5 軸および 6 軸制御を併用したキャラクタライン加工*

森 重 功 一** 井 沢 祐 弥*** 竹 内 芳 美†

Highly Efficient Machining of Character Line Using Five-Axis and Six-Axis Control

Koichi MORISHIGE, Yuya IZAWA and Yoshimi TAKEUCHI

5-axis control machining can create workpieces with complicated shape difficult to machine by 3-axis control. Moreover, 6-axis control machining can cope with workpieces impossible to machine by rotational tools since it can control the direction of non-rotational tool. Though 5-axis control machining which uses rotational tools is advantageous in terms of the machining efficiency, the cutting remainings peculiar to the rotational tool take place at the corner part of workpiece shape. On the other hand, 6-axis control machining can machine the corner part, which cannot be removed with the rotational tool, though it has the low machining efficiency. The use of two machining methods together seems to be very effective to improve the machining efficiency. This research investigates the highly efficient and accurate machining method using 6-axis control machining together with 5-axis control one. The algorithm to generate the cutter location data is developed in consideration of the use of 5-axis and 6-axis control machining, and it is implemented to the integrated CAM software for 5-axis and 6-axis control machining. As a result, it is experimentally found that the system enables the effective and accurate machining.

Key Words : five-axis machining, six-axis machining, CAD/CAM, vibration cutting, machining efficiency

1. 緒 言

近年、工業製品の形状に対する要求が複雑・多様化する傾向が顕著である。その反面、企業は製品の設計・生産におけるコストの削減を常に求められている。そのため、従来の方法では加工が不可能であった形状に対応できる、より効率的な加工方法の確立が強く求められている。

図1に示すような複数の曲面の交線や角隅部分は、回転工具では加工することはできない。このような部分は、従来、放電加工により除去されてきたが、この場合、マシニングセンタから放電加工機への段取り替えが必要となり、作業時間の増加、取付誤差の発生などの問題が考えられる。また、専用の電極を製作しなければならないという点も、コストの点で不利である。ここで、回転工具による切削加工の制約を解決してその適用範囲を拡大することにより、放電加工を切削加工に置き換えることが可能となれば、リードタイムの短縮という製造業における共通の命題の解決に、大きく寄与することができる。

Fig.1 Character line and corner part

以上のような背景をもとに、非回転工具を同時 6 軸制御して加工を行う 6 軸制御加工が提案され、その実用化に向けて継続的に研究がなされてきた¹⁻⁵⁾。同時 6 軸制御加工は、工具の送り速度、すなわち切削速度が低速に制限されてしまうため、加工精度や加工面性状が悪化するという問題があったが、この低切削速度の問題は振動切削^{6,7)}を適用することにより解決されつつある⁸⁾。しかしながら、振動切削を適用した場合でも工具に過大な負荷をかけることはできないため、1 回あたりの切込み量を大きくすることはできない。また、6 軸制御加工の送り速度は、依然、十分なものではないため、単位時間あたりの除去量は微小である。加工効率の点では、回転工具による加工の方が有利である。

本研究では、大径のボールエンドミルによる加工後のキャラクタライン付近の削り残し部分を、回転工具による 5 軸制御加工と 6 軸制御振動切削を併用することにより効率的に除去し、明瞭なキャラクタラインを得るための加工方法を確立することを目的としている。ここでは、加工対象形状の 3 次元 CAD データを利用した工具経路の生成方法について説明した後、提案した手法を組み込んだ独自の CAM ソフトウェアにより生成したデータを利用した加工実験の結果について述べる。

2. 5 軸および 6 軸制御を用いたキャラクタライン加工

2.1 提案する加工方法

本研究で提案するキャラクタライン加工の手順を図2に示す。まず、図2(a)に示すように、適当な径のボールエンドミルで仕上加工まで行う。ここから 6 軸制御で加工することもできるが、膨大な時間がかかり効率が悪いので、小径のボールエンドミルで可能な限り除去することが望ましい。しかしながら、通常の小径工具は突き出し長さを短くしなければならないためホルダ部分などが工作物と干渉しやすく、加工できる部分が制限されることが多い。このような場合は図2(b)に示すように、同時 5 軸制御を利用した傾斜加工が有効である。最後に、図2(c)に示すように、残留 R 部分を同時 6 軸制御を用いた振動切削により除去する。

* 原稿受付 平成 14 年 12 月 27 日

** 正 会 員 電気通信大学 (調布市調布ヶ丘 1-5-1)

*** 学生会員 電気通信大学大学院

† 正 会 員 大阪大学大学院 (吹田市山田丘 2-1)

Fig.2 Machining method proposed in this research

Fig.3 Composition of PNF data

この加工方法を実現するためには、それぞれの加工に最適な工具経路（Cutter Location, 以下 CL）を、効率よく生成できることが重要である。

2.2 切削点情報の形式

本研究における5軸および6軸制御加工のためのCLデータは、いずれも同じ形式の切削点データに基づいて計算される。切削点データの構成を図3に示す。1切削点のデータは、工具が工作物と接する切削点の座標値P, 切削点における加工面の法線ベクトルN, 工具の送り方向を指示する工具送り方向ベクトルFの3つの要素と、次の点まで切削送りと早送りのどちらのモードで移動するかを示すフラグで構成されている。以下、この切削点データをPNFデータと呼ぶ。

2.3 切削点の生成

ここでは、目的のキャラクタライン加工のための切削点情報の計算方法について説明する。まず、図4(a)に示すように、加工対象の稜線を分割する点を生成する。次に、それぞれの分割点において稜線の接線ベクトルに直交する平面を考え、それぞれの平面と稜線を構成する2つの曲面との干涉線を求める。ここで、図4(b)に示すように干涉線が短い場合には、干涉線の端点における接線方向に直線を結合する形で延長する。また、稜線の端点で干涉線が得られない場合が考えられるが、このときは図5(a)のように直前の分割点における干涉線をコピーし、図5(b)に示すようにキャラクタラインの端点における接線と直交する平面に投影して得られた曲線を目的の干涉線とする。また、干涉線が足りない場合は、図5(c)に示すようにキャラクタラインの端点から任意の長さの直線を足して延長した後に、その延長部分を等分制し、図5(d)に示すように干涉線を延長したキャラクタラインの分割点にコピーする。

PNFデータの切削点Pは目的の加工を考慮して、それぞれの干涉線上に生成される。このとき、コピーした曲線から求めたP点は厳密には加工面上にはないため、加工において削り過ぎや削り残しが生じる恐れがある。そのため、図6に示すように

Fig.4 Generation of intersection curves

Fig.5 Treatment of intersection curves at the end of target edge

Fig.6 Correction of cutting points

各P点を曲面に投影することにより修正している。修正後のP点においては、法線ベクトルNを再計算する。各P点における工具送り方向ベクトルFは、対応する分割点における接線ベクトルを、Nと直交するように修正したものである。

3. 5軸制御加工用データの生成

3.1 PNFデータの生成

まず図7に示すように、それぞれの分割点における2つの干涉線に対して、荒加工用の大径ボールエンドミルおよび小径ボールエンドミルとの接点を求め、得られた2つの接点の間に切削点Pを等間隔に配置する。このときのP点の数は、カスプが所定の高さ以下になるように自動的に決定される。続いて、それぞれのP点における法線ベクトルなどのPNF情報を計算する。ここで、工具送り方向Fに対して左側の加工面に対するPNFデータをL-PNF、右側の加工面に対するPNFデータをR-PNFと呼ぶことにする。

Fig.7 Arrangement of cutting points

Fig.8 Generation of PNF data for 5-axis machining

さらに、曲面を切削する際の負荷を軽減するために、加工前の残留R部と目標残留R部の間にPNFデータを追加する。まず、図8(a)に示すように、最大切込み量が所定の値以下となるように干渉線と接する円弧を生成する。続いて、図8(b)に示すように、所定のピックフィード量を考慮して円弧状に切削点Pを配置する。以後、円弧状に生成されたこのPNFデータをC-PNFと呼ぶ。

3.2 CLデータの生成

5軸制御加工のCLデータは、図9に示すように切削点PをN方向に工具半径オフセットした工具中心点Oと、工具軸ベクトルTによって決定される。ここでは、工作物との干渉がないTをどのように決定するかが重要となる。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CLデータを生成している⁹⁻¹²⁾。図10にC-Spaceを利用した工具姿勢決定処理の一例を示す。工具送り方向に対して左側の曲面と右側の曲面が、それぞれ干渉領域としてC-Space上に写像されている。干渉のない工具姿勢に対応する自由領域から図中に示すように工具姿勢点を選定され、その点におけるパラメータをもとに干渉のない工具姿勢が決定される。

4. 6軸制御振動切削用データの生成

4.1 PNFデータの生成

図11(a)に示すように、それぞれの分割点における干渉線に対して小径ボールエンドミルとの接点を求め、PNFデータを等間隔に配置する。ここでも、工具への負荷を軽減させるために残留Rと目的形状の間にC-PNFデータを生成する。まず、図11(b)に示すように、残留Rの円弧を所定の切込み量ずつ大きくした円弧を生成し、円弧と干渉線との交点を求める。続いて図11(c)に示すように、2つの交点の間に所定のピックフィード量を考慮した円弧状のC-PNFを配置する。

4.2 CLデータの生成

4.2.1 振動方向を考慮した工具姿勢の決定

本研究では、振動切削ユニットとして多賀電気製SB-150を

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

(a) Definition of tool attitude in real space

(b) 2-dimensional configuration space

Fig.9 Concept of 2-dimensional configuration space

Fig.10 Determination of tool attitude using 2-dimensional configuration space

用いている。加工で使用する工具を図12に示す。この工具はチップの刃先に適切な振動が発生するように設計されたホルダを介し、超音波振動子に取り付けられている。工具の刃先は、切削方向に対して一定の角度をもって振動している。適切な振動切削を行うためには、振動方向と切削方向を一致させることが重要である。

図13に示すように、各切削点における6軸制御加工のCLは、切削点Pと工具軸ベクトルT、工具方向ベクトルDによって決定される¹³⁾。今回の加工においては、TとNは一致しており、TとFの外積ベクトルD₀をTのまわりに10°回転させたものがDとなる。

Fig.11 Generation of PNF data for 6-axis machining

Fig.12 Non-rotational cutting tool used for 6-axis vibration cutting

Fig.13 Composition of cutter location for 6-axis machining

4.2.2 干渉のチェックと回避

工具干渉チェックのため、図 14(a)に示すように非回転工具の外形を 3 次元ワイヤフレームモデルで表現した。干渉チェックは、工具形状を表現する線分と干渉対象面の交差判定によって行う。各切削点において、工具の線分と面が交差しなければ干渉はないものとみなす。交差のある場合でも、工具端点がある場合は加工のための接触とみなす。

干渉が検出された場合には干渉回避処理を行う。前述のように振動方向と切削方向は常に一致させる必要があるため、回避運動は図 14(b)に示すように、切削点 P を始点とした工具送り方向ベクトル F まわりの回転によるもののみとなる。干渉した線分要素が工具形状情報の右側成分と左側成分のどちらのものであるか判定し、右側成分の場合には工具送り軸ベクトル F に対し反時計回り、左側成分の場合には時計まわりが回転方向となる。決定された回転方向にベクトル T、D を回転させることにより、工具姿勢を変化させる。1 回の回避における回転角度 θ は任意に設定できる。回避後の工具姿勢に対して再度干渉チェックを行い、再び干渉が検出された場合には、さらに θ 回転させた工具姿勢を求める。以上のような干渉チェックおよび干渉回避処理を干渉が検出されなくなるまで繰り返すことにより、最終的なベクトル T、D を得る。

Fig.14 Interference check and avoidance of non-rotational tool using wire-frame model

Fig.15 CAD model defined for machining experiment

Table 1 Machining condition of 5-axis machining

Tool radius [mm]	1.5
Spindle speed [min^{-1}]	5000
Feed rate [mm/min]	800
Target cusp height [mm]	0.01
Depth of cut [mm]	0.2

Table 2 Machining condition of 6-axis machining

Frequency [kHz]	19
Amplitude [μm]	36
Feed rate [mm/min]	400
Pick feed [mm]	0.1
Depth of cut [mm]	0.1

5. 加工実験

考案した加工方法の妥当性を検証するために、加工対象形状の 3 次元 CAD データを基に CL を出力する 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¹⁴⁾。

図 15 に示すように、2 つの曲面が交差してできるキャラクタラインを加工対象とした。それぞれの加工の条件を表 1, 2 に示す。非回転工具の向きを決定する Cs 軸の最大回転速度の限界値が低いため、6 軸制御加工の送り速度は 5 軸制御加工の半分となっている。

はじめに、おおまかに荒加工をした後、R5 ボールエンドミルを用いて 2 つ曲面の仕上げ加工を行った。続いて、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、キャラクタラ

Fig.16 Actual 5-axis control machining

Fig.17 Actual 6-axis control machining

イン周辺の削り残しを集中的に除去した。5軸制御加工の様子を図16に示す。最後に、同時6軸制御振動切削加工により、キャラクタラインの仕上げを行った。6軸制御加工の様子を図17に示す。5軸、6軸制御とも加工中の状態は良好であり、明瞭なキャラクタラインを得ることができた。図18にそれぞれの加工後のキャラクタラインの断面を示す。各加工によって、所定の領域が確実に除去されていることが確認できる。

表3, 4は加工効率について検討したものである。図18(a)の状態から6軸制御加工のみを用いて図18(c)の最終形状まで加工した場合、3886(sec)の時間を要すると想定される。それに対して5軸制御加工を併用した今回の加工の場合、5軸加工と6軸加工にそれぞれ914(sec)、635(sec)、合計で1549(sec)で最終形状まで加工することができた。提案した加工方法の方がはるかに効率的であることがわかる。

6. 結 言

本論文では、明瞭なキャラクタラインを効率よく加工することを目的とし、5軸および6軸制御加工を併用した加工方法を提案した。また、目的の加工に適切なCLを、3次元CADの幾何情報を基に生成する方法について述べた。それぞれのCLは、同じ形式の切削点データを利用して生成される。5軸制御加工用のCLの工具軸ベクトルは、2次元C-Spaceを用いた工具姿勢決定の適用により、工具干渉のないものを自動的に決定することができる。6軸制御加工用のCLは、振動切削工具の特性を考慮して決定され、簡便な手法により工具干渉を回避したものを得ることができる。最後に、それぞれのCLを出力するCAMソフトウェアを自作し、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、2つの加工方法の併用によって加工時間を大幅に短縮できることを確認した。また、加工によって得られたキャラクタラインも明瞭であり、提案した加工方法が精度の点でも十分に使用に耐えるものであることを確認した。

(a) After rough cutting with R5 ball end mill (b) After 5-axis cutting with R1.5 ball end mill (c) After 6-axis cutting with non-rotational tool

Fig.18 Machined result after each process

Table 3 Machining time of 6-axis machining

Machining	6-axis
Number of path	153
Average time for one path [sec]	25.4
Machining time [sec]	3886

Table 4 Machining time of 5-axis and 6-axis machining

Machining	5-axis	6-axis
Number of path	62	25
Average time for one path [sec]	14.7	25.4
Machining time [sec]	914	635
Total machining time [sec]	1549	

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)の関係者の皆様と、プログラムの作成に努力いただいた大学院生の安田修吾氏に感謝の意を表す。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) 葉閣齊, 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) 石畝学, 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軸制御溝加工, 精密工学会誌, **65**, 11 (1999) 1623.
- 9) 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.
- 10) 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) 393.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) H. Toriya and H. Chiyokura: 3D CAD -Principle and Applications, Computer Science Workbench, Springer-Verlag, Tokyo, (1993).