曲面細分割による工具経路生成方法*

入口 健二** 加藤 清敬**

A Method for Tool Path Generation with Surface Subdivision

Kenji IRIGUCHI and Kiyotaka KATO

Realtime tool path generation is effective for machining surfaces precisely of a die and enables to respond to changes of conditions like the diameter of a cutting tool. The software for the realtime tool path generation is required to be able to generate collision-free tool paths in high rate and to be reliable. In this paper, a new method is proposed for tool path generation based on a surface model. The method has a feature that collisions between a tool and surfaces are detected and avoided quickly and stably in a process based on surface subdivision. Simulated results show that the proposed method enables to generate tool paths for not only ball end type but also other types of tool, and generate tool paths immediately even if conditions like a using tool are changed, and generate tool paths in high rate enough to apply the method to the realtime tool path generation.

Key words: realtime tool path generation, collision-free tool path, collision detection, collision avoidance, surface subdivision, die

1. はじめに

近年、金型などの曲面形状の切削加工においては、磨き工程の負担の軽減または排除のために仕上精度の向上が行われている。加工物の仕上精度を上げるには精度の高い多量の工具経路データが必要であり、データの作成およびそのデータによる加工の両方に費やされる時間が増大する。これに対し工具経路データを生成しながら同時に加工を行うというシステムであれば、データ生成から加工までのトータルした時間を短縮でき、さらに加工現場での加工条件の修正・変更にも対応できて有効である^{1) 2)}。このようなシステムを実現するには工具経路生成において、1) 工具と曲面との干渉を回避した工具経路を安定に生成できること、2) 加工を待たせることなく実時間で処理できること、3) 条件を変更した場合に即座に工具経路を再生成できることが要求される。これらの要求に対し従来の工具経路生成方法では、例えばオフセット面を用いるもの^{3) 4)}では、オフセット面の表現精度と生成時間の問題やオフセット面の再利用性の問題があり、オフセット面を用いないもの^{5) 6)}では条件の変更における即座な対応が可能であるが、工具と曲面との干渉回避における安定度や計算量の問題がある。

そこで本論文では、オフセット面によらずに曲面の細分割したデータを用いて工具と曲面との干渉回避を行うことを特徴とする新たな工具経路生成方法を提案する。そして提案する方法について計算機実験を行いその有効性を検証する。

2. 工具経路生成

本提案の工具経路生成方法では、1) 工具中心点の基本的な移動経路を与え、それによって工具を移動させ、2) 移動の途中で工具と曲面とが干渉する場合に工具をその中心軸の方向に移動

させて干渉を回避することで工具経路を生成する(図1)。以上を行う処理の構成を図2に示す。入力情報として工具形状、ベースの曲面モデル、基本的な工具経路、工具経路の精度を指定するトレランス量などがある。工具形状としては、ボールエンド

Fig.1 Basic method of tool path generation

Fig.2 Main processes in tool path generator

* 原稿受付 平成 10 年 4 月 8 日

** 正 会 員 三菱電機(株) 産業システム研究所 (尼崎市塚口本町 8-1-1)

Fig.3 Generation of bounding-sphere-tree

ミル、フラットエンドミル、ラジアルエンドミルなどが扱え、干渉計算で用いられる工具形状に関する次の四つ評価関数が定義できれば他の形状も扱うことができる。

- ・指定のオフセット量だけオフセットした工具形状に対し指定の空間点の内外を判定する関数
- ・指定の空間点に最も近い工具形状表面上の点とその点における工具形状表面の法線ベクトルを求める関数
- ・指定のベクトルに垂直な平面群と工具形状とが接する場合に、接する点を求める関数
- ・指定の空間点が工具形状に干渉する場合に、工具形状を中心軸方向に移動させて干渉を回避する関数

ベースの曲面モデルは、パラメータ表現された四辺形の曲面が集合したものである。工具経路生成処理では、まず前処理として1)工具に干渉する曲面部分のラフな抽出に使用する曲面の包含球ツリーを生成する。次に2)基本的な工具経路上の一点を求めてその点に工具中心点の位置を設定する。次に3)干渉計算により工具と曲面との干渉を回避するように工具の位置を修正する。次に4)干渉回避した工具の位置をチェックして妥当であれば現在の工具中心点を結果の工具経路上の一点として出力する。また出力する工具中心点の間隔が適度となるように基本的な工具経路上に求める一点の位置を決める。2)~4)の処理を繰り返して工具経路上の点を得る。以上の処理において3)の干渉計算は特に重要であり、高速・安定であることが要求される。

3. 干渉計算

干渉計算では、まず曲面の包含球ツリーを用いて工具に干渉する曲面パッチ（曲面を細分割したもの）をラフに抽出する。次に抽出された曲面パッチを細分割しながら曲面パッチを近似する双一次パッチによる干渉チェックを用いてより細かな曲面パッチの抽出を行う。この処理は曲面パッチが十分平坦な曲面パッチ（以下平面パッチと呼ぶ）に細分割されるまで行い、得られた平面パッチについて工具との干渉回避処理を行う。

3.1 包含球ツリーによる干渉計算

包含球ツリーは曲面を細分割した曲面パッチの包含球を細分割の履歴に従って統合したツリー構造である(図3)。包含球ツ

Fig.4 Collision checking between tool and sphere

リーを生成するには、まず最初に曲面の細分割を行う。この細分割は曲面パッチが双二次Bézier曲面パッチで近似できるまで繰り返す。次に近似された曲面パッチに対しBézier曲面パッチの制御点情報を用いて最初の包含球を生成する。次に細分割の履歴をさかのぼりながら下位のレベルの包含球を包含するように上位のレベルの包含球を生成して行き、最終的に曲面全体の包含球を生成する。そして包含球データを有するノードのツリー構造を曲面の細分割の履歴に従って作成する。ツリー構造の末端のノードには包含球データのほかに曲面パッチを双一次パッチで近似する際の誤差量などの情報も含まれる。

包含球ツリーを用いた干渉計算では、包含球ツリーの先頭のノードの包含球（曲面全体の包含球）から始めて、あるノードの包含球と工具との干渉チェックを行い、この結果干渉する場合にそのノードにつながる下位のノードについてさらに同様な干渉チェックを再帰的に行ってゆき、包含球が工具に干渉したノードがツリーの末端のものである場合にそのノードに対応する曲面パッチを抽出する。工具と包含球との干渉チェックは、工具形状を外側へ包含球の半径分オフセットしたのに対して包含球の中心点の内外を判定することで行う(図4)。この干渉チェック処理は、各種工具形状ごとに用意される評価関数の一つで行う。曲面パッチの細分割を双二次Bézier曲面パッチで近似できるまで行った理由を次に示す。

- (1) 曲面パッチの包含球による干渉計算は、曲面パッチの領域をラフに近似する包含球を用いているので、厳密な干渉計算をするためにより細かな曲面パッチに用いても効果が上がらない。Bézier曲面パッチで近似された曲面パッチやその細分割したものはBézier曲面パッチの性質より双一次パッチで簡単に近似できるので、双一次パッチを利用したより効率的な干渉計算に移行できる。
- (2) Bézier曲面パッチで近似された曲面パッチの包含球をBézier曲面パッチの制御点情報から作成できる。

包含球ツリーは、工具形状、干渉計算の精度に依存しないものであり、前処理で一度生成しておけば、曲面形状を変更しない限り再利用することができる。

3.1.1 Bézier曲面パッチによる近似

包含球ツリーの生成において、細分割した曲面パッチが双二次Bézier曲面パッチで近似できるかを以下に示す方法でチェックした。まずパラメータ空間を等間隔に分割して 5×5 の曲面パッチ上の点 $P_{i,j}$ ($i, j = 0, \dots, 4$)をサンプル点として生成し、サンプル点の中で $P_{k,l}$ ($k, l = 0, 2, 4$)を通過する双二次Bézier曲面パッチの制御点 $Q_{i,j}$ ($i, j = 0, 1, 2$)を生成する(図5)。そして残りのサンプル点 $P_{m,n}$ ($m, n = 1, 2$)とそれらに対するBézier曲面パッチ上の点との距離がある指定誤差以内であることをチェックし、指定誤差以内であれば近似できるとする。

Fig.5 4×4 points on surface patch and definition of approximating Bézier surface patch

3.1.2 双一次パッチの誤差評価

双二次Bézier曲面パッチとその四隅から定義される双一次パッチとの誤差評価を以下のように行う。 $Q_{i,j}$ ($i, j = 0, 1, 2$) を制御点、 u, v ($0 \leq u, v \leq 1$) をパラメータとする双二次Bézier曲面パッチ $S(u, v)$ とその四隅の点から定義される双一次パッチ $L(u, v)$ を次のように表す。

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 b_i^2(u) b_j^2(v) Q_{i,j} \quad (1)$$

$$L(u, v) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 b_i^2(u) b_j^2(v) R_{i,j} \quad (2)$$

ただし、

$$R_{k,l} = Q_{k,l} \quad (k, l = 0, 2)$$

$$R_{k,1} = \frac{1}{2} R_{k,0} + \frac{1}{2} R_{k,2} \quad (k = 0, 2)$$

$$R_{1,l} = \frac{1}{2} R_{0,l} + \frac{1}{2} R_{2,l} \quad (l = 0, 2)$$

$$R_{1,1} = \frac{1}{4} R_{0,0} + \frac{1}{4} R_{0,2} + \frac{1}{4} R_{2,0} + \frac{1}{4} R_{2,2}$$

同一パラメータに対する二つのパッチ上の点の差 $E(u, v)$ は、

$$\begin{aligned} E(u, v) &= S(u, v) - L(u, v) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 b_i^2(u) b_j^2(v) D_{i,j} \\ &= b_1^2(u) \{ (1-v) D_{1,0} + v D_{1,2} \} \\ &\quad + b_1^2(v) \{ (1-u) D_{0,1} + u D_{2,1} \} \\ &\quad + b_1^2(u) b_1^2(v) \left\{ D_{1,1} - \frac{1}{2} (D_{1,0} + D_{1,2} + D_{0,1} + D_{2,1}) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。但し、

$$D_{i,j} = Q_{i,j} - R_{i,j}$$

式(3)を基に双一次パッチと双二次Bézier曲面パッチとの誤差の評価値 e を次のように定義する。

$$e = e_u + e_v + e_{uv} \quad (4)$$

但し、

$$\begin{aligned} e_u &= \left| b_1^2(u) \{ (1-v) D_{1,0} + v D_{1,2} \} \right|_{\max} = \frac{1}{2} \max(|D_{1,0}|, |D_{1,2}|) \\ e_v &= \left| b_1^2(v) \{ (1-u) D_{0,1} + u D_{2,1} \} \right|_{\max} = \frac{1}{2} \max(|D_{0,1}|, |D_{2,1}|) \\ e_{uv} &= \left| b_1^2(u) b_1^2(v) \left\{ D_{1,1} - \frac{1}{2} (D_{1,0} + D_{1,2} + D_{0,1} + D_{2,1}) \right\} \right|_{\max} \\ &= \frac{1}{4} \left| D_{1,1} - \frac{1}{2} (D_{1,0} + D_{1,2} + D_{0,1} + D_{2,1}) \right| \end{aligned}$$

評価値 e は、 $E(u, v)$ の絶対値の最大値以上の値をとる。よって双一次パッチ $L(u, v)$ の各点から距離が e までの空間に Bézier曲面パッチ $S(u, v)$ の各点が含まれる。 Bézier曲面パッチ

Fig. 7 Collision avoidance with a point

Fig. 8 Collision avoidance with a planer patch

Fig. 9 Checking of tool center position

用意される評価関数の一つで行う。そして点 P_t を通り工具の中心軸に平行な直線と曲面パッチのとの交点 P_p を求める。交点 P_p が存在しなければ、工具はパッチ内部の点と干渉しない。交点 P_p が求まった場合、点 P_t と点 P_p の高さを比較し点 P_t の高さが低い場合に、工具をこの2点間の距離だけ移動させて工具とパッチとが接する状態にする。

4. 工具経路点の間隔の制御

生成される工具経路は、工具中心点の連続した直線的移動の集合であり、工具が二つの工具位置間を直線的に移動する途中において曲面の凹凸に応じて削り残す状態と削り込む状態が生じる。この削り残しと削り込みの量は、曲面と工具の曲率および工具の移動距離に依存し、この量を一定以下に抑えるために曲面と工具の曲率の評価結果を基に工具経路上の点の間隔を制御することが行われている⁴⁾。本提案の工具経路生成方法では、削り残しと削り込みの量を一定以下に抑えるために以前に算出した工具経路の進行方向に対して新たに得られる工具経路上の点の変動を一定以下に抑えることで工具経路上の点の間隔を簡易的に制御する方法を用いた。二つ前、一つ前および新

(a) Surface model

(b) Tool path (Ball end mill, $\phi 20$) (c) Tool path (Radial end mill, $R=1\text{mm}$, $\phi 20$)

Fig. 10 Example of tool path generation (No.1)

しく得られた工具中心点の位置をそれぞれ T_{i-2} 、 T_{i-1} および T_i とし、 T_{i-1} を通りベクトル $A = (T_{i-1} - T_{i-2})$ に平行な直線 L と T_i との距離を d 、直線 L との変動を限定する値を ϵ_d とする(図9)。また T_{i-1} から T_i を求めた際の基本的な工具経路上における工具中心点のステップ幅を s 、最小のステップ幅を ϵ_s とする。距離 d およびステップ幅 s とから次のように T_i を処理する。

- ・ $d > \epsilon_d$ でしかも $s > \epsilon_s$ のとき、 T_i を工具経路上の一点として出力しないでステップ幅 s を縮小して再び T_i の算出を行う。
- ・ $d > \epsilon_d$ でしかも $s \leq \epsilon_s$ のとき、 T_i を工具経路上の一点として出力する。 $s = \epsilon_s$ として次の工具経路上の点の計算を行う。
- ・ $d \leq \epsilon_d$ のとき、 T_i を工具経路上の一点として出力し、次の工具経路上の点の計算を行う。

以上により曲面や工具の曲率の評価を行わないで出力する工具経路上の点の間隔を適度に制御することができる。

5. 実行例

図10～図12に本提案の方法による工具経路の生成例を示す。図10は、面と面の境界に凹凸のある場合の基本的な工具経路生成例であり、(a)はベースの曲面モデル、(b)は $\phi 20$ のボールエンドミルを用いた工具経路生成例、(c)はR部の半径が1mmの ϕ

Fig.11 Example of tool path generation (No.2)

20のラジアルエンドミルを用いた工具経路生成例である。(b)において面と面の接平面が不連続な境界で滑らかに回り込む工具経路が生成されているのが確認できる。同様な部分において(c)は工具経路の変化が急な部分とフラットな部分が存在するのが確認される。ラジアルエンドミルのR部の半径が小さいほど工具経路の変化が急になる。

図11はインペラ形状に対する工具経路生成例を示しており、(a)はベースの曲面モデル、(b)はφ10のボールエンドミルを用い、工具経路のトレランスを10μmとして工具経路を生成したもので、(c)は(b)における工具中心点データを示したものであり、(d)はR部の半径が1mmのφ10のラジアルエンドミルで工具経路のトレランスを10μmとして工具経路を生成したものである。

Fig.12 Example of tool path generation (reel)

(b)の工具経路生成時には包含球ツリーの生成に5秒要したが、工具形状を変更して引き続き行った(d)の工具経路生成では直ちに工具経路の再生成が行われた。

計算機としてMER7500(CPU:PA-RISC 60MHz)を用いた場合、(b)の例で生成した工具経路の全長を生成時間で割って計算した送り速度は22m/minとなり、さらに工具経路のトレランスを1μmとしたときの送り速度は10m/minとなった。(c)においては工具経路の変化が急な部分ほど工具中心点が集中しているのが確認され、工具のステップの制御が働いているのが分かる。図11はリールの曲面モデルでの工具経路生成例である。

6. おわりに

本研究では、3次元曲面加工のための新たな工具経路生成方法として曲面の細分割による工具と曲面との干渉計算を特徴とする方法を提案し、工具経路生成実験を行い以下の結論を得た。

- (1) 提案した工具経路生成方法では、ボールエンドミル以外の工具形状に対しても工具経路を生成することができる。
- (2) 提案した工具経路生成方法では、工具形状などの変更に対して即座に工具経路を再生成することができる。
- (3) 提案した工具経路生成方法は高速・安定であり、実時間工具経路生成に適用可能である。

参考文献

- 1) 鈴木 裕, 山崎和雄, 星 鐵太郎, 黒宮義久: 金型実時間加工用数値制御システムの開発(第2報)ー実時間工具経路生成について, 精密工学会誌, 53, 12(1987) 1952.
- 2) 鈴木 裕, 黒田 豊, 坂本正史, 元村直行: 金型実時間加工用数値制御システムの開発(第3報)ー逆オフセット法に基づくCAMの実時間処理化, 精密工学会誌, 57, 3(1991) 473.
- 3) 近藤 司, 岸浪建史, 斎藤勝政: 逆オフセット法を基にした形状加工処理, 精密工学会誌, 54, 5(1988) 971.
- 4) T. Kuragano: FRES DAM System for Design of Aesthetically Pleasing Free-form Objects and Generation of Collision-free Tool Paths, Computer Aided Design, 24, 11(1992) 573.
- 5) 加藤清敬: 境界稜線からの曲面形成を特徴とした形状モデラ, および工具投影分割法による三次元曲面加工に関する研究, 東京大学博士論文, 平成4年度.
- 6) J. S. Hwang: Interference-free Tool-path Generation in the NC Machining of Parametric Compound Surfaces, Computer Aided Design, 24, 12(1992) 667.
- 7) K. Iriguchi, K. Kato and M. Oshima: Realtime Tool Path Generation for 5-Axis Control Machining, Proc. IMACS/SICE Int. Symp. Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems '92 Kobe, 1, (1992) 95.