削抵抗が小さくなる。
- (2) 往復パスの短ストローク部分において、短時間での連続的な方向転換による急加減速のために発生するオーバーシュートなどの形状精度低下は、NCデータ上での方向転換部分の指定送り速度減速で抑制可能である。
- (3) 工具進入時はドリル加工や溝加工になり、工具に対する切削抵抗が増大し、工具のチッピングなどの原因となる。工具進入時は、送り速度の減速や傾斜切削を行うことで切削抵抗の減少、傾斜切削を行うことで中心刃への負荷の抑制が可能である。
- (4) 高速ミーリング用往復加工用CAMとして、溝加工距離にしきい値を設定して長距離の溝加工を避け、また切込み時には傾斜切削を行うことにより切削抵抗の増加や動的衝撃を抑制するCAMを開発できた。
- (5) 荒加工として、本CAMから生成した往復パスと、市販のCAMから生成したオフセットパスを用いて金型モデル

Fig. 15 External view of (b) area shown in Fig. 11

Table 6 Cutting time

	(A)	(B)
Kind of rough cutting path	Offset path	Zigzag path
Rough cutting time min	28.3	13.8
Kind of finishing cutting path	Z lay contouring path	
Total cutting time min	39.9	25.4

Fig. 16 Frank wear (VBmax) versus cutting length

ル加工の比較実験を行った結果、切削時間を半減することができた。また、仕上げ加工を同一パスで行った場合でも総合切削時間は約4割減少させることが可能になった。なお、この際の工具摩耗、形状精度は同程度であった。以上のことから、開発した本CAMシステムは金型加工に十分有用であると言える。

参 考 文 献

1) 高橋一郎, 安斎正博, 中川威雄: 超高速加工機「HICART」の開発, 機械と工具, 42, 4(1998) 20.
2) 高橋一郎, 坂本哲郎, 安斎正博, 中川威雄: 金型高速ミーリング用カッタパスの適応, 型技術, 13, 13(1998) 14.
3) 例えば, 加瀬 究, 安斎正博: 高速切削で CAD/CAM はどう変わるか (べきか) ?, 機械技術, 47, 9(1999) 27.
4) 例えば, 福井雅彦, 玉井秀樹, 高橋百利: 三次元金型用・高能率切削加工, 精密工学会誌, 64, 6(1998) 819.
5) 例えば, 大平研五: 高速金型加工用マシニングセンタによる金型加工, 型技術, 10, 3(1995) 34.
6) 高橋一郎, 安斎正博, 中川威雄: 往復送りカッタパスを用いる超高速ミーリング機の開発, 精密工学会誌, 65, 5(1999) 714.
7) 坂本哲郎, 竹内芳美, 高橋一郎, 加瀬究, 安斎正博: 高速ミーリング用カッタパスの生成に関する研究, 1999 年度精密工学会春季大会学術講演会後援論文集, (1999) 226.
8) 例えば, 百地 武: 空気静圧主軸による金型の超高速加工, 機械技術増刊号 機械加工ハンドブック, 47, 12(1999) 13.
9) 高橋一郎, 安斎正博, 中川威雄: 10 万回転超高速ミーリングにおける超硬小径ボールエンドミルの摩耗特性, 精密工学会誌, 65, 6(1999) 867.