拡張 Z-map モデルによる測定支援 システムの開発*

——データ構造とプリミティブ測定——

郝 明 暉** 水 垣 善 夫*** 坂 本 正 史***

A Computer Aided Testing System Based on Enhanced Z-map Modeling Method
—Data Structure and Measuring for Primitive Shapes—

Minghui HAO, Yoshio MIZUGAKI and Masafumi SAKAMOTO

This paper presents a new hierarchical lattice space model and a new coordinate measuring support system with a graphic interface based on the model. The 2.5-dimensional model, named Enhanced Z-map model, has a tree structure of component patches such as a Quadtree model and its depth-ended terminal patches represented in the form of Z-map model as a set of z coordinate value of a point according to an X-Y lattice point. The model structure has a theoretical capability to represent a free-form surface by any fine patch unit. The measuring support system has functions to determine the points to be measured on a designed shape and to make a collision-free measuring path by means of the Inverse Offset method. The system configuration inclusive of a 3-dimensional coordinate measuring machine is illustrated and the procedures of supporting functions are explained too. The experimental results of model handling support the promising efficiency of memory compression and the fast processing speed compared with that in a Z-map model. Through the measuring experiments in primitive shapes, it is concluded that the operability to command instructions is improved with the use of a graphic interface based on the model.

Key words: Computer Aided Testing system, hierarchical lattice space model, measuring path generation, graphic man-machine interface, Inverse Offset method, collision avoidance

1. は じ め に

近年、複雑な形状を有する金型を高能率、高精度で定・検査するために、三次元測定機を用いた金型用ATシステムの開発・研究が急速に進みつつある。そのようなシステムを開発する場合、測定物の形状をかにコンピュータ内にモデリングするかが、システムにとって、最も基本的かつ重要である。そのモデリング方法の良否により、システムの機能、操作性、測測ノウハウの組み込み等のほか、システムの拡張性まで強く影響される。データ構造が単純な格子空間モデル（例えばZ-mapモデル¹⁾）やDecompositionモデル（例えばオクトツリー²⁾）は、基本演算、処理が簡である反面、形状表現能力やメモリー利用には制約

がある。ソリッドモデルには高い形状表現能力を有する反面、データ構造が複雑で演算コストもかかるなどの問題がある。そこで、格子空間モデルに階層性を導入する試み³⁾も行われているが、ポイント管理に起因する分解精度の制限や面形状情報の扱いに制約が残されている。従って、メモリーの節約、処理効率の向上、形状情報の有効利用及び要求する各項目の生成などを考慮して、新たな製品モデルを開発し、測定の自動化を進めることが重要な研究課題となっている。

そこで筆者らはZ-mapデータ構造と階層データ構造の融合を基本的な考え方として、両方式の特徴を生かし、形状分類情報を付加した拡張Z-mapデータ構造⁴⁾の概念を提案している。更に、拡張Z-mapデータ構造を核とし、測定物の形状をプリミティブに限定した上で、金型用測定支援システムの開発を行った。

本文は主に、以下に示した点について報告する。

(1) 拡張Z-mapデータ構造の概念、特徴、及びそれによる三次元形状の表現

* 原稿受付 平成3年7月20日

** 学生会員 九州工業大学工学部（北九州市戸畑区仙水町1-1）

*** 正 会 員 九州工業大学工学部

Fig. 1 Z-map model

Fig. 2 Quadtree model

- (2) グラフィック表示のマシ・マシンインタフェースと測定作業のノウハウを組み込んだ測定支援システムの開発

2. 拡張 Z-map モデル

2.1 概 念

従来の Z-map とは、図 1 に示すように、2.5 次元の形状 $Z=Z(x, y)$ の定義域 (X, Y) を一定間隔 dx, dy でサンプル化し、各格子点の Z 値を配列 $Z\text{-map}[m][n]$ に記憶させる方法である。この方法は定義域内の形状を一つの配列で表現するので、データ構造が単純で、要求するデータ（主に要求する点の座標値）の抽出などの処理に優れている。しかし、この方法では決めた定義域内の dx, dy が定数でなければならない（異なる精度のデータは一つの配列に共存できない）ので、高精度な形状表現を実現するには、膨大なメモリー空間が必要であり、処理時間の増大も問題となる。

階層データ構造は Decomposition モデルのデータ構造であり、図 2 のクワッドツリーのように任意の分解能で形状を表現し得る。しかし、各最終ツリーにある情報が一点の座標値しかないので、要求する情報を抽出するための処理時間の節約や形状特徴の利用などがしにくい。

拡張 Z-map データ構造は、以上の 2 種類のデータ構造を融合し、それぞれの特徴を生かして開発したモデリング方式である。図 3 に拡張 Z-map データ構造の概念、及びメモリー上のイメージを示す。

すなわち、従来の Z-map データ構造に階層性を導入する。定義域内の形状の表現、特徴及び階層管理を

Fig. 3 Enhanced Z-map model

考慮した上で、メモリー上で 3 種類のデータ領域を設けている。各領域の定義については次のとおりである。

(1) 細分領域 (Divided area)

2×2 のポインタ配列であり、これにより次の階層にある 4 つの領域の先頭ポインタを管理する。図 3 (b) に示したように、データの階層管理はこの細分領域の繰返しにより実現される。

(2) Z-map 領域 (Z-map area)

図 1 の Z-map データ構造と同じである。ただし、そのサンプル格子点の数が定数である。一方、 k 層目にある Z-map 領域内のピッチ dx_k, dy_k は次の式より与える。

$$\begin{cases} dx_k = dx_1 / 2^{k-1} \\ dy_k = dy_1 / 2^{k-1} \end{cases}$$

dx_1, dy_1 : ピッチの初期値である。

(3) 平面領域 (Flat plane area)

3 次元形状内の平面部分（斜面を含む）を平面領域として取り扱う。定義域は $X-Y$ 平面上の四角形領域である。その 4 頂点の Z 座標値をデータとして持つ。

更に、Z-map 領域と平面領域内の形状の特徴データとして、その最大、最小 Z 値を持たせてある。

この 3 種類のデータ領域は構造が異なっているので、区別しなければならない。また効率よく測定作業を行うために、熟練者のノウハウを利用して、測定対象の形状特徴に応じた測定点数を選定し、測定点を決めるのが望ましい。これらの問題に対処するため、各領域の先頭にある Type を認識ラベルとして利用する。図 4 には Type のフォーマットを示している。

4 バイトの値に対し、上位の 2 バイトを合成曲面に

Fig. 4 Format type

Fig. 5 Flowchart of model transformation

おける同種のプリミティブの番号とする。下位の 2 バイトの値はプリミティブの種類及び各領域の種類を意味している。各プリミティブの種類値は平面：100，円柱面：400，円すい面：500，球面：600 等である。また，2 枚以上のプリミティブの点を有する Z-map 領域を境界面とし，その Type 値を 300 とする。細分領域の Type 値は 200 である。Type の下位 2 バイトの値が 100，200，それとも 200 以上であるかにより，平面，細分及び Z-map 領域を区別できる。これらの Type 値は CAD システムで形状を設計する際，プリミティブごとに設定する。ただし，細分領域と境界面の Type 値は CAD 用モデルから拡張 Z-map モデルに変換する時，自動的に設定する。

拡張 Z-map モデルで形状を表現する際，細分回数を減らすために，まず対象物の定義域を粗く分割して，階層構造の第一層とし，ポイントにより管理する。分割した領域では拡張 Z-map 方式で表現する。

2.2 拡張 Z-map モデルの生成

図 5 は CSG タイプの CAD モデル⁵⁾から拡張 Z-map モデルへの変換フローチャートである。

システムをスタートして，まず対象物の CSG モデルを読み込む。操作者がシステムメニューに従って，

Fig. 6 An example of subdivision around boundary patches

変換条件を設定する。この変換条件については，X-Y 平面の最大ピッチ（ピッチの初期値），最小ピッチの設定のほか，形状精度や形状特徴の要求に応じた細分条件の設定などが必要である。CSG から拡張 Z-map へのモデル変換は法線ベクトルアルゴリズム⁵⁾に基づき行っている。本システムではモデル変換に関し，次の細分条件を選択できるようになっている。

- (1) 指定された形状 (Type 値) のサンプルピッチがあるしきい値を超えると細分する。この条件によりプリミティブごとに細分できるのみでなく，各プリミティブの境界部分もより細かく取り出せる。
- (2) 指定された形状 (Type 値) に対し，その形状領域 (Z-map 領域と平面領域) 内の最大，最小 Z 値の差及びサンプルピッチがあるしきい値を超えると細分する。これにより，Z 値が急速に変化するところ（例えば抜き勾配の高い部分）もより高精度に表現できる。
- (3) 自由指定方式。条件 (1) と (2) の補助として，マン・マシン方式を用い，操作者が対象物の X-Y 平面の上で，細分領域と最小ピッチを自由に決めることができる。

モデル変換で求められた各点がどんな形状に所属するかは，CSG モデル内に定義した Type 値を参照する。各格子点に対して，Type 値を比較し，その値が変化すると，その領域を境界領域として定義する。変化しない時，その値をこの領域の Type 値として定義する。最後に，その領域の最大，最小 Z 値を求める。図 6 は球面に対して，細分条件 (1) を用い，境界部分を 1 回細分した例である。

以上のように，従来の格子空間モデル¹⁾³⁾と比べ，拡張 Z-map モデルには次のような特徴がある。

- (1) 異なる精度のデータが共存できる。メモリーの節約も期待できるようになった。また形状の表現精度は細分領域の繰返し回数にのみ依存しているので，より自由に決められる。
- (2) 3 次元の形状が各階層にある Z-map 領域ある

Fig. 7 Hardware construction

いは平面領域の集合となっており、各領域内では従来の Z-map 方式と同様に扱える。

- (3) 各形状領域 (Z-map 領域, 平面領域) 内の形状が Type 値により判別できる。各プリミティブ間の境界部分もより容易に抽出できる。

3. 測定支援システムの開発

3.1 ハードウェア構成

本システムのハードウェア構成を図 7 に示す。3次元座標測定機は、最小表示量 $0.5\ \mu\text{m}$ 、空間精度 U_3 $5\ \mu\text{m}$ 以内である。ホストコンピュータは、32 bit EWS HP-9000/330 CH を使用した。3次元座標測定機とホストコンピュータの間は GP-IB 回線で接続されている。CAD/CAM システムは当研究室で開発した金型用 CSG/CAD・CAM システムである。当測定システムとは Ethernet で接続されている。対象物の幾何モデルは、Ethernet を通じ、EWS へ送られる。このモデルは拡張 Z-map モデルに変換したのち、測定システムの核として使用される。

3.2 ソフトウェア構成

本システムのプログラミング言語は C である。図 8 にシステムのフローチャートを示す。まずシステムをスタートさせて、測定対象の形状モデルを読み込む。操作者はシステムメニューに従って、測定点を指示する。システムが指定された測定点に対し、干渉チェックを行う。測定可能な点に対して、測定パスを生成し、測定作業を行う。最後は測定結果の処理である。

測定点や、測定パスの決定、また測定シミュレーションを行うのに、測定対象の形状を把握する必要がある。そのため、本システムでは、拡張 Z-map データを用いて、シェーディング処理を施した Paint 法 (2, 3 次元) 及びワイヤフレーム法 (3 次元) により、測定対象のグラフィック表示を行っている。

3.3 測定点の選定

Fig. 8 Flowchart of measuring procedures with use of Enhanced Z-map model

Fig. 9 Determination of patches and their inside points to be measured

測定点及び測定パターンの決定は操作者のノウハウに強く依存しており、自動化が遅れている。拡張 Z-map の場合、各 Z-map あるいは平面領域ごとに形状認識のデータ (Type 値)、領域内最大・最小 Z 値などの情報を持っているため、これらの情報の組合せにより、測定点の自動選定が容易になっている。

まず、操作者がマウスを用い、測定対象の平面画像でプリミティブ (Type 値) を指定する。続いて、システムメニューに従い、キーボードから各領域内の測定パターン及び最大と最小 Z 値の差のしきい値を与える。図 9 に示すように、指定されたプリミティブに対して、システムがその Z 値の最大 (最小) 領域を抽出する。その領域から、8つの方向に沿って、形状境界に最も近い、合わせて最大 9つの領域 (あるいは最大、最小 Z 値の差がしきい値を超える領域) を自動的に抽出する。各領域内の測定パターンについては X-Y 空間を平均的に覆えるように 3, 5, 9 点とした。なお、測定領域の抽出、測定パターンの決定はマニュアル操作でも可能である。更に、対象物の形状がプリ

Fig. 10 Interference check

ミティブの複合曲面の場合、以上の操作をプリミティブごとに行う。

3.4 干渉チェック

プローブによる接触測定の場合、プローブが測定物と接触したか否かを主にプローブに付けているセンサの変形・変位の大きさにより判断する。その変形・変位があるしきい値を超えると接触と判断する。従って、測定精度を保证するために、測定中測定表面に沿うプローブの滑りを避けなければならない。本システムでは測定中プローブの移動方向を図 10 (a) のように測定点での法線方向とした。P_T (Target Point) での法線ベクトル $\vec{V}$ は P_T の周囲 4 点による接線ベクトルの外積で算出される。更に 3 次元座標測定機の測定コマンドの要求に応じて、 $\vec{V}$ に沿って P_T の両側に一定距離 (プローブ半径 r より大きい) で P_A (Approach Point) と P_R (Reference Point) を取る。この 2 点によって測定プローブ中心の移動方向と最大移動範囲を指定する。測定モードに入る前にプローブと測定表面との接触を避けるために、測定モード開始点 P_A の下限を P₁ とし、上限を P₂ とする、距離 $|P_1P_1|$ と $|P_1P_2|$ は対象物の加工誤差や形状によって異なるが、本研究では、すべての測定点に対し、 $|P_1P_1|$ 、 $|P_1P_2|$ を定数とし、その値をオペレータにより与える。P_A の位置はプローブの干渉チェックにより決定される。

プローブを移動する途中、測定点以外の表面との接触を避けるために、本システムでは、あらかじめ拡張 Z-map データ構造を持つ逆オフセット面 (以下ではオフセット面と略称する) を生成し、それを利用して干渉チェックを行う。オフセット面の生成方法は、まず形状の拡張 Z-map モデルに基づき、各格子点の Z 座標値 + プローブ半径 r をオフセット面の Z 値の初期値とする。次に従来の逆オフセット法³⁾を用い、各領域の形状情報を利用しながら、領域ごとに処理を行

う。なお、平面領域では以上の処理を省略できるため、処理時間は大幅に短縮する。

プローブの干渉には、主に 2 種類の場合がある。

- (1) プローブが測定開始点から測定点までの移動途中に測定点以外の部分と接触する。
- (2) プローブがある測定開始点から次の測定開始点へ移動する途中、他の部分と

衝突する。

第一種の干渉に関して、図 10 (a) のようにチェックする。法線ベクトル $\vec{V}$ に沿って、プローブ中心 P を P₁ から P₂ へ移動しながら、P と P₀ の Z 値 Z_p, Z₀ を算出する。Z_p > Z₀ なら干渉しないとみなす。最後に、区間 [P₁, P₂] 内に干渉が起きず、 $|P_1P|$ が最大となる P を測定開始点 P_A とする。以上の条件が満足できなければ、測定不能と判断する。

図 10 (b) に第二の干渉チェック法を示す。まず測定開始点 P_{A1} から P_{A2} まで直線的に、オフセット面の最大高さ Z_{max} を走査する。Z_{max} に一定高さを加え、両測定経過点 P_{N1}, P_{N2} の Z 座標値とする。各測定経過点の X, Y 座標値をそれぞれの測定開始点と同じにする。特に、測定点同士が異なる領域にある場合、異なる領域間最大 Z 値の走査を省くため、全オフセット面の最大 Z 座標値を測定経過点の Z 座標値とする。

3.5 測定パスの生成

測定時間の短縮と処理時間の節約を考慮すると、各測定点を最短一巡経路で結ぶことが望ましい。しかし従来の方法では、抽出された測定点に対し、最短一巡経路を計算する等の処理時間が、測定点数の増加につれて急速に増えるという問題点があった。

本システムでは 3.3 節に述べた測定点抽出の方法に応じて、各測定領域を結ぶ最短一巡経路の算出と各領域内のパターンの最短一巡経路の算出の 2 段階に分けて、測定パスを求める。

このような方法で算出された測定パスは最短とは言えないが、測定領域数・測定点数の増加につれて最短経路に近付くことは明らかである。この方法により計算量ははるかに減少し、処理時間の節約が期待できる。

測定データの後処理に関する利便性を考慮し、以上の方法で抽出された測定点、測定パス及び測定値など

Fig. 11 An experimental measurement model with subdivided boundary patches

Fig. 12 Distribution and location of measured paths on the experimental model

Fig. 13 The simulation of measuring path

のデータはプリミティブ、測定領域ごとに保存している。

4. 実験結果

本システムでは測定作業を行う前、操作者がまず手動方式で金型の基準面を測定する。形状モデルの座標系と3次元測定機の機械座標系との変換行列を求めた後、測定パスを3次元測定機の機械座標系へ変換し、測定作業を行った。実測した対象物の形状は図11に示すように2枚の円柱面と1枚の球面からなり、境界部分が1回細分されている。図12は測定点抽出の一例である。その測定パスのシミュレーションを図13に示す。表1には測定値の一部を示している。

上記の形状を用いて、本システムと従来のZ-mapモデル¹⁾を用いたシステムとを比較した。その結果を表2に示す。表から分かるように、本システムの方がメモリの有効利用、処理時間の短縮などの面で優れている。

5. 終わりに

2.5次元の格子空間モデル(Z-map)に階層性と形状認識データを組み込んだ新しいモデル(拡張Z-map)を提案した。拡張Z-mapモデルをCATシステムに組み込むことにより、以下の成果を得た。

(1) 拡張Z-mapモデルでは、単一部品の形状表現

Table 1 Measured results

Surface (number, indicator)	Measured coordinates mm		
	X	Y	Z
Column surface 1 (1 000, 400)	36.171	11.369	13.150
	49.996	23.608	20.002
	64.962	12.622	15.055
Column surface 2 (2 000, 400)	64.877	76.609	14.988
	49.995	87.616	19.812
	34.847	78.936	11.200
Spherical surface 1 (1 000, 600)	50.360	32.102	22.973
	48.046	47.965	29.612
	24.922	49.482	13.926

Table 2 Comparison of system efficiency

	Enhanced Z-map	Z-map	
X-Y resolution mm	0.2	0.4	0.4
Data amount byte	138 538	76 394	128 034
3 D Graphic Display s	368	233	505
Offset generation s	203	45	113

において異なる精度で部分形状を表現できる。この特徴により、加工物の要求測定精度に応じて、形状の細分化が可能となり、メモリの節約も可能となった。

- (2) 形状認識データを組み込んだことにより、形状分類、境界の抽出及びプリミティブごとの形状細分化等、形状に依存する諸処理を容易に実現できた。
- (3) 各形状領域(Z-map, 平面領域)はZ座標値及び形状認識データ(Type値)のほか、最大・最小高さなどの形状特徴量も保持している。これらの情報を利用して、測定点の決定が容易となった。
- (4) 拡張Z-mapモデルを核として開発した測定支援システムの操作性がよくなり、処理時間も短縮できるようになった。

参考文献

- 1) 糸瀬和彦, 坂本正史, 水垣善夫: 三次元測定機による自動測定に関する研究, 昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1989) 321.
- 2) D. Meagher: Geometric Modeling Using Octree Encoding, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 19, (June 1982) 129.
- 3) 近藤 司, 岸浪建史, 齊藤勝政: 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.
- 4) 郝 明暉, 水垣善夫, 坂本正史: CATシステム用幾何モデルの開発, 精密工学会長崎地方講演論文集, (1990) 67.
- 5) 原田英治, 浅尾晃通, 水垣善夫, 坂本正史: オンザマシン測定システムの開発(第一報), 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 1185.