曲面形状補間を用いた五軸制御加工用工具経路生成法*

森 川 真 寿^{*1}, 石 田 徹^{*2}
寺 本 孝 司^{*2}, 竹 内 芳 美^{*3}

5-Axis Control Tool Path Generation Using Curved Surface Interpolation

Masatoshi MORIKAWA, Tohru ISHIDA,
Koji TERAMOTO and Yoshimi TAKEUCHI^{*4}^{**} Department of Computer-Controlled Mechanical Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

In 5-axis control machining, it is important to reduce the processing time of generating interference-free tool path between tool and workpiece. Thus, the paper describes a method to determine interference-free tool postures, based on not every cutting point but every tool path. The method generates a ruled surface between an offset curve which sifts a cutting point curve by a tool radius against a surface to be machined, and one of parametric curves on an interference surface. A boundary tool locus which does not interfere with workpiece is generated by rotating the ruled surface, while moving control points on the surface. Tool postures corresponding to a cutting point curve are determined by appropriately selecting the curve within an area surrounded by two ruled surfaces. The curve implies a candidate of interference-free tool paths can be generated at high speed. The effectiveness of the proposed method was demonstrated by machining experiment of an impeller.

Key Words: 5-Axis Control Machining, Interference-free, Tool Path, Curved Surface Interpolation, CAM

1. 緒 言

近年、製造業界では製品の多様化および複雑化に伴って、設計・製造工程における工程数の増加が問題となってきた。これに対して、製造工程を集約することで効率的な生産を実現するべく、多軸制御加工機や複合加工機が注目を集めている。その中でも五軸制御加工機は、工具や加工物の段取り替え省略による工程数削減などが可能なことから導入が盛んになっている。

五軸制御加工では、加工物に対する工具姿勢の自由度が高いため、オーバハング部を有する複雑な形状も加工物を再セッティングすることなく加工できる。このことは、再セッティングに伴う誤差が生じないなどの利点がある。しかしながら、工具姿勢の自由度の高さに起因した、工具と加工物間の干渉が問題となっている。

現在、五軸制御加工用 CAM がいくつか開発されているが、工具の干渉問題のために加工対象が限定され

るなどその機能に制限があるため、多様化した複雑な製品への適用は容易ではない⁽¹⁾。五軸制御用 CAM での干渉回避に関する研究では、代表的な切削位置ごとに工具と加工物との干渉を検出し、干渉があれば局所的に工具姿勢を変化させて回避するといったものが主流である⁽²⁾⁽³⁾。これらは全切削位置ごとに工具と加工物間の干渉検出を行い、干渉があれば干渉回避した工具姿勢を決定するという試行錯誤的な処理を行っている。複雑な形状に対しては、C-Space という概念を導入し、干渉を巧妙に回避する方法も開発されている⁽⁴⁾が、多くの計算時間を要し、高効率な CAM システムとしての実用性には難がある。したがって、信頼性が高く、短時間で工具経路生成が可能な CAM の開発が望まれている。

そこで本研究では、ボールエンドミル工具を用いた五軸制御加工において、干渉のない工具経路を高速に生成することを目的とした新たな工具経路生成手法を提案する。具体的には、工具姿勢を切削点ごとに決定するのではなく、工具掃引形状の中心軌跡を曲面形状を用いて補間し、一つの工具経路ごとに工具姿勢の取りうる領域を求める。その領域から工具姿勢を決定することで、干渉のない工具経路を生成する。

提案した手法を実装した五軸制御加工用メインプロ

* 原稿受付 2005年3月31日。

^{*1} 大阪大学大学院生 (〒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

セッサを開発し、複雑形状であるインペラを加工対象形状として加工実験を行い、その手法の有効性を検証したので報告する。

2. 工具経路の曲面形状補間

2.1 工具経路における用語の定義 本研究では、工具経路を生成する際に使用する形状要素である点、曲線、曲面を図1に示すように定義する。ボールエンドミル工具の刃が加工面に接するときの切削位置を切削点、切削点を工具送り方向に補間した軌跡曲線を切削線、工具中心点を工具送り方向に補間した軌跡曲線を工具中心曲線とする。工具姿勢を表す工具軸ベクトルを工具送り方向に張った曲面を工具軸曲面、工具軸ベクトルの先端を結んだ曲線を工具軸曲線と呼ぶ。

2.2 工具姿勢の曲面形状補間

2.2.1 法線方向工具経路の生成 加工面に対して自由度の高い工具姿勢を実現するために、まず加工面上の一つの工具経路上に工具軸曲面を生成する。図1を用いてその手順を述べる。

最初に、加工面に対して法線方向に工具半径だけオフセットした曲面を生成する。オフセット曲面をピックフィード方向に分割した曲線が工具中心曲線となる。次に、工具中心曲線をオフセット曲面の法線方向に工具長だけ伸長した曲線を生成する。この曲線が加工面に対して法線方向の工具姿勢となる工具軸曲線である。続いて、生成された工具中心曲線と工具軸曲線の2曲線間にルールド曲面を生成する。このルールド曲面は、工具送り方向に工具軸ベクトルを張ったときにできる工具軸曲面にほかならない。ここで、工具姿勢の制御を容易にするために、工具軸曲面を構成する2曲線をNURBS曲線で表す。

ここで、B-Splineの基底関数は、 m を階数、 n を制御点数、 t_i をノットとして、式(1)で定義される⁽⁵⁾。

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & (t_i \leq t < t_{i+1}) \\ 0 & (t < t_i, t_{i+1} \leq t) \end{cases}$$

$$N_{i,m}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+m} - t_i} N_{i,m-1}(t) + \frac{t_{i+m+1} - t}{t_{i+m+1} - t_{i+1}} N_{i+1,m-1}(t) \dots \dots \dots (1)$$

NURBS曲線は、基底関数、座標空間における制御点 $q_i(x_i, y_i, z_i)$ 、各制御点の重み ω_i 、制御点 $Q_i = (\omega_i q_i, \omega_i) (i=0, \dots, n-1)$ 、ノットベクトル $T = [t_0 \dots t_{m+n+1}]$ を用いて、式(2)で与えられる⁽⁵⁾。

$$P(t) \equiv (x(t), y(t), z(t))$$

$$= \frac{\sum_{i=0}^{n-1} N_{i,m}(t) \omega_i q_i}{\sum_{i=0}^{n-1} N_{i,m}(t) \omega_i}, \quad t_{m-1} \leq t \leq t_n \dots \dots \dots (2)$$

本研究では、曲線の扱いを容易にするために、すべての重みを $\omega_i=1.0$ とし、ノットの間隔を一樣とする。加えて、NURBS曲線にノットを挿入し、多重化することで曲線上の制御点を扱いやすくする。

元のNURBS曲線のノットベクトル T に対し、 k 番めと $k+1$ 番めのノット間に新たなノット t' を挿入する場合、新しいノットベクトル T' は式(3)で表される。さらにノットを挿入することで制御点の数が増加し、位置が変化する。それに伴う新たな制御点 $Q'(i=0, \dots, n)$ は、式(4)で与えられる⁽⁵⁾。

$$T' = [t' \dots t'_{m+n}] = [t_0 \dots t_k \quad t' \quad t_{k+1} \dots t_{m+n+1}]$$

$$t'_i = \begin{cases} t_i & (0 \leq i \leq k) \\ t' & (i = k+1) \\ t_{i-1} & (k+2 \leq i \leq m+n) \end{cases} \dots \dots \dots (3)$$

$$Q'_i = (1 - \alpha_i) Q_{i-1} + \alpha_i Q_i$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & (i \leq k-m+1) \\ \frac{t' - t_i}{t_{i+m-1} - t_i} = \frac{t'_i - t'}{t'_{i+m} - t'_i} & (k-m+2 \leq i \leq k) \\ 0 & (k+1 \leq i) \end{cases} \dots \dots \dots (4)$$

扱うNURBS曲線を、三次のBezier曲線で構成される複数のセグメントからなる曲線にする。そこで、各セグメントの両端の制御点におけるノットの多重度を階数4とし、それ以外のノットの多重度を3とする。このように、4階のBezier形のNURBS曲線にすると、制御点が曲線の端点から規則的に二つおきに曲線上にのるために、2・2・2項で述べる制御点の移動が扱いやすくなる。

図2に、NURBS曲線に変更された工具中心曲線と工具軸曲線の間に生成された工具軸曲面を示す。

2.2.2 制御点の移動による工具軸曲面の形状変化 五軸制御加工の利点は、工具姿勢を自在に指定でき

Fig. 1 Definition in tool path generation

ることにある。本研究では、加工面に対して法線方向に張られた工具軸曲面の形状を変化させ、工具姿勢を決定する。

五軸制御加工におけるボールエンドミル工具と加工面との位置・姿勢の関係は、一般に次のようになる。まず、工具中心点を原点として、加工面の法線ベクトル、工具送り方向ベクトル、およびこれら二つのベクトルの外積で算出されるベクトルより構成される局所座標系を考える。この系において、工具姿勢は法線ベクトルに対する傾斜角度 θ と法線ベクトルに対する回転角度 ϕ の二つのパラメータによって表現される。

ところで、図3に示すように、工具中心曲線および工具軸曲線の1セグメントの制御点 C_{3i} , $C_{3(i+1)}$, P_{3i} および $P_{3(i+1)}$ は曲線上にのっている。ここで、前述の考えに基づいて、 P_{3i} と $P_{3(i+1)}$ を傾斜角度 θ 、回転角度 ϕ だけ回転移動させ、それを P'_{3i} , $P'_{3(i+1)}$ とする。このときの移動ベクトルをそれぞれ V_{3i} , $V_{3(i+1)}$ とする。しかし、制御点 C_{3i+1} および C_{3i+2} は工具オフセット曲面の工具中心曲線上にないため、その点における法線ベクトルと第1階微分ベクトルが正確に算出できない。したがって、工具軸曲線上にない制御点 P_{3i+1} と P_{3i+2} の移動ベクトル V_{3i+1} , V_{3i+2} は、式(5)に示すように V_{3i} と $V_{3(i+1)}$ を用いて補間する。

$$\left. \begin{aligned} V_{3i+1} &= \frac{2}{3} V_{3i} + \frac{1}{3} V_{3(i+1)} \\ V_{3i+2} &= \frac{1}{3} V_{3i} + \frac{2}{3} V_{3(i+1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

算出された移動ベクトル V'_{3i+1} , V_{3i+2} により、工具軸曲線上にない制御点 P_{3i+1} , P_{3i+2} はそれぞれ P'_{3i+1} , P'_{3i+2} に移動する。

このように、工具軸曲線の全セグメントに対して制御点の移動を行うと、新たに生成された工具軸曲面は設定した工具姿勢の工具軌跡として生成される。なお、加工面以外に干渉面が存在する場合は、工具姿勢を自由に設定できない。3章では、干渉面を考慮した工具経路生成法について述べる。

3. 干渉を回避した工具経路生成法

3.1 干渉面に沿った工具経路

工具と加工物が干渉しない工具経路を生成する手法の一つとして、図4(a)に示すように、加工物の表面に沿って工具姿勢を変化しながら移動することが考えられる。以下では、この考えに基づいて干渉のない工具経路を生成する。すなわち、図4(b)に示すように、干渉面の形状を用いて干渉の有無の境界となる工具姿勢を表す曲面(境界曲面)を作成し、それを利用して干渉せずに工具軸曲線が取りうる領域を作成する。その領域内において、工具軸曲線を決め、それより工具姿勢を求めれば、干渉のない工具経路を生成できる。

本手法では、干渉判別と干渉回避という試行錯誤的な処理が不要になるため、工具経路生成に要する計算時間を大きく短縮できると考えられる。

3.2 干渉面による境界曲面の作成法

工具干渉の有無の境界となる工具姿勢を作成するため、まず、加工物の干渉面群の中で工具掃引形状軌跡を沿わせる干渉面を選択する。図5の左に示すように、選択された干渉面上の分割された曲線群中より、工具中心曲線から見て干渉面上で最も大きな凸部を有する曲線を自

Fig. 2 Curved surface interpolation of normal tool axes

Fig. 3 Surface shape modification by moving control points

(a) Boundary surface when the tool moves along the interference surface (b) Interference-free area of tool path

Fig. 4 Tool path generation method

動選出する。この曲線が工具姿勢変化の基となる。この曲線と工具中心曲線との間にルールド曲面を生成する。このルールド曲面を構成する2曲線も4階Bezier形NURBS曲線とする。

次に、工具半径を考慮に入れて境界曲面を構成する。生成されたルールド曲面を構成する工具中心曲線と干渉面上の曲線との間で、曲線上にのって、対応する制御点 C_{3i} と P_{3i} を結ぶベクトル T (制御点間ベクトル) を考える。ここで、任意のベクトル V を回転軸として角度 Ψ の回転移動を表すマトリックスを $Rot(V)(\Psi)$ とすると、干渉面との境界となる $3i$ 番めの制御点間ベクトル T' は、図5の右に示すように、式(6)のように算出される。ただし、回転方向は干渉面より遠ざかる方向とする。

$$T' = TRot(T \times N)(\Psi) \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 N は制御点 P_{3i} における干渉面の法線ベクトルである。また、 Ψ は工具半径 r を用いて式(7)より算出される。

$$\Psi = \sin^{-1} \frac{r}{|T|} \dots \dots \dots (7)$$

この回転移動を、曲線上にのっている $3i$ 番めの制御点に対して行う。曲線上にのっていない $3i+1$, $3i+2$ 番めの制御点は、2・2項で述べたように移動ベクトルを補間して回転移動を行う。

Fig.5 Boundary surface generation by moving control points on the initial ruled surface

Fig.6 Interference-free area between boundary surfaces

以上の処理で得られたルールド曲面が、干渉面と干渉しない工具掃引形状の中心軌跡を表す境界曲面となる。

3・3 加工面を考慮した境界曲面の作成法 周囲の干渉面に対しては、3・2節の干渉境界曲面を作成したが、加工面に対する干渉は考慮されていない。そこで、加工面に対する工具干渉も考慮するために、加工面に対して干渉の有無となる境界曲面を2章で述べた手法を用いて作成する。図6(a)に示すように、傾斜角度 θ 、回転角度 ϕ を設定することで加工面に対して干渉のない工具軌跡を表す境界曲面を作成する。ただし、設定した境界曲面と加工面との距離が工具半径以下になる可能性がある場合は、傾斜角度に大きな値を設定できない。

3・4 工具姿勢決定法 干渉のない工具軸曲線の取りうる領域を作成する。図6(b)に示すように、両側に壁のある領域を加工するときには、まず、一つの工具中心曲線において、生成された二つの干渉面に対する境界曲面のシャンク側の稜線をそれぞれ取出す。次に、2稜線間にルールド曲面を作成する。このルールド曲面は、一つの工具経路において、工具中心曲線に対応する干渉のない工具軸曲線が取りうる領域を表している(以下、非干渉領域という)。この領域から工具軸曲線を選出することで工具姿勢が決定され、工具経路を生成できる。

工具軸曲線の出選にあたって、図7に示すように、まず、生成された非干渉領域に局所座標系 $u-v$ を設定する。次に、非干渉領域から v 方向のパラメータ値を与えて工具姿勢となる工具軸曲線を選出する。ここでは、パラメータ値を最も安全な工具姿勢となるように中間値をとって0.5とした。最後に、工具中心曲線と選出された工具軸曲線間にルールド曲面を作成すると、一つの工具経路について工具軸曲面が得られる。

Fig.7 Selection of tool axis curve within interference-free area

Fig.8 Interference-free area and tool axis surface (parameter=0.5)

工具軸曲面を工具送り方向にパラメトリック分割して得た各直線が工具軸ベクトルに、その下端点が工具中心点となる。本手法の適用例を図8に示す。溝形状

Table 1 Cutting conditions

Material of workpiece	Aluminum (A2017)	
	Roughing	Finishing
Spindle speed (rpm)	2500	12000
Feed rate (mm/min)	800	500
Pick feed (mm)	1.5	0.08~0.4
Depth of cut (mm)	1.0	0.3

Fig. 9 Interference avoidance in tool feed direction

Fig. 10 Tool path surrounded by interference surfaces

Fig. 11 Workpiece shape to be machined: Impeller

Fig. 12 Tool path generated on hub surface

Fig. 13 Tool locus on hub surface

の底面を加工面として、一つの工具経路における非干渉領域と、そこから得られた工具軸曲面である。

一般に見られるような工具送り方向の両側に存在する干渉面に対しては、以上のような工具経路生成法によって、干渉のない工具経路を生成できる。しかし、ポケット形状のように工具進行方向にも干渉面が存在する場合には、進行方向の干渉についても検討する必要がある。この対策として、作成された工具軸曲面の形状をさらに変化させることで干渉回避を行う。

そこで、図9に示すように、まず、作成された工具

Fig. 14 Appearance under finish machining

(a) Over view

(b) Hub surface

(c) Suction surface

Fig. 15 Machined result of impeller

軸曲面内の工具軸と工具送り方向の干渉面との距離を算出する。その距離が工具半径以下の場合には、工具半径以上の適当な距離となる位置で工具軸曲線を切断する。切断した工具軸曲線と工具中心曲線間に新たな工具軸曲面を作成すれば、工具送り方向にも干渉のない工具経路を生成できることになる。

この手法を適用して、周囲を干渉面に囲まれたポケット形状の底面の加工用工具経路を求めた。図 10 は、得られた Cutter Location Data (以下、CL データという) から工具モデルを表示したものであるが、工具送り方向、ピックフィード方向ともに工具と加工物との干渉がないことが確認できる。

なお、干渉面がさらに多くなった場合には、処理上、複数の干渉面を一つの干渉面として扱えるような前処理をした上で、上記の手法を適用すればよいと考えている。

4. 複雑形状を対象とした加工実験

4.1 加工対象形状 本研究で提案した曲面形状補間を用いた工具経路決定法を五軸制御加工用メインプロセッサに実装し、その実用性を加工実験により検証する。加工対象形状は、図 11 に示すような自由曲面状のブレードを 8 枚有するようなインペラである。従来、インペラは鋳造で製造されていたが、近年、圧縮比を高くするため高速回転が生流となり、強度上の理由と圧縮効率を向上させるため、ブレードの削り出し加工が多くなってきている。加工実験では、図 11 に示す四つの面の仕上げ加工を対象とした。

4.2 工具経路生成 本研究における荒加工の CL データは、インペラの荒加工用に別途に作成したシステムを用いて作成した。仕上げ加工では、開発した五軸制御加工用メインプロセッサを用い、インペラを構成する四つの面を加工面とした CL データをそれぞれ作成した。切削条件は表 1 に示すように設定した。Hub surface に対する CL データ作成の際に、一つの工具中心曲線に対して生成された非干渉領域とその領域より得られた工具軸曲線を図 12 に示す。この工具軸曲線を用いて生成された CL データの一部に工具を表示した工具軌跡を図 13 に示す。工具は両側のブレードと干渉することなく、それらに沿って移動していることが確認できる。

Hub surface に対する CL データ生成時間を比較し

たところ、切削点における工具姿勢と加工物の干渉判定を基に逐次的に干渉回避を行う従来の手法では約 55 分であったが、本手法では約 12 分であり、計算時間を大幅に短縮できた。

4.3 加工結果 作成した CL データをポストプロセッサにより NC データに変換し、五軸制御マシンニングセンタを使用して加工を行った。加工中のようすを図 14 に、加工結果を図 15 に示す。詳細な形状計測が困難なため定量的な評価は行えないものの、CAD で設計した形状を、工具干渉することなく良好に加工することができた。他の面に関しても比較的長好な面性状が確認された。しかしながら、各曲面の境界に削り残しが見られたが、これは作成した CL データでこれらの境界部分において工具が離脱する点となっていたからである。境界部分に沿って切削するような CL データを別に作成することで、このような削り残しは解消できると考えられる。

5. 結 言

五軸制御加工における工具経路の生成処理の高速化を目的とし、曲面形状補間表現を基にした工具経路生成法を提案した。さらに、提案した手法を実装した五軸制御加工用メインプロセッサを開発し、インペラに対する CL データを作成して加工実験を行ったところ、工具干渉もなく良好な面性状を持つ加工結果が得られ、提案した手法の有用性が示された。

本研究を実施するに当たり、五軸制御マシンニングセンタを貸与された MTTRF (工作機械技術研究財団) に感謝する。

文 献

- (1) Young, H.-T., Chuang, L. C.-., Gerschwiler, K. and Kamps S.,: A fiveaxis rough machining approach for a centrifugal impeller, *Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, **23** (2004), 233-239.
- (2) 竹内芳美・清水弘幸・出村健・渡辺隆弘・伊藤哲也, ソリッドモデルに基づく 5 軸制御加工, 精密工学会誌, **56-11** (1990), 2063-2068.
- (3) 小西和正・福田好朗・岩田一明, 5 軸制御加工における工具干渉検出と回避法に関する研究, 精密工学会誌, **63-9** (1997), 1258-1262.
- (4) 森重功一・竹内芳美, C-Space に基づいた 5 軸制御加工における工具姿勢の決定法, 精密工学会誌, **66-7** (2000), 1140-1144.
- (5) 三浦曜・望月一正, CAD/CG 技術者のための実践 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline), (2001), 工業調査会.