



マシニングセンタの生産性向上に関する研究 (第2報)*

— 工具経路が生産性に及ぼす影響 —

閻 喜仁** 白瀬敬一*** 河端 裕† 平尾政利†† 安井武司††

Improving Productivity of Machining Centers Based on NC Program Diagnostic System (2nd Report)
-Effects of Tool Paths on Productivity-

Xiren YAN, Keiichi SHIRASE, Hiroshi KAWABATA, Masatoshi HIRAO and Takeshi YASUI

The productivity of machining centers is affected not only by the effective feed rates and average tool travel per block studied in the first report, but also by the generated tool paths, especially the variation of moving vectors of the tool. In this paper, first of all, the factor of productivity evaluation is defined extensively to the case of multi-F code, and furthermore expressed as a function of the time constants, feed, average travel per block and the moving vectors of the tool. The expression of the factor shows that the smaller the time constants and the average variation per block of moving vectors, the higher the productivity is, and the longer the average travel per block, the higher the productivity is. Then with feature-based work models, namely, spline plane, slope, boss, island and pocket, being exemplified, the productivity of those NC programs generated by I-DEAS CAM tool is analyzed by the self-developed NC program simulator in two patterns of tool paths, namely the contour line and zigzag. The results show that in most cases, the productivity of the tool path in contour line pattern is higher, and the productivity of machining with a tool of smaller diameter is higher when the cutting power is kept constant. The theoretic and simulative studies on the tool path will contribute to the development of new CAM tools.

Key words : NC program, machining center, productivity, tool path, contour line, zigzag, CAM

1. はじめに

製品の差別化, 消費者ニーズの多様化により, 製品デザイン(外観)は個性的になり, それらの生産に欠かせない金型の加工形状が複雑になる一方で, 生産性の向上が求められている. 金型の加工に用いられるマシニングセンタ(以下MC)の生産性は, NCプログラムの良否に左右されており, 第1報¹⁾ではNCプログラムシミュレータにより加工時間を評価して, 生産性が有効送り速度, 1ブロック当たりの平均移動距離で評価できることを報告した.

また, 工具経路生成法に関する研究²⁾³⁾も行われているが, ここでは特定の被削材形状に対して1種類の工具経路パターン(Zigzag or staircase²⁾)が検討されており, 工具経路の良否は工具経路の全長のみで評価されている. しかし現実には, 工具経路の良否は工具経路の全長だけではなく, 工具の加減速に影響を及ぼす工具移動ベクトルの変化や1ブロック当たりの平均移動距離にも左右される.

そこで本報では, 第1報で提案した評価式を拡張し, ブロックごとの送り速度や工具移動ベクトルの変化についても考慮した生産性評価法を提案する. さらに, 工具経路パターン(等高線加工とZigzag加工)の違いや, 等動力という拘束条件での工具径の違いについて生産性の良否を検討した. ここでは, 自由曲面, 傾斜面, ポケットや島といった特徴的な加工形状を例に, 市販のCAMツールを利用して作成したNCプログラムの生産性を自作のNCプログラムシミュレータで評価した. 最後に, 切削条件, 工具経路パターンを最適化して生産性を向上させるため

の要因を検討し, CAMにおける工具経路生成の戦略を模索する.

2. 生産性の評価

2.1 有効送り速度に基づいた評価指数

第1報では, 式(1)に示す有効送り速度比 e を定義した. この式では連続するブロックで, 送り速度 F が一定であると仮定していた.

$$e = \frac{t}{t/e} = \frac{d/F}{d/(Fe)} = \frac{f_{av}}{F} \quad (1)$$

ここで, 式(1)を送り速度 F が変化する場合, つまり m 工程に拡張し, 新しい生産性評価の指数とした. この指数は, 送り速度の指令値と移動距離から求められる加工時間と, 工具移動の加減速を考慮した実加工時間の比として次式で表される.

$$e = \frac{\sum t_i}{\sum t_i/e_i} = \frac{\sum d_i/F_i}{\sum d_i/(F_i e_i)} = \frac{\sum_{i=1}^m (\frac{1}{F_i} \sum_{j=1}^{n_i} d_{ij})}{\sum_{i=1}^m (\frac{1}{F_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{d_{ij}}{e_{ij}})} \quad (2)$$

ここで, d_i, e_i, F_i は, 第 i 工程における工具移動距離, 有効送り速度比, 送り指令値であり, d_{ij}, e_{ij} は, 第 i 工程 j 番目のNCブロックにおける工具移動距離, 有効送り速度比である. また,

$$d_i = \sum_{j=1}^{n_i} d_{ij}, \quad e_i = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{d_{ij}}{e_{ij}} \quad (3)$$

の関係があり, m 工程すべてで送り F_i が同じであれば, 式(2)は式(1)と等価になる.

次に, 第 i 工程における有効送り速度比に関する関係式を導出する. 第1報の式(3)をもとに, 指数関数的な加減速の場合について e_{ij} を計算すると, 次式で示される.

* 原稿受付 平成10年1月5日
** 学生会員 金沢大学大学院 (金沢市小立野 2-40-20)
*** 正会員 大阪大学大学院 (吹田市山田丘 2-1)
† 正会員 金沢工業大学 (石川県石川郡野々市町が丘 7-1)
†† 正会員 金沢大学大学院

$$e_{ij} = 1/(1+k_{ij}) \quad (t \gg T_1) \quad (4)$$

但し、

$$k_{ij} = (T_1 + T_2)(F_i - f_{Sij})/d_{ij} \quad (5)$$

ここで、 T_1 は加減速の時定数、 T_2 は位置決め制御系の時定数、 f_{Sij} は第*i*工程*j*番目ブロックの始点における実送り速度である。 $t \leq 4T_1$ の場合、 e_{ij} は次式で計算すると誤差が無視できる。

$$e_{ij} = \begin{cases} \sqrt{d_{ij} d_{4T_1}} / 4T_1 F_i & (F_i \geq f_{Sij}) \\ d_{4T_1}^2 / 4T_1 F_i d_{ij} & (F_i < f_{Sij}) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 d_{4T_1} は $t = 4T_1$ の時刻に至るまでの移動距離である。

一般に、 $t_{ij} \gg T_1$ のブロックが多いが、連続ブロックの場合、 $f_{Sij} = F_i \cos \alpha_{ij}$ となるので、第*i*工程における有効送り速度比は

$$e_i = 1/(1+k_i) \quad (7)$$

但し、

$$k_i = (T_1 + T_2) F_i \left(1 - \sum_{j=1}^{n_i} \cos \alpha_{ij} / n_i \right) / d_{av,i} \quad (8)$$

n_i は第*i*工程におけるNCプログラムの移動ブロック数、 α_{ij} は*j*番目と*j-1*番目ブロックの2つの工具移動ベクトルが成す角度、 $d_{av,j}$ は1ブロック当たりの平均移動距離である（図1参照）。

k はNCプログラムにおける送り速度の有効性及び工具経路の良否を示すパラメータで、 k が小さいほど有効送り速度比が大きく、実平均送り速度が指令送り速度に近づいて生産性が良いと判断できる。つまり、式(8)から、NCプログラムの生産性には工具の総移動距離だけでなく、移動ベクトルの向きの変化、制御系の時定数も影響を及ぼすことがわかる。式(8)では移動ベクトルの変化が新たに考慮され、1ブロック当たりの平均移動距離の他に、経路の複雑さも同時に評価できる。 k を小さくするためには、制御系の時定数を小さくし、1ブロック当たりの平均移動距離を大きくし、移動ベクトルの平均変化量 $\sum \cos \alpha_{ij} / n_i$ の値を1に近づけるべきであることがわかる。特に、移動ベクトルの平均変化量を1に近づけるといことは、工具経路の曲率をできるだけ小さくすることに相当する。これは、自由曲面の加工では微小な直線ブロックで曲線を近似するよりも、NURBSやスプライン補間により工具経路を生成する方が、生産性の観点で有効であることを示している。

2.2 等動力での切削パラメータ関係式

生産性を向上させるためには、粗加工はできるだけ機械の最大動力を利用して行うべきである。文献4)に示された動力経験式によると、軸方向及び半径方向の切込み a_z, a_r 、主軸回転数 S 、送り速度 F における切削動力は次式で示される。

$$P = K a_z a_r S^{0.2} F^{0.8} \quad (9)$$

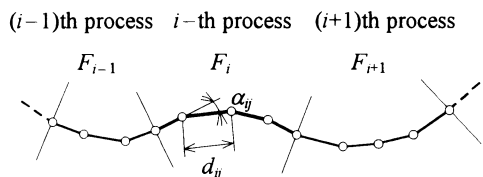


Fig.1 Geometry of successive NC blocks

ここで K は実験で求められる動力係数である。

式(9)で $v = \pi D S / 1000$ の関係を考慮して、等切削速度、等動力となる条件を導くと

$$a_z a_r F^{0.8} D^{-0.2} = const \quad (10)$$

が求められる。

異なった工具径 D_1, D_2 に対して、軸方向、半径方向の切込み a_z, a_r を工具径に対する比率で決定して等動力による加工を行う場合、送り速度 F_1, F_2 の比は次式で示される。

$$F_2 / F_1 = (D_1 / D_2)^{2.25} \quad (11)$$

例えば $D_1 / D_2 = 2$ の条件では、 $F_2 / F_1 = 4.757$ となり、工具径を半分にするだけで、送り速度が4.757倍に上げられることを示している。工具径に比例して軸方向、半径方向の切込み a_z, a_r がそれぞれ1/2倍になることを考慮しても、単位時間当たりの切削量は約20%増加することになる。

同様に、ボールエンドミルで同じ加工精度（同じカスプ高さ）を実現するという条件で、軸方向の切込み a_z は工具径の比率で、半径方向切込みは $a_r \propto \sqrt{D}$ で決定して等動力による加工を行う場合、送り速度 F_1, F_2 の比は次式で示される。

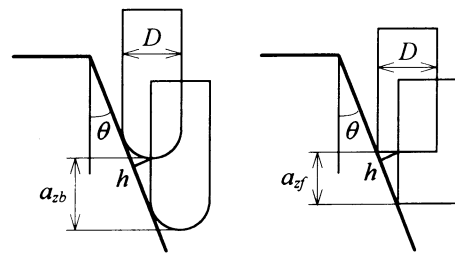
$$F_2 / F_1 = (D_1 / D_2)^{1.625} \quad (12)$$

例えば $D_1 / D_2 = 2$ の条件では、 $F_2 / F_1 = 3.08$ となり、工具径を半分にするだけで、送り速度が3.08倍に上げられることを示している。工具径に応じて軸方向の切込み a_z が1/2倍、半径方向の切込み a_r が1/1.414倍になることを考慮しても、単位時間当たりの切削量は約10%増加することになる。

このように送り速度が十分に上げられる条件であれば、大径工具よりも小径工具を用いると単位時間当たりの切削量を増加させることができる。しかし、ワーク形状によっては送り速度が十分に上げられないとか、工具強度の点で等動力の条件では加工ができないという場合も生じる。このため、工具径は有効送り速度比と工具強度の観点から総合的に判断する必要がある。

3. 工具経路パターンの違いによる生産性評価

種々の加工形状に対して、工具経路パターン、工具、切込み、工具径と生産性の関係を調査した。本論文では、典型的な加工形状として、斜面、スプライン曲面、島があるポケット、ボスがある平面、さらにこれらを統合した形状について、加工用のNCプログラムを生成して、自作のNCプログラムシミュレータでその生産性を評価した。NCプログラムの生成には汎用CAMツールI-DEASを用い、工具経路パターンとしては等高線とZigzag、工具としてボールエンドミルとスクウェアエンドミルを選択した。また、切込みについてはConstant step（一定切込み）、



(a) Ball end mill (b) Flat end mill
Fig.2 Slope cutting with ball and flat end mills

と Constant cusp（一定カスプ高さ）を選択したり，工具径に応じで等動力の条件で変化させた。

3.1 斜面加工

3.1.1 斜面切削パラメータの関係式

図 2 にボールエンドミルとスクウェアエンドミルでの斜面加工を示す。加工する斜面の勾配を θ ，加工のカスプ高さを h ，工具径を D とすると，ボールエンドミルを使用する場合の軸方向の切込みは式(13)で，スクウェアエンドミルを使用する場合の軸方向切込みは式(14)で示される。

$$a_{zb} = 2\sqrt{Dh} \cos\theta \quad (13)$$

$$a_{zf} = h / \sin\theta \quad (14)$$

従って，この 2 種類の工具における切込みの比率は，

$$a_{zb} / a_{zf} = \sqrt{D/h} \sin 2\theta \quad (15)$$

となる。この値は $\theta=45^\circ$ の条件で最大値に達する。

ここで，カスプ高さ $h=1\text{mm}$ の条件で，種々の工具径 D と斜面の勾配 θ に対して求めた a_{zb} / a_{zf} の値を図 3(a) に，工具径 $D=12\text{mm}$ の条件で，種々のカスプ高さ h と斜面の勾配 θ に対して求めた a_{zb} / a_{zf} の値を図 3(b) にまとめて示す。

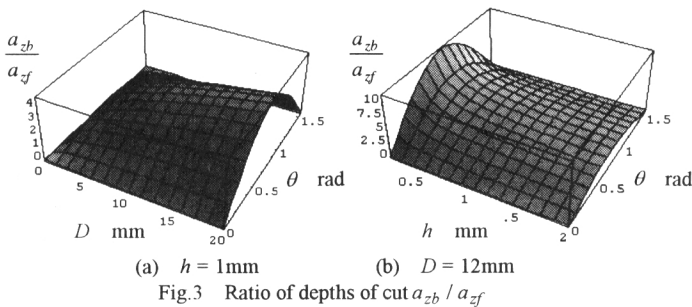


Fig.3 Ratio of depths of cut a_{zb} / a_{zf}

斜面加工においては $a_{zb} / a_{zf} = \sqrt{D/h} \sin 2\theta > 1$ となる条件で，ボールエンドミルを使用する場合の軸方向切込みを大きくすることができ，結果的に生産性が向上することになる。図 3 で示されるように， $a_{zb} / a_{zf} > 1$ となる条件は非常に広範囲であり，一般に， $D \ll h$ であるとか， θ が 0° や 90° に近いといった条件でない限り，ボールエンドミルを使用する方が生産性が向上することになる。これは，曲面加工における加工効率を検討した文献 5) の結果とも対応する。

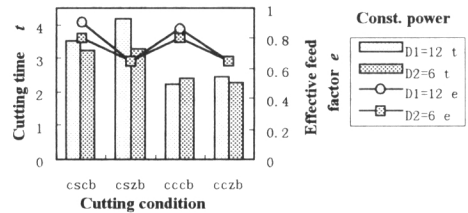
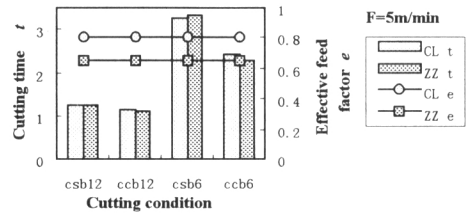
3.1.2 円すい面加工

斜面の勾配 $\theta=15^\circ$ で円すい面のワークを作成し，Constant cusp で，カスプ高さを $h=0.2\text{mm}$ とし，2 種類の工具径 ($D=6\text{mm}, 12\text{mm}$) のボールエンドミルとスクウェアエンドミルそれぞれについて，等高線の工具経路パターンで 4 種類の NC プログラムを生成し解析した。その結果を表 1 に示す。

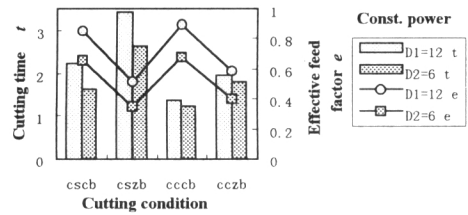
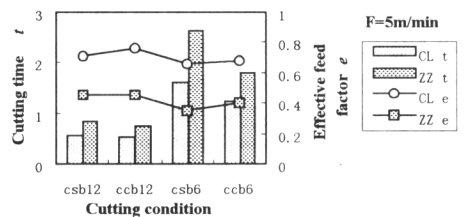
Table 1 Comparisons of cutting time in profiling slopes

D (mm)	a_{zb} / a_{zf}	Simulated t_b / t_f	Calculated t_b / t_f
6	112/42	$33.5/92.0=0.364$	0.365
12	118/30	$24.7/94.1=0.262$	0.258

表 1 の中で， a_{zb} / a_{zf} は加工段数 (z 軸方向の加工面の数) の逆比で計算した。表 1 から，同じ加工精度 (カスプ高さ) の条件では，工具径が大きいほどスクウェアエンドミルよりボールエンドミルによる加工が効率的であることがわかる。さらに，スクウェアエンドミルでの加工時間 t_f は工具径と関係無く，ほぼ



(a) Wavy spline surface



(b) Convex spline surface

Fig.4 Machining of spline surface in different tool path planning

cs: Constant step; cc: Constant cusp;
3rd character c or CL: Contour line; z or ZZ: Zigzag;
b: ball mill; f: flat end mill; 6 or 12: tool diameter

一定であることがわかる。

3.2 スプライン面加工

上面に波状と中凸状のスプライン面を有する 2 種類の 3 次元モデル (底面が 70 X 70mm) を作成し，スプライン面から素材の上面までのクリアランスを 10mm とした。2 種類の工具経路パターン (等高線と Zigzag)，2 種類の工具径 ($D=6\text{mm}, 12\text{mm}$) のボールエンドミルで，切込みは Constant step (Cross feed=0.5D) あるいは Constant cusp ($h=1\text{mm}$) の条件で決定した。さらに一定の送り速度と等動力の条件についても考慮して，8 種類の NC プログラムを生成し，その解析を行った。その結果を図 4 にまとめて示す。

解析結果 (図 4) は以下のようにまとめられる。

- (1) 波状スプライン面を加工する場合 (図 4(a))： Zigzag パターンは等高線パターンに比べて工具経路長が短く，加工時間が少し短い。等高線パターンでは，工具移動ベクトルの向きの変化が大きく，工具の加減速に時間を要している。また，Zigzag パターンでは，波の谷に沿って加工した方が工具移動ベクトルの向きの変化が小さく，加工時間が短縮できる。
- (2) 中凸状スプライン面を加工する場合 (図 4(b))： 等高線パターンは Zigzag パターンに比べて加工時間が短い (平均で約

34%短縮）。これは、波状スプラインの場合と違って、工具移動ベクトルの向きの変化が小さいためである。

- (3) 等動力加工の観点では、小径工具の方が加工時間が短い（平均で約 17%短縮）。
- (4) 生産性評価指数 e の比較では、等高線パターンによる e が Zigzag パターンによる e に比べて大きい。

3.3 島があるポケット加工

ポケットに島として 2 つの円柱がある 3 次元モデル（底面が 70 X 70mm）を作成した。2 種類の工具経路パターン（等高線と Zigzag）、2 種類の工具径（ $D=6\text{mm}$, 12mm ）、ボールエンドミルに対しては切込みを Constant step（Cross feed= $0.5D$ ）と Constant cusp（ $h=0.2\text{mm}$ ）の条件で決定し、スクウェアエンドミルに対しては切込みを Constant step で決定した。さらに一定の送り速度と等動力の条件についても考慮して、12 種類の NC プログラムを生成し、その解析を行った。その結果を図 5 にまとめて示す。

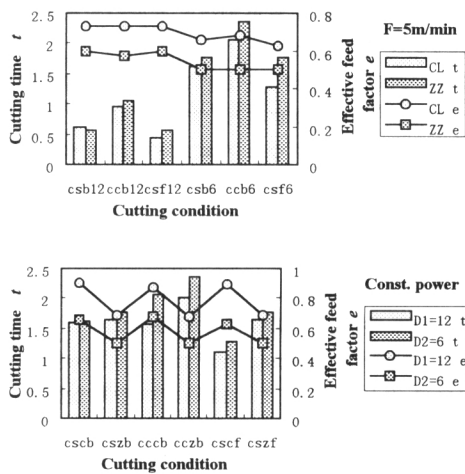


Fig.5 Machining of pocket with island in different tool path planning

解析結果（図 5）は以下のようにまとめられる。

- (1) 一般に、等高線パターンは Zigzag パターンに比べて加工時間が短い（平均で約 14%短縮）。
- (2) 等動力加工の観点では、大径工具の方が加工時間が短い（平均で約 12%短縮）。
- (3) 生産性評価指数 e の比較では、等高線パターンによる e が Zigzag パターンによる e に比べて大きい。

3.4 ポスがある平面加工

平面にポスとして円柱と円すいを有する 3 次元モデル（底面が 70 X 140mm）を作成した。2 種類の工具経路パターン（等高線と Zigzag）、2 種類の工具径（ $D=6\text{mm}$, 12mm ）のスクウェアエンドミルで、切込みは Constant step（Cross feed= $0.5D$ ）あるいは Constant cusp（ $h=1\text{mm}$ ）の条件で決定した。さらに一定の送り速度と等動力の条件についても考慮して、8 種類の NC プログラムを生成し、その解析を行った。その結果を図 6 にまとめて示す。

解析結果（図 6）は以下のようにまとめられる。

- (1) 切込み方法に Constant step を選択した場合、等高線パターンは Zigzag パターンに比べて加工時間が短い。しかし、Constant cusp を選択した場合、逆の結果となる。これは、工具の逃げやアプローチのための経路が生成され、工具経路長が長くなったため、CAM ツールの工具経路生成アルゴリズムに依存する。

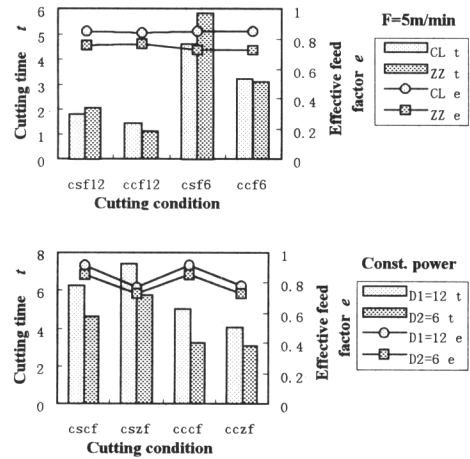


Fig.6 Machining of plane with bosses in different tool path planning

- (2) 長手方向に加工すると、短手方向に加工する場合に比べて、加工時間が短縮できる（平均で約 24%短縮）。
- (3) 等動力加工の観点では、小径工具の方が加工時間が短い（平均で約 26%短縮）。
- (4) 生産性評価指数 e の比較では、等高線パターンによる e が Zigzag パターンによる e に比べて大きい。

3.5 複合形状加工

これまで特徴的な加工形状に対して、個々に工具経路と加工時間の関係を見てきたが、最後にこうした特徴的な加工形状が組み合わせられた一般的な加工形状に対して工具経路と加工時間の関係を調査した。そこで図 7 に示すような、ボス、斜面、ステップといった加工特徴が組み合わせられた複雑な形状の 3 次元モデル（底面が 110 X 140mm）を作成した。2 種類の工具経路パターン（等高線と Zigzag）、2 種類の工具径（ $D=6\text{mm}$, 12mm ）のスクウェアエンドミルとし、切込みは Constant step（Cross feed= $0.25D$, $0.5D$ ）の条件で決定した。さらに一定の送り速度と等動力の条件についても考慮して、8 種類の NC プログラムを生成し、その解析を行った。その結果を図 8 にまとめて示す。

解析結果（図 8）は以下のようにまとめられる。

- (1) 等高線パターンでは Zigzag パターンに比べて、工具移動の加減速がスムーズで、加工時間が短い（平均で約 41%短縮）。半径方向の切込みを小さくした場合、加工時間はさらに短縮された。
- (2) 等動力加工の観点では、小径工具の方が加工時間が短い（平

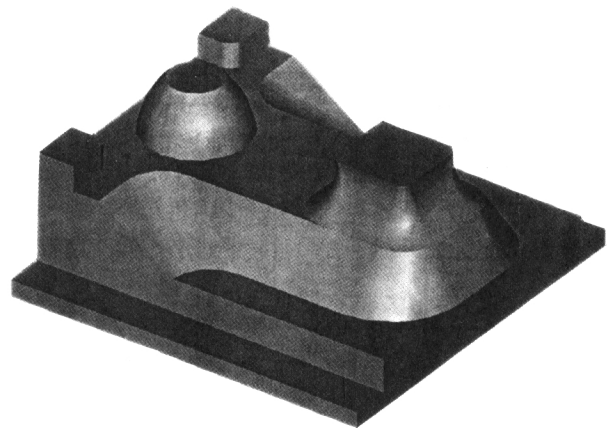


Fig.7 Workpiece model with complex geometry

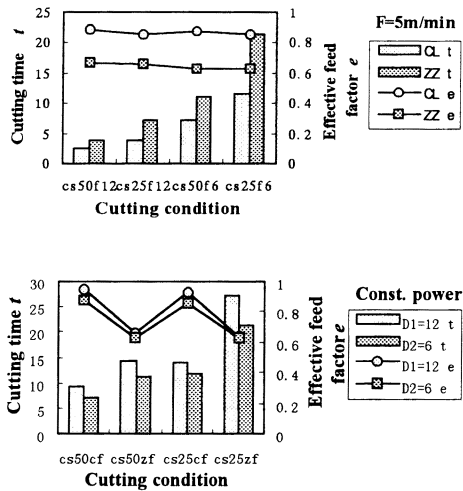


Fig.8 Machining of complex geometry in different tool path planning

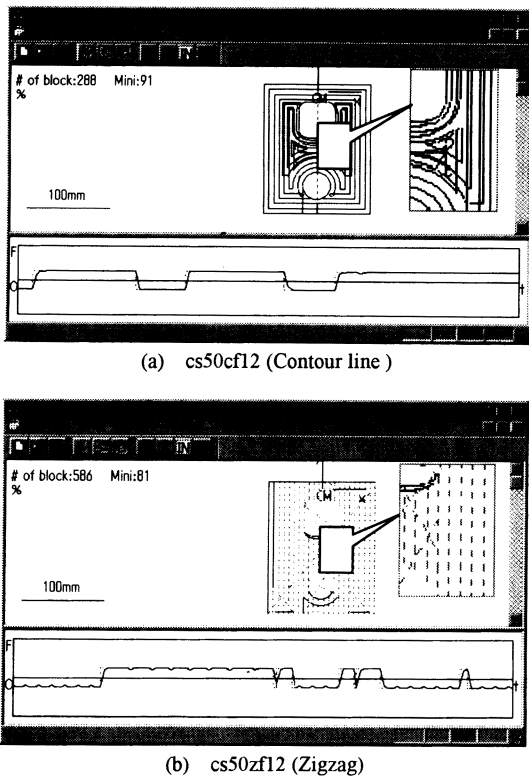


Fig.9 Simulation of tool paths and feed rates in contour line and zigzag patterns

均で約 20%短縮)

(3) 生産性評価指数 e の比較では、等高線パターンによる e が、Zigzag パターンによる e に比べて大きい。

以上の解析例から、ほとんどの加工形状に対して等高線パターンは Zigzag パターンに比べて加工時間を短くできるというこ

とがわかった。これは CAM ツールの工具経路生成アルゴリズムに依存するが、ここで生成された等高線による工具経路には G02/G03 による圆弧補間のコードが多く含まれていることがわかった。これは、工具移動ベクトルが滑らかに接続されることに寄与しており、図 9 に示した 2 種類の工具経路についてのシミュレーション結果でも明らかのように、等高線パターン(図 9(a))における送り速度の変化が、Zigzag パターン(図 9(b))における送り速度の変化に比べて小さくなっている。(実行画面の上部に工具経路、下部に送り速度の変化が表示されている。)これは、微小な直線補間(G01)で曲線を近似した場合に、その接続部で工具移動の加減速が繰り返され加工時間が長くなる⁶⁾のと同じ理由による。

4. ま と め

- (1) 生産性評価指数として有効送り速度比を導出し、生産性の良否には、位置決め制御系の時定数、工具の 1 ブロック当たり平均移動距離、工具移動ベクトルの向きの変化が影響を及ぼすことを示した。
- (2) 斜面加工で同じ加工精度を目標に、同じ半径方向の切込み条件で加工時間を比較すると、斜面の勾配が 0° または 90° に近くない限り、スクウェアエンドミルよりもボールエンドミルを用いた方が生産性が良くなる。また、工具径が大きいほどボールエンドミルがスクウェアエンドミルより効率的である。
- (3) 典型的な加工形状に対して、生産性評価指数 e を用いて工具経路パターンの違いによる生産性評価を行い、等高線パターンによる e が、Zigzag パターンによる e よりも大きいことを示した。
- (4) 加工時間の比較でも、一般に等高線パターンは Zigzag パターンに比べて加工時間が短い。例外は、波状スプライン面を Zigzag パターンで波状に沿って加工する場合であった。
- (5) 等動力、中高送りでの加工では、一般に小径工具の方が加工時間が短い。例外は、島があるポケット加工の場合であった。

参 考 文 献

- 1) 関喜仁, 白瀬敬一, 河端 裕, 平尾政利, 安井武司: マシニングセンタの生産性向上に関する研究(第1報), 精密工学会誌, **63**, 7(1997) 1044.
- 2) Bala M. and Chang T.C.: Automatic Cutter Selection and Optimal Cutter Path Generation for Prismatic Parts, Int. J. Prod. Res., **29**, 11(1991) 2163.
- 3) Lee Y.S. and Chang T.C.: CASCAM - An Automated System for Sculptured Surface Cavity Machining, Computers in Industry, **16** (1991) 321.
- 4) Tolouei-Rad M. and Bidhendi I.M.: On the Optimization of Machining Parameters for Milling Operations, Int. J. Mach. Tool. & Mfg., **37**, 1(1997) 1.
- 5) Lin R. S. and Koren Y.: Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces, Trans. of the ASME, **118**, 2(1996) 20.
- 6) 宮田光人, 大槻俊明: 高精度曲面を形にする NURBS 補間-NC 装置が 1ms ごとに補間点を指令する, 日経メカニカル別冊デジタルファクトリ, 2(1997) 112.