突出し長さを考慮した3+2軸制御荒加工用工具経路生成*

井上 武 浩^{*1}, 中 本 圭 一^{*2}
石 田 徹^{*2}, 竹 内 芳 美^{*3}Tool Pass Generation Method for Shoter Overhang Tools
in 3+2-Axis Control Rough MachiningTakehiro INOUE, Keiichi NAKAMOTO,
Tohru ISHIDA and Yoshimi TAKEUCHI^{*4}^{*4} Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

In recent years, 5-axis control machining has attracted a wide attention because of having many advantages compared with 3-axis control machining. However, there have been few roughing procedures corresponding to 5-axis control machining. This study especially deals with roughing by 3+2-axis control machining, which performs 3 translational axes machining after determining a suitable tool axis vector by 2 rotational axes movement. For 3+2-axis control machining, the determination of tool axis vectors, tool lengths and tool diameters largely affects the rough machining time. The previous study proposed a method of determining the optimal tool axis vectors and selecting the tool diameters for efficient roughing. In order to improve the method more effectively, this study proposes a new method of searching optimal tool combinations by taking account of shorter tool length. Stiffness of short tool is so high that it can machine workpiece more efficiently. The effectiveness of the proposed method was demonstrated by the machining simulation and experiment.

Key Words: Roughing, 3+2-Axis Control Machining, Multi-Stage Decision, Voxel

1. 緒 言

近年の製造業界では、製品の設計から生産にかかるリードタイムを短縮するために、5軸制御加工機の利用が進んでいる。5軸制御加工機は、直進3軸制御を用いた工具の位置決めだけでなく、回転2軸制御を用いて工具と被削材の相対姿勢を任意に決定できる。そのため、段取り替えなしに複数の面を加工する多面加工のように工程を集約することができ、切削加工を高効率・高精度で行うことが可能である。

5軸制御加工用の工具経路は一般にCAMを用いて生成される。5軸制御加工では工具に複雑な動きをさせるため、工具経路を人間が計算することは不可能である。CAMにより工具経路を計算して加工を支援することで、5軸制御加工機で効率的な加工を実現する必要がある。そのため、適切な工具経路を生成できるように5軸制御加工用CAMの開発が行われている。しかし、仕上げ加工に比べて、荒加工に対する効率的なCAMシステムの開発が遅れている。

荒加工では、切削加工により除去する体積が大きく、加工の進展に伴い被加工物の形状が大きく変化するため、工具経路の生成が困難であることが多い。加えて、加工工程に合わせた工具形状を作業設計時に選定しなければならない。そのため、現在開発されている5軸制御荒加工用CAMでは、長い計算時間を必要とするものが多い⁽¹⁾⁽²⁾。

これらの課題に対して、3+2軸制御加工を用いた荒加工用CAMシステムの開発が行われている⁽³⁾。3+2軸制御加工とは、回転2軸制御で工具姿勢を割り出した後に、直進3軸制御で加工を行う5軸制御加工法であるため、工具経路の生成には技術的に確立した3軸制御加工用CAMを用いることができる。開発されたCAMでは、工具経路生成の前段階において、使用する工具姿勢、工具径、突出し長の最適な組合せを決定することにより、システムの自動化と加工の能率化に貢献した。しかしながら、このシステムでは工具姿勢の変更を最少とする組合せを決定方針としていたため、形状によっては5軸制御加工の利点が活かさない問題があった。

図1に示すように、5軸制御加工では工具を傾斜させてホルダの干渉を回避することで、工具の突出し長を短くすることが可能である。短い突出しの工具は剛

* 原稿受付 2009年3月23日。

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科。^{*3} 正員, フェロー, 大阪大学大学院工学研究科。

E-mail: takeuchi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

Fig. 1 Tool length and tool posture

性が高くなり、切込みや送り速度を増加することができるため、長い突出しの工具より加工能率を上げることができる。キャビティ形状の場合には、工具姿勢の変更が増えたとしても、工具突出しを短くできることの利点は大きいと考えられる。

そこで本研究では、システム自動化の前提のもと、より高効率な荒加工を実現する 3+2 軸制御加工用 CAM システムの開発を行った。CAM による作業設計では、工具姿勢、突出し長、工具径の 3 つの要素を考慮する対象とし、加工能率を上げるために工具の突出しを短くすることを第一に考えた。さらに、加工形状の変化を CAM で予測することによって、加工順序を決定することも目指した。提案する方式を開発する CAM システムに組み込み、シミュレーションと加工実験により有効性を検証したので報告する。

2. 突出し長と工具姿勢の決定

2.1 工具長、工具姿勢データの作成 製品形状の加工面を入力として、それを必要な分解能で図 2 のようにポリゴン分割し、ポリゴン番号をつける。また、工具姿勢についても必要な分解能で離散化し、工具姿勢番号をつける。工具姿勢は角度パラメータ θ , ϕ を用いて表現し、 $\theta(0 \leq \theta < 90)$ はワーク座標系における Z 軸となす角度であり、 $\phi(0 \leq \phi < 360)$ は Z 軸回りの回転角度である。

初めに、全加工面ポリゴンについて加工可能か判断するために、与えられた工具姿勢から見てポリゴンが他のポリゴンと交差するか計算する⁽³⁾。交差がなく加工可能と判定されたポリゴンについて、ホルダと他のポリゴンが干渉しないような最短の突出し長を算出する。ここまでの操作を取り扱うために、式(1)に示す加工可能判別行列 A を作成する。行列 A の成分 a_{uv} は、工具姿勢番号 u により、ポリゴン番号 v が加工不可能であれば 0 となっている。加工可能であればあら

Fig. 2 Polygonalized surfaces of workpiece

Fig. 3 Definition of tool shape

Fig. 4 Polygon projection to plane

かじめ設定した突出し長の上限に対する百分率で表される。すなわち、0~100 の整数値になる。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \cdots \cdots (1)$$

ここからは、工具姿勢ごとに必要な工具突出し長の算出方法を詳しく述べる。図 3 に示すように工具形状を定義し、ホルダ直径、ホルダ長さは既知とする。

離散化されたすべての工具姿勢に関して、全ポリゴンを工具軸ベクトルと垂直な平面に射影する。図 4 に示すように、与えられた工具姿勢で、加工可能と判別されたポリゴンの各射影ポリゴンに対し、射影ポリゴンの重心を中心とし、ホルダ半径を半径とする円を射影平面上に作成する。ここで、図 4 に示すように工具軸ベクトルを Z' 軸とし、それに垂直な面からなる座

標系を用意する。作成された円内に他の射影ポリゴンが含まれる場合、図5に示すように、射影前のポリゴン同士の Z' 座標値の差をとり、その値をそのポリゴンを加工するのに必要な工具突出し長とする。円内に複数の射影ポリゴンが含まれる場合は、 Z' 座標値の差の値が大きいものを採用する。

2・2 多段決定による探索 全ポリゴンを加工するのに必要な工具姿勢の探索には、図6に示すような多段決定を用いる。 N 段 i 番目の状態 $S_i(N)$ は、ベクトル $T_i(N)$ 、ベクトル $P_i(N)$ をもつ。 $T_i(N)$ の成分 t_{ui} は、現在の状態で選択している工具姿勢があるなら1とし、工具姿勢が未選択ならば0とする。行列 $P_i(N)$ の成分 p_v は、選択した工具姿勢で加工可能なポリゴンを1、加工不可能なポリゴンを0としている。 $P_i(N)$ の全成分が1となると、全体が加工可能と判断される。

できるだけ短い突出し長の組合せを得るために、突出し長を判定するスカラー量 TL を任意に設定(たとえば $TL=30$ mm)し、次の操作を行うことで多段決定用の行列 B を作成する。 $TL < a_{uv}$ なら加工不可能

Fig. 5 Tool length determination

Fig. 6 Multi-stage decision process

なので $b_{uv}=0$ とし、 $0 < a_{uv} \leq TL$ から加工可能なので $b_{uv}=1$ とする。また、探索時の候補数削減のために、行列 B において、加工可能な工具姿勢が少ないポリゴンの列が左側にくるように列をソートする。同様に、加工可能なポリゴンが多い工具姿勢の行が上側にくるように行をソートする。

多段決定では、工具姿勢を選択していない初期状態 $S_1(0)$ からスタートし、段数が増加するたびに候補となる工具姿勢を選択、追加した状態を作成する。候補となる工具姿勢は、現在の状態で加工不可能な最小列番号のポリゴンを加工できる工具姿勢であり、最小行番号のものから順に選択する。 $P_i(N)$ の全成分が1となる状態が存在した時点で操作を終了する。

ここまでの操作により、 TL 以下の突出し長で全ポリゴンを加工できる工具姿勢の組合せが求まる。加工不可能なポリゴンが存在する場合には、 TL を微小量増加して B を更新し、多段決定の操作を繰り返し行う。

3. 加工順序の決定

3・1 加工順序決定の流れ 工具姿勢と工具径の組合せの候補は、工具姿勢と加工能率の関係を評価する先行研究の評価関数⁽³⁾を用いて限定する。その際に、突出し長と工具姿勢は前章で得た結果を使用し、工具径は表1に示す形式でユーザが指定したものを使用する。ボールエンドミルは中仕上げとして全姿勢で使用する。

必要な工具姿勢と工具径の組合せを求めた後に、除去形状の変化を考慮して姿勢と径の組合せを使用する順番を決める。除去形状はボクセルモデルで表現し、加工ごとに削り残し形状を保持して加工順の決定に利用する。

3・2 形状変化の処理 従来の突出し長の決め方による加工、つまり、加工中にホルダが干渉しないように突出し長を十分に長く取る加工法では、削り残しは図7(a)のように比較的単純な形状となる。それに

Table 1 Cutting conditions

Tool number	1	2	3	4
Tool type	Square	Square	Square	Ball
Diameter [mm]	16.0	10.0	6.0	6.0
Pick feed [mm]	1.6	1.0	0.6	0.6
Depth of cut [mm]	3.2	2.0	1.2	0.25
Feed rate [mm/min]	230	850	1300	2600

Fig. 7 Difference of machinable area

対し、本手法で考える短い突出し長の加工では、工具刃先が加工部深くまで潜り込むことが難しくなるため、図 7(b)のように削り残しが複雑な形状として残ってしまう。この削り残しを適切に認識できていないと、次の工程でホルダが削り残しと干渉して加工が行えなかったり、無駄な再加工を必要としたりするという問題が生じやすい。そのため、加工の進展による除去形状の形状変化を考慮に入れて、加工順序を決定することが重要となる。

本手法では、この形状変化を取り扱うために、ボクセルモデルを採用する。ボクセルモデルのシミュレーションでは、工具形状ボクセルと除去形状ボクセルの集合演算を順次繰り返し計算する手法が一般に用いられる。この手法は、それぞれのボクセル要素を細密に配置することにより、正確な形状変化を取り扱うことができるが、集合演算の繰り返しによる計算時間が長くなる欠点をあわせもっている。

本研究では、加工順序を決める次工程との兼ね合いと、工具経路の生成に一般の 3 軸 CAM を使用することから、計算時間を短縮できる簡易的なボクセルモデルの形状変化手法を考案した。図 3 に示したように工具形状を簡略化し、工具突出し長とホルダ径の値を元に、ボクセルモデルの形状変化を計算する。工具経路の基本パターンとしては、等高線状の経路を採用した。

形状変化手法の説明のために、製品形状として図 8 に示すポケット形状を用いる。この製品形状はあらかじめボクセルモデルで作成している。説明に用いる工具形状と工具姿勢およびポケット形状の関係を図 8(a) に示す。ボクセルモデルの形状変化は次の手順により処理される。

(1) 現在削り残っているボクセル形状を入力する [図 8(b)]。

Fig. 8 Change of voxel model in proposed method

(2) 入力された削り残しボクセルに対し加工する工具姿勢軸から可視な部分を算出する。つまり、製品形状に遮られずに見えているボクセルを算出する [図 8(c)]。

(3) 等高線加工をするために工具姿勢軸 Z' の値の大きいものから順に、突出し長ずつ等間隔で Z' 平面を生成する [図 8(d)]。

(4) 可視部以外の加工不可ボクセルについて Z' 平面間ごとに上から順にホルダ半径分オフセットする。なお、加工不可ボクセルについては、上から順に更新される [図 8(e)]。

(5) 可視部として残ったボクセルは加工可能な部分として、加工順を決める次工程に使用する。

(6) 加工不可ボクセルを削り残しとして算出する。

3.3 加工順序決定の評価式 評価式を用いて、前節までの手法で求めた工具形状と工具姿勢の組合せ

の要素を、どの順序で加工に使用するかを決定する。加工順序を決める評価式は式(2)を用いる。評価値 E は、選択した工具と姿勢の組合せにおいて、除去形状の単位時間当たりの除去体積を評価する。分子は除去される体積を表し、ボクセル数 n と単位ボクセルの体積 d^3 との積により計算される。分母は予想加工時間を表し、切削距離 L と工具のボクセル除去率 [単位ボクセルの面積 d^2 / (ピックフィード量 $a \times$ 切込み量 b)] との積を、送り速度 F で割ることにより計算している。

$$E = \text{Volume} / \text{Time}$$

$$= (n \times d^3) / \left(\sum \delta L \times \frac{d^2}{a \times b} \times \frac{1}{F} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta L = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \dots\dots\dots (3)$$

切削距離は、製品形状からの距離により番号付けされたボクセルを用いて工具経路を生成する手法を元に計算する⁽⁴⁾。加工時間を予測するためには、除去体積に対して単に加工能率で割るだけでなく、工具の経路を考える必要がある。そこで、工具経路を考えるために、ボクセルに番号付けする手法を用いる。

図 9(a) は、被削材を工具姿勢軸 Z' の正方向から見た図で、灰色のマスが製品形状のボクセル、白色のマスが除去形状のボクセルを表している。番号は製品形状からの距離を表している。前項でも述べたが、工具経路は等高線状の加工を想定していて、図 9(b) のように番号の大きいものから順に結ぶことで経路が生成される。その際に、ボクセル間の距離を順次足していくことで、切削距離が計算される。

評価式は、評価値として単位時間当たりの除去体積を予測するため、この値の大きいものが良い評価値となる。現在選択できる工具形状と工具姿勢の組合せ要素の中で、評価値の一番良い要素を順に選択することにより加工順序が決定されていく。 i 番目に使用する工具形状と工具姿勢は以下の手順で決定する。

1. $(i-1)$ 番目の加工後の削り残りデータを入力する。
2. 工具形状と工具姿勢を選択し、加工可能部を計算する(前項の手法)。
3. 加工可能部に対し、評価式(2)で評価する。
4. i 番目に選択可能なすべての工具形状と工具姿勢の組合せについて 2, 3 の処理を行う。
5. 評価値の一番良い組を i 番目に選択する。

その評価値がボールエンドミルでの評価値以下になるか、 $(i+1)$ 番目に選択する組合せがなくなるまで処理を繰り返すことにより、加工順が決定される。

4. CAM システムの検証

4.1 加工対象データ作成 本研究で提案した手法の有用性を検証するため、図 10 に示す壁形状の加工に適用した。壁部分は高さ 50 mm、厚さ 10 mm とし、角部には R5 のフィレットをつけている。対象形状は、3 軸制御加工の場合に、ホルダの干渉が問題となり長い突出し工具が必要となる形状である。荒加工手順としては、初期形状とする 1 辺が 100 mm の立方体から、除去形状を切削加工して対象形状を創成した。工具は表 1 に示すものを用い、ホルダは直径 32 mm、高さ 75 mm とした。工具姿勢パラメータ θ , ϕ の分解能は 10, 15 deg とし、加工面のポリゴン要素数は 432 とした。除去形状は 1 辺が 2 mm のボクセル 59 643 個で表現した。

多段決定の適用により、必要な突出し長が 30 mm、工具姿勢は 5 つで、 $(\theta_1, \phi_1) = (60, 330)$, $(\theta_2, \phi_2) = (40, 30)$, $(\theta_3, \phi_3) = (60, 315)$, $(\theta_4, \phi_4) = (50, 15)$, $(\theta_5, \phi_5) = (50, 300)$ と求まった。続いて、工具径と工具姿勢のデータを基に評価式を計算したところ、加工順序が以下のように決定された。

- (1) 工具番号 2 で、姿勢番号 4 を用いて加工
- (2) 工具番号 2 で、姿勢番号 3 を用いて加工
- (3) 工具番号 3 で、姿勢番号 1 を用いて加工

Fig. 9 Tool path generation based on voxel expression

Fig. 10 Target shape

Fig. 11 Change in voxel form by the proposed method

Fig. 12 Result of cutting simulation by ESPRIT

(4) 工具番号 4 で、すべての姿勢で中仕上げ加工

これらのデータを基に、市販の CAM ソフトウェア ESPRIT を用いて加工パスを作成した。仕上げ代は 0.5 mm とし、加工パスにはジグザグパスを採用した。

4・2 形状変化のシミュレーション 前節で作成したデータを基に、開発したボクセル形状変化手法について検証を行った。図 11 にボクセルモデルの形状変化の様子を示す。前節で決定した(1)から(3)の加工工程後に削り残されると予想される部分が、それぞれボクセルとして表現されている。次に、ESPRIT を用いて同工程の加工シミュレーションを行った。図 12 に ESPRIT でのシミュレーション結果を示す。

図 11 と図 12 とを比較することにより、シミュレーション結果が類似しており、開発したボクセル形状変化手法が有用であることが確認された。さらに、ESPRIT による加工シミュレーションでは、削り残しとホルダが干渉することなく最後まで加工が行われることが確認できた。結果から荒加工で目標除去体積の 98.4% を加工可能であると計算された。

4・3 加工実験 実際の工作機械での加工時間の検証を行った。工作機械は森精機製作所製 NT 4250

Fig. 13 Machined result of workpiece

DCG を使用し、被削材には、アルミニウム合金 (A 2017) を用いた。図 13 に示す加工結果からも分かるように、実際の加工においても、ホルダの干渉がなく目標形状が加工できていることが確認できた。このときの加工時間は 321 分だった。

続いて、従来手法を用いた加工を行い加工時間を比較した。従来手法のデータは、工具に突出し長 55 mm、直径 10 mm のスクエアエンドミルを用いて、工具姿勢 $(\theta, \phi) = (0, 0)$ のみの 3 軸制御荒加工とした。なお、突出しが長くなるため、工具メーカーの推奨する切削条件を参考にしてピックフィード、切込み、送り

速度の条件はそれぞれ表の 80% にして用いた。このときの加工時間は 458 分であった。これより、提案手法では加工時間が 71% に短縮できたことが分かる。

5. 結 言

本研究で得られた結論は次のとおりである。

(1) 高能率な荒加工を実現するために、短い突出しの工具を使用した加工において、ホルダ干渉を考慮した作業設計を支援する手法を提案した。

(2) 開発した CAM システムを用いて NC データを作成してシミュレーションと加工実験を行ったところ、従来より短時間で目標形状を加工可能で、この結果、提案した手法の効果を実証できた。

本研究を実施するに当たり、5 軸制御マシニングセンタを貸与された MTTRF(工作機械技術研究財団) および、CAM ソフトウェアを貸与された(株)DP テクノロジー社に感謝する。

文 献

- (1) Balasuabramaniam, M., Laxmiprasad, P., Sarma, S. and Shaikh, Z., Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation, *Computer-Aided Design*, Vol. 32 (2000), pp. 261-277.
- (2) Suzuki, H., Hayashi, A., Takeuchi, Y. and Sato, M., Development of A CAM System for 5-Axis Controlled Machine Tools, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 60, No. 6 (1994), pp. 832-836.
- (3) Umehara, T., Ishida, T., Teramoto, K. and Takeuchi, Y., Effective Tool Pass Generation Method for Roughing in Multi-axis Control Machining, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No. 732 (2007), pp. 2387-2393.
- (4) Nakamoto, K., Inaoka, T., Shirase, K. and Moriwaki, T., Development of a Process Planning System for 5-axis Controlled Machine Tool (1st Report)—Determination of Tool Posture by Estimating Removal Volume and Cutting Time Based on Voxel Model—, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 73, No. 9 (2007), pp. 1019-1024.