5軸NC工作機械による主軸傾斜曲面加工法に関する研究 (第2報)*

—複数回の傾きを必要とする形状に対する割り出し角列決定方法—

山田 誠** 田中文基*** 近藤 司** 岸浪建史*** 香村章夫†

Sculpture Surface Machining by Automatically Indexing Tilted Tool Axis on 5-axis Machine Tools (2nd report)
— Determination Method of Sequence of Indexing Angles for Complex Machining Shape —

Makoto YAMADA, Fumiki TANAKA, Tsukasa KONDO, Takeshi KISHINAMI and Akio KOHMURA

Nowadays most of die and mold makers use High Speed Cutting or Machining in cavity and core manufacturing. However, finishing processes for injection molding molds and die casting dies are done by EDM because these applications have many thin and deep cavities to be machined. Otherwise, the long solid carbide milling cutters are necessary for machining these molds and dies. To save set-up time and avoid using the long solid carbide milling cutters, we have proposed 3+2-axis high speed machining on a 5-axis machining center. The 3+2-axis machining is the sequence of machining by indexing tilted tool axis on 5-axis machining center. In the 3+2-axis machining process, the sequence of indexing angles must be determined automatically, because the shape of the die and mold is very complex to determine the indexing angles by an operator. Therefore, the main objective of this research is to propose an automatic determination method of the sequence of indexing angles for machining the die and mold. We have proposed, in the first report, the calculation method of optimum indexing angle candidates for given required machining surfaces using normal vectors of the surface and effective cutting edge shape, and the machinable area derivation method of calculated indexing angle based on inverse offset method with state flag. In this report, we extend the proposed calculation method to determine the sequence of indexing angles for a complex machining shape. Firstly, in order to represent machinable information of facet, a new facet data structure is proposed. Secondary, the precise representation of machinable area on the offset surface is proposed. Finally we illustrate an example to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: 5-axis machine tools, mold and die machining, high speed cutting, inverse offset method, sculpture surface machining, indexing tilted tool axis, sequence of indexing angles.

1. 結 言

今日のフライス系工作機械による金型加工の多くは、ボールエンドミルを用いた3軸制御加工により行われている。この加工方法に対するCAMシステムとして、経験による加工ノウハウを活かしたソフトウェアが数多く存在する。しかしながら、金型加工における3軸制御加工では、工具ホルダの干渉を回避するために長い工具突き出し長を必要とする問題¹⁾や、工具の弾性変形が大きくなる側刃部での加工や表面粗さが悪い工具の回転中心付近での加工を避けることができない問題²⁾が存在する。特に長い工具突き出し長により工具剛性が低下するため、高速送り加工ができなくなる。

これらを解決するためには、加工物に対する工具姿勢の自由度が必要であり、その機能を有する5軸工作機械を用いた加工が有効である。これまで同時5軸制御に関する種々の研究がなされてきた^{3)~6)}が、さらに高精度な加工を実現するためには、いまだ3軸制御加工で培ってきたノウハウを活用することのできる加工方法が必要である⁷⁾。これらの背景から本研究では、フライス系工作機械による金型加工において、剛性と工具姿勢の自由度を併せ持つ加工法として、5軸工作機械の回転2軸で

割り出し、主軸を被加工物に対して傾斜させながら3軸制御加工(以降3+2軸制御加工と呼ぶ)を行う方法を提案してきた¹⁰⁾。

この3+2軸制御加工は、図1に示すように、CADモデルで与えられる要求加工形状に対し、その加工物座標系における工具軸の最適な傾斜角(割り出し角)およびその割り出し角における加工可能な領域を導出し、割り出し角における工具経路を3軸制御CAMにより生成し、主軸を被加工物に対して傾斜させて加工を行うものである。この方法の利点は、3軸制御CAMのノウハウを継承することができ、かつ、加工物に対する工具姿勢の自由度を加えることにより高能率・高精度加工を実現することができることである。

Fig. 1 Overview of 3+2 axis control machining

* 原稿受付 平成 17 年 4 月 20 日

** 正 会 員 函館工業高等専門学校 (函館市戸倉町 14-1)

*** 正 会 員 北海道大学大学院 (札幌市北区北 8 条西 4 丁目)

† ㈱牧野フライス製作所 (東京都目黒区中根 2-3-19)

Fig. 2 Procedure of deriving of indexing angle and machinable area

第 1 報では、1 回の割り出しにより加工可能な要求加工部位に対して、割り出し角を導出する基本的な方法を提案した。そして、その決定された割り出し角により要求加工部位が加工可能となることを示してきた。本報では、要求加工形状を加工するために複数の割り出し角（割り出し角列）を必要とする形状に対して、要求加工形状から最適割り出し角列を導出する方法を提案する。また、与えられた CAD モデルから、本方法に従って最適割り出し角列を導出する適用例について、その手順と結果を示し、実機での加工例を報告する。

2. 3+2 軸制御加工における割り出し角導出方法概要

本研究では、金型加工にボールエンドミルを使用すること、そして、要求加工形状はソリッドモデルとして与えられることを前提とする。そして、与えられたソリッドモデルを必要な分解能で facet 分割し、それを基に 3+2 軸制御加工を行うための割り出し角を自動決定する。

この最適割り出し角の導出は、図 2 に示すように次の手順で行う。

- 1) 連続的に存在する割り出し角をある分解能で離散化し、それら全ての割り出し角の中から、生成された各 facet の法線ベクトルを基に、後述する面法線に基づく割り出し角探索法を用いて、割り出し各候補を選択する。
- 2) 全ての割り出し角候補に対して、工具の切れ刃、シャンク、ホルダ形状の情報を基に、状態フラグ付き逆オフセット法を用いて工具干渉回避を考慮した加工領域の導出を行う。
- 3) 導出された加工可能面積が最大となる割り出し角候補を選択し、その割り出し角における加工可能 facet を導出する。以上の手順は前報にて報告した。しかしながら、複数回の傾きが必要な複雑な形状の場合、図 2 の塗りつぶし部分に示す以下の手順が必要となり、詳細については 3 章に記す。
- 4) 加工可否情報を表現する facet Flag を更新し、未加工 facet を算出する。
- 5) 未加工 facet を割り出し角候補導出プロセスへ戻し、それを加工するための割り出し角候補導出および、逆オフセット法による加工 facet 導出を行う。

これら 1) から 5) の工程を繰り返すことにより、割り出し角列と加工可能領域とを決定する。

割り出し角候補は、分割された要求加工領域それぞれの facet に対して、工具の有効切れ刃部で加工可能な姿勢を、面法線に基づく割り出し角探索法¹⁰⁾により導出する。本研究では、割り

(a) Definition of indexing angle

(b) Limited angles for cutting tool

Fig. 3 Relationship between a normal vector of a facet and tilted tool axis

出し角を図 3(a) に示すような角度パラメータ ϕ 、 θ を用いて表現する。ここで、 ϕ は被加工物座標系における Z 軸となす角度であり、 θ は被加工物座標系における Z 軸回りの回転角度である。また、工具の有効切れ刃部を図 3(b) に示す様に、ボールエンドミル工具の回転中心付近（面法線と工具軸とのなす限界角 γ ）と側刃付近（工具軸と被加工面とのなす限界角 ζ ）とを除いた部分と定義する。

ある割り出し角において、有効切れ刃部で加工可能な facet 面積と要求加工面積との比を割り出し角評価量 $E_{\phi, \theta}$ と定義する。この割り出し角評価量を全ての割り出し角に対して算出し、この割り出し角評価量がある設定量より大きなものを割り出し角候補として導出する。

加工可能領域の導出には、逆オフセット法¹¹⁾を拡張した状態フラグ付き逆オフセット法を用いる。本方法は、逆向き工具が移動する際の包絡面を記憶する格子空間を、工具軸方向に設定し、要求形状面上を逆向き工具が移動する際の工具の包絡面からオフセット面を生成する。そのオフセット面はシャンク・ホルダ部により形成された干渉部分と工具切れ刃部により形成された部分とを識別する状態フラグとオフセット面から facet を参照するポイントを有している。この状態フラグとポイントによりある割り出し角候補における加工可能 facet と加工不可 facet とを識別することができる。この加工可能 facet 面積が最大となる割り出し角を最適割り出し角として導出する。

3. 複数回の傾きが必要な場合の導出方法

3.1 複数の割り出し角を必要とする場合の必要条件

要求加工領域を 1 回の割り出しで加工できない場合、複数の割り出し角（割り出し角列と呼ぶ）が必要となる。この最適な割り出し角列が満たすべき条件は、1) 割り出し回数が少ないこと、2) 一様な加工面が得られること、である。これらを満たすために、決められた工具（工具およびホルダ、突き出し長）で 1 回の割り出し加工において加工可能 facet の面積が最大となるような割り出し角を導出し、未加工 facet に対して割り出し角の導出を繰り返すことにより最適な割り出し角列を導出する。

本研究において、加工可能 facet は、算出された割り出し角候補に基づき状態フラグ付き逆オフセット法を用いて導出される。この割り出し角列を導出する際に次の必要条件がある。

- 1) 割り出し角列を導出する際、facet が、未加工か、何回目加工されたか、何番目の候補による加工可能領域かを区別しなければならない。

2) 加工可否情報は *facet* として得られるが, *facet* の分解能が粗いため, CAM システムへ渡す際, より精度の高い加工領域表現方法でなければならない。

これらの必要条件を満たすために, 本報では, 割り出し角列中の各割り出し角における加工可否情報を表現するために, 状態フラグ付き *facet* を, 加工領域の指定方法として, オフセット面における加工領域の指定方法を提案する。

3.2. 状態フラグ付き *facet*

本研究における逆オフセット法を実行するための格子空間は, 図 4 に示すように, 工具軸に沿った Z-Queue により構成されている。要求加工面が選択された割り出し角候補において全域加工可能であるか否かを判断するためには, 加工面 (*facet*) が加工可能か, 不能かを格子点から加工面 *facet* へのポインタを用いる必要がある。しかしながら, 複数の割り出し角が必要となる形状の場合, *facet* が未加工か, 何回目で加工されたか, 何番目の候補による加工可能領域かを区別する必要性が生じる。

例えば, 図 4 に示すように, 2 回の割り出し角で加工可能となる場合を考える。図 4(a) は 1 回目の割り出し角での加工可能 *facet* 導出結果を表している。図 4(a) 中において, この割り出し角において, 黒色丸が加工可能を, 白色丸が加工不能を示している。また, 黒塗りの部分は加工可能な *facet* を表し, 白塗りの部分は加工不能 *facet* を表している。図 4(b) は, 2 回目の割り出し角における加工可能 *facet* 導出結果を表している。図中の灰色塗りの部分が既に加工された *facet* を表している。

そのため, 要求加工面 *facet* に状態フラグを適用し, それにより要求面の加工可能可否情報を表現する。Facet と Z-Queue とのデータ構造を Express-G¹²⁾により表現したものを図 5 に示す。このように, *facet* と Z-Queue とは, 互いに参照できるポインタを持ち, Flag の list の N 番目が N 番目の割り出し角での加工の可否を表す。このことにより, *facet* と Z-Queue とは互いに情報参照することが可能となり, *facet* が未加工か, 何回目で加工されたか, 何番目の候補による加工可能領域かを区別することができる。

Fig. 4 State of Z-Queues on inverse offset method

Fig. 5 Data structure of Z-Queue and facet

3.3 オフセット面による加工領域指定法

CAM システムにおいて工具経路を導出するために, 要求加工形状において, 各割り出し角における加工可能領域を認識する必要がある。そのため, 導出された割り出し角が, どの領域に対する割り出し角であるかを明らかにするために, 割り出し角毎の加工可能領域を CAM システムへ渡す必要がある。

加工可能領域を加工面 (*facet*) 上で指定した場合, *facet* の分解精度に依存することになる。*facet* の分解精度は CAD システムに依存し, 分解精度が粗いため, 本研究においては, 一定の分解精度を保証でき, *facet* よりも高精度は格子空間 (オフセット面) において加工可能領域を指定する方法を提案する。本研究では, 加工点を示す Z-Queue 配列が図 6 に示すような 2 値画像として, 画像処理アルゴリズム¹³⁾を用いてオフセット面における加工可能領域の輪郭を導出した。

図 6 左側において, 状態フラグが加工可能を示す Z-Queue を黒丸で表している。また, 同図右に示すようにその輪郭を抽出し, 加工可能領域の輪郭として指定する。

4. 割り出し角列の導出法適用例

3+2 軸制御加工において複数の割り出し角を必要とする形状の例として, 図 7(a) に示す形状を対象とし, 図 7(b) で示すように形状全体に対して白抜きで示した範囲を要求加工領域とする。このモデルを図 8(a) に示すように *facet* 分割 (太線が要求加工領域を示す) し, 同図(b) のように, $\phi 4$, $L/D=5$ の突き出し長のボールエンドミル工具で加工する場合を想定する。このような形状, 要求加工領域に対して, 割り出し角候補の導出, その割り出し角候補における加工領域の導出, および, 未加工領域のフィードバック処理による複数の割り出し角の決定に関する実行例について示す。

Fig. 6 Boundary area deriving from offset point

Fig. 7 An example of required machining shape

(a) Required machining facets (b) Cutting tool configuration
Fig.8 Required machining facets and cutting tool configuration

Fig.9 Result of computing the evaluation value in 1st trial

4.1 傾斜角候補の導出例と加工領域の確認

図 7 に示す要求加工領域に対する面法線に基づく割り出し角探索法による割り出し角評価量 $E_{\phi, \theta}$ を図 9 に示す。これを求める条件は、 ϕ 、 θ の分解能はそれぞれ 5° とし、限界角度 $\gamma=10^\circ$ 、 $\zeta=10^\circ$ とした。また、 ϕ の値を工作機械の制限より 0° から 90° までの範囲に、 θ は 0° から 360° の範囲において導出した。図 9 に示す割り出し角評価量の結果から、 θ が 45° 、 135° 、 225° 、および 315° を中心とする割り出し角近傍に評価量の大きな割り出し角が分布することがわかる。この 4 つの大きな割り出し角の分布領域からそれぞれ候補を抽出できる様、割り出し角候補を割り出し角評価量の上位 100 組(図 9 中の黒丸で示す割り出し角)を選択した。

これら 100 組の各割り出し角候補に対し、状態フラグ付き逆オフセット処理を適用することにより、それぞれの割り出し角候補における加工可能 facet を導出した。図 10(a) に割り出し角評価量が大きい代表的な 4 つの割り出し角候補における加工可能 facet の導出結果を示す。図中の太い線で描かれている部分が加工可能 facet を表している。また、図 10(b) に同図(a)と同じ割り出し角における加工不能 facet を示している。これも同様に、太い線が加工不能 facet を表している。

これらの結果から、加工可能面積が最大となる割り出し角候補 $\phi=15^\circ$ 、 $\theta=225^\circ$ を第 1 回目の割り出し角とした。そして、この割り出し角による加工不能となる facet を図 11(a) に、また、この割り出し角によるオフセット面における加工可能領域を同図(b)に示すように導出した。

4.2 未加工領域のフィードバックによる傾斜角度導出例

1 回目の割り出し角導出における結果から、図 11 に示す未加工 facet を要求加工面として、割り出し角候補導出プロセスへ再入力する。これは、第 1 回目と同様に、割り出し角候補を面法線に基づく割り出し角探索法により導出する。その結果を、図 12 に示す。これは、未加工 facet を入力とした割り出し角探索法による割り出し角評価量である。割り出し角評価量が最大(割り出し角評価量が 100% となる角度)となる角度は図 12 の丸印で示すように 149 組存在した。

$\langle \phi:15^\circ \theta:45^\circ \rangle$, $\langle \phi:15^\circ \theta:135^\circ \rangle$, $\langle \phi:15^\circ \theta:225^\circ \rangle$, $\langle \phi:15^\circ \theta:315^\circ \rangle$
(a) Machinable facets

$\langle \phi:15^\circ \theta:45^\circ \rangle$, $\langle \phi:15^\circ \theta:135^\circ \rangle$, $\langle \phi:15^\circ \theta:225^\circ \rangle$, $\langle \phi:15^\circ \theta:315^\circ \rangle$
(b) Unmachinable facets

Fig.10 Results of deriving of machinable area

(a) Unmachinable facets (b) Machinable area
Fig.11 Machinable area and Unmachinable facets in 1st trial ($\phi:15^\circ$, $\theta:225^\circ$)

Fig.12 Result of computing the evaluation value in 2nd trial

これら 149 組を割り出し角候補とし、それぞれの割り出し角候補において状態フラグ付き逆オフセット法を適用し、加工可能 facet を導出した。その結果、要求加工形状の未加工 facet の全てが加工可能となった割り出し角は、図 12 の黒丸に示す 136 通り存在した。これら導出された全域加工可能となる割り出し角候補の中で、治具、工作機械主軸等との干渉が起きにくくなるように、加工座標系における工具の傾斜角度が最小となるものを割り出し角として採用した。この結果、 $\phi=15^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ を第 2 回目の割り出し角とした。

この割り出し角導出に関する全体の流れを、図 13 に示す。この図で、最初の要求加工形状が入力され、割り出し角候補を導出、そして、それぞれの候補に対する加工可能 facet を導出し、第 1 回目の割り出し角およびその加工可能領域を導出する手順を実線矢印で示している。また、1 回目の割り出し角において未加工 facet として導出された facet を再入力し、同様の手順で割り出し角および加工可能領域を導出する手順を破線で示している。その結果、この要求加工形状では、2 回の割り出し加工により要求加工形状全域が加工可能となった。

Fig.13 Procedure for decision of sequence of indexing angles

4.3 加工実験

得られた2回の割り出し角列に基づいて、3軸制御用CAM(牧野フライス製FF-CAM)により図14に示すよう工具経路を生成し、実機において検証加工を行った(図15)。使用工作機械はOSU-545(大島機工製)、使用工具はφ4超硬ボールエンドミル(L/D=5)、被削材はNAK55を用い加工した。今回の実験では、底面部分の割り出し角が異なる平面部に境界線が現れたが、図15に示すように、2回の割り出し角で工具ホルダおよび加工物に干渉無く加工できることを確認した。

5. 結 言

本研究では、5軸工作機械を用いた割り出し傾斜加工金型加工における最適傾斜角自動導出に関して次のことを示した。

- (1)複数の割り出し角を必要とする形状に対して、ソリッドモデルで与えられる金型用加工要求面から、割り出し角列を導出する方法を提案した。
- (2)割り出し角列中の各割り出し角における加工可否情報を表現するために、状態フラグ付きfacetを提案した。
- (3)一定の精度を保証可能な加工領域の指定方法として、オフセット面における加工領域の表現方法を提案した。
- (4)提案する割り出し角列導出方法を複数の割り出し角を必要とする要求形状に適用し、実際の導出例を示し、有効性を確認した。

(a) $\phi=15^\circ, \theta=225^\circ$ (b) $\phi=15^\circ, \theta=45^\circ$

Fig.14 Tool path simulation by CAM

(a) $\phi=15^\circ, \theta=225^\circ$ (b) $\phi=15^\circ, \theta=45^\circ$

Fig.15 Machining of example shape on 5-axis machining center

謝 辞

本研究は、金型分野におけるデジタル・マイスター技術開発助成事業(生産機械の高精度化、高能率化等に関する技術開発)「金型加工工作機械用 傾斜角度自動割出機能の技術開発」(平成13年~15年度)の助成を受けていることを付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) T. Altan, B.Lilly, Y.C.Yen: Manufacturing of Dies and Molds, Annals of the CIRP, 50, 2 (2001) 405.
- 2) 是田規之, 江川庸夫, 黒田基文, 渡部健, 伊井良治: ボールエンドミル加工における表面粗さの生成過程の解析, 精密工学会誌, 59, 09 (1993) 1537.
- 3) 鈴木裕, 桑野義正, 後藤勝征, 竹内芳美, 佐藤眞: 5軸加工用CAMシステムの開発, 精密工学会誌, 60, 6 (1994) 832.
- 4) Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation, Computer-Aided Design, 32, 4 (2000) 261.
- 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, 01 (1996) 80.
- 6) S.-H. Suh, J.-K. Kang: "Process planning for multi-axis NC machining of free surfaces", International Journal of Production Research, 33, 10 (1995) 2723.
- 7) P. Gupta, R. Janardan, J. Majhi T. Woo: "Efficient geometric algorithms for workpiece orientation in 4- and 5-axis NC machining", Computer-Aided Design, 28, 8 (1996) 577.
- 8) 武藤一夫: 同時5軸加工の新しいソリューション提案, 型技術, 17, 13 (2002) 20.
- 9) 青山英樹: CAD/CAMの現在と将来への課題, 型技術, 20, 2 (2005) 28.
- 10) 山田 誠, 田中文基, 近藤 司, 岸浪建史, 香村章夫: 5軸NC工作機械による主軸傾斜曲面加工法に関する研究(第一報), 精密工学会誌, 70, 1 (2004) 65.
- 11) 近藤司, 岸浪建史, 斎藤勝政: 逆オフセット法を基にした形状加工処理, 精密工学会誌, 54, 5 (1988) 167.
- 12) JIS B3700-11 産業オートメーションシステム及びその統合, 製品データの表現及び交換, 第11部: 記述法: EXPRESS 言語(1996).
- 13) 長谷川純一, 奥水大和, 中山晶, 横井茂樹: 画像処理の基本技法, 技術評論社 (1986).