5 軸および 6 軸制御を併用した隅部加工*

井 沢 祐 弥** 森 重 功 一*** 竹 内 芳 美†

Highly Efficient Machining of Corner Parts Using Five-Axis and Six-Axis Control

Yuya IZAWA, Koichi MORISHIGE and Yoshimi TAKEUCHI

Simultaneous 6-axis control machining with a non-rotational tool, which can create sharp corner shapes, is not necessarily efficient due to the small depth of cut and the low feed speed. Though the application of simultaneous 5-axis control machining with rotational tools is advantageous in terms of the machining efficiency, the cutting remaining peculiar to the rotational tool take place near the corner part. Therefore, using two machining methods together enables the efficient machining of sharp corner shapes. In the previous paper, we showed the high efficiency of our original machining method of character line using 5-axis and 6-axis control. As the industrial products have various kinds of the corner shape pattern besides the character line, however, the proposed machining method could not cope with all corner patterns. This paper describes the classification of corner shapes at the end of the character line and the generation method of cutting point data for machining of all patterns using 5-axis and 6-axis control.

Key words : CAD/CAM, 5-axis machining, 6-axis machining, machining efficiency

1. 序 論

一般の 3 次元形状の加工には、ボールエンドミル等の回転工具が用いられるが、複数の曲面で構成される隅部形状を加工する場合、工具形状に特化した削り残しが発生する。特に、複雑な自由曲面の交線付近に生じた残留部分は、小径の回転工具を用いても完全に除去することは不可能である。

以上の問題を解決するために、5 軸制御加工に回転軸を 1 つ付加して非回転工具の向きを同時に制御する 6 軸制御加工が考案された^{1)~8)}。同時 6 軸制御加工を導入することにより、隅部形状の明瞭な加工が可能となるうえに、回転工具による荒加工と曲面の仕上げ加工から、非回転工具による隅部の除去までの一連の工程を 1 台のマシニングセンタで行うことができる。しかしながら、同時 6 軸制御加工は工具の送り速度が低速であるうえに、切込み量を微小とせざるを得ないため、加工効率が著しく低い。

以上のような理由から、本研究では図 1 に示すような、加工能率の点で有利な小径ボールエンドミルを用いた同時 5 軸制御加工を併用した隅部の除去加工を提案している⁹⁾。まず、(a) 大径ボールエンドミルにより荒加工を行う。続いて、(b) 小径のボールエンドミルを用いた同時 5 軸制御加工により残留 R を可能な限り除去する。最後に、(c) 非回転工具を用いた同時 6 軸制御加工により残留部分を完全に除去する。前報⁹⁾では、2 つの自由曲面の交差部分であるキャラクタラインのみを対象とした処理について論じ、提案した加工法が加工時間の短縮の点で有効であると同時に、十分な加工精度が得られることを確認した。しかしながら、工業製品にはキャラクタライン形状の他に、3 つの曲面から構成された角隅形状など、様々な種類の隅部形状が存在している。提案した加工法を実用化するためには、複数のパターンの隅部形状を含んだ複雑な形状に対応できるように手法を拡張する必要がある。

本報では、大径ボールエンドミルによる荒加工後の隅部にお

ける残留 R 部分を除去することを目的とし、隅部稜線の端点における形状をパターン化して判別し、5 軸制御中仕上げ加工と 6 軸制御仕上げ加工のための工具経路データを生成する手法を開発したので報告する。

2. 工具経路データの計算

本研究における 5 軸および 6 軸制御加工のための工具経路 (Cutter Location, 以下 CL) は、図 2 に示すように切削点 P、P における加工面の法線ベクトル $\mathbf{N}$ 、工具送り方向ベクトル $\mathbf{F}$ の 3 つの情報にもとづいて計算される。以下、この切削点情報を PNF データと呼ぶ。

それぞれの加工のための CL データの構成を図 3 に示す。回転工具を用いる 5 軸制御加工の CL は、図 3(a) に示すように、P から $\mathbf{N}$ 方向に工具半径分オフセットした工具中心点 O と、 $\mathbf{N}$ からの傾斜角 θ と $\mathbf{N}$ を軸とした回転角 ϕ から求められる工具軸ベクトル $\mathbf{T}$ によって決定される。本研究では、これまでに提案してきた 2 次元コンフィギュレーション空間 (Configuration Space, 以下 C-Space) に基づいた工具姿勢決定法を適用して、適切な θ 、 ϕ を計算している^{10)~13)}。

非回転工具を用いる 6 軸制御加工の CL は、図 3(b) に示すように、切削点 P、工具軸ベクトル $\mathbf{T}$ 、 $\mathbf{N}$ と $\mathbf{F}$ の外積ベクトル $\mathbf{X}$ と $\mathbf{T}$ を軸に角度 ω 回転して得られる工具方向ベクトル $\mathbf{D}$ の 3 つから構成される¹⁴⁾。工具と工作物が干渉する可能性がある場合は、非回転工具の 3 次元ワイヤフレームモデルを使用して干渉チェックと回避を行う。

Fig.1 Proposed machining method

* 原稿受付 平成 16 年 1 月 29 日

** 学生会員 電気通信大学大学院 (調布市調布ヶ丘 1-5-1)

*** 正 会 員 電気通信大学

† 正 会 員 大阪大学大学院 (吹田市山田丘 2-1)

Fig.2 Composition of PNF data

Fig.3 Composition of CL data

3. 隅部形状パターンの分類

本研究では図4に示すように、隅部の稜線上の任意の点における左曲面 S_L と右曲面 S_R の法線ベクトルのはさみ角 θ_c が $0 < \theta_c < 180^\circ$ となる場合を加工対象とする。まず、加工開始点 P_{s0} と稜線 E_0 を選定する。次に、 P_{s0} において、左右の曲面の法線ベクトル N_L, N_R の外積ベクトル U を計算する。続いて、 P_{s0} における稜線 E_0 の接線ベクトル W を求め、 U と W との内積 I を計算する。 $I < 0$ の場合は、 $0 < \theta_c < 180^\circ$ となるので加工対象とされる(図5(a))。一方、 $I > 0$ の場合は、 $180 < \theta_c < 360^\circ$ となるので、加工対象から除外される(図5(b))。

加工対象の稜線 E_0 の終点 P_{E0} は、図6に示すように、稜線 E_0 以外に2つの稜線 E_1 と E_2 に共有されている。稜線 E_1 と E_2 の始点 P_{S1} と P_{S2} が終点 P_{E0} と一致するように稜線の向きを補正し、 E_1 と E_2 についても E_0 と同様の手法を用いて、それぞれの稜線が加工対象となるかどうかを判別する。稜線が加工対象となる場合は、さらに、その稜線の終点を共有する2つの稜線に対して同様に判別を行う。この動作を繰り返すことにより、選定した加工開始稜線 E_0 から連続する全ての加工対象稜線を抽出することができる。

本研究では、隅部の稜線の端点 V における形状を3つのパターンに分類し、それらを自動判別して各形状に応じたPNFデータを生成する。ここで、加工対象となる稜線を E_c とし、頂点 V を共有する稜線で E_c の左側の稜線を E_L 、右側の稜線を E_R とする。また、 E_c 、 E_L 、 E_R に対応する左右の曲面の開き角をそれぞれ θ_c 、 θ_L 、 θ_R とする。頂点 V における3種類の形状のパターンを図7に示す。形状は θ_c 、 θ_L 、 θ_R の大きさに基づいて判定される。 $0 < \theta_c < 180^\circ$ かつ $180 < (\theta_L, \theta_R) < 360^\circ$ となる場合をパターン1(図7(a))とする。 $0 < (\theta_c, \theta_L) < 180^\circ$ かつ $180 < \theta_R < 360^\circ$ となる場合、または $0 < (\theta_c, \theta_R) < 180^\circ$ かつ $180 < \theta_L < 360^\circ$ となる場合をパターン2(図7(b))とする。 $0 < (\theta_c, \theta_L, \theta_R) < 180^\circ$ となる場合をパターン3(図7(c))とする。

4. PNFデータの生成

ここでは、稜線 E_c を加工するためのPNFデータを計算する方法について説明する。まず、図8に示すように、加工対象の稜線 E_c を分割する点を生成する。このとき、分割数は点列を結んだ直線列と稜線 E_c との最大偏差が所定の値以下となるように決定される。PNFデータは、加工面 S_L 、 S_R と、各分割点における E_c の接線と垂直な平面との干渉線上の幾何情報をも

Fig.4 Definition of target edge

Fig.5 Judgment of edge

Fig.6 Selection of target edges

Fig.7 Definition of corner shape patterns

Fig.8 Obtained intersection curves

Fig.9 Arrangement of cutting points

とに生成される。配列された5軸および6軸制御加工用の切削点の例を図9(a), (b)にそれぞれ示す。 E_c の端点においては、パターン1, 2, 3のそれぞれの形状に応じた処理を行う。パターン1形状については前報⁹⁾で報告したので、ここではパターン2, 3の形状に対するPNFデータの生成法について説明する。

4.1 パターン2形状におけるPNFデータ

パターン2の場合は、5軸制御加工と6軸制御加工でPNFデータの生成法が異なる。回転工具を用いる5軸制御加工では、隣接する稜線に対応する経路が連続的になるようにPNFデータを生成することが望ましい。一方、非回転工具を用いる

Fig.10 Cutting points along target edge

Fig.11 Treatment of intersection curves of the end of edge

6軸制御加工は、工具の向きを急激に変えることは好ましくないため、隣接する稜線を連続的に加工することはできない。そのため、6軸制御加工の場合は、工具方向の変化ができるだけ少なくなるようにPNFデータを生成する。

4.1.1 5軸制御加工用PNFデータの生成

図10に示すように、稜線 E_C 部分に対して、各分割点における E_C の接線と垂直な平面を生成し、平面と曲面 S_L , S_R との干渉線から切削点を計算する。このとき、稜線 E_C の端点付近で十分な長さの干渉線が取得できない場合や、干渉線そのものが得られない場合は、前報⁹⁾で説明したパターン1と同様の手法を用いる。まず、図11(a)に示すように、干渉線の端点における接線方向に直線を結合する形で延長し、稜線 E_C の端点の直前の分割点における干渉線をコピーする。コピーされた干渉線は、図11(b)に示すように、稜線 E_C の端点における接線と直交する平面に射影され、目的の干渉線として定義される。また、干渉線が足りない場合は、図11(c)に示すように、稜線 E_C を端点から十分な長さの直線を足して延長した後に、その延長部分を等分割し、分割点に稜線 E_C の端点において生成した干渉線をコピーする。

次に、図12(a)に示すように、頂点 V における稜線 E_C に垂直な平面 S_{PC} と、頂点に属する E_C 以外の隅部形状となる稜線 E_L もしくは E_R に垂直な平面 S_{PL} もしくは S_{PR} を生成し、稜線が共有する頂点 V における法線ベクトルを軸にして、2平面の間に等角度間隔となるように平面を回転コピーする。続いて、生成した各平面に対して、図12(b)に示すように、選ばれた2つの稜線が共有する曲面 S_L もしくは S_R との干渉線を求める。また、反対側の曲面 S_R もしくは S_L に対しては、図12(c)に示すように、隅部ではない稜線 E_R もしくは E_L を各平面に射影し、これを干渉線とする。続いて、図9(a)に示すように、それぞれの干渉線に対して工具が接している状態を想定し、曲面 S_L もしくは S_R に対して、図12(d)に示すように、2つの接点間を等分割するように切削点を配置する。パターン2の形状に生成された5軸制御加工用のPNFデータの例を図13に示す。

(a) Definition of intersection planes

(b) Generation of intersection curve

(c) Projection of curve

(d) Generation of cutting points

Fig.12 Generation of cutting points for 5-axis machining of pattern 2

Fig.13 PNF data for 5-axis machining of pattern 2

4.1.2 6軸制御加工用PNFデータの生成

6軸制御加工の場合は、図11で示した稜線 E_C の端点における処理法を用いて、図14(a)に示すように E_C を十分な長さの直線で延長した後、稜線 E_C と垂直な平面と左右の曲面 S_L , S_R の干渉線を求め、切削点を配置する。続いて、図14(b)に示すように、隅部形状となる2つの稜線 E_C と E_L もしくは E_R が共有する曲面 S_L もしくは S_R 上の切削点を曲線補間して曲線経路 C_P を生成する。次に、5軸制御加工用のPNFデータの生成の場合と同様に、頂点 V における2つの稜線 E_C と E_L もしくは E_R が共有する法線ベクトルを軸とした等角度間隔の平面を生成し、選ばれた2つの稜線が共有する曲面 S_L もしくは S_R との干渉線を生成する。求めた各干渉線に対して、図14(c)に示すように、小径ボールエンドミルとの接点を求め、接点を曲線補間して曲線 C_V を生成する。最後に、図14(d)に示すように、この曲線 C_V と曲線経路 C_P との交点を計算し、工具パスの端点としたあとで、不要な切削点を削除する。パターン2の形状に生成された6軸制御加工用のPNFデータの例を図15に示す。

4.2 パターン3形状におけるPNFデータ

パターン3の場合は、3つの曲面に対して、大径ボールエンドミルと小径ボールエンドミルが接している状態を想定する。

5軸制御加工の場合は、図16(a)に示すように、加工対象の稜線 E_C の左右の曲面 S_L , S_R と大径ボールエンドミルとの接点

(a) Arrangement of cutting points

(b) Generation of tool paths

(c) Generated curve along remaining

(d) Calculation of end points

Fig.14 Generation of cutting points for 6-axis machining of pattern 2

Fig.15 Generated PNF data for 6-axis machining of pattern 2

(a) Generation of intersection curve

(b) Arrangement of cutting end points

(c) Generation of cutting points

Fig.16 Generation of cutting point data for pattern 3

P_L , 小径ボールエンドミルとの接点 P_S , 大径ボールエンドミルの中心点 O_L の3つの点を通る平面を生成する。6軸制御加工の場合は, 小径ボールエンドミルとの接点 P_S , 頂点 V , 小径ボールエンドミルの中心点 O_S を通る平面を生成する。

続いて, 生成した平面と曲面との干渉線を生成し, 5軸制御加工の場合は2つの接点 P_L と P_S の間を, 6軸制御加工の場合は小径ボールエンドミルとの接点 P_S と頂点 V の間を等分割して干渉線上に切削点を配置する(図16(b))。稜線部分に対しては, 図16(c)に示すように, 各分割点において稜線 E_C の接線と垂直な平面を生成し, 平面と各曲面との干渉線から切削点を計算する。パターン3の形状に対して生成された5軸および6軸制御加工用のPNFデータを, 図17(a), (b)にそれぞれ示す。

4.3 パスの結合

図18に示すように, それぞれの稜線に対して生成したPNF

(a) For 5-axis machining

(b) For 6-axis machining

Fig.17 Generated PNF data for pattern 3

Fig.18 Initial state of 5-axis paths

(a) Connection in same direction

(b) Connection in opposite direction

Fig.19 Connection of tool paths

(a) For Pattern 2

(b) For Pattern 3

Fig.20 Connected PNF data for 5-axis machining

データは, 隣接する稜線に対するPNFデータと連続している場合がある。5軸制御加工の場合は, このような連続的なPNFデータを結合して可能な限り工具の離脱を少なくし, 加工時間を削減することが望ましい。

そこで, 隣接している稜線に対するPNFデータが同一の曲面を共有し, かつ, 送り方向が一致する場合は, 図19(a)に示すように, これらを結合する。また, 送り方向が異なる場合は, 図19(b)に示すように, 送り方向を統一してこれらを結合する。連続的に結合されたパターン2, 3の5軸制御加工用のPNFデータを, 図20(a), (b)にそれぞれ示す。

5. 加工実験

開発した手法の妥当性を検証するために, 3次元CADデータをもとにPNFデータおよびCLを算出するCAMソフトウェアを自作して加工実験を行った。形状の定義と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を利用した¹⁵⁾。

実験では, 図21に示すような, パターン1, 2, 3の全ての形状を有する形状を加工対象とした。加工条件を表1に, 加

Fig.21 CAD model defined for machining experiment

(a) R5 ball end mill for rough cutting (b) R1.5 ball end mill for 5-axis machining (c) Bore byte for 6-axis machining

Fig.22 Tools used for machining experiment

Table 1 Machining condition

Machining	5-axis	Machining	6-axis
Tool radius [mm]	1.5	Frequency [kHz]	19
Spindle speed [min^{-1}]	5000	Amplitude [μm]	30
Feed rate [mm/min]	600	Feed rate [mm/min]	200
Target cusp height [mm]	0.01	Pick feed [mm]	0.1
Depth of cut [mm]	0.2	Depth of cut [mm]	0.1

工に使用した工具を図22に示す。はじめに、R5ボールエンドミルを用いて、荒加工とそれぞれの曲面の仕上げ加工を行った(図22(a))。次に、R1.5ボールエンドミルを用いた同時5軸制御加工により、隅部の削り残しを集中的に除去した(図22(b))。最後にボーリングバイトを用いた同時6軸制御加工により、隅部の仕上げ加工を行った(図22(c))。加工中は、5軸制御加工では、隣接する稜線をできるだけ連続的に加工することにより、離脱回数を最小限に抑えることができた。また、6軸制御加工も、それぞれのパターンの形状に対して良好に行うことができ、図23に示すように、明瞭な隅部形状を得ることができた。

加工時間を比較したものを表2、3に示す。6軸制御加工のみで荒加工後の残留Rを除去した場合では14423(sec)の時間を要するが、5軸および6軸制御を併用した加工法を導入することにより、4559(sec)で加工することが可能となった。本研究で提案した加工法は、3つの曲面で構成される隅部を含んだ複雑な形状の加工においても効率的であることがわかる。

6. 結 論

本論文では、前報で提案した5軸および6軸制御を併用したキャラクターライン加工を、3つの曲面で構成される隅部形状を含んだ複雑な形状に対しても適用できるように手法を拡張した。加工対象となる稜線を自動選定し、稜線の端点における形状を3つのパターンに分類した後、それぞれの形状に応じた工具経路を自動生成する手法について述べた。最後に、CLを出力するCAMを自作し、それを利用して算出したCLデータをNCデータに変換して加工実験を行ったところ、3つのパターンの形状における隅部の稜線を明瞭に加工することができた。同時に、提案した加工方法は3つ曲面から構成される隅部形状を含んだ複雑な形状においても、加工時間の短縮の点で有効であることを確認した。

Fig.23 Obtained character lines and corner shapes

Table 2 Machining time of 6-axis machining

Machining	6-axis
Number of path	574
Machining time [sec]	14423

Table 3 Machining time of 5-axis and 6-axis machining

Machining	5-axis	6-axis
Number of path	215	99
Machining time [sec]	2352	2207
Total number of path	314	
Total machining time [sec]	4559	

謝 辞

本研究を進めるにあたり助力頂いた(株)リコーおよび多賀電気(株)の関係者の皆様に感謝の意を表す。また、本研究は科学研究費補助金(若手研究(B)14750084、代表:森重功一)の助成のもとに行われたことを記す。

参 考 文 献

- 1) 竹内芳美, 横山信人, 久木達也, 鈴木 裕, 佐藤 真: 6軸制御による自由曲面平滑加工, 精密工学会誌, **60**, 12 (1994) 1786.
- 2) 竹内芳美, 横山信人, 久木達也: 6軸制御による自由曲面上への異形断面溝加工, 精密工学会誌, **61**, 1 (1995) 132.
- 3) 久木達也, 竹内芳美: キャラクタラインの6軸制御加工, 精密工学会誌, **62**, 2 (1996) 230.
- 4) 葉 閣斉, 竹内芳美: 6軸制御による角隅加工の研究, 精密工学会誌, **63**, 11 (1997) 1569.
- 5) 石 敏 学, 竹内芳美: シャープなエッジをもつポケット形状の6軸制御加工, 精密工学会誌, **64**, 8 (1998) 1206.
- 6) E. Shamoto, T. Moriwaki: Study on Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, **43**/1 (1994) 35.
- 7) T. Moriwaki, E. Shamoto: Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, **44**/1 (1995) 31.
- 8) 宮内 馨, 森重功一, 竹内芳美: 振動切削を用いた6軸制御加工, 精密工学会誌, **65**, 11 (1999) 1623.
- 9) 森重功一, 井沢祐弥, 竹内芳美: 5軸および6軸制御を併用したキャラクターライン加工, 精密工学会誌, **69**, 9 (2003) 1317.
- 10) 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.
- 11) K. Morishige, K. Kase and Y. Takeuchi: Collision-free Tool Path Generation Using 2-Dimensional C-Space for 5-Axis Control Machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **13**, 6 (1997) 80.
- 12) K. Morishige, K. Kase and Y. Takeuchi: Tool Path Generation Using C-Space for 5-Axis Control Machining, Transactions of The ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, **121**, 1 (1999) 144.
- 13) 森重功一, 竹内芳美: 2次元C-Spaceに基づいた5軸制御加工における工具姿勢決定法—工具形状を考慮したC-Spaceの生成と安全第一加工戦略—, 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1140.
- 14) K. Morishige and Y. Takeuchi: Six-Axis Control Character Line Finishing Using Ultrasonic Vibrational Cutting Tool, Initiative of Precision Engineering at The Beginning of a Millennium, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, (2001) 249.
- 15) H. Toriya and H. Chiyokura: 3D CAD-Principle and Applications, Computer Science Workbench, Springer-Verlag, Tokyo, (1993).