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*

森 重 功 一** 加 瀬 究*** 竹 内 芳 美†

The Method of Collision Avoidance for 5-Axis Control Machining Using
2-Dimensional Configuration Space

Kouichi MORISHIGE, Kiwamu KASE and Yoshimi TAKEUCHI

This study deals with the method of collision avoidance in the automatic tool path generation for 5-axis control machining. The 5-axis control machining offers the potential of efficient and accurate machining, while the collision between a tool and surrounding objects is still a severe problem. The method devised in this study realizes the judgement on the possibility of collision avoidance at the position where the collision take place, and produces the direction of collision avoidance, based on the 2-dimensional configuration space defined by two parameters which determines the tool posture. This method allows a test workpiece with an overhanging part to be actually milled without collision. As a result, the validity of the method is experimentally confirmed.

Key words : 5-axis control machining, automatic collision avoidance, 2-dimensional configuration space, collision-free CL data

1. 緒 言

5軸制御加工機は、従来からの直進駆動3軸に回転駆動2軸を付加した工作機械で、工作物に対して任意の工具姿勢を与えることができるため、複雑な形状の加工が可能となる。

しかし、その高い自由度の反面、工具とその周囲の環境との干渉を常に考慮しなければならず、この複雑な工具干渉問題が5軸制御加工の普及を妨げる大きな要因の1つとなっている。そのため、工具干渉のない5軸制御加工の工具経路を、自動的に生成することのできるCAMシステムが強く望まれている。

この5軸制御加工時の工具干渉問題に対して、工具経路の自動生成に関する研究の中で、自動工具干渉回避の手法が既にいくつか提案されている¹⁾²⁾。しかし、いずれの手法も工具干渉検出後の干渉回避処理において、干渉が回避できるまで暫定的な工具姿勢の決定を繰り返すというような試行錯誤的な処理が中心となっている。そのため、回避方向を一意的に決めることができず、切削が不可能な位置では回避処理が無限に繰り返される可能性がある。したがって、工具干渉が検出された位置において干渉回避の可能性をその周囲の環境から総合的に判断し、回避可能ならば、干渉のない新たな工具姿勢を、試行錯誤的ではなく、ある確かな方針に基づいて確定することのできる手法の開発が必要であると考えられる。

本研究では、この5軸制御加工における工具干渉問題の解決策として、ロボットマニピュレータの障害物回避経路の自動計画³⁾に用いられる Configuration 空間 (Configuration Space, 以下 C-Space と略す)⁴⁾ を適用した、多面体近似された工作物の形状モデルを用いて、工具干渉を検出した位置における幾何情報から、その位置で取り得るすべての工具姿勢とそれらの姿勢に対する干渉の有無の関係を表す2次元の C-Space を作成し、それをもとにした解析的な工具干渉回避手法を提案する。

次に、手法を組み込んだメインプロセッサを用いて工具経路 (Cutter Location, 以下 CL と略す) データを自動生成し、それをもとに加工実験を行うことによりその有効性を検証する。

2. 2次元 C-Space の設定

C-Space とは、移動体の位置・姿勢を表すパラメータ空間のことである。C-Space を用いた手法の特徴として、この空間上では移動体の位置・姿勢を1つの点で表すことが可能であることがあげられる。そのため、実空間上の複雑な干渉回避動作計画を、ある制約のもとでの1点の回避動作計画という容易な問題に置換できる。

本研究は、ボールエンドミルによる同時5軸制御フライス加工を対象としている。この場合、加工面の各切削点における工具姿勢は、図1に示すように切削点を法線ベクトル方向に工具半径だけオフセットした工具中心点と、それを始点とする工具軸ベクトルによって決定される。

そこで、それぞれの切削点において、工具中心点を原点、法線ベクトルを Z 軸、工具送り方向を表す接線ベクトルを X 軸とするような局所的な直交座標系 (以下、ローカル座標系と呼ぶ) を考える。このローカル座標系における工具軸ベクトルは、図2に示すように、Z 軸となす角度 θ 、XZ 平面となす角

Fig. 1 Decision of tool posture in case of ball-end mill

* 原稿受付 平成7年3月10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

Fig. 2 Tool axis vector on the local coordinate system

Fig. 3 Concept of 2-dimensional C-Space

度 ϕ という、2つのパラメータによって表現することができる。

そこで、この2つのパラメータ θ, ϕ の極座標で表現される2次元の C-Space を設定する。考案した2次元 C-Space の構成図を図3に示す。この C-Space 上の1点においては、原点との距離がパラメータ θ に、原点と点を結ぶ線分が横軸となす角度がパラメータ ϕ に対応している。工具軸ベクトルは、法線ベクトルに対して $\pi/2$ 以上傾けることはできないので、この C-Space の有効範囲は、原点を中心とした半径 $\pi/2$ の円の内部としてさしつかえない。工具周辺の障害物を、この C-Space 上に閉領域として表現することにより、その切削点において取り得るすべての工具姿勢と干渉の有無の関係を明確に表現することができる。

以後、工具干渉に対応する C-Space 上の閉領域のことを干渉領域、C-Space の有効範囲内の干渉領域以外の領域を自由領域、工具姿勢に対応する C-Space 上の点を工具姿勢点と呼ぶことにする。この場合、実空間上で障害物と干渉している工具姿勢点の集合が、C-Space における干渉領域を表すことになる。

C-Space 上のそれぞれの工具姿勢点は、実空間におけるただ1つの工具姿勢に対応しているため、ある工具姿勢で工具が障害物と干渉しているならば、その姿勢に対応する C-Space 上の工具姿勢点は干渉領域内部の点であると考えられる。また、実空間で工具と障害物が接している場合の工具姿勢点は、C-Space 上では干渉領域と自由領域との境界線上の点となる。

3. 2次元 C-Space を用いた工具干渉回避処理

2節で述べた2次元 C-Space を用いることにより、工具干渉

Fig. 4 Example of C-Space not to avoid collision

Fig. 5 Method of collision avoidance

チェックに続く干渉回避に関する処理を解析的に行うことができる。以下、本研究で取り扱う2つの処理について説明する。

3.1 干渉回避の可否の判定

2次元 C-Space を用いることにより、その切削点で工具姿勢を修正することによって干渉を回避することができるかどうかを自動的に判定することが可能となる。例えば、C-Space の有効範囲のすべてが、図4に示すように写像された干渉領域によって占有される場合、工具姿勢点の取り得る自由領域が存在しないため、この切削点における干渉の回避は不可能と判断することができる。一方、この判定において自由領域が存在する場合は、続く干渉回避の処理に移ることになる。

3.2 干渉回避処理

3.1項で述べた手法で干渉回避が可能であると判定された場合、再び C-Space を用いて、確実な干渉回避処理を行うことが可能となる。本研究では、この工具干渉回避の方針として、工具姿勢変化量、すなわち工具姿勢を決定する2つのパラメータ θ, ϕ の変化量 $\Delta\theta, \Delta\phi$ の合成量 $\{(\Delta\theta)^2 + (\Delta\phi)^2\}$ が最小であるものとした。例えば、 θ_c, ϕ_c の値で決まる工具姿勢で干渉が検出された場合は、図5に示すように、C-Space $f(\theta, \phi)$ 上における干渉領域内部の工具姿勢点 $f(\theta_c, \phi_c)$ から、C-Space 上で最短距離にある領域境界上の点における θ, ϕ の値を求め、その値をもとに新たな工具姿勢を決定することにより、干渉を回避することができる。

4. 多面体近似された形状への適用

考案した2次元 C-Space と、それに基づく干渉回避手法を実際の工具経路自動生成に適用するには、実空間上の障害物をいかに C-Space 上に干渉領域として表現するかが問題となる。そこで本研究では、自由曲面などを含む一般の形状に対しては、十分な精度で多面体近似がなされていることを前提としている。

以下では、説明の簡明さを目的として、図6に示すように9つの平面で構成される多面体を対象に、図7に示すように干渉

Fig. 6 Defined shape of workpiece

Fig. 7 Example of collision between the workpiece and the tool

している工具位置と姿勢を与え、そこから干渉を回避していく過程を説明する。このときの工具姿勢は、パラメータ θ, ϕ をそれぞれ $\pi/6$ として決定した。

4.1 ローカル座標系の設定

まず、対応する切削点において、工具中心点、単位法線ベクトル、単位接平面ベクトルをもとに、ローカル座標系を設定する。

4.2 干渉領域の写像

ここでは、形状を構成する平面から工具と干渉する可能性のあるものだけを選定し、2次元 C-Space 上の干渉領域として解析的に写像する。ここで選定される平面は、工具中心点から見て正面を向けている平面と考えることができる。そこで、図8に示すように工具中心点から平面の中心を指示するベクトル C と、平面の法線ベクトル N の内積 $C \cdot N$ の値をもとに干渉の対象となる平面を選定する。例えば、2つのベクトルのなす角度が鋭角、すなわち内積の値が負の場合は写像処理の対象とし、反対になす角度が鈍角、すなわち内積が正の場合はその平面を処理の対象から外す。

次に、選定されたそれぞれの平面ごとに、工具との接触を維持しながら工具姿勢を変化させていくことにより、C-Space における干渉領域と自由領域の境界を求める。ここでは、図9に示すように、稜線上の点を工具半径の長さだけオフセットし、工具中心点からそのオフセット点を指示するベクトルをその点で稜線と接する工具姿勢を表す工具軸ベクトルとする。このときの工具軸ベクトル T は、任意のベクトル V に対して時計周りに角度 ω の回転移動を表すマトリクス $R^V(\omega)$ を用いて、以下の式(1)のように算出できる。

Fig. 8 Collision surface selection

Fig. 9 Calculation of C-Space boundary by tracing all edges of a plane

$$T = PR^{((P \times D) \times P)}(\omega) \quad (1)$$

ここに、 P は稜線上の点を指示するベクトル、 D は稜線の方向を表すベクトルである。また、回転角度 ω は、工具半径 r を用いて次の式(2)のように求めることができる。

$$\omega = \sin^{-1} \frac{r}{|P|} \quad (2)$$

稜線を始点から終点まで等分割し、それぞれの分割点における工具の接触に対応する θ, ϕ の値を求めていく。そうして得られた θ, ϕ の軌跡を、2次元 C-Space 上に3次スプライン曲線で表現する。この境界写像処理をすべての稜線に対して行うが、この場合、稜線の終点と次の稜線の始点との間にギャップが生ずる。ここでは、図10に示すように稜線の端点から工具中心点を指示するベクトルを軸とした工具と同径の円弧を想定することによりこのギャップを補間している。この円弧を稜線と同様に等分割し、工具中心点からそれぞれの分割点を指示するベクトルに対応する θ, ϕ の値から補間部分に対応する C-Space 上のスプライン曲線を計算する。写像されたすべての曲線によって囲まれる領域が、1つの平面に対する干渉領域となる。例題における平面の選定および干渉領域写像処理の様子

Fig. 10 Method of interpolation of gap between ends of offset edge

(a) selected collision surfaces

(b) projecting collision surfaces onto C-Space

Fig. 11 Process for making 2-dimensional C-Space

Fig. 12 Generated 2-dimensional C-Space with collision area

を図 11 に示す。

最後に、写像されたそれぞれの干渉領域の和集合をとることにより、目的の切削点における最終的な干渉領域を、2次元 C-Space 上に表現することができる。

以上の処理の結果得られた C-Space を図 12 に示す。原点を中心とする円形の内部が実現可能なすべての工具姿勢に対応する C-Space の定義領域である。この領域に交差する形で下方に存在する閉領域が、最終的に得られた干渉領域である。干渉領域以外の定義領域が自由領域となる。

Fig. 13 Decision of collision-free tool posture by searching the boundary on C-Space

Fig. 14 Change in tool posture by collision avoidance

Fig. 15 Example of collision-free tool path generated by use of C-Space

4.3 干渉回避の可能性の判定と回避処理

ここでは、作成した2次元 C-Space から、その切削点における切削が可能かどうかを判定する。

この例題では、作成された C-Space 上に自由領域が存在するため、干渉回避することにより切削が可能であると判断され、続く干渉回避処理に移る。図 13 に示すように与えられた工具姿勢に対応する干渉領域内部の点から C-Space 上で最短距離にある境界上の点におけるパラメータ θ , ϕ の値を求め、その値をもとに新たな工具姿勢を決定することにより、図 14 のように干渉を回避できる。

処理の流れとしては、メインプロセッサ上での CL データの計算時に、各切削点において工具干渉チェックを行い、干渉の検出された場合は考案した干渉回避手法を用いて工具姿勢を修正することにより、工具干渉のない5軸制御加工の CL データを自動的に生成することができる。本手法をもとに生成された工具経路の例を図 15 に示す。

Fig. 16 Defined shape to be machined

Fig. 17 Generated collision-free CL-data

5. 加工実験

干渉回避手法を組み込んだ5軸制御加工用メインプロセッサを用い、工具干渉のないCLデータを自動生成し、加工実験を行った。加工対象形状として、図16に示すように80×80×50 mmの立方の上面中央部に、上から見てV字型で下方に末広りの溝形状を定義した。この溝を削り出す場合、特に底面に対する加工では、干渉を回避しながら切削するための同時5軸制御が不可欠である。

溝の底面に対して自動生成したCLデータを図17に示す。使用した計算機はSun SPARCstation 10 Model 51で、図17のCLデータの算出には約40分を要した。得られたCLデータを、既存のポストプロセッサ⁵⁾を用いてNCデータに変換して加工を行った。図18にその加工状況を示す。被削材は超々ジュラルミン (A 7075) である。工具は半径5.0 mmのストレートシャンクボールエンドミルを用いた。また、5軸制御加工機は、3軸制御のマシニングセンタのテーブル上に小型NC円テーブルを付加して5軸仕様にしたものを使用した。

試行錯誤的な干渉回避手法をもとに生成された工具経路は姿勢がばらつくことが多いため、切削が不安定になることが考えられる。それに対し本実験では、干渉回避動作においても回転テーブルがふらつくことなく、切削はスムーズに行えた。

図19に加工後の形状を示す。問題とした工具干渉もなく、定義通りの溝形状を加工することができた。

6. 結 言

本研究では、5軸制御加工における工具干渉問題に対して、干渉の検出された位置において取り得るすべての工具姿勢とその姿勢に対する干渉の有無の関係を表す2次元C-Spaceを用

Fig. 18 Machining by 5-axis control

Fig. 19 Machined workpiece

いた干渉回避法を考案し、手法を多面体表現された形状に適用して以下の結論を得た。

- (1) 作成した2次元C-Spaceにおける自由領域の有無により、その位置での干渉回避の可能性の自動判定が可能となった。
- (2) 干渉回避が可能である場合、2次元C-Spaceにおける干渉領域内部の点から、C-Space上で最短距離の境界上の点でのパラメータ値をもとに新たな工具姿勢を決定することにより、確実な自動工具干渉回避処理を実現した。
- (3) 考案した干渉回避手法を組み込んだ5軸制御加工用メインプロセッサを開発し、それを用いることにより干渉のないCLデータを自動的に生成することができた。
- (4) 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、加工実験を行ったところ、工具が干渉することなく加工することができ、手法の有効性を確認した。

本研究を進めるにあたり、助力いただ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に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 竹内芳美, 清水弘之, 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.
- 2) 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.
- 3) 長谷川 勉: マニピュレータの障害物回避動作の自動計画, 日本ロボット学会誌, **5**, 6 (1987) 475.
- 4) T. Lozano-Perez: Spatial Planning: A Configuration Space Approach, IEEE Trans. Comput., **32**, 2, (1983) 108.
- 5) 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.