ソリッドモデルに基づく 5 軸制御加工*

竹内芳美** 清水弘幸** 出村 健*** 渡辺隆弘*** 伊藤哲也†

5-Axis Control Machining Based on Solid Model

Yoshimi TAKEUCHI, Hiroyuki SHIMIZU, Takeshi IDEMURA,
Takahiro WATANABE and Tetuya Ito

The study deals with 5-axis control machining of workpieces with sculptured surface like impellers. The 5-axis control machining allows complex workpieces to be produced efficiently and accurately. Then, it is of importance to avoid the collision between tool and workpiece due to the arbitrariness of tool attitude. The system developed in the study generates the collision-free tool path for workpieces with sculptured surface, based on the CAD/CAM system employing the solid modeling techniques. As a result, the validity of the system is experimentally confirmed.

Key words: 5-axis control machining, collision avoidance, CAD/CAM, solid model, sculptured surface

1. 緒 言

NC 技術の進歩に伴い、現在数多く使われている 3 軸制御の NC 工作機械のほかに、最近では多軸制御の NC 工作機械が使われ始めている。多軸制御の利点として、3 軸制御では加工が困難である形状に対応できることや、段取り換えを省くことなどがあげられる。特に自由曲面の加工では、加工時間の短縮や磨きなどの後処理工程の簡略化が可能となるため、多軸制御の加工技術は今後ますます普及するものと思われる¹⁾²⁾。

しかし、多軸加工用のソフトウェアは 3 軸加工のもののより数段難しく、特別な工作物に対してだけ専用の NC データを生成しているようである³⁾。さらに、多軸制御では工具に様々な姿勢を与えることができるゆえに、工具とそれを取り巻く環境との干渉が大きな問題となる⁴⁾。現在開発されている 5 軸加工ソフトウェアは、工具干渉が必ずしも十分解決されているとはいえず、生成した NC データを CRT 上でシミュレーションして目視で確認したり、試し削りに頼っているのが現状である。しかし、加工対象物が複雑な形状である場合には 3 次元空間で起こる干渉を 2 次元の CRT 上でチェックすることは困難であり、また試し

削りにかかる時間を省くためにも、確実に工具干渉を回避できる加工ソフトウェアが望まれる。

このような背景から、本研究ではソリッドモデルで定義した形状をもとに、工具と工作物の干渉を考慮した同時 5 軸制御のための加工ソフトウェアを開発することを目的としている。

2. 形状表現について

3 次元形状のモデリングは、既に開発済みのパーソナル CAD/CAM システム P-CAPS⁵⁾を用いた。形状定義は、CSG と B-reps の構造を持つソリッドモデルを核として実現されている。CSG で使われる形状要素には、球、円柱、円すい、立方体の基本プリミティブと、回転体、円環体、自由曲面などのユーザ定義プリミティブが用意され、これらのプリミティブに対して形状編集や集合演算を施して目的形状を定義することができる。

3. 5 軸制御加工ソフトウェア

3.1 3 軸制御とのかかわり

CAD で定義した形状に対して工具経路を生成するが、3 軸制御で加工する場合、工具中心点の軌跡となる工具オフセット面は、格子空間モデルの変形である Z-map を用いて求めている⁵⁾。格子空間モデルは空間を小さな格子で立方体に区分けし、その立方体の集合で 3 次元形状を表現するものであるが、Z-map は、xy 平面にただ 1 つの Z 値を持つ構造にし、3 次元形

* 原稿受付 平成 2 年 4 月 24 日。1989 年度精密工学会秋季大会学術講演会（平成元年 11 月 7 日）にて発表

** 正 会 員 電気通信大学（調布市調布ヶ丘 1-5-1）

*** 学生会員 電気通信大学

† 正 会 員 （株）ヤマザキマザック（つくば市御幸ヶ丘 39）

Fig. 1 Procedure of 5-axis control machining

状を柱状要素の集合体として表現するものである。Z-map はシンプルで統一的に扱える利点があるが、もともと3軸制御のマシニングセンタ用に考案したため、Z値が多価である形状には対応できない。そこで、5軸制御で多価の形状を加工する場合、CSGから直接オフセット面を生成する。このように、3軸制御加工と5軸制御加工とを使い分けている。

3.2 工具経路の生成手順

CSGで定義した形状には様々なプリミティブが含まれているが、同時5軸制御で加工する形状は特に効果が期待できる自由曲面に限定している。P-CAPSでは自由曲面に双3次のBézier曲面を用いており、その工具経路生成手順を図1に示す。加工対象物はCSGで定義されており、その中で自由曲面のプリミティブに対して工具オフセット面を生成する。工具オフセットは曲面における切削点からオフセットの量だけ法線方向にシフトすることにより行われる。また、工具経路はオフセットした曲面を走査線方向になぞることにより求められる。

加工曲面に対する工具姿勢は、工具中心点を始点とする工具軸ベクトルを計算することにより決定される。図2において、曲面の切削点における法線ベクトルを N 、送り方向のベクトルを F としたとき、工具軸ベクトル T は2つの角度 α, β を与えることにより決定される。つまり、ベクトル N をベクトル F のまわりに α 度だけ回転させ(T' とする)、次に T' をベクトル N まわりに β 度だけ回転させればよい。すなわち、ベクトル T は次式で求められる。

$$T = E^{N\beta} \cdot E^{Fa\alpha} \cdot N \quad (1)$$

Fig. 2 Determination of the tool axis vector

ここで、 $E^{V\theta}$ はベクトル $V[V_x, V_y, V_z]$ の回りに角度 θ だけ回転させる回転変換マトリクスを表し、次式により定義される⁶⁾。

$$E^{V\theta} = \begin{bmatrix} V_x^2 V + C & V_x V_y V - V_z S & V_x V_z V + V_y S & 0 \\ V_x V_y V + V_z S & V_y^2 V + C & V_y V_z V - V_x S & 0 \\ V_x V_z V - V_y S & V_y V_z V + V_x S & V_z^2 V + C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} V &= 1 - \cos(\theta) \\ C &= \cos(\theta) \\ S &= \sin(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上式に基づいて、各切削点に対する工具軸ベクトルを計算すれば、工具は加工曲面に対して常に一定の姿勢を保つことができる。このように工具の中心位置と工具軸ベクトルを計算できるが、その際工具が工作物を削りすぎることのないように干渉チェックをする必要がある。工具と工作物の干渉チェックには前述のCSGデータが利用される。工具干渉を自動的に回避した工具経路はCLデータとして出力され、機械座標系に変換されたのちNCデータになる。

3.3 干渉回避の方法

一般に、多軸制御による加工では工具干渉が大きな問題となる。工具干渉には工具と加工対象物、チャック、テーブル、ジグ等との干渉があるが、ここでは工具と加工対象物との間に起こる干渉を取り上げ、これを自動的に回避する手段を考案する。

加工対象物はCSGで定義されており、干渉チェックにはこのCSGデータを利用する。工具形状は、図3に示すような工具座標系を仮定し、指定された工具の周囲に多数のチェックポイントを設け、工具形状を点群の集合体として近似する。このとき、工具中心点と工具座標系の原点は一致させておく。チェックポイントは、工具の円周方向に等間隔に P_1 から P_n まで設置され、それぞれをZ軸方向に連続させてチェッ

Fig. 3 Check points on a tool

クポイント列を作る。1つのチェックポイント列をさらに3つの区間に分け、区間中の内分点を等間隔に設定する。この3つの区間の設定を変化させることにより、ボール、テーパ、フラット等のエンドミルを定義することができる。

これらチェックポイントの設定は、工具情報と干渉チェック情報に基づいて自動的に決定され、工具形状データとして保存される。この工具形状データを工具オフセット面上を滑らし、各チェックポイントとCSGデータの内外判別を行うことにより干渉チェックを実現している。CSGではそれぞれのプリミティブが半空間で表されているので、チェックポイントの各座標値と各プリミティブとの位置関係を調べることで、形状の内外判別が可能となる。干渉が起きた場合には干渉を回避できる工具軸ベクトルを計算し、工具姿勢を変更する。干渉回避の手順を以下に示す。

<STEP 1>

初めに指定された工具中心位置、工具軸ベクトルに基づいて、工具形状に設けた全チェックポイントに対してCSGの内外判別を行う。その際、工具座標系で定義した工具をワーク座標系に変換する必要がある。いま、加工表面に対する工具位置と工具姿勢が図4に示すように指定されたとする。このときの工具中心点の座標を $P(P_x, P_y, P_z)$ とし、また工具軸ベクトル T が xy 平面に対する角度を a 、 xz 平面に対する角度を b とすれば、工具座標系で定義された工具の姿勢を変える変換マトリクス M は次のように表すことができる。

Fig. 4 Tool axis vector on work-coordinate system

$$M = E^{Y(90-a)} \cdot E^{Zb} \quad (4)$$

ここで、 $E^{Y\theta}$, $E^{Z\theta}$ はそれぞれ y , z 軸回りに角度 θ の回転を表す 4×4 の回転変換マトリクスを意味する。また、工具座標系からワーク座標系への位置変換は平行移動で実現でき、 4×4 の単位行列 S に次の成分を与えればよい。

$$\left. \begin{aligned} S(4, 1) &= P_x \\ S(4, 2) &= P_y \\ S(4, 3) &= P_z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

これより工具座標系とワーク座標系におけるチェックポイントの座標をそれぞれ A^T , A^W とすれば、

$$A^W = A^T \cdot M \cdot S \quad (6)$$

と表される。

ワーク座標系へ座標変換された工具の各チェックポイントとCSGデータの内外判別を行い、すべてのチェックポイントに関してCSGの外側と判断されたとき、工具干渉は起こらないものとする。もし、この段階で干渉が起きたならば次のステップへ移る。

<STEP 2>

工具干渉が起きた場合には、干渉が回避できる工具姿勢を決定する必要がある。干渉回避は工具中心点を中心として工具姿勢を変化させることにより行われる。つまり、工具中心点の位置は変化させず、工具軸ベクトルを変化させることにより干渉回避を行う。干渉回避は工具軸ベクトルを少しずつ変化させて試行錯誤的に行われるが、効率的に回避するためにあらかじめ干渉しない工具姿勢をある程度予測することを試みている。

工具のチェックポイントは円周上に等間隔に n 個設置されているので、それと同等に等分された半径1の円形状を図5のように設定する。これは問題を簡単にするために3次元形状である工具を軸方向に投影したもので、 $P_1, P_2, \dots, P_n$ のチェックポイント列は $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ に相当する。STEP 1ですべてのチェックポイントに対してCSGの内外判別を行ったとき、等

Fig. 5 Projected tool shape

Fig. 6 Concept of the tool collision avoidance

分されたチェックポイント列 $P_1, P_2, \dots, P_n$ に対して, CSG の内外判別で形状の内部となったポイントの数をそれぞれ $C_1, C_2, \dots, C_n$ とする. この $C_1, C_2, \dots, C_n$ を工具移動方向を決定する要素と考え, これより工具が回避する方向ベクトル D を次のように定義する.

$$D = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \vec{O} \cdot C_i \quad (7)$$

ここで, O は円の中心である. また, C_i は工具回避方向を決定するうえで重みの役割をしており, これにより干涉回避方向ベクトルが予測できる. さらにベクトル D を正規化したものを D' とする. 図5に示した工具投影モデルで求めた干涉回避方向ベクトルを3次元のワーク座標系へ変換すると, 実際の工具回避方向ベクトル I は次式で表される.

$$I = D' \cdot M \quad (8)$$

ここで, M は式(4)で求めた 4×4 の工具姿勢変換マトリクスである.

<STEP 3>

ここでは, STEP 2 で求めた工具回避方向ベクトルの方向へ工具を傾ける. そこで, 図6に示すようにベクトル T_0 とベクトル I の外積からベクトル K を求める. T_0 を I の方向に角度 α 傾けたベクトル T_1 を求めるには, T_0 を K のまわりに α だけ回転させれば

よいので, 次式で求めることができる.

$$T_1 = E^{K\alpha} \cdot T_0 \quad (9)$$

続いて, 工具軸ベクトルをベクトル T_1 に一致させ(図6中の①), 工具のチェックポイントと CSG の内外判別を行う. ここで, 工具回避角度 α は干涉チェック情報として, 対話的に入力される. このステップで干涉が回避できない場合は次のステップへ移る.

<STEP 4>

ここでは, STEP 3 で求めたベクトル T_1 をベクトル T_0 の周りに β 度ずつ回転させ, そのつどチェックポイントと CSG の内外判別を繰り返す. 工具移動は②③の方向に交互に行い, T_0 の全周について試みる. 角度 β も干涉チェック情報として対話的に入力され, まだ干涉が起こるなら次のステップへ進む.

<STEP 5>

STEP 3 で用いた α を加算し, 再度 STEP 3 と STEP 4 を繰り返す. すなわち, ベクトル T_0 がベクトル I の方向へ傾く角度を c とすれば $c = m \cdot \alpha$ となる. ただし, $m = 2, 3, \dots$ で, $m \cdot \alpha \leq 180^\circ$ まで繰り返す.

以上の過程で, 工具と加工対象物との干涉を回避できる工具姿勢を求めることができる.

3.4 5軸荒加工

荒加工はできる限り3軸制御で行うことが望ましいが, 多価の形状の場合, 5軸制御で荒加工を行わなければならない場合もある. 荒加工パスは仕上表面で求めたパスを工具軸ベクトルの方向にシフトして求める. すなわち, 仕上形状に対して干涉を回避した CL データを生成し, これを工具軸ベクトルの方向に切込み量だけオフセットする作業を切込み回数だけ繰り返して荒加工パスとする.

仕上形状における工具中心位置と工具軸ベクトルを P, V , 切込み回数を f , 切込み量を d とすれば荒加工の工具中心位置 P' は次式で表すことができる.

$$P' = P + V \cdot i \cdot d \quad (10)$$

ただし, $i = 1, \dots, f$

仕上形状で求めた CL データは干涉が回避されているので, 工具軸方向にオフセットした荒加工の CL データも干涉が起こることはない. ただし, 先端に近づくほど径が大きくなる工具を用いる場合, この方法では干涉する可能性があるため, 仕上面から切込み量だけオフセットした点ごとに干涉チェックを行う必要がある.

次に, 荒加工の切込み回数の決定に関しては, 3軸荒加工の Z-map データを利用する. 図7に示すよう

Fig. 7 Number of depth of cut in rough cutting

Fig. 8 Structure of 5-axis control machining center

に、仕上表面に対して求められた工具軸ベクトル方向に指定した切込み量分のオフセットを行い、Z-mapの外側になるまで繰り返して切込み回数を決定する。荒加工で用いるZ-mapは精度が低い、5軸荒加工の切込み回数を決める上で用いる点では何ら問題はない。また、システムにはワークの寸法も入力され、加工パスはワーク内におさまるようになっている。

4. 5軸制御システムの構成

計算処理はオムロン製のワークステーション(LUNA)を用いた。使用した5軸NC工作機械は、ヤマザキマザック製のティルティングテーブル型5軸マシニングセンタで、図8に示すように工具側に3軸、工作物側に2つの回転軸を持つ。

CLデータはこの機械に適合するように座標変換される。ワーク座標系から機械座標系への変換は3軸制御では平行移動処理で済むが、5軸制御の場合、回転軸による影響を考慮しなければならない。つまり、図9に示すようにCLデータにおける2点 P_1 、 P_2 の工具中心位置、工具軸ベクトルを満足させようとすれば、

Fig. 9 Linearization to reduce the influence of axis rotation

回転軸の影響で工具軌跡は円弧を描くため、加工表面をえぐる可能性がある。そこで、必要に応じて P_1 、 P_2 間を等間隔に分割し、各分割点における工具中心位置と回転角度を決定している⁷⁾。生成されたNCデータはRS-232Cを介してDNCで伝送され、加工を行う。

5. 加工実験

加工対象物としてインベラを取り上げ、ソリッドモデルP-CAPS/CADによりモデリングを行った。CADデータはCSGとB-repsを合わせ持つが、そのうちのB-repsデータを利用して陰影表示したのが図10(a)である。この形状は円柱、自由曲面(平面タイプ、円柱タイプ)のプリミティブから構成されており、3軸制御では加工が困難であると同時に工具干渉が問題となる。荒加工、及び外形は3軸で加工し、翼面と翼面間の狭部を同時5軸で加工した。自由曲面プリミティブに対して生成したCLデータを表示したのが図10(b)であり、この段階で工具干渉は自動的に回避されている。オフラインで生成したNCデータは、EWSからRS-232Cを介してDNCで伝送して加工を行った。5軸マシニングセンタによる加工状況を図10(c)に示す。被削材はMCナイロンを用い、工具は突出しが長くとりて剛性の高いテーパボールエンドミル(先端半径3mm、テーパ角3°)を使用した。このときのピックフィード量は0.2mmで、工具のチェックポイントの間隔は、工具の先端で0.5mm、側面で2mmとした。このような工具形状の近似による形状誤差は、工具先端で20 μ m程度となる。これは加工精度にも影響してくるので、加工精度を向上させるには、さらに工具形状の近似を細かくする必要がある。加工形状を図10(d)に示す。このようにソリッドモデルで定義した形に対して、工具干渉を考慮した同時5軸による加工が実現できた。

6. 結論

ソリッドモデルを用いて、工具と工作物の干渉を考慮した5軸加工のための加工ソフトウェアを開発し、以下の結論を得た。

(a) Defined workpiece shape

(b) Tool path simulation

(c) In machining

(d) Machined Workpiece

Fig. 10 Example of 5-axis control machining

- (1) 3次元ソリッドモデルで定義した形状データを用いて、自由曲面に任意の工具姿勢で加工することができ、またZ-mapデータを利用して5軸荒加工の切込み回数を自動的に決定することができた。
- (2) 5軸制御加工で問題とされていた工具と加工対象物の干渉に対し、CSGデータを利用した回避方法を提案した。
- (3) 干渉を回避した工具経路を基に5軸制御マシンニングセンタ用のNCデータを生成し、翼面の同時5軸制御の加工実験を行ってシステムの有用性を確認した。

参 考 文 献

- 1) 難波国男, 小川雅人: 3次元NC自動プロによるNC加工, 機械技術, 31, 3 (1983) 34.
- 2) 庄縮羽根車の加工時間短縮, 日経メカニカル, 7月11日号 (1988) 48.
- 3) 沢田 潔: 多軸数値制御工作機械による自由曲面加工の現状, 日本機械学会誌, 83, 740 (1980) 42.
- 4) 岸浪建史, 近藤 司, 新庄博之, 中原博史: トロコイダル補間に基づくコンピュータ制御5軸工作機械, 精密工学会誌, 55, 3 (1989) 557.
- 5) Y. Takeuchi, M. Sakamoto, Y. Abe and R. Orita: Development of a Personal CAD/CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques, Ann. CIRP, 38, 1, (1989) 429.
- 6) 広瀬茂男: ロボット工学, 装華房, (1987) 12.
- 7) 関口久夫: 5軸制御NC工作機械による複雑形状部品の加工, 機械技術, 31, 12 (1983) 101.