金型加工の工程設計支援技術に関する研究（第一報）*

－削り残り領域の逆オフセット面への投影アルゴリズム－

乾 正 知**

Study on Computer-Aided Process Planning of Mold Part Machining
- Projection of the Machining Remained Area to Cutter Location Surface of the Product -

Masatomo INUI

In this paper, an algorithm for projecting the machining remained area in a prior machining to the cutter location surface for the next machining is proposed. This projection is useful for automating some process planning task of mold machining, such as the determination of the milling region in the following machining operations. In our proposed algorithm, the milling simulation and the inverse offsetting of the result shape of the simulation is required. Most milling simulation programs use discrete Z-map models for representing the workpiece shape. In this paper, an algorithm for inverse offsetting the Z-map model is discussed. Our algorithm computes dense zig-zag curves covering the Z-map model, then it generates the swept volume of the inversed cutter moving along the curves to obtain their Minkowski sum shape. Proposed algorithm is implemented and an experimental process planning assistance program using this technology is demonstrated.

Key words: process planning automation, inverse offsetting, Z-map model, CAM

1. はじめに

CAMソフトウェアの高性能化により、金型加工でのNC生成に要する時間は大幅に短縮されている。製造現場では、さらなる効率化を実現するために、NC生成の前段階にあたる工程設計の高速化が、強く望まれるようになってきた。金型加工は、粗加工、中仕上げ、仕上げ、磨き作業の順に進む¹⁾。金型製造における工程設計とは、前段階の加工において削り残る部分の検出や、それらを除去するための工具の選択や加工姿勢の決定、そして工具経路の生成範囲を決める作業などを指す。複雑な成型品の金型では、工程設計に丸1日を要する場合もあり、金型製造の効率化を阻害する大きな原因になっている。

工程設計自動化を目的とするソフトウェアも市販されているが（例えば²⁾）、工程設計には定型的な作業が少なく、企業や工場ごとに手順や方針が異なるため、市販ソフトウェアをそのまま利用できる事例はあまりない。金型加工では、工作物の状態、工具変形、ホルダー干渉などが複雑に絡むため、工程設計には高度な技能が必要だが、現在の技術では、技能を柔軟に取り込み活用できるプログラムの実現は難しい。これらの理由から、経験豊富な技術者が、図面に基づいて加工の状態を想定しつつ、手作業で工程計画を作成することが一般的である。

工程設計を高速化するために、われわれは、技術者が技能を発揮しつつ、主体的かつ迅速に作業を進められるソフトウェア環境を整備するアプローチを検討している。自動車メーカを中心に、企業での金型製造の実態を調査したところ、工程設計における判断の基準は企業ごとに異なるが、判断の材料として参照される情報には共通のものが多く分かった。特に、前加工で削り残る領域、工具が接近可能な姿勢、シャンクやホルダーと工作物の干渉状態などの幾何的な情報が、頻繁に参照されている。そこで、これらの情報を工作物などのモデルから高

Fig.1 Projection of the machining remained area to the CL surface

速に抽出するプログラム群を用意し、それらが提供する情報に基づいて技術者が判断し工程設計を進めれば、技能の発揮と作業の効率化がともに達成されることになる。

本論文では、このような情報抽出技術の一つとして、削り残り領域を逆オフセット面へ投影するアルゴリズムを開発したので報告する。粗加工では、大径の工具を用いて素材を除去するため、製品の凹形状の部分に削り残りが生じてしまう。削り残りは、次の中仕上げにおいて、より小径の工具を用いて除去することになる。中仕上げ加工のための工具経路は、製品形状を工具の逆形状分膨らませた逆オフセット面（英語名 Cutter Location surface, CL surface）上に生成される。したがって粗加工での削り残り部が、中仕上げ加工のための逆オフセット面のどの部分に対応するのか知る必要がある。図 1(a)には、薄青色で示した削り残り部を逆オフセット面へ投影し、対応する範

* 原稿受付 平成 17 年 5 月 10 日

** 正 会 員 茨城大学（茨城県日立市中成沢 4-12-1）

Fig.2 CL surface of the workpiece shape W with some remained material (a), and CL surface of the mold part P (b)

Fig.3 Comparison of z-values of two CL surfaces A and B to derive the projected area of the remained material to the CL surface

図を決める様子を示した。

この投影処理は、工程設計において非常に重要な役割を果たす。例えば、投影された図形の面積から工具経路の全長が推定できるので、加工時間の見積もりが可能となる。中仕上げ加工用に、あまりに大径の工具やホルダーを指定すると、逆オフセット面が高い位置に生成され、結果として削り残し領域の投影が困難（＝この工具では加工できない）になる（図 1(b)参照）。したがってこの投影処理は、工具選択の支援にも有効である。

自動車のバンパーなどの深い形状の金型では、中仕上げの際に工具を傾けて加工することが多い。投影された削り残り領域は、この加工姿勢決定の際にも重要な情報となる³⁾。

複雑な金型を数多く扱う自動車メーカなどでは、この投影処理の重要性がよく認識されており、同処理を実現するソフトウェアを開発した例も報告されているが、利用できる工具がボールエンドミルに制限されていた⁴⁾。市販の多くの CAM ソフトウェアは、前加工で削り残る領域に選択的に工具経路を発生させる機能を備えている。これらのソフトウェアは、本論文で議論する投影処理と同じ機能を備えていると想像されるが、その技術は公表されていない。また市販ソフトウェアの同機能には不完全なものが多く、削り残りを正しく除去できない事例が多数知られている。

本論文では、この削り残り領域の逆オフセット面への投影を、高精度かつ安定に実現するアルゴリズムを開発したので報告する。提案するアルゴリズムは、金型加工で通常用いられる全ての工具に対応できる。削り残りが僅かな場合や、ボールエンドミルだけを用いて加工する場合には、処理を高速に行えるように、アルゴリズムに改良を施した。実際にプログラムを作成し複雑な例題に適用することで、その有効性を検証した。

2. アルゴリズムの概要

本論文の提案するアルゴリズムの概要を示す。以下の議論では、理解を容易にするために、ボールエンドミル加工を例に説明するが、提案するアルゴリズムは、任意の工具に対応できる切削加工シミュレーションや逆オフセット法だけを用いており、工具形状には依存しない。

図 2(a)上には、大径のボールエンドミルを用いて粗加工を行った後の工作物の断面を示した。製品の凹形状の部分に、削り残りが生じている。この切削加工後の工作物形状は、NC 切削加工シミュレーションにより取得できる⁵⁾。粗加工において削り残った部分は、より小径の工具を用いた中仕上げ加工で除去される。中仕上げ加工のための工具経路は、製品形状を工具の逆形状分膨らませた、逆オフセット面上に生成される（図 2(b)参照）。中仕上げでは、粗加工で削り残った部分が除去できれば十分なので、工具経路は逆オフセット面上の限られた範囲にだけ生成すればよい。この工具経路を生成すべき範囲は、粗加工での削り残り領域を、中仕上げ加工のための逆オフセット面へ投影することで決められる（図 1(a)参照）。

製品形状の逆オフセット面は、図 2(b)下に示したように、逆形状の工具を、その中心を製品形状の表面に保ちつつ製品上を縦横に滑らせたときに得られる掃引形状の、最も上側の面となる。同じ処理を、粗加工後の工作物形状に対して行うことで（図 2(a)下参照）、削り残りを含む工作物形状の逆オフセット面を得ることができる。削り残り部の表面は、製品形状の表面よりも上側に存在するので、削り残り部に対応する逆オフセット面は、製品形状の逆オフセット面よりも上に現れる。したがって図 3 に示すように、製品形状の逆オフセット面 A と工作物形状の逆オフセット面 B を計算しそれらを重ね合わせると、削り残り領域に対応する逆オフセット面上の範囲は、面 A のうち、面 B が面 A よりも上に存在している部分として抽出できる。

以上をまとめると、粗加工での削り残り領域を中仕上げ加工用の逆オフセット面へ投影する、以下のアルゴリズムを得る。

Step 1: NC 切削加工シミュレーションを実行し、粗加工後の削り残りを含む工作物の形状モデル W を得る。

Step 2: 中仕上げ加工用の工具形状のモデルを用いて、製品形状のモデル P の逆オフセット面 A を生成する。

Step 3: 同じ工具形状のモデルを用いて、 W の逆オフセット面 B を得る。

Step 4: 面 A のうち、面 B が面 A よりも上に存在している範囲を抽出し、それを削り残り領域を逆オフセット面 A に投影した結果として出力する。

3. Z マップモデルの逆オフセット

Step 2 の、製品形状の逆オフセット面の生成手法については、既に多くの研究がある。われわれも、多面体表現された形状を高速に逆オフセットする技術を報告している⁶⁾。Step 1 の切削加工シミュレーションでは、工作物の形状モデルとして離散的なデータ形式を用いることが多く、特に XY 平面上の直交格子に基づく Z マップと呼ばれる手法が普及している¹⁾。Step 3 では、この Z マップで表現された形状モデルを逆オフセットすることになるが、この処理についてはまだ実用的なアルゴリズムは知られていない。そこで本章では、Z マップモデルの逆オフセット面を効率的に算出する手法について述べる。

3.1 Z マップモデルに基づく切削加工シミュレーション

切削加工にともなう工作物の形状変化は、素材形状を表す立体モデルから、工具経路に沿って移動する切削工具の掃引形状を差し引くことで表現できる。金型加工では、工具経路は数百万本もの微小な線分の連続となる。このような複雑な工具移動に対応する掃引形状を立体モデルから差し引く集合演算は、不安定なものになりやすい。そのため切削加工の幾何的なシミュレーションでは、Z マップと呼ばれる離散的な形状モデルを用いる手法が一般的である。

Z マップ表現に基づく加工シミュレーションでは、まず XY 平面上に、素材の投影を包含する X 軸と Y 軸に平行な直交格子を用意する。そして各格子点から垂直上方に伸びる半直線と素材形状の上面の交点を計算し、その Z 値を各格子点に記録する。この処理を全格子点について繰り返すと、素材形状の上面を半直線群の先端で表現できる。このような形状表現を Z マップモデルと呼ぶ。Z マップモデルの精度は直交格子の解像度によって決まる。本研究では、直交格子の解像度を 8000×8000 に定めた。これは、後述する計算実験で用いた PC の許す最大の解像度である。

加工の進行にともなう工作物の形状変化は、Z マップの半直線群を、折れ線状の経路に沿って移動する工具の掃引形状の底面で切り詰めることで表現できる（図 4 参照）。ボールエンドミル加工では、工具の掃引形状の底面は、同一半径の球面と円筒形が交互に接続したものとなる。したがって半直線を切り詰める処理は、これらの図形と半直線の交差を調べ、その最も下側の交点を得る処理の繰り返しとなる。われわれは、グラフィックス・ハードウェアを利用することで、この処理を高速に実行する技術を開発している⁷⁾。

3.2 Z マップモデルの逆オフセット処理

加工シミュレーションにより得られた粗加工後の工作物形状を、中仕上げ加工用の工具を用いて逆オフセットすることを考える。工作物形状の逆オフセット面は、逆形状の工具を、その中心を工作物の上面に保ちつつ縦横に滑らせたときに得られる掃引形状の、最も上側の面となる。そこで本研究では、Z マップ表現された工作物形状の逆オフセット面を、以下の 3 ステップの処理により得ることにした。

Fig.4 Concept of Z-map model based milling simulation

Fig.5 Workpiece shape in the Z-map representation and zig-zag path obtained by connecting the top points of the Z-map segments

Fig.6 Number of linear segments can be reduced by replacing some short segments to a longer one

Step 3.1: 工作物の表面を緻密に覆う工具経路を生成する。

Step 3.2: この経路にそって逆形状の工具を移動した時の、掃引形状を定義する。

Step 3.3: 掃引形状の最も上側の面を、Z マップモデルとして計算し保存する。

Step 3.1 では、Z マップ表現された工作物の表面を覆いつくす工具経路を生成する。Z マップを定義する半直線は、XY 平面上の直交格子に基づいて定義されている。各格子点は、X 軸方向を「行」Y 軸方向を「列」とする行列状に並んでいるので、各行の格子点を左から右、もしくは右から左へ順にたどり、対応する半直線の上端を線で結ぶことで、X 軸方向に沿って並んだ工作物上の点列を得ることができる。この処理を、最も下の行から最も上の行まで、奇数行は左→右、偶数行は右→左にたどりながら繰り返すと、工作物の表面を緻密に覆う、X 軸に平行なジグザグ状の経路を得ることができる（図 5 参照）。同様の処理を直交格子の列について繰り返すことで、Y 軸に平行なジグザグ経路も得られる。

解像度 8000×8000 の格子に基づく Z マップの場合、上述の手法で生成されるジグザグ経路を構成する線分数は、 $2 \times 8000 \times 8000$ 本という膨大な数になる。しかしこの線分数は、ある許容誤差値 ε を与え、図 6 に示すように、形状変化が ε 以下の折

Fig.7 Swept volume of the inversed cutter moving along the path (a), and the transformation of its top surface to the Z-map representation (b)

れ線の連続を、一本のより長い線分に置き換えていくことで、大幅に削減できる。本研究では $\varepsilon = 0.002 \text{ mm}$ としたが、多くの場合、線分数は 10 パーセント以下まで削減された。

Step 3.2 では、この経路に沿って移動する逆形状の工具の掃引形状を定義し、Step 3.3 で、その最上面の形状を Z マップに記録する（図 7 参照）。工具がボールエンドミルの場合には、掃引形状の最も上側の面は、工具先端の半球が折れ線にそって移動した結果生成される、球面と円筒面が交互に接続した形状となる。そこで、前述した切削加工シミュレーションと同様に、XY 面上に解像度 8000×8000 の直交格子を配置し、各格子点から上方に半直線を延ばす。そして球面や円筒面と半直線の交差を調べ、その最も上側の交点の高さを、格子点ごとに記録する。この処理は、最も「上」側の交点の高さを記録することを除けば、切削加工シミュレーションと全く同じ処理となる。

4. 処理の高速化

提案したアルゴリズムをさらに高速化する技術を以下に示す。

(1) 工作物の逆オフセット範囲の限定：図 2(a)と(b)の上側の図を比較すれば分かるように、粗加工後の工作物の形状は、削り残りが生じている凹形状部を除けば、ほとんどの部分は製品形状と一致している。したがって、それらの部分を逆オフセットした結果も、製品形状の対応する部分を逆オフセットした結果と一致するので、Step 4 の逆オフセット面の比較の際には無視できる。このことから、工作物形状の Z マップモデルを逆オフセット処理する際には、最初に工作物形状のうち削り残りが生じている部分を抽出し、Step 3.1～3.2 では、その部分にだけ工具経路を発生させ、逆形状の工具を動かし掃引形状の最上面を記録すればよい。工作物上の削り残り部は、粗加工後の工作物形状と製品形状を比較することで、容易に抽出できる⁸⁾。

(2) ボールエンドミルのみを用いる場合の簡略化：曲面を多用した金型は、そのほとんどがボールエンドミルだけを用いて加工される。このような場合には、以下のように処理することで、処理の手間を大幅に削減できる。半径 R のボールエンドミルを用いて粗加工を行い、続いてより小径の半径 r のボールエンドミルを用いて中仕上げ加工する場合を考える。粗加工後の工作

物形状を半径 r だけ逆オフセットした形状は、粗加工の際に、半径 R のボールエンドミルの代わりに、半径 $R - r$ のボールエンドミルを用いて加工した結果と一致する。このように置き換えれば、Step 1 の加工シミュレーションと Step 3 の工作物形状の逆オフセットの二つの処理を、一回の加工シミュレーションだけで実現できることになる。

5. 計算実験の結果

提案したアルゴリズムに基づいて、粗加工での削り残り領域を、中仕上げ加工のための逆オフセット面へ投影するプログラムを実現し、幾つかの計算実験を行った。図 8 には、実験で用いた製品の多面体モデルを示す。このモデルは、サイズ $187.7 \times 212.8 \times 137.8 \text{ mm}$ で、222727 枚のポリゴンから構成されている。図 9 には、この形状を直径 12mm のボールエンドミルで粗加工した場合に生じる削り残り領域を緑色で示した。この領域は、加工シミュレーションにより得られた粗加工後の工作物形状と製品形状を比較することで抽出された⁸⁾。

図 8 の製品形状を、直径 6mm のボールエンドミルで加工する場合の逆オフセット面を図 10 に示す。本論文で提案した手法を用いて、図 9 に示されている削り残り領域を、この逆オフセット面に投影した結果を図 11 に示す。図 9 との対応を容易にするために、投影された部分の逆オフセット面のみを緑色で表示している。処理には CPU が Xeon 3.6GHz、主記憶 4GB、GPU として Nvidia 社の Quadro FX3400 を搭載した PC を用いた。この場合、ボールエンドミルのみを用いる加工なので、4 章(2)に示した高速化手法が利用できる。高速化手法を用いない場合には、Step 1～4 の計算に 272.06CPU 秒を要したが、高速化手法を用いると、同じ結果を 127.45CPU 秒で得ることができた。

同じ製品形状を、直径 12mm、コーナ半径 2mm のラジラスエンドミルで加工する場合の逆オフセット面を図 12 に示す。図 9 の削り残り領域を、この逆オフセット面に投影した結果を図 13 に示す。この例では処理に 603.22 CPU 秒を要した。ただし Step3 の処理では、4 章(1)に示した技術を用いて処理範囲を削減している。図 11 と図 13 を比較すると分かるように、逆オフセット面が違っていると、投影結果もかなり異なったものになる。この例では、溝が狭くラジラスエンドミルが入り込めないため、この工具では溝部の削り残りが除去できない。図 13 を見ると、溝部の削り残りの投影が得られていないことが分かる。

6. ま と め

本論文では、工程設計支援に有用な幾何的情報の抽出ツールとして、前加工での削り残り領域を次加工のための逆オフセット面に投影するアルゴリズムについて述べた。このアルゴリズムでは、製品形状と加工シミュレーションにより得られる工作物形状をともに逆オフセットし、その結果を比較することで削り残り領域の投影結果を得る。多くの加工シミュレーションでは、工作物の形状表現手法として Z マップモデルを用いている。本論文では、この Z マップで表現された形状モデルの逆オフセットを効率的に行う手法を示した。また処理をさらに高速化するために、工作物モデルの逆オフセットの範囲を限定する技術と、ボールエンドミルのみを用いる加工の場合に、処理のステップを一部簡略化する技術を紹介した。

本研究を進めるにあたって、マツダ（株）の細田剛氏より、多くの助言と評価データのご提供をいただいた。この場を借りて深く感謝する。

Fig.8 Part model in a polyhedral representation with 222727 polygons

Fig.11 Projection of the remained area in Fig.9 to the CL surface in Fig.10

Fig.9 Remained material after milling with a ball end cutter ($D = 12\text{mm}$)

Fig.12 CL surface for milling with a radius end cutter ($D = 12\text{mm}$, $r = 2\text{mm}$)

Fig.10 CL surface for milling with a ball end cutter ($D = 6\text{mm}$)

Fig.13 Projection of the remained area in Fig.9 to the CL surface in Fig.10

参 考 文 献

- 1) B. K. Choi, R. B. Jerard: Sculptured Surface Machining, Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers (1998).
- 2) http://www.datadesign.co.jp/downloadsite/catalog_pdf/millplan.pdf
- 3) 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.
- 4) 近藤道夫: 加工残領域の認識, ユニシス技法, **23**, 3 (2003) 86.
- 5) W. P. Wang, K. K. Wang: Geometric Modeling for Swept Volume of

- Moving Solids, IEEE Computer Graphics and Applications, **6**, 12 (1986) 8.
- 6) M. Inui: Fast Inverse Offset Computation Using Polygon Rendering Hardware, Computer-Aided Design, **35**, 2 (2003) 191.
- 7) M. Inui, R. Kakio: Fast Visualization of NC Milling Result Using Graphics Acceleration Hardware, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (2000) 3089.
- 8) M. Inui and T. Miyashita: Hollow Shape Extraction: Geometric Method for Assisting Process Planning of Mold Machining, Proc. IEEE Int. Symp. Assembly and Task Planning (2003) 30.