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)*

—階層型デジタイジングデータ処理について—

近藤 司** 三好隆志** 斎藤勝政** 難波則広***

Development of a Die Making System based on
a Non-contact Digitizing System (1st Report)
—Processing of Digitizing Data in Hierarchical Measurement System—

Tsukasa KONDO, Takashi MIYOSHI, Katsumasa SAITO 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 such as a die model. This paper presents a measurement using a hierarchical method to machine a master model shape efficiently, and also the procedure of measuring and the data structure of a master model shape. In general, a master model consists of some surface elements. Each tool path can be created efficiently if it is possible to identify these elements. In order to separate surface elements from the data to be measured, a character line should be used. The character line exists on a boundary between surface elements and can be detected by hierarchical measurement. A measurement is performed in each layer level and the measuring pitch is gradually halved within the boundary of the surface elements. There are 2 types of data to define a measured master model shape. One is a lattice patch data which constructs the model shape in X-Y space, and the other is a patch group data which constitutes the surface element. The measured shape is represented by the patch with a quad tree data structure and a patch group data is a set of patches.

Key words: non-contact digitizing system, flexible machining system, hierarchical measurement, quad tree data structure, die making

1. 緒 言

本研究は複合 3 次元曲面から構成される複雑な形状、その代表例として金型製作用マスタモデルに対して測定された非接触デジタイジングデータを基に高能率加工を可能にする金型生産加工システムの開発を目的としたものである。模型形状を基にした加工方法のほとんどは倣い加工、またはそれによる測定データを用いた同等の加工方法¹⁾である。すなわち、その加工方法の特徴は倣い過程時に採用されたプローブ形状(球体)、倣いモードに加工条件を一致させることにより容易にモデル形状を生成できることが挙げられる。倣い加工におけるその模型形状生成の再現性はプローブ径が小さくなる程良好となる。しかし加工効率はその

れとは逆の傾向があり工具径が大きくなるに従い良好となる。一般に模型形状はその要素形状である平面、2 次曲面、自由曲面などの複合曲面で構成されている。この複合曲面における倣い加工は測定パス(等高線または走査線モード)を工具経路とする一体加工であり、面の種類、その方向性に依存して加工面粗さは一様とはならない。しかし、測定作業において個々の要素形状またはあるしきい値内でその近似形状が解析されればその形状情報を基に工具形状(平面であればフラットエンドミル、フェースミルなど)、工具径、工具経路の加工条件を要素形状単位に選択でき、高精度、高能率な加工が可能となる。すなわち、形状の持つ特徴に応じた加工情報の生成が可能になる。

本論文では加工を目的とした模型形状の測定法について提案し、その手法、データ構造について論ずる。その特徴を以下に示す。(1) 模型面を直接測定するため著者が独自で開発した非接触距離センサを用いている。(2) 測定方法は粗ピッチから細ピッチ測定へと

* 原稿受付 平成 2 年 9 月 6 日。1989 年度精密工学会春季大会学術講演会(平成元年 3 月 24 日)にて発表

** 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 キヤノン(株)(東京都大田区下丸子 3-30-2)

Fig. 1 Flow of die making according to model types

段階的に行い、その過程で測定領域を形状急変部に限定する階層処理を採用している。(3) 測定データは $X-Y$ 空間で格子状に分割するパッチを単位とした面情報であり、そのデータ構造に4分木法を採用している。(4) 加工を意識した模型形状の測定におけるデータ構造として測定点から構成される格子面データとその面データのグループ化により表現する要素形状データをもつ。

2. 本研究の基本構想

モデル形状生成過程の違いによる加工処理の流れを3種類に分類し図1に示す。

(1) CAD/CAM を基にした加工処理 (白矢印)

模型形状が解析形状で構成され図面などで与えられている。要素形状が既知であるためその特徴に応じた加工情報生成が可能となる。

(2) 倣い加工処理 (斜線矢印)

前述の通り、加工条件に柔軟性が無い。

(3) 本論文で目指す加工処理 (黒矢印)

模型形状は実体で与えられ、その測定データを基に形状解析を行うことにより模型形状を解析形状の集合体として近似表現する。それにより加工情報は解析形状と測定データの両情報を基に生成することが可能となる。本論文において自由曲面は2次曲面の近似曲面として取り扱う。

図2は、非接触レーザ距離センサを用いた模型形状の形状測定によって金型を

効率的にしかも高精度に加工することを目的としたシステムの基本構想図である。本システムは大きく測定システム、形状解析システム、加工システムの3つのシステムとデータベースから構成されている。

1) 測定システムは

① 模型形状測定システム

複合形状である模型を非接触ディジタルセンサを使用した階層型測定手法により形状急変部領域を抽出し要素形状への分離を行うものである。

② 素材形状測定システム

金属面である素材の測定を行い、模型形状とのベストフィット操作の後、余肉量算出を行うものである。

③ 加工物形状測定システム

加工物形状の測定を行い、模型形状との形状比較から後加工工程のための形状誤差マップを作成するものである。

2) 形状解析システムは模型形状測定システムからの形状要素データを用いて平面、2次曲面への当てはめから最適な近似曲面を作成し、その一般式の係数を記憶する。

3) 加工システムは蓄積された加工ノウハウと測定システムから得られた余肉量を参照して高効率な粗加工用 NC 情報の作成、さらに形状解析結果を基に個々の要素形状の特徴を考慮した仕上加工用 NC 情報の作成を行うものである。

本研究では、与えられた模型、素材に対して各形状上の任意の位置座標を測定可能な柔軟なディジタルセンサシステムとして非接触式を採用した。

Fig. 2 Concept of proposed machining system

Fig. 3 Non-contact digitizing sensor

Fig. 4 Master model as composite surface

3. 非接触3-Dディジタイジングセンサ

本ディジタイジングシステムで使用しているレーザを用いた非接触3-Dディジタイジングセンサを図3に示す。センサはマシニングセンタの主軸に取り付けられ被測定物体とのZ軸方向の距離を測定するものであり、マシニングセンタからのX, Y, Z軸座標値とその距離情報により物体上の座標値を算出する。このため、測定可能な被測定物体はZ方向に対して1価の形状に限定される。その測定性能、原理は別報²⁾で報告済みである。このセンサを用いることにより模型形状上の位置座標をプローブ径補正なしで直接測定することができ、模型形状を高速に点群データへ変換することが可能である。

4. 階層型ディジタイジングシステムの基本的な考え方

一般に模型形状は図4に示すように自由曲面を含む要素形状の集合体である。要素形状は境界線で囲まれる面により定義されている。ディジタイジングシステムを基に模型形状を加工する場合においてもその工具経路生成は個々の要素形状の特徴を考慮して生成することが望ましくその加工単位は面要素であると言え

Fig. 5 Concept of hierarchical measurement

る。すなわち、測定データを基に模型形状を複数の要素形状に分離し、その形状認識ができれば高能率な加工情報の生成が可能である。本論文では模型形状の要素形状分離のための測定手法として階層処理を導入した。その分離の手がかりとしてキャラクタラインを用いる。キャラクタラインは形状の特徴を示す境界部のほか、複数の要素形状間の境界部において相貫線として存在しており、一般に形状急変部として認識できる。すなわち、測定データから形状急変部の抽出が可能になれば形状分離の手がかりが得られる。

本手法は模型形状をX-Y座標空間で粗ピッチから細ピッチへと段階的に細かく測定してゆき、その測定領域を形状急変部近傍に限定する形状急変部を重視した測定法である。図5にその基本的な考え方を示す。初期ピッチをX-Y空間における最小要素形状寸法の1/2以下に設定し、その初期ピッチにより模型形状の領域全体を格子状に測定する。次にそのデータから形状急変部を判定し、ピッチ2分法により徐々に細かくし形状急変部領域のみを細測定する。測定の階層が進むにつれ細測定領域は形状急変部に限定されることになる。また、階層型測定が進行する過程で形状急変部としてのデータが消失する格子面はR付けフィレットとして推定可能である。階層型測定を採用することにより測定データは模型形状を構成する点群の一部にとどまらず、要素形状の境界線近傍を表現するデータとしての情報も有することになる。

5. 階層型測定の手順とデータ構造

形状測定において、形状の急変部に対して多量のデータを持ち、それ以外の領域は必要最小限のデータを持つような測定法が効率的である。本論文ではこの

Fig. 6 Data structure of measured data in hierarchically

Fig. 7 Procedure of hierarchical measurement

測定法に対する合理的なデータ記憶方法として4分木法によるデータ構造を採用した。X-Y空間において近接する正方4格子点で囲まれる領域を双1次曲面として扱い、ここでは格子面と呼ぶ。形状急変部においてはさらに4分割された同面として取り扱う。そのデータ構造を図6に示す。格子面データは測定された4格子点座標値アドレスへのポインタと上位、下位層の格子面データへのポインタにより構成されている。したがって、ポインタをたどることにより任意格子面データを探索することができる。

階層型測定処理の流れを図7に示す。① マスタモデルをマシニングセンタのベッドに固定し、センサを測定開始位置へ移動させる。② 測定領域、測定開始ピッチ、必要精度ピッチ、細測定領域判定しきい値、移動速度を測定初期条件として入力する。③ マシニングセンタはマスタモデル上の測定点に移動する。④ センサはX-Y空間における格子点位置でのZ座標

値を測定し、⑤ そのデータをパーソナルコンピュータへ転送する。⑥ 測定データは点座標値格納領域に入力され、⑦ 面のデータ構造部に対して4格子点座標値へのポインタが格納される。⑧ 測定データから得られた格子面データが細測定領域か否かの判定を行う。⑨ 細測定面と判定されると下位階層へのポインタとして面データ領域の最後尾アドレスが記憶され、最後尾から新たに下位階層における4格子面データ分の領域が追加され、それぞれの領域には上位の階層へのポインタが格納される。すべての細測定面に対して同様な操作を行い下位階層のデータ領域を確保する。⑩ つづいてセンサを細測定面上に移動させその面における内部格子点座標を測定し同様な処理が行われる。このため、センサは形状急変部のみを追跡して移動していく。処理は階層単位で行われ必要精度ピッチに到達するまで繰り返す。最終階層においてキャラクタラインが存在する格子面データのDown-toには-1が記憶される。これにより測定点が被測定物の形状急変部近傍に集中するようになり効率的な測定を行うことができる。

6. 細測定領域判定

本論文で提案する測定法は測定データを基に複合形状を構成する要素形状を抽出可能にすることである。このため、その形状要素間に存在する形状急変部に測定点を集中させその境界部を明確にする必要がある。その重要な役割を担うのが細測定領域判定である。その判定法に対していくつか提案され³⁾⁴⁾ており、また著者らも試行⁵⁾してきたが、測定誤差、形状特徴線の方角性等に比較的影響を受けない判定法として面の傾きの変化量を評価値として判定する方法を採用した。前述の格子面データを単位にその面の周囲の面に対する傾きの変化量を調べる。図8に細測定領域判定法を示す。判定は2段階で行われる。第1段階は判定対象となる格子面を境界として隣接する格子面が不連続に接続する領域に対する評価であり、対象面近傍を調査することにより判定を行う。対象面の周囲4平面における面法線ベクトル(N1~N4)のそれぞれの開き角 θ を調べ、細測定領域判定しきい値を越えるものがあればその段階で細測定面の対象となり面データ構造部に登録される。第2段階は対象面内に段差などの複数の不連続部が存在する場合の評価であり、対象面自身の状態を調査する。面内部の4隅の点座標値から4平面を想定しその面法線ベクトル(N5~N8)を含めて同様な判定を行う。面法線ベクトルは自点から隣接点へ向かう2つのベクトルの外積計算から求める。ま

Fig. 8 Judgement for boundary of surface element

Fig. 9 Grouping of lattice patches

た、粗ピッチ測定時の面法線ベクトルの開き角は実開き角より小さくなる傾向がある。そのため、それを考慮したしきい値を階層単位に設定する。

7. 面データのグループ化の方法とデータ構造

測定空間における被測定形状は階層化された格子面データの集合体として実現されている。このデータを基に複合曲面を構成する要素形状を分離することは階層化された格子面を形状急変部を境界としてグループ化することと同等である。図 9 に 3 階層までの測定空間において、その測定データを基にした格子面のグループ化の手順を示す。グループ化の処理は階層単位に行われ上位から下位へ進む。グループ化の手がかりとなるキャラクタラインは最下位層における格子面の

Face No.	Patch Nos.
I	$P_i(1, 2, 3, \dots)$
J	$P_j(1, 2, 3, \dots)$
:	
N	$P_n(1, 2, 3, \dots)$

Fig. 10 Data structure of surface element

Fig. 11 Master model composed analytical surfaces

状態を調査することで認識できる。すなわち、最下位層の格子面データの Down-to の値が -1 を有する格子面（黒色）にキャラクタラインが存在している（図 9 (a)）。上位階層において、キャラクタラインの存在している格子面を包含する面（斜線）を抽出し、その面に接し細測定面を持たない面は要素形状面と考えることができるため探索開始面とする。探索開始面から近接面への追跡調査を始め形状急変部面に囲まれるすべての面（交差線）を抽出しその面番号を要素形状データ格納領域に格納する。続いて、下位の階層において同処理を繰り返す。この際、追跡は 4 分木構造における探索木をたどり上位の階層の面データを参照しながら行うことになり上位面が要素形状面であれば格納領域に記憶する。この操作をすべての階層の格子面に対して施すことにより要素形状に対する格子面のグループ化を行うことができる。模型形状の構成する要素形状データはその番号とグループ化された格子面群の番号を持つ。そのデータ構造を図 10 に示す。

8. 実験

実際に球面、2 平面、2 円筒面、円すい面、三角すいを含む複合形状を NC 工作機械により加工を行い、それを模型形状として実験を行った。各階層において形状急変部判定しきい値として面法線の開き角 30° 、測定ピッチ 4 mm、2 mm、1 mm の 3 階層までをデジタイジングし、その要素形状のグループ化を行った。図 11 に解析面の模型形状を、図 12 に加工した実際のモデルを示す。図 13 に階層化処理された測

Fig. 12 Master model

Fig. 13 Measuring data in hierarchical space

定データを示す。平面 1, 2 間での形状急変部判定が不十分であるが、測定点が形状要素間の形状急変部近傍に集中していること、また要素形状が形状急変部のループにより包閉されていることが確認できる。

また、図 14 に形状の分離図を示す。形状急変部判定が正常に機能している領域においては良好な形状分離が行われているのが確認できる。さらに、測定データ量は通常の必要精度ピッチで測定する場合に比較して総測定点数で 23%、総格子面データを加算した量においても 52% 程度に減少した。

9. 結 論

測定データから個々の形状要素へ分離することを目的にディジタイジングシステムの開発を行い以下に示すことを明らかにし、提案した。

Fig. 14 Detection of surface element

- (1) 測定データから形状分離の手法に対し、形状急変部抽出の必要性を明らかにし形状急変部のみを集散的に測定する階層型ディジタイジングシステムを提案した。
- (2) 形状急変部を抽出する手法として周囲の格子における面法線ベクトルの開き角をしきい値とする評価法を提案し、その有効性を確認した。
- (3) 測定データから形状急変部を探索、追跡することにより形状分離を可能とする手法を明らかにした。
- (4) 実験により要素形状数 7 の複合曲面を階層型ディジタイジングデータ処理を行い本手法の有効性を確認した。

参 考 文 献

- 1) 奥田長三: TRC 800 金型加工トータルシステム, 機械と工具, (1987. 3) 42.
- 2) 三好隆志ほか: 非接触 3-D ディ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.
- 3) R. Hoffman & A. K. Jain: Segmentation and Classification of Range Image, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9, 5, (1987) 608.
- 4) B. C. Vemuri, A. Mitche & J. K. Aggarwal: Curvature-based Representation of Object from Range Data, Image and Vision Computing, 4, 2, (1986) 107.
- 5) 難波則広ほか: 非接触ディジタイジングデータに基づく形状急変部の抽出法に関する研究, 精密工学会北海道大会講演論文集, (1989) 55.