C-Space を用いた 5 軸制御加工のための工具経路生成法*

森 重 功 一** 加 瀬 究*** 竹 内 芳 美†

Tool Path Generation Using C-Space for 5-Axis Control Machining

Koichi MORISHIGE, Kiwamu KASE and Yoshimi TAKEUCHI

This study deals with the method of tool path generation for 5-axis control machining using the ball end-mill. The 5-axis control machining has been used for the particular shapes such as impeller, blade, rotor and groove of tire. On the other hand, it becomes known that this machining has a lot of advantages in case of application to the general shapes such as molds and dies. However, most of present CAM systems for 5-axis control machining have limitations of the functions for the tool collision, the workpiece shape and the method of machining. For that reason, there are many cases that users cannot get the desirable CL data. In regard to the above problem, we apply the 3-dimensional C-Space showing the relationship between all tool positions and postures and the existence of tool collision. The method of tool path generation devised in this study enables users to generate CL data reflecting their own machining strategy such as the continuous change of tool posture and the machining condition. The method allows an impeller to be actually milled in good machining condition without tool collision. As a result, the validity of the method is experimentally confirmed.

Key words: 5-axis control machining, collision avoidance, 2-dimensional C-Space, 3-dimensional C-Space, collision-free CL data, machining strategy

1. 緒 言

従来、5 軸制御加工は主にインペラ、ブレード、ロータ、タイヤ溝などのように複雑な形状の加工に特定されてきたが、金型などの一般的な形状に適用した場合においても、工具の合理的な使用や工程数の大幅削減など様々な利点があることが知られている。そのように汎用的な目的で 5 軸制御加工を施行するためには CAM による支援が不可欠となるが、現行の 5 軸制御加工用 CAM は、そのほとんどが工具干渉に関する機能や対象形状、加工方法を限定したものである。そのため、ユーザが目的的工具経路 (Cutter Location, 以下 CL と略す) を得られない場合が多い。

この 5 軸制御加工の CL データ生成に関する問題に対し、筆者らは工具干渉のないデータを生成できる汎用的な手法の 1 つとして、各切削点における工具姿勢と干渉の関係を表す 2 次元 Configuration 空間 (Configuration Space, 以下 C-Space と略す)¹⁾ を用いた解析的な工具干渉回避法に基づく手法を示してきた²⁾³⁾。しかし、すべての切削点において工具干渉チェックを行い、干渉のある工具姿勢だけを修正するというこれまでの方法では、工具姿勢変化の連続性を考慮することができず、良好な仕上面を得ることはできない。

本研究では、まず、これまで利用してきた 2 つのパラメータで表現される 2 次元 C-Space に、工具の移動を表すパラメータを 1 つ加えることにより 3 次元のものに拡張する。そして、それを基に工具干渉の回避だけでなく、連続性や安全性、切削状態などを考慮したユーザの加工戦略を反映することのできる CL データ生成手法を新たに提案する。最後に、手法に基づいて開発したメインプロセッサを用いて CL データを生成し、それを基に加工実験を行うことにより、その有効性を検証する。

2. これまでの経路生成方法の問題点

曲面をフライス加工する際には、一般にボールエンドミルが用いられる。この工具で 5 軸制御加工を行う場合、各切削点における工具中心点の位置は 1 つしか存在しないが、取り得る工具姿勢は無数にある。そのため、加工面上に生成した工具中心点に対して暫定的な工具姿勢を付加し、その姿勢について干渉チェックを行い、干渉のあった場合だけ工具姿勢を何らかの手法で修正することにより、工具干渉のない CL データを得ることができる。これまで提案された 5 軸制御加工を対象とした工具経路の生成方法²⁾⁴⁾⁵⁾ は、工具姿勢の修正方法は異なるものの、いずれも以上の流れに沿ったものであった。

しかし、どの手法においても工具が干渉する直前で初めて姿勢が変わるため、干渉回避時の機械の動作が急激で不自然なものとなってしまう。並進駆動軸と回転駆動軸を併用する 5 軸制御加工において、このような動作はオーバカットやアンダカットの原因となる。この問題に対しては、ポストプロセッサ上で CL データから NC データへ変換する際にリアライゼーションと呼ばれる補間処理⁶⁾ を施すことにより一応の精度は保つことができる。しかし、微小の指令ブロックが 1 か所に集中するため、CNC の処理能力が追いつかなくなり、所定の工具送り速度が得られない場合がある。また、姿勢変化の前後で工具の切削方向がまったく異なることから面性状が急変するなど、加工面に悪影響を及ぼすことは避けられない。

以上のことから、実際の 5 軸制御加工を考えるうえでは工具干渉はもちろんのこと、姿勢変化の連続性や良好な加工面を得るための切削状態などを考慮した CL を生成する必要がある。

3. 3 次元 C-Space とそれに基づく工具経路生成

3.1 2 次元 C-Space

図 1 に前報²⁾ で用いていた 2 次元 C-Space f_2 の構成を示す。 f_2 は、それぞれの切削点における工具軸ベクトルを決定する法線ベクトルに対する傾斜角度 θ 、法線ベクトル周りの回転角度

* 原稿受付 平成 8 年 5 月 13 日

** 学生会員 電気通信大学電気通信学部 (調布市調布ヶ丘 1-5-1)

*** 正 会 員 理化学研究所 (和光市広沢 2-1)

† 正 会 員 電気通信大学電気通信学部

(a) Definition of tool posture in real space

(b) 2-dimensional C-Space

Fig. 1 Concept of 2-dimensional C-Space

ϕ という2つのパラメータによって極座標表現される2次元空間である。この $f_2(\theta, \phi)$ の定義領域に工具の周囲にある障害物を写像し、干渉のない工具姿勢に対応する自由領域と干渉のある工具姿勢に対応する干渉領域に分別することにより、その切削点における工具姿勢と干渉の有無の関係を明確に把握することができる。

3.2 手法の設定

新たに提案する工具経路生成法は、 f_2 に CL における工具中心点の移動を表すパラメータを1つ加え、3次元 C-Space f_3 に拡張することによって実現される。図2に f_3 の構成とそれに基づく工具経路生成法の概念を示す。この図では、形状を構成する面との工具干渉が考えられる曲面の加工を想定している。

始めに、図2(a)に示すように、工具が進入する切削点から離脱する切削点までの1本の経路における工具中心点の軌跡を、経路の始点で0、終点で1となるパラメータ s によって表現される空間曲線 $C(s)$ と考える。次に、この $C(s)$ を内分する任意の位置において2次元 C-Space f_2 を作成し、その自由領域の境界を図2(b)に示すように θ, ϕ, s の3つのパラメータによって張られる3次元 C-Space $f_3(\theta, \phi, s)$ 上に配置する。ここで、それぞれの s における $f_2(s)$ の境界線を補間することによって得られる管状面を考える。この管の内側における任意の点が、曲線 C 上の工具中心点の位置と干渉のない1つの工具姿勢に1対1で対応する。以下、干渉のない工具の位置と姿勢に対応する点の集合といえるこの空間を、3次元 C-Space f_3 の自由空間と呼ぶことにする。

ここで、自由空間の入口から出口を、管の内部の面と干渉す

(a) Cutter location in real space

(b) 3-dimensional C-Space

Fig. 2 Concept of 3-dimensional C-Space and method of the tool path generation

ることなく滑らかに結ぶ曲線 C_f が得られたならば、この C_f を適当な許容値のもとに分割し、各分割点における θ, ϕ, s の値に相当する実空間上の工具の位置と姿勢を逐次求めていくことにより、干渉のないように姿勢変化が連続的な CL データを生成することができる。つまり、3次元 C-Space f_3 を利用することにより、実空間上では複雑な工具経路の計画を、管の内部を通る曲線の定義という比較的容易な問題に置換することができる。

この工具経路生成法を実行する上では、 f_3 の自由空間を通る曲線 C_f を、どのように決定するかという点が重要となる。自由空間の境界と干渉しないという条件を満たす曲線は無数に存在するため、その中から最適なものを選択するということは困難である。そのため、 C_f を定義する際には幾つかの条件で C_f を拘束する必要があるが、反対にそれらの条件を切削に不具合が生じると考えられる姿勢を避けるなど切削状態を考慮したものとするにより、作業者の加工戦略を反映した CL データの生成が可能となる。

3.3 2次元 C-Space 生成処理の拡張

考案した工具経路生成法を施行するうえでは、 f_3 を生成するために、加工面上のどの位置においても確実に f_2 の自由領域を取得できることが重要である。この f_2 の生成に関して、前報までは対象形状を凸多面体に限定したものであった。そこで本報では、自由曲面などで構成される一般の形状に対しても手法を適用できるように、この f_2 の生成手法を拡張する。

ロボットマニピュレータの動作計画の研究における C-Space の生成においては、ロボットや障害物を多角形や多面体で近似

(a) Collection of tool posture points by tracing edges of polygon

(b) Projected tool posture points

(c) Collision area with error area

(d) Modification by inserting a point into the loop list

(e) Final collision area

Fig. 3 Process of making the collision area of 2-dimensional C-Space

することが一般的によく行われる⁷⁾。本研究もその考え方に基づいて、曲面の扱いに関する問題を簡略化している。

拡張した手法の流れを図3に示す。まず、干渉の対象となる曲面を選択し、それを十分な数の3角形ポリゴンで多面体に近似する。このときの分割数は、目的の曲面の大きさや最大曲率に応じて変える必要がある。そして、それぞれのポリゴンに対して図3(a)に示すように工具と3つの稜線の接触を想定した形で工具軸ベクトルを変化させ、そのときの θ, ϕ の値に対応する点を f_2 上に逐次プロットしていく。次に、図3(b)のように投影された点群を基にして干渉領域の境界線を求める。ここでは、中心からの距離が最も遠い点を始点として、点群の外周を囲む点を順に求め、環状のリストにする。得られた環状リストの点列を滑らかに補間する閉曲線が干渉領域の境界となるが、このままでは図3(c)のように、領域の凹部がまったく表現されず、実際のものよりも領域が大きくなり過ぎるため、目的の情報を把握するのに十分なものとはいえない。そこで、図3(d)に示すように、リスト中の連続する2点間の距離が設定した許容値以上の場合には、2点の midpoint から最寄りの点をプロットされた点の中から1つ選出して2点間に挿入する。このような補間処理を、すべての2点間の距離が許容値以内に収ま

Fig. 4 Workpiece shape to be machined

Fig. 5 Limited change in tool posture

るまで繰り返し、最終的に得られた環状リストの点群を滑らかに結ぶことにより、図3(e)に示すように1つの障害物に対応する干渉領域が得られる。定義領域からすべての障害物に対する干渉領域の差を取っていき、残った領域が目的の f_2 の自由領域となる。

4. 適用例

4.1 問題設定

考案した手法の妥当性を検証するために、簡単な加工実験を行った。加工対象形状として、5軸制御加工の代表例としてよく取り上げられるインペラを考えた。以下、形状の定義と処理プログラムの作成には、(株)リコー製の3次元ソリッドモデラDESIGNBASEと、それに付属するライブラリーを用いている。定義した形状を図4に示す。大きさは径が最大156 mm、高さが120 mmである。この形状を加工する場合、6枚の羽根の裏表は各切削点における工具姿勢を一定にすることで切削可能だが、羽根にはさまれる底の面に関しては両側の羽根との干渉が考えられるため、それらの干渉を回避するために姿勢を変化させながら切削する必要がある。今回は、この底面の加工に対して手法を適用し、CLデータを生成した。

4.2 加工戦略の設定とCLデータの生成

最初に、目的の形状を加工するための戦略を設定する。今回は、実際の加工における複雑な姿勢変化は加工後の面性状を考えるうえで好ましくないと考え、加工中に取り得る工具姿勢を図5に示すように工具送り方向に対して垂直な左右の傾斜運動だけで実現できるものだけに限定した。このような工具姿勢変化に対応するCLを表す曲線 C_f は、次のようにして求めることができる。

Fig. 6 Calculation of curve Cf based on the machining strategy

Fig. 7 Generated collision-free CL data

まず、図 6 に示すように f_3 上の幾つかの s において、点 $A(\theta, \phi) = (\pi/2, \pi/2)$ と点 $B(\theta, \phi) = (\pi/2, 3\pi/2)$ を結ぶ直線と f_3 の自由空間との交点を求め、その中で点 B から最寄りの 2 点を選出する。得られた点を B から近い順に P_1, P_2 とすると、 P_1 は工具送り方向右側の障害物と接触する工具姿勢に、 P_2 は左側の障害物と接触する工具姿勢にそれぞれ対応する。よって、 P_1, P_2 の中点 P_3 を求めることにより、左右の障害物の中間に立つような工具姿勢を得ることができる。それぞれの s における P_3 を f_3 上で滑らかに補間する曲線を求めることにより、目的の姿勢変化に対応する Cf を得ることができる。今回、 f_2 を生成する位置は、 s の区間を 3 等分する 4 が所としたが、この s の刻みは周囲の障害物や切削面の曲率の変化に応じて、その分割数や生成位置を変える必要がある。

設定した加工戦略に基づいて生成した CL データを図 7 に示す。全体のパスの数は 83 本であった。このため、83 の f_3 を作成することになり、その 4 倍の 332 の f_2 が必要となる。この CL データ生成には、Sun SPARCstation 10 で約 2 時間を要した。

4.3 加工実験と考察

4.2 節で得られた CL データを、既存の汎用ポストプロセサ⁸⁾を用いて NC データに変換し、5 軸仕様のマシニングセンタ上で加工を行った。表 1 に加工条件を、図 8 に加工状況を示す。被削材は超々ジュラルミンの円柱から NC 旋盤で外周形状を削り出し、削り代 0.5 mm まで各ブロックごとに荒加工を施したものを使用した。加工中の機械の動作は当初の目的どおり連続的で非常に滑らかであり、切削状態も良好であったが、加工

Table 1 Machining condition

Machining	Fine finishing
Work material	A 7075
Tool	R 3×2 edge ball-end mill
Spindle speed	5 000 rpm
Feed rate	800 mm/min
Depth of cut	0.2 mm
Pickfeed	0.2-0.7 mm

Fig. 8 Machining by 5-axis control

Fig. 9 Undesirable surface appearance

(a) By down cutting (A) (b) By cutting at the center of tool (B)

Fig. 10 Enlarged surface appearance of Fig. 9

後の曲面上に図 9 に示すように、にじみのような面不良が確認された。その部分を拡大したものを図 10 に示す。問題のない A の部分は図 10 (a) のように断続切削によるカッターマークがきれいにでているが、問題の B の部分は図 10 (b) のように不連続な性状になっている。これは、工具先端の回転中心部で切削したために工具が食い込み、断差が生じたものと考えられる。

そこで、このような不良の原因となる工具先端部での切削を回避するために、4.2 節の設定に若干の修正を加えた。 f_3 においては、 s 軸上の点が切削点における面の法線と一致する問題

Fig. 11 Modified method of calculating curve Cf

Fig. 12 Tool posture with inclination to the tool feed direction

Fig. 13 Surface appearance with avoidance of cutting at the center of tool

の工具姿勢に対応している。そこで、Cf がこの s 軸と交差することを避けるために、管状面との交線を図 11 のように微小量シフトして Cf を求めた。このように Cf を決定することにより、切削中の工具姿勢に常に図 12 に示すような工具送り方向側への傾斜が加わるため、このような問題を避けることができる。

以上のように問題を設定して CL データを生成し直し、再度、加工を行った。図 13 が加工後の図 9 と同一箇所の様子である。先の面不良は完全に消えており、このことから Cf の決定に新たに付加した条件が有効であったことが分かる。また、加工面上の他の部分においても新たな不良は確認されなかった。図 14 に最終的に得られたインペラ形状を示す。4.1 節で定義したとおりの形状を加工することができた。

Fig. 14 Machined workpiece

5. 結 言

本研究では、ボールエンドミルを用いた同時 5 軸制御による仕上加工を対象に、工具が進入してから離脱するまでの 1 本の経路における工具中心点の位置と工具姿勢に対する干渉の関係を表す 3 次元 C-Space を用いた工具経路生成法を考案し、生成した CL データを用いて加工実験を行い、以下のような結論を得た。

- (1) これまでの手法で問題であった、干渉回避による急激な姿勢変化のない、連続的で滑らかな CL データの生成が可能となった。
- (2) 工具先端部分での切削を回避するなど、作業者の加工戦略を反映した CL データの生成が可能となった。
- (3) 生成した CL データをポストプロセッサで NC データに変換して加工を行ったところ、良好な性状の仕上面が得られ、手法の有効性を確認した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり助力頂いた、中川威雄部長を始めとする理化学研究所研究基盤技術部の皆様、並びに本学大学院生の長坂学氏、卒研究生の濱田竹冊氏に心から感謝する。また、研究を遂行するに当たり便宜を図って頂いた(株)リコーソフトウェア事業部、日立ツール(株)の関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- 1) T. Lozano-Perez : Spatial Planning: A Configuration Space Approach, IEEE Trans. Comput., **32**, 2, (1983) 108.
- 2) 森重功一, 加瀬 究, 竹内芳美 : 2 次元 Configuration 空間を用いた 5 軸制御加工における工具干渉回避法, 精密工学会誌, **62**, 1 (1996) 80.
- 3) 森重功一, 加瀬 究, 竹内芳美 : C-Space を用いた 5 軸制御加工における工具干渉回避法——自由曲面への適用, 1995 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1995) 141.
- 4) 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.
- 5) 鈴木 裕, 桑野義正, 後藤勝征, 竹内芳美, 佐藤 真 : 5 軸加工用 CAM システムの開発, 精密工学会誌, **60**, 6 (1994) 832.
- 6) 竹内芳美, 渡辺隆弘 : 5 軸制御マシニングセンタ用ポストプロセッサの研究, 精密工学会誌, **58**, 9 (1992) 1586.
- 7) J.-C. Latombe : Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, Boston, (1991) 40-41.
- 8) 長坂 学, 竹内芳美 : 形状創成関数に基づく 5 軸制御加工用一般化ポストプロセッサの研究, 精密工学会誌, **62**, 11 (1996) 1607.