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*

— 工具形状を考慮した C-Space の生成と安全第一加工戦略 —

森 重 功 一** 竹 内 芳 美**

Tool Attitude Determination for Five-Axis Control Machining Based on Configuration Space
— Consideration of Tool Shape and Safety First Machining Strategy —

Koichi MORISHIGE and Yoshimi TAKEUCHI

This paper deals with the method of collision-free tool attitude determination for five-axis control machining using ball end mills. Five-axis control machining cannot only cope with the fabrication of complicated shapes, but also offers numerous advantages such as reasonable tool employment, great reduction of set-up process and so on. However, most of the present CAM systems for five-axis control machining have a lot of restrictions concerning tool collision, object shape, machining method, and so on. For that reason, if the obtained cutter location data is unsatisfactory, there is no way to modify the data, and a considerable time is consumed in order to calculate a desirable five-axis control tool path. In this paper, an effective method is proposed, which can determine a collision-free tool attitude on the basis of the original two-dimensional configuration space. Our two-dimensional configuration space shows the relationship between tool attitudes and the existence of tool collision at each cutting point. Thus, the calculation method of configuration space is at first extended, taking into the account of the tool shape data to be used such as diameters of holder and shank parts, and taper angle. Furthermore, the proposed method enables us to reflect machining strategies, that is, the user's machining intention on the basis of empirical knowledge. In this paper, the safety first machining strategy and the rapid determination of tool attitude are proposed by utilizing the Delaunay net. The method has been found effective experimentally for generating five-axis control tool paths.

Key words: five-axis control machining, CAD/CAM, collision-free cutter location data, two-dimensional configuration space, machining strategy, safety first, Delaunay net

1. 緒 言

近年、製品に対する要求が多様化し、そのライフサイクルが短くなるにつれ、より柔軟性の高い生産システムが必要となってきた。5軸制御加工機はこのような問題を解決する有力な手段の一つと考えられる。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、様々な加工を実現することができる¹⁾。

しかしながら、数多くの利点にもかかわらず、5軸制御加工の普及は十分とはいえず、導入されている場合についても十分に活用されているとはいえない。理由は様々であるが、大きな原因の一つとして、複雑な動作で加工状況を予測しにくいこと、NCのプログラミングが困難であることがあげられる。そのため、5軸制御加工の導入時には5軸制御加工用CAMの導入も不可欠であるが、現行の5軸加工用CAMは高精度な加工を汎用的に施行するには機能的に不十分なものが多く、このソフトウェアの不備の問題が5軸制御加工の普及を妨げる最大の原因であることが作業者の間から強く指摘されてきた^{2) 3)}。

より汎用的に5軸制御加工を利用するために、5軸加工用のCAMが具備すべき機能は、工作物に対するどのような位置においても、干渉の無い工具姿勢を明確に把握し、その中からただ一つの姿勢を的確に決定できることである。

我々はボールエンドミル加工を対象に、工具姿勢と干渉の有無の関係を把握する方法の一つとして、2次元のコンフィギュ

レーション空間⁴⁾ (Configuration Space, 以下 C-Space) の利用を提案してきた⁵⁾。また、干渉のない工具姿勢は無数に存在するため、姿勢の決定には作業者が意図している加工を反映させるための何らかの指針が必要である。この指針のことを、我々は加工戦略 (Machining Strategy) と呼んでいる。前報では、工具干渉を考慮するだけでなく、工具先端部での切削を回避するという戦略に基づいて工具姿勢を決定するなどの加工戦略を反映した工具経路 (Cutter Location, 以下 CL) 生成の一例を示した⁶⁾。しかしながら、求められる加工は実に多様であるため、より実用的なシステムとするためには、主要な加工戦略を整理し、それぞれの戦略に対応したCLを生成できるように手法を拡張する必要がある。

本論文では、まず、使用工具のホルダ部分やエンドミルのテーパ部分などの形状を考慮できるように2次元C-Spaceの生成方法を拡張する。次に、CL生成のための主要な加工戦略の一つとして、加工中の工具干渉に対する安全性を重視した戦略を提案し、その戦略に基づいた工具姿勢の決定法として、計算幾何学の分野で多用されているドローネ三角形分割を利用した効率的な計算方法について述べる。最後に、いくつかの事例を示しながら提案した手法の有用性について検討する。

2. 工具形状を考慮した 2 次元 C-Space

2.1 2 次元 C-Space の構成

提案した2次元C-Space f_2 の構成を図1に示す。 f_2 は、それぞれの切削点において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 と法線ベクトル周りの回転角度 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

* 原稿受付 平成11年11月22日

** 正会員 電気通信大学電気通信学部 (東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

T : Tool axis vector O : Tool center point
C : Cutting point r : Offset radius

(a) Definition of tool attitude in real space

(b) Two-dimensional configuration space

Fig. 1 Concept of two-dimensional configuration space

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の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。

提案したC-Spaceを用いて工具経路を生成するためには、どのような形状のどの位置においても、あらゆる形態の工具干渉を考慮したC-Spaceを、確実に生成できることが重要である。本研究では処理の高速化を図るため、それぞれの領域は閉じた多角形として表現されている。

2.2 工具形状を考慮した干渉領域の計算

前報までは、対象とするエンドミルの形状をストレートテーパのもののみとし、干渉を考慮する部分もエンドミルの先端からシャンク部分までに限定していた。しかし、加工中のホルダ部分の干渉は、工作物の破損だけにとどまらず工作機械自体の破損につながる恐れがあり、重大な問題である。さらに、5軸制御による複雑な部品形状の削り出し加工においては、ホルダ部分の干渉を避けるためにエンドミルの突出しが長くなる傾向にある。このような場合、剛性の低下を考慮して、シャンク部分にテーパのついたエンドミルを使用するのが一般的である。

使用工具のホルダ部分やエンドミルのテーパ部分などの形状は、それらの部分の径の大きさを干渉領域に反映することによって考慮することができる。

まず、図2に示すように干渉領域として写像する曲面を十分な数の三角形ポリゴンで分割する。次に、それぞれのポリゴン

Fig. 2 Collection of collision tool attitude points by tracing polygon

Fig. 3 Calculation of offset point taking into account of the tool radius

に対して、3つの稜線に接触している工具姿勢をいくつかサンプリングする。このときの工具姿勢を表す工具軸ベクトルTは、図3に示すように、任意のベクトルVに対して時計回りに角度 ω の回転移動を表すマトリクス $\text{Rot}^V(\omega)$ を用いて、以下の式(1)から算出される。

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

ここで、Pは工具中心点Cから稜線上の点Pを指示するベクトル、Dは稜線の向きを表すベクトルである。各ポリゴンの稜線の向きは、工具中心点から見える側を表と考へ、その法線に対して右ねじ回転の方向としている。また、回転角度 ω は工具オフセット半径rを用いて次の式(2)から求めている。

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

このときのオフセット半径rについて、ボールエンドミルをホルダに取り付けた状態を、図4に示すように先端球状部分と首下部分、シャンク部分、ホルダ部分の4つの部分に分割して考へ、稜線上の点と工具中心点の間の距離lに応じて以下の式から算出する。

$$r(l) = \begin{cases} R + \frac{l(R_S - R)}{L_N - R} & (l \leq L_N) \\ R_S & (L_N \leq l < L) \\ R_H & (l \geq L) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、Rはエンドミル刃先端球状部分の半径、 R_S はエンドミルシャンク部分の半径、 R_H はホルダ部分の半径であり、Lはホルダからのエンドミルの突出し長さ、 L_N はエンドミルの首下部分の長さである。

Fig. 4 Calculation of the angle ω based on the tool shape

Fig. 5 Example of cutter location according to the safety first strategy

以上のようにして、各三角形ポリゴンの稜線に対してサンプリングした工具姿勢に対応する点を2次元C-Space上にプロットし、それらの点を包括する領域を求めることにより、使用工具の形状を反映した干渉領域を得ることができる。すべての干渉領域を写像した最終的な2次元C-Spaceを用いることにより、ホルダ部分などの工具のどの部分にも干渉しない工具姿勢を得ることができる。

3. 安全第一戦略に基づいた工具経路の生成

3.1 安全第一加工戦略

2次元C-Spaceの生成後、指定の加工戦略に基づいて自由領域内部の点を1つ選定することにより、干渉のない工具姿勢を得ることができるが、C-Space上でそれぞれの戦略に対応する点を的確かつ効率的に求めるアルゴリズムの確立も重要である。

図5に示すように、すべての干渉面との接近度を考慮し、干渉する確率が最も低い工具姿勢を維持して加工するという戦略は、加工時の安全性を重視するという点で不可欠である。この加工戦略を「安全第一戦略 (Safety first strategy)」と呼ぶことにする。この戦略の場合、自由領域に内接する円の中で半径が最大となるものの中心点が、目的の工具姿勢に対応している。しかし、このような内接円を探索的に求めようとすると、図6に示すように局所的な解に収束してしまう恐れがあるうえに、処理が試行錯誤的なものとなるため、膨大な計算時間が必要となる。

以上の問題点をふまえ、以下ではドローネ三角形分割を利用した効率的な工具姿勢決定方法について述べる。

Fig. 6 Local convergence problem in the process for searching the maximum circle inscribing the free area

Fig. 7 Example of the Voronoi diagram and Delaunay net

3.2 ドローネ三角形分割を利用した工具姿勢の決定

平面上に n 個の点 $P_i(x_i, y_i)$ ($i = 1, \dots, n$) が与えられたとき、点 P_i の勢力圏 $V_n(P_i)$ を以下のように定義する。

$$V_n(P_i) = \bigcap_{j \neq i} \{P \mid d(P, P_i) < d(P, P_j)\} \quad (4)$$

ここで、 $d(P, P_i)$ は点 P と点 P_i のユークリッド距離である。これを点 P_i に対するボロノイ多角形という。さらに、 $V_n(P_i)$ ($i = 1, \dots, n$) による平面の分割をボロノイ図と呼ぶ。ここで、与えられた点 P_i ($i = 1, \dots, n$) を母点と呼び、ボロノイ多角形の頂点をボロノイ点、辺をボロノイ辺という。

ボロノイ図において点 P_i と点 P_j のそれぞれに対応するボロノイ多角形が共有辺をもつとき、点 P_i と点 P_j を線分で結ぶことによって、 P_i ($i = 1, \dots, n$) の凸包の三角形分割が得られる。これはボロノイ図を平面グラフと見たときの相対グラフであり、ドローネ三角形分割と呼ばれている⁷⁾。図7にボロノイ図およびドローネ三角形分割の例を示す。

ここで、計算幾何学におけるボロノイ図およびドローネ三角形分割の応用である「最大空円問題」を考える。最大空円問題は、与えられた点群の凸包の中に中心を持ち、その内部に与えられた点を1つも含まない円の中から、半径が最大のものを求める問題である。この問題は、各ドローネ三角形の外接円の中から、中心が凸包の中にあり、半径が最大のものを選ぶことによって解くことができる⁸⁾。今回、この最大空円問題の解法を、安全第一戦略のための工具姿勢点決定処理に適用した。

まず、図8に示すように、自由領域の多角形の頂点を母点としてボロノイ図を生成する。次に、得られたボロノイ図をもとにドローネ三角形分割を計算し、各ドローネ三角形について外接円を考える。これらの外接円の中から、図9のように中心が自由領域の内部に存在し、半径が最大のものを選出する。

Fig. 8 Generated Voronoi diagram based on vertices of the free area

Fig. 9 Obtained tool attitude point by using the Delaunay net

ここで得られる外接円は、本来求めるべき最大内接円とは意味的に異なるが、自由領域を構成する多角形の頂点を増加させ、候補となるドロネ三角形の数を増やすことにより、求めるものに限りなく近い円を得ることができる。また、試行錯誤的に領域を探索するという非効率的な処理を、ドロネ三角形分割の生成、有限個のドロネ三角形の外接円の計算とその並べ替えという、処理時間が一定した一連の処理に置き換えることにより、計算時間の大幅な短縮が期待できるうえに、局所収束に関する問題も解決できる。

得られた最大外接円の中心におけるパラメータ θ, ϕ の値をもとに工具姿勢を決定することにより、安全第一戦略に対応した工具姿勢を求めることができる。探索的な最大内接円の算出による工具姿勢の決定処理では、自由領域の形状にも左右され、Sun SPARCstation 5上で10～30秒の計算時間を要したが、提案した方法を用いることにより、一律1秒弱の計算時間でほぼ同等の工具姿勢を得ることが可能となった。

4. 加工実験

前章までに述べた工具形状を考慮したC-Spaceの生成と安全第一戦略の適用について、事例をもとにその有効性について検討する。加工形状として、航空機部品によく見られるノズル形状を想定し、図10に示すように上から下に曲がりながら広がるオーバハングした穴形状を定義した。この形状を加工する場合、深部の加工においてはホルダ部分と工作物が干渉する恐れがある。そのため、工具形状を考慮したC-Spaceの生成が不可欠である。また、加工中の工具姿勢が非常に厳しく制限されるため、加工戦略として前述の安全第一戦略を採用した。

今回の実験で使用した工具の仕様を表1に示す。ホルダ部と

Fig. 10 Curved hole-like shape designed for the machining experiment

Table 1 Parameter of tool shape used for machining experiment

Holder radius	R_H mm	15
Shank radius	R_S mm	8
Mill radius	R mm	6
Extrusion length	L mm	70
Under neck length	L_N mm	45

Fig. 11 Example of the tool attitude determination leaving the tool shape out of consideration

Fig. 12 Example of the tool attitude determination in consideration of tool shape

の干渉を避けるため、エンドミルの突出しはかなり長いものとなるため、テーパ付きのものを使用した。

図10の☆の位置において生成した2次元C-Spaceの様子を比較する。従来の方法では、図11(a)のように2次元C-Spaceの自由領域が分布していた。この自由領域の多角形と安全第一戦略に基づいて得られた工具姿勢を図11(b)に示す。工具のホルダ部分が工作物の曲面と干渉していることがわかる。

同じ位置において、工具形状を考慮して生成した2次元C-Spaceを図12(a)に示す。図12(a)のものと比較して、自由領域がかなり縮小していることがわかる。この自由領域の内部の点、テーパシャンク部分、ホルダ部分、いずれの部位にも干渉のない工具姿勢に対応している。安全第一戦略に基づいて得ら

Fig. 13 Machining method of the curved hole-like shape

Fig. 14 Simulation of the cutter location for the curved hole machining

れた工具姿勢を図12(b)に示す。ホルダ部分の干渉が回避されていることがわかる。

この穴形状の加工方法としては、図13(a)に示すように穴の内部の上から下に階層的な切削平面を設定し、穴を構成する4つの曲面との干渉を回避しながら下方方向に削り込んでいく。また、それぞれの平面の切削においては、最初に図13(b)に示すように境界の内側を往復経路で削り出した後、最後に13(c)のように境界を1回なぞることにより壁面の仕上げを行う。穴の中間の切削平面に対して生成した壁面仕上げ加工のCLデータの一部を図14に示す。工具干渉のない連続的で滑らかなCLデータが生成されていることがわかる。

それぞれの切削平面に対して生成したCLデータを、既存の汎用ポストプロセッサを用いて逐次NCデータに変換し、5軸制御マシニングセンタ上で加工を行った。図15に加工中の様子、図16に加工後の形状を示す。工具干渉もなく、目的通りの穴形状が加工されていることがわかる。

5. 結 言

本論文では、ボールエンドミルを用いた5軸制御加工を対象として提案してきた2次元C-Spaceを利用したCL生成方法について、まず、使用工具の形状を考慮できるように2次元C-Spaceの生成方法を拡張した。次に、主要な加工戦略の一つとして安全第一戦略を提案し、それに対応する工具姿勢の決定方法として、ドローネ三角形分割を利用した手法を示した。最後に、現存の手段では困難と思われる穴形状の加工を想定して、実際にCLの計算および加工実験を行い、以下の結論を得た。

Fig. 15 Machining with five-axis control

Fig. 16 Machined workpiece shape

- (1) ホルダ部分やシャンク部分など、使用工具の形状や大きさを考慮した2次元C-Spaceの生成が可能となった。
- (2) 安全第一加工戦略に基づいた工具姿勢を、実用的な処理時間で確実に決定できることを示した。
- (3) オーバハングした穴形状の加工に対して、提案した手法により生成したCLデータを用いて加工を行ったところ、工具干渉もなく良好な加工を行うことができた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり助力頂いた理化学研究所 研究基盤技術部の皆様、ならびに、(株)リコー ソフトウェア事業部、(株)精密形状処理研究所の関係各位に深謝する。

なお、本研究の一部は科学研究費(基盤研究B(1)11450052, 代表: 乾 正知) および(財)高度生産システム振興財団の平成9年度助成金の支援のもとに行われたことを記す。

参 考 文 献

- 1) E.E.Spro: Step up to five-axis programming?, Manuf. Eng., (1993) 55.
- 2) 小野 保: ゴム金型の同時5軸制御加工と工具干渉チェックプログラム, ツールエンジニア, **35**, 12 (1994) 74.
- 3) 藤井範之: 同時5軸制御加工によるゴム金型の製作, ツールエンジニア, **37**, 5 (1996) 86.
- 4) T.Lozano-Perez: Spatial Planning: A Configuration Space Approach, IEEE Trans. Comput., **32**, 2 (1983) 108.
- 5) 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.
- 6) 森重功一, 加瀬 究, 竹内芳美: C-Spaceを用いた5軸制御加工のための工具経路生成法, 精密工学会誌, **62**, 12 (1996) 1783.
- 7) 伊理正夫, 腰塚武志: 計算幾何学と地理情報処理, 第2版, 共立出版, (1993) 126.
- 8) F.P.Preparata and M.I.Shamos: Computational Geometry: An Introduction, Springer-Verlag, New York, (1985) 256.
- 9) 長坂 学, 竹内芳美: 形状創成関数に基づく5軸制御加工一般化ポストプロセッサの研究, 精密工学会誌, **62**, 11 (1996) 1607.