非接触 3-D デジタイジングシステムを基にした 金型生産加工システムの開発 (第 2 報)*

— 工具経路生成法について —

近藤 司** 斎藤勝政** 三好隆志*** 難波則広†

Development of a Die Making System based on a Non-contact Digitizing System (2nd Report)
— Cutter Path Generation —

Tsukasa KONDO, Katsumasa SAITO, Takashi MIYOSHI and Norihiro NANBA

The purpose of this study is to develop a flexible machining system based on non-contact digitizing data of a master model. This paper presents a procedure of generating a cutter path for each surface element, which constitutes the master model. The procedure is as follows: (1) A master model is decomposed into some surface elements. (2) A surface element is fitted to quadric surface, and the quadric equation is transformed to NURBS equation. (3) An offset surface is created by the Inverse Offset Method which is available for any tool shape. (4) To generate a cutter location data (x, y, z), the coordinate x and y are calculated from NURBS equation, and the coordinate z is obtained by the offset surface.

Key words: non-contact digitizing system, flexible machining, die making, NURBS, cutter path generation

1. 緒 言

意匠性の高い造形物の多くは、デザイナーの感性に依存した微妙な形状をもち、それらは一般に複合自由曲面により構成されている。そのような形状の表現は、CAD に代表される双 3 次曲面を基本としたモデラでは必ずしも十分に行われず、その場合、マスタモデルの創成により行われている。

マスタモデルをベースとした形状加工は、削り加工などデジタイジング処理を基にした一体加工が一般的である。その工具経路はデジタイジング処理の際に用いたプローブの移動経路であり、用いる工具形状はプローブと同形状である。

通常のデジタイジング処理においては、プローブは測定平面内を移動し、マスタモデル形状の全体を走査する。したがって、プローブ形状（主として球体）と同形工具により行う加工では、その被加工物の形状とは無関係に一定方向にカットマークを発生させるほか、加工面粗さが均一にならないなどの欠点がある。これに対してモデルを構成する面要素単位の加工では、面の輪郭に沿ったカットマークが生じることや面粗さが均一にできることのほか、面の特徴を考慮した工具を選択できる利点がある。

本研究は、非接触式のデジタイジングシステムで得られたデジタイジングデータを基に、マスタモデルを構成する要素面単位の工具経路の生成を可能とする加工システムを開発することを目的としている。また、使用する工作機械は 3 軸制御工作機械を対象としている。本論文では、デジタイジングからマスタモデルを構成する要素面単位の工具経路生成までの処理手順と、その処理方法を論ずる。

2. 形状処理と工具経路生成の課題

本研究におけるデジタイジングから工具経路生成までのデータ処理の流れを図 1 に示す。前報¹⁾では、非接触デジタイジングシステムにおいて得られるマスタモデル形状の点群情報を基に、マスタモデルを構成する要素面の抽出方法に関して以下のことを報告した。

まず、形状急変部を法線情報が急変する領域と定義し、要素面は形状急変部で囲まれる領域として定義した。次に、点群情報から形状急変部を抽出し、点群データを要素面に分離するために、測定ピッチを粗から密へと段階的に処理する階層型デジタイジング処理と、隣接する点群情報から得られる法線情報の変化量が設定したしきい値を越えた点を形状の急変部とする急変部判定法、判定結果を基にした点群データの要素面への分離法を提案し、複合形状を例として実験を行いその正当性を確認した。しかし、形状急変部を判定するために用いるしきい値は、測定ピッチと形状の変化に応じて階層単位で設定しなければならないため、形状分離の自動化には問題を残した。

本報では以下の課題について取り扱った。

- ① 前報で提案した形状急変部の判定方法では、測定ピッチに依存してそのしきい値を設定する必要があるため、本報では、形状急変部は複数の形状の境界領域として定義し、それに基づく形状急変部の判定法を提案する。
- ② 要素面単位の工具経路生成においては、各要素面をパラメトリック表現した方が都合がよい。そのため、形状急変領域で囲まれる要素面を 2 次曲面へ当てはめる。また、面を統一的に取り扱うために、2 次曲面式から NURBS 曲面式へ変換する。その処理手順を示す。
- ③ 一般に、当てはめた曲面式と点群情報は厳密には異なっている。従って、曲面式のみを用いて工具経路を生成するとマスタモデル形状とは異なる形状が創成される。また、曲面に応じて工具形状が異なる場合、工具経路生成時の工具干渉問題を解決する必要がある。このため、点群情報か

* 原稿受付 平成 5 年 5 月 17 日

** 正 会 員 北海道大学工学部（札幌市北区北 13 条西 8 丁目）

*** 正 会 員 大阪大学工学部（吹田市山田丘 2-1）

† キヤノン(株)（東京都大田区下丸子 3-30-2）

Fig. 1 Data flow of proposed machining system

Fig. 2 Concept of surface boundary

ら逆オフセット法²⁾により工具干渉の生じないオフセット面を生成し、工具移動は曲面情報から制御する方法を提案して、その手順を示す。

3. 形状急変部の抽出方法

マスタモデル形状を構成する面要素間には、相貫曲線（エッジ）、またはそれらを滑らかに接続するばかし面（フィレット面）が存在する。微視的にはエッジは半径0のフィレットであるため、複合曲面で構成されるマスタモデルにはある半径をもつフィレットが形状急変領域として存在すると考えることができる。

図2に提案する形状急変部抽出法の基本概念を示す。マスタモデル上を球体（探索球体）が接触しながら移動するとき、マスタモデルの面には球体と接触する領域（ P_0 から P_1 と、 P_3 から P_4 ）と接触しない領域（ P_1 から P_2 と、 P_2 から P_3 ）が存在する。前者は探索球体の半径以上の形状曲率半径を有する領域、すなわち要素面であり、後者は球体が進入することが不可能な領域、すなわち形状急変領域である。

図3にデジタイジングデータを基にした形状急変領域の抽出方法を示す。3-D デジタイジングにより得られる情報は、連続的に表現可能な面モデルではなく、あるピッチ間隔で計測されるマスタモデル上の3次元座標値をもつ点群である。このため、形状急変領域の抽出は測定点単位の処理となる。測定点

Fig. 3 Detection of surface boundary

P_0 の形状急変部の判定は以下に示す手順で行う。

- ① 測定点 P_0 の近接点を用いて、その平面近似から P_0 における単位法線ベクトル $\mathbf{n}$ を計算する。
- ② 単位法線ベクトル $\mathbf{n}$ と探索球体の半径 R から球体の中心位置 O_0 を計算する。
- ③ O_0 を中心とする半径 R の球体を XY 平面へ投影した円領域を評価領域とし、評価領域内の測定点 P_i と O_0 との距離 d_i を計算する。
- ④ $d_i < R$ である P_i が存在すれば、 P_0 は形状急変領域内の点とする。 $d_i \geq R$ であれば P_0 は要素面上の点とする。

図4に本論文において実験に使用したマスタモデル形状を示す。マスタモデルは2つの平面、半球面、楕円面、円筒面、円すい面の6種類の要素面から構成されており、半径3mmの球体工具により加工した形状である。このため、凹急変部は半径3mm、また凸急変部は半径0mmのフィレット面であると推定できる。図5は3.5mmの探索球体を用いて形状急変部判定を行った例である。凹、凸の両形状急変部が抽出されていることが確認できる。

4. 測定点群のパラメトリック曲面表現

形状急変部により分離された点群は、面要素単位にラベル付

Fig. 4 Master model with 6 surface elements

Fig. 5 Example of surface boundary detection

けされグループ化される。加工処理においては、面要素がどのような面に属するかまたは近似されるかを認識することが重要である。本研究では、点群により表現された面要素をパラメトリック表現された2次曲面式に当てはめた。その手順は、点群を最小自乗法により2次曲面へ当てはめる処理と、当てはめた2次曲面式をNURBS曲面式へ変換する2段階に分けて行った。

4.1 2次曲面への当てはめ

点群を2次曲面へ当てはめる処理手順を以下に示した。

- ① 並進，回転操作による点群データの位置補正
要素面を構成する点群を2次曲面へ当てはめる際，その評価

は点群から2次曲面までのZ軸方向の距離（誤差）の標準偏差を用いて行っている。要素面は平面を含む自由曲面であるため，座標系の取り方によりその標準偏差は異なることが予想される。また，点群データは座標系の原点付近に分散している方が計算誤差が少ない。以上の理由で点群データを並進，回転操作することにより適当な位置へ移動した。並進移動は点群中心位置と座標原点が一致するように，回転操作は並進操作後の点群データに対して平面式を当てはめ，その法線方向がZ軸方向に一致するように補正した。座標変換により補正された点群を補正点群と呼ぶ。

- ② 補正点群データの2次曲面式への当てはめ
一般形による2次曲面式を以下に示す。

$$F(x, y, z) = ax^2 + by^2 + cz^2 + 2(fyz + gzx + hxy + lx + my + nz) + d = 0 \quad (1)$$

ここで，任意の係数の内1つを定数化し，式(1)を変形する。本論文では便宜上 $d=1$ とした。

式(1)左辺に補正点群座標 (x_i, y_i, z_i) を代入すると，残差 ε_i が生じる。

$$\varepsilon_i = F(x_i, y_i, z_i)$$

最小自乗法を適用して，残差の自乗和を最小とすることにより各係数を決定する。評価関数を以下のように定める

$$S = \sum F(x_i, y_i, z_i)^2 = \sum \{ax_i^2 + by_i^2 + cz_i^2 + 2(fy_i z_i + gz_i x_i + hx_i y_i + lx_i + my_i + nz_i) + 1\}^2 \quad (2)$$

ここで，式(2)を最小化する停留条件に従い，各方程式の係数に関する S の偏微分を0とおくことにより正規方程式を得る。その正規方程式を解くことにより $a \sim n$ までの係数が決定され，補正点群データの2次曲面式への当てはめを行うことができる。

図6に，3章で分離した要素面の2次曲面への当てはめ結果を示す。点群と2次曲面の当てはめの評価は点と曲面との距離を誤差とする標準偏差で行い，その距離は簡便に求めることができるZ軸方向とした。その結果，6種類の形状に対して標準偏差が0.16 mm以下に当てはまっている。デジタイジングシステムの測定精度（ ± 0.05 mm）と，測定形状が機械加工面であることを考慮すると2次曲面の場合はほとんど楕円面，一葉双曲面，二葉双曲面のいずれかに分類されることが予想される。このため，平面の場合，本研究では係数の値の評価から判断し分類した。

4.2 解析曲面のNURBS変換

本研究では平面，楕円面，一葉双曲面，二葉双曲面を3階のNURBSへ変換する。しかし，一般形の2次曲面式から直接，

Theoretical		Analyzed		
Quadric surface	Coefficient (A, B, C) or (L, M, D)	Quadric surface	Coefficient (A, B, C) or (L, M, D)	S. D. mm
Plane 1	0.0, 0.0, 0.0	Plane	0.0, 0.0, -0.027 3	0.067 7
Plane 2	0.0, 0.0, 0.0	Plane	0.0, 0.0, -0.032 6	0.041 1
Right circular cone	1.0, -2.25, 1.0	Hyperboloid of one sheet	0.878, -2.062, 0.943	0.033 7
Circular cylinder	400.0, -∞, 400	Hyperboloid of one sheet	380.6, -66 794.0, 400.2	0.071 1
Elliptic cylinder	506.25, -∞, 225.0	Hyperboloid of one sheet	521.3, -69 737.4, 224.8	0.077 0
Sphere	1 600.0, 1 600.0, 1 600.0	Ellipsoid	1 634.0, 1 608.8, 1 627.9	0.155 5

$$\text{Quadric surface equation; } \frac{X^2}{A} + \frac{Y^2}{B} + \frac{Z^2}{C} = 1$$

$$\text{Plane equation; } Z = LX + MY + D$$

Fig. 6 Result of surface fitting

Fig. 7 Relation between control net and NURBS

NURBS の曲面式へ変換することは困難である。したがって、変換操作は①2次形式の主軸変換³⁾、②標準形表現された2次曲面式を3階のNURBSへ変換、の2段階により行った。主軸変換の際、図6で示す標準形2次曲面式の係数 A, B, C または、平面式の係数 L, M, D を決定する。3階のNURBSは式(3)により定義される。

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,3}(u) N_{j,3}(v) w_{i,j} \mathbf{P}_{i,j}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,3}(u) N_{j,3}(v) w_{i,j}} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{P}_{i,j}$: 制御点、 $w_{i,j}$: 制御点に対応した重み、 $N_{i,3}(u)$: ノットベクトルで定義される3階の u 方向の重み関数である。

①で用いた座標変換操作を修正点群に対して行い、その点群の存在領域を含むようにNURBSを定義する。2次曲面を3階のNURBSへ変換するためには制御点位置、その制御点に対する重みを決定しなければならない。本研究ではNURBSにおけるその制御点の数、その位相関係、ノットベクトルは、図7に一葉双曲面の例に示すように、あらかじめ定めてある。2次曲面は2種類の2次曲線を基にしたテンソル積曲面であるため、その2次曲線をNURBS表現するための制御点とその重みを求める。2種類の2次曲線は2次曲面とXZ平面、およびXY平面との断面曲線として定義し、それぞれを u, v 方向のパラメータで制御される曲線とする。NURBSを定義する制御点 $\mathbf{P}_{i,0}, \mathbf{P}_{0,j}$ は当てはめた標準形2次曲面式の係数 A, B, C および L, M, D を用いて決定する。また、制御点が決めればその重みとの関係は明らかである⁴⁾。2つのNURBSの制御点位置を基にして、NURBSを定義する制御点 $\mathbf{P}_{i,j}$ を決定する。また、 $\mathbf{P}_{i,j}$ に対する重み $w_{i,j}$ は $w_{0,j}$ と $w_{i,0}$ の掛合せで決定する。

5. 工具経路生成

一般に、工具経路は工具基準点がオフセット面を移動する軌跡である。本研究で対象としているマスタモデルを基にした加工においては、その工具経路はモデルを構成する面要素単位で生成することが必要である。前章で述べた各面要素を当てはめた解析曲面は近似曲面であるため、解析曲面に対するオフセット面は利用することができない。このため、本研究ではデジタイジングシステムから得られる点群データを要求形状として処理する。要求形状に対するオフセット面の生成は逆オフセット法を採用し任意の工具形状に対応することを可能とした。すなわち、各面要素の特徴に応じて選択された工具形状に対して

Fig. 8 Calculation of cutter location data

tool shape: $r=3\text{mm}, r_n=0\text{mm}$

Fig. 9 Example of offset surfaces using NURBS

工具経路が生成できる。工具基準点の算出方法を図8に示す。

ここで、

$\mathbf{T}$ は逆オフセット法により生成されたオフセット面 $\mathbf{T}: (T_x, T_y, T_z)$

また、

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P} + r_n \mathbf{n} + (r - r_n) \mathbf{n}' \quad (4)$$

$\mathbf{Q}$ は (u, v) の関数 $\mathbf{Q}(u, v): (Q_x, Q_y, Q_z)$

$\mathbf{P}$ はNURBS曲面上の点座標で (u, v) の関数 $\mathbf{P}(u, v): (P_x, P_y, P_z)$

$\mathbf{n}$ は $\mathbf{P}$ における単位面法線ベクトル

$\mathbf{n}'$ は $\mathbf{n}$ をXY平面へ投影した単位ベクトル

r は工具半径

r_n はノーズ半径

工具基準点はオフセット面 $\mathbf{T}$ 上に位置するが、その際 X, Y 座標値は式(4)により計算される。工具経路はNURBSの曲面式に基づきパラメータ (u, v) を0~1までの範囲を微小ステップで制御することにより生成される。また、工具経路は要素面の存在領域の範囲に生成することが要求される。本研究ではこれを簡易的な方法で処理した。すなわち、式(4)で算出した $\mathbf{Q}$ と同じ X, Y 座標における T_z を Q_z と比較し、その差がしきい値 δ 以内であれば領域内部、しきい値を越える場合は領域外と判定する。すなわち、 $Q_z < T_z$ の場合、その工具位置では工具干渉が発生することが判定できる。本研究では工具経路は要素面の領域外ではZ軸方向における非干渉領域へ回避するように生成した。したがって、要素面境界部の加工領域は δ の設定値に依存する。

図4で示したマスタモデルを例にとり工具経路の生成を行った。図9に要素面を当てはめたNURBS式から求めたそれぞれの曲面に対するオフセット点群を示す。図10にデジタイジングデータを基に逆オフセット法により算出したマスタモデルのオフセット面を示す。図11に各要素面に対する工具経路

tool shape: $r=3\text{mm}$, $r_n=0\text{mm}$

Fig. 10 Example of offset surface using Inverse Offset Method

Fig. 11 Example of cutter paths for surface elements

を示す。また、図12にそれらの加工例を示す。目視において、他の要素面との工具干渉を回避するため未切削領域の存在は確認できるが、工具干渉などの過切削部分は確認されなかった。また、カットマークが加工面に対してほぼ均等な間隔で存在することが確認できる。

6. 結 論

非接触デジタイジングシステムを基にした点群データを利

Fig. 12 Machining example

用した工具経路生成方法に関して、以下の結論を得た。

- (1) マスタモデルを構成する要素面を単位として加工する際の、工具経路の生成方法とその処理手順を示した。
- (2) 点群データで表現されるマスタモデル形状から、その要素面間に存在する形状急変部を抽出する方法を提案した。
- (3) 点群データで表現される要素面を2次曲面への当てはめ、さらにNURBSで表現する手順を示した。
- (4) デジタイジングデータから生成したオフセット面とNURBSを基にして、工具干渉の生じない工具経路の生成法を提案した。

終わりに、デジタイジングデータの2次曲面式への当てはめに関してご助言いただいた、花王(株)須川雅之氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 近藤 司ほか：非接触3-D デジタイジングシステムを基にした金型生産加工システムの開発（第1報），精密工学会誌，57，8（1991）1381.
- 2) 近藤 司ほか：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）971.
- 3) 矢野健太郎：代数学と幾何学，裳華房，（1975）258～281.
- 4) L. Piegl: Curve and Surface Constructions using Rational B-splines, CAD, 19, 9, (1987) 485.
- 5) 三好隆志ほか：非接触3-D デジタイジングシステムの開発研究，精密工学会誌，56，6（1990）1021.