



Region Growing/Merging を用いた 効率的なメッシュセグメンテーション*

溝 口 知 広** 伊 達 宏 昭*** 金 井 理***

Efficient Mesh Segmentation base on Region Growing and Merging

Tomohiro MIZOGUCHI, Hiroaki DATE and Satoshi KANAI

To effectively use scanned meshes obtained by 3D laser scanner or X-ray CT scanning systems in engineering applications, such as inspection and CAD model reconstruction, we need to segment meshes and extract desirable regions and their approximating surfaces. Surfaces of engineering objects are commonly represented by a set of analytic surfaces, such as planes, cylinders, spheres, cones. Therefore, the mesh surface of them needs to be approximated by a set of analytic surfaces. In this paper we propose an efficient mesh segmentation algorithm based on region growing and region merging. Our algorithm first robustly and accurately estimates mesh principal curvatures using the two-pass estimation method. Then it fast extracts regions and their approximating analytic surfaces based on region growing even if regions are smoothly blended. Finally it efficiently merges initial set of regions of large and complex scanned meshes under the user specified tolerances using region merging. We demonstrate the efficiency and accuracy of our algorithm with scanned meshes acquired from real engineering objects by X-ray CT scanning systems.

Key words: X-ray CT scanning systems, mesh segmentation, reverse engineering

1. 緒 言

3次元レーザ測定器は様々な製品開発の分野で、実物からの測定点群データ取得のために幅広く利用されている。また近年、高エネルギーX線CT測定器の普及により、複雑な内部構造を持つ機械部品からも容易に3次元画像データを入手することが可能となった¹⁾。これらの測定データは三角形メッシュに変換された後、デジタルエンジニアリングで利用されることが一般的である。

この測定から得られたメッシュを、検査、CADモデル再構築、CAE等で有効に活用するには、アプリケーションに応じて、メッシュから、ユーザの要求するメッシュ上の部分領域とそれらを近似する曲面パラメータを抽出する処理（セグメンテーション）が必要となる。測定対象が機械部品の場合、その表面は主に解析曲面（平面、円筒面、球面、円錐面）で構成されることが多く、その測定メッシュからは、ある特定の解析曲面で近似される部分領域と、その解析曲面定義のための曲面パラメータを抽出することが求められる。またこのセグメンテーションは実用的な観点から、以下の4つの要件を満たすことが望ましい。

- (1) 複雑形状の機械部品の測定メッシュは数百の曲面領域を持つため、領域抽出のための対話的な入力操作が少ないとこと
- (2) 測定メッシュは数百万面以上の大規模なものとなるため、できるだけ短時間で処理できること
- (3) ユーザが定義する誤差閾値を満たし、かつ、できるだけ少ない数の領域へメッシュ表面をセグメンテーションできること
- (4) 測定誤差が含まれるメッシュからでも、後の処理に支障のない適切な領域境界を頑健に抽出できること

1.1 関連研究

メッシュセグメンテーションに関しては、これまでに多くの手法が提案されている。

CGの分野では、グラフカットに基づくセグメンテーション手法²⁾³⁾が提案されているが、これらは人体形状などのメッシュを、凹領域を手がかりに、腕や足などの部分メッシュに分割することを目的としており、解析曲面境界での分割が必要となる機械部品表面のセグメンテーションには適用が難しい。

Manganら⁴⁾は、画像のセグメンテーション手法であるWatershedアルゴリズムを拡張し、3次元メッシュへ応用する手法を提案した。しかしこの手法では、例えば2つの平面が交わるような、メッシュ上のシャープなエッジは抽出できるが、機械部品では一般的な平面と円筒面が接続されている部分のような、滑らかな境界が抽出できないといった問題がある。

Benkóら⁵⁾は、CADモデル再構築のための対話的なセグメンテーション手法を提案した。この手法では、メッシュ上から解析曲面、線形押し出し面、回転面の抽出が可能である。しかしこの手法では、1領域の抽出毎に1回の閾値入力作業を必要とするため、領域数の多い複雑形状の機械部品を対象とした場合、作業時間の観点から適用が難しい。

Vieiraら⁶⁾は、測定メッシュのセグメンテーションのためのリージョングローイング法を提案した。この手法ではまず、メッシュの曲率を算出し、本来の曲面上に乗っていると推定される少ない数の頂点集合からなるシード領域を生成する。次に、自由曲面のフィッティングとシード領域への近傍頂点追加を反復的に行うことで、最終領域とそれにフィットする曲面を抽出する。しかしこの手法では、自由曲面で近似される領域の抽出のみしか取り扱っていない。また、Fitzgibbonら⁷⁾は、このリージョングローイング法を利用し、レンジデータから解析曲面を抽出するアルゴリズムを提案した。しかしこれらの手法では、算出した曲率値に対する閾値処理によりシード領域を生成しており、スケール依存性のあ

* 原稿受付 平成19年10月25日

** 学生会員 北海道大学大学院情報科学研究科（札幌市北区北14条西9丁目）

*** 正会員 北海道大学大学院情報科学研究科（同上）

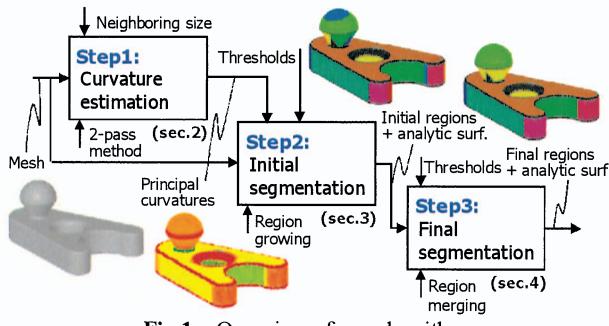


Fig.1 Overview of our algorithm

る曲率値に対して、適切なセグメンテーションが可能な1つの閾値をユーザが設定することは、自由曲面、解析曲面の如何を問わず、多くの領域を含む複雑形状に対する処理では困難となる。

矢敷ら⁸⁾は、このリージョングローイングを利用して、ユーザが抽出したい領域毎に、シード点とその領域の解析曲面種類を対話的に入力することで、測定メッシュから解析曲面を抽出する手法を提案した。しかしこの手法でも、領域数の多い複雑形状に対しては長い作業時間が必要となる。

Wuら⁹⁾はk-meansクラスタリングに基づいた手法で、メッシュから平面、円筒面、球面、ローリングブレンド面とそれらで近似される領域を抽出するアルゴリズムを提案した。またYangら¹⁰⁾は同様の手法に基づいて、平面と2次曲面とそれらで近似される領域を抽出するアルゴリズムを提案した。これらの手法では曲面による領域の近似誤差の総和を最小化することができるが、ユーザは抽出する領域数を前もって設定しなければならならず、その適切な領域数をあらかじめ指定することは極めて困難である。

Djebaliら¹¹⁾は、ユーザが指定した閾値以内で領域を局所的に統合することでフィッティング誤差の総和を最小に近づける、準最適セグメンテーション手法を提案した。しかしこのアルゴリズムでも、領域統合のために多くの曲面フィッティングを繰り返すため、大規模で複雑な形状に対しては長い計算時間を要する。

1.2 提案アルゴリズムの概要

以上より、先に述べた4つの要件すべてを満たすセグメンテーション手法は現状では存在しないと言える。そこで本研究では、これらの要件を満たす、解析曲面抽出のためのリージョングローイングとリージョンマージングに基づく効率的なメッシュセグメンテーション手法を提案する。本手法は図1に示す通り、以下の3つのステップから構成される。

まず、局所2次多項式曲面フィッティングの反復に基づき、メッシュ頂点の主曲率を計算する(step1)。この手法では、従来の手法ではその算出誤差が大きくなりやすかった、例えば2平面が交差するようなシャープエッジ付近にある頂点も含めて、高精度かつ測定ノイズに対してロバストに主曲率を計算できる。

次に、算出した主曲率を基に初期セグメンテーションを行う(step2)。まず各頂点の主曲率を解析し、本来の曲面間の境界ではなく曲面上に乗っていると推定される小さな数の連結頂点集合からなるシード領域を生成する。次に、2次多項式曲面と2次曲面を併用したリージョングローイングを用いて、領域への曲面フィッティングとシード領域への近傍頂点追加を反復的に行い、メッシュ上の部分領域とそれを近似する解析曲面を抽出する。リージョングローイングを利用してすることで、曲面が滑らかに接続されている場合でも、適切にそれぞれの曲面を抽出することができる。

最後に、Djebaliらの手法¹¹⁾を改良したリージョンマージングを用いて、ユーザが指定した閾値内で、領域数をできるだけ減少す

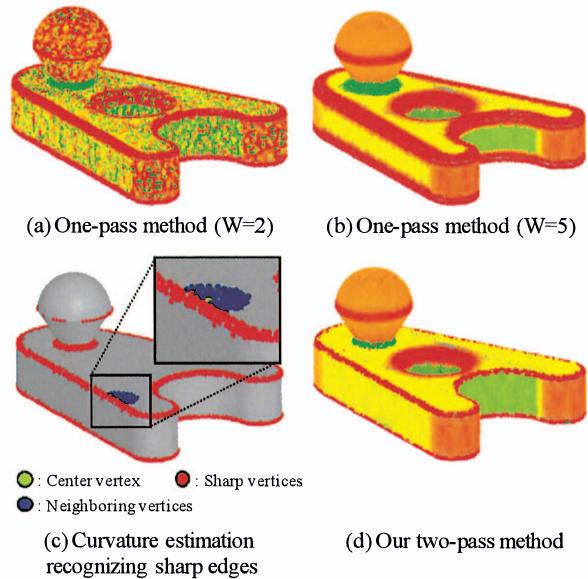


Fig.2 2-pass curvature estimation method (In these figures, maximum principal curvatures are visualized)

るよう効率的に初期領域を統合する(step3)。本手法では、領域間の接続の滑らかさを評価し、また、隣接領域の曲面種類を比較することで、統合の候補となる領域ペア数を減らし、計算コストを削減する。また、頂点数の大きな領域ほど曲面フィッティング精度が高いはずであるといった仮定から、領域統合における曲面フィッティングの回数を減らすことでも、計算コストを削減する。

なお本研究では、X線CTデータから、広く用いられているマーチングキューブ法で生成された、三角形サイズや稜線長がほぼ一定であるメッシュを主な対象とする。

以下本論文では、第2章でメッシュ主曲率算出手法(step1)について、第3章でリージョングローイングを用いた初期セグメンテーション(step2)について、第4章でリージョンマージングを用いた最終セグメンテーション(step3)について、また、第5章で曲面フィッティングと誤差評価について述べる。第6章で提案手法の検証、実験結果、および考察を述べ、最後に7章で結論と今後の課題について述べる。

2. シャープエッジを考慮したメッシュ主曲率算出

メッシュ曲率算出に関しては、これまでに様々な手法が提案されている。ノイズを含む測定メッシュから高精度に曲率を算出するためには、各頂点の近傍に局所的に曲面をフィットして、この曲面より算出する手法が有効であることが知られている⁹⁾。本研究では、これらの手法に比べ、シャープエッジ付近の頂点においても高精度にメッシュ主曲率を算出可能な、局所的な2次多項式曲面フィッティングに基づく2パスからなる手法を提案する。以下にその手順を述べる。

2.1 局所2次多項式曲面フィッティングに基づく主曲率算出

まず、メッシュの各頂点 v_i の近傍頂点群 $N(i, W)$ に対して、式(1)の2次多項式曲面 $h(u, w)$ をフィットする。(本論文中では、 v_i は頂点名であり、その位置ベクトルを v_i で表記する。)

$$h(u, w) = a_0u^2 + a_1w^2 + a_2uw + a_3u + a_4w + a_5 \quad (1)$$

ここで、 a_0, \dots, a_5 は2次多項式曲面を定義する係数である。 $N(i, W)$ は、 v_i と位相的に接続し、式(2)で示すユークリッド距離内にある、頂点 v_j を含む連結頂点集合である。

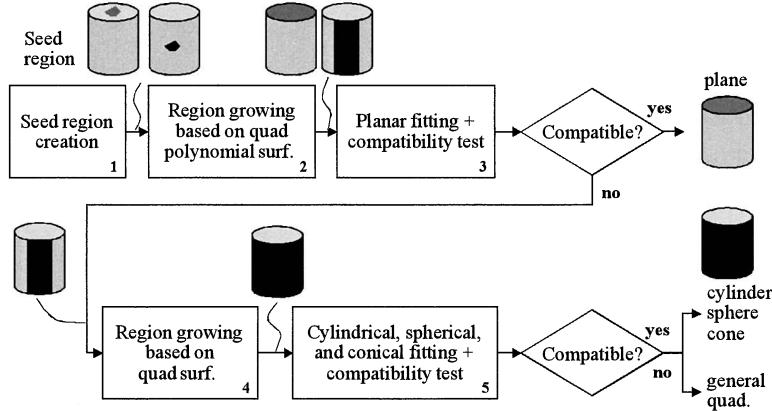


Fig.3 Proposed initial segmentation algorithm

$$N(i, W) = \{v_j \in V \mid \|v_j - v_i\| < W \cdot l_{i,avg}\} \quad (2)$$

ここで V はメッシュの全頂点集合である。 $l_{i,avg}$ は頂点 v_i に接続する稜線の平均長であり、 W は近傍サイズを決定するパラメータである。本手法では、計算コスト削減のために、測地距離ではなく、ユークリッド距離を利用する。また、メッシュの接続性を利用し、頂点 v_i から探索を再帰的に行うことで、 $N(i, W)$ を連結頂点のみで構成することができる。

この $h(u, w)$ をフィッティングするため、まず、頂点 v_i の正規化法線ベクトル \mathbf{n}_i を、 v_i に接続する 1 近傍三角形の面積で重み付けされた法線ベクトルの平均法線として計算する。次に、近傍頂点群 $N(i, W)$ を頂点 v_i の法線ベクトル \mathbf{n}_i と同じ法線を持つ任意平面上に投影し、この投影面上での各頂点 v_j のパラメータ (u_j, w_j) を、 $(u_i, w_i) = (0, 0)$ となるように計算する。ここで、この平面上での u 軸は \mathbf{n}_i に直交する任意方向ベクトルと定義し、 w 軸は、 \mathbf{n}_i と u 軸に直交するベクトルと定義する。次に、算出した (u_j, w_j) から、最小二乗法を用いて、式(1)の 2 次多項式曲面のフィッティングを行う。最後に、この曲面 $h(u, w)$ より、頂点 v_i に応する曲面上の点における主曲率 $\kappa_{i,1}$ 、 $\kappa_{i,2}$ を計算する。本手法では、2 つの主曲率の絶対値を比較し、大きな方を最大主曲率 $\kappa_{i,max}$ 、小さな方を最小主曲率 $\kappa_{i,min}$ と定義する。この曲率算出法については、Vieira らの論文⁹⁾に詳細な記述がある。

2.2 シャープエッジを考慮した 2 パス主曲率算出

測定ノイズを含むメッシュに対して、式(2)の W を小さく設定し主曲率を計算すると、図 2(a)に示すようにノイズの影響を受け適切な計算ができない。一方、パラメータ W を大きくすると、境界から離れた領域では測定ノイズの影響を受けにくく安定にメッシュ主曲率を計算できるが、図 2(b)に示すようにシャープエッジ付近での算出精度が低くなるといった問題がある。この問題を解決するため、本研究では以下に述べる 2 パスからなる主曲率算出手法を新たに提案する。

まず 1 パス目では、比較的小さな近傍頂点群 $N(i, W_1)$ に対して式(1)の 2 次多項式曲面をフィットし、最大主曲率を計算する。次に、Vieira ら⁹⁾の手法を利用して、最大主曲率 $\kappa_{i,max}$ が式(3)を満たす頂点 v_i をシャープエッジ上にあると考え、図 2(c)に示すように“シャープ頂点”，それ以外の頂点を“非シャープ頂点”と分類する。

$$\frac{1}{|\kappa_{i,max}|} < th_{sv} \cdot l_{i,avg} \quad (3)$$

ここで閾値 th_{sv} は、メッシュの形状や解像度に応じて設定する必要がある。

次に 2 パス目では、非シャープ頂点のみに対して、近傍頂点群 $N'(i, W_2)$ に曲面をフィットし主曲率を再計算する。この際には、図 2(c)に示すように、 $N(i, W_2)$ からシャープ頂点を除去し、さらに v_i と位相的に接続している頂点群のみからなる頂点集合を $N'(i, W_2)$ とする。

この 2 パス主曲率算出手法によって、図 2(d)に示すように、シャープエッジ付近の頂点も含めて測定ノイズに対してロバストかつ高精度にメッシュ主曲率を算出することができる。シャープエッジを多く含む機械部品の測定メッシュに対して、本手法は有効である。これまでの実験より、メッシュ稜線長が測定器の分解能とほぼ同等である高密度な測定メッシュに対しては、パラメータをそれぞれ $W_1 = 2.0$ 、 $W_2 = 5.0$ に設定すると、いずれのメッシュでも妥当な結果が得られている。

本手法ではさらに 2 パス目の主曲率算出後に、メッシュ頂点に対応する点の正規化法線ベクトルをフィッティングした曲面から計算し、これをメッシュ頂点の平滑法線ベクトル \mathbf{n}'_i とする。本手法ではこの \mathbf{n}'_i を解析曲面フィッティングの初期値計算(5.2 節)で利用することで、先述の \mathbf{n}_i を利用するよりも高精度な初期値計算が可能となり、収束演算が高速化できる。

3. リージョングローイングを用いた初期セグメンテーション

3.1 提案手法の概要

次に、算出した主曲率を基に、リージョングローイングを用いて初期のセグメンテーションを行う。本研究では、最終的に解析曲面(平面、円筒面、球面、円錐面)を抽出することを目的とし、まず汎用的な曲面を用いてリージョングローイングにより領域を抽出し、抽出された領域に対して解析曲面をフィットしその精度を評価することで、領域の解析曲面種類とその曲面パラメータを抽出する。

2 次多項式曲面は (u, w) の陽関数であるため、単一の平面領域を自然な形で近似することができるが、円筒面、球面、円錐面に対してはそれらを部分的にしか近似できない。一方で 2 次曲面は、円筒面、球面、円錐面を完全に表現することができるが、単一の平面領域に 2 次曲面をフィットしようとすると、単一の領域の領域に対して 2 つの平面がフィットされたり、縮退した橢円体がフィットされたりする場合がある。

上記の考察から、本手法では、リージョングローイングに 2 次多項式曲面と 2 次曲面を併用するアルゴリズムを提案する。提案手法の概要を図 3 に示し、手順の概要を以下に述べる。

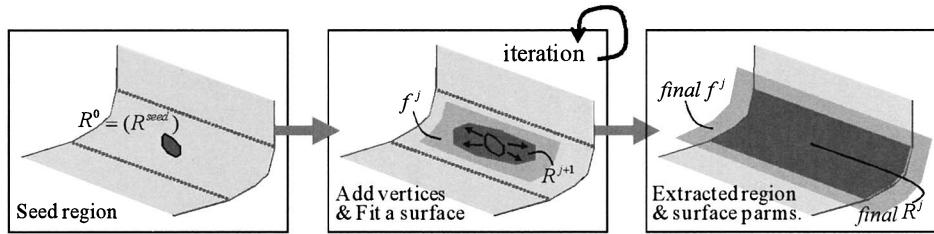


Fig.4 Overview of region growing

- (1) 頂点の最大主曲率を解析し、シード領域を生成する(3.2節).
- (2) 2次多項式曲面を用いたリージョングローイングにより、手順(1)で得られるシード領域に、追加条件を満たす近傍頂点が無くなるまで追加することでシード領域を拡大し、領域を抽出する(3.3節).
- (3) 手順(2)で抽出された領域に対して平面をフィットし、十分にフィットできていればその領域を平面領域と分類し、残りのメッシュ頂点に対して手順(1)からの処理を繰り返す。十分に近似できていなければ、手順(4)に進む(3.4節).
- (4) 手順(2)で抽出された領域をシード領域として、2次曲面を用いてさらにリージョングローイングを適用し領域を拡大し、より大きな領域を抽出する(3.3節).
- (5) 手順(4)で抽出された領域に対して、円筒面、球面、円錐面の順にフィットし、十分にフィットできる曲面が見つかった時点での領域を円筒面領域、球面領域、円錐面領域と分類する。それ以外の場合は、一般2次曲面領域とみなす。この手順が終了すると、領域に加えられていない残りのメッシュ頂点に対して手順(1)からの処理を繰り返す(3.4節).

3.2 シード領域生成

リージョングローイングアルゴリズムで適切なセグメンテーションを行うためには、抽出したい本来の曲面の境界から離れた中央部にシード領域が生成されることが望ましい。これを実現するため、以下の方法でシード領域を生成する。

まず、すべての非シャープ頂点 v_i において、近傍頂点 $v_j \in N(i, W_3)$ との最大主曲率の平均偏差 $d(i)$ を式(4)で計算する。

$$d(i) = \frac{1}{|N(i, W_3)|} \sum_{v_j \in N(i, W_3)} |\kappa_{j, \max} - \kappa_{i, \max}^{\text{avg}}| \quad (4)$$

ここで $\kappa_{i, \max}^{\text{avg}}$ は $N(i, W_3)$ 内の頂点の最大主曲率の平均値であり、 $|N(i, W_3)|$ は $N(i, W_3)$ 内の頂点数である。平面、円筒面、球面上では最大主曲率は一定であるため、この偏差 $d(i)$ は、これらの曲面間の境界に存在する頂点ではその値が大きくなり、曲面の中央部に存在する頂点では小さくなる。本手法では、すべてのメッシュに対して $W_3 = 3.0$ に設定している。

次に本手法では、いずれの領域にも属していない非シャープ頂点のうち、 $d(i)$ が最小の頂点を中心にしてシード領域を生成する。シード領域の範囲は、中心頂点 v_i の近傍非シャープ頂点群 $N(i, W_4)$ とする。本手法ではここでもすべてのメッシュに対して $W_4 = 3.0$ に設定している。ただし、領域内の頂点数が閾値 th_{seed} に満たない場合には、次のリージョングローイングステップでの曲面フィッティングの精度を保証するため、その領域はシード領域としない。本手法では、すべてのメッシュに対して $th_{seed} = 10$ に設定している。

3.3 リージョングローイング

リージョングローイングの概要を図4に示し、以下に手順を述べる。

1. 生成したシード領域 R^{seed} を初期領域 R^0 とし、これに対して初期曲面 f^0 をフィットする。 $j = 0$ とする。

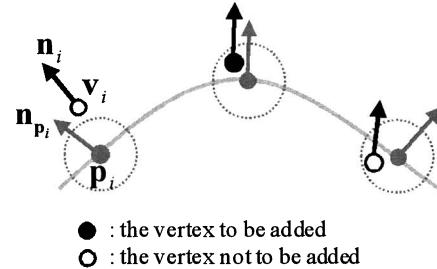


Fig.5 Vertex adding rules

2. R^{seed} と位相的に接続し、なおかついずれの領域にも属していない頂点 v_i の曲面 f^j との位置誤差、法線方向誤差(以下、方向誤差)を計算し、これが式(5)、(6)の頂点追加条件を満たせば逐次的に R^{seed} に追加する。この処理を、それ以上頂点が追加されなくなった時点で終了し、拡大された領域 R^{j+1} を抽出する。
3. $|R^{j+1}| > |R^j|$ であれば、 R^{j+1} に対して新たに曲面 f^{j+1} をフィットし、 $j \leftarrow j+1$ と更新し、手順2に戻る。 $|R^{j+1}| \leq |R^j|$ であれば終了し、拡大された領域 R^j と曲面 f^j を抽出する。ここで $|R^j|$ は領域 R^j 内の頂点数である。

図5に示す頂点追加条件は、式(5)、(6)で定義される。

$$|\mathbf{v}_i - \mathbf{p}_i| < th_{dis} \quad (5)$$

$$\cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_{p_i}) < th_{nm} \quad (6)$$

ここで \mathbf{p}_i はメッシュ頂点 \mathbf{v}_i に対応する曲面上の点、 \mathbf{n}_i は頂点 \mathbf{v}_i の法線ベクトル、 \mathbf{n}_{p_i} は点 \mathbf{p}_i における正規化された法線ベクトルである。 th_{dis} と th_{nm} はユーザーが設定する閾値であり、メッシュ解像度やノイズレベルに応じて設定される。これらの閾値は、この論文で示すX線CTによる測定から得られたメッシュに対してはすべて、 $th_{dis} = 0.5l_{avg}$ 、 $th_{nm} = 5.0 \text{ deg}$ に設定する。ここで l_{avg} は全メッシュ稜線の平均長である。X線CTで計測され、マーチング・キューブ法を用いて生成された典型的なメッシュでは、レーザ計測より得られたメッシュと比べてその稜線長は比較的一定であり、 th_{dis} を上述のように平均稜線長に比例するように設定することで、メッシュサイズや解像度に依存せず閾値を設定することが可能となる。レーザ計測により得られたメッシュでは、メッシュの稜線長にはばらつきが大きいため、測定器の性能に応じて、またはメッシュに含まれるノイズレベルを推定して設定することが必要となる。

2次多項式曲面のフィッティングは、第2章で述べた手法を用いる。2次曲面のフィッティング、および、曲面との誤差計算について、第5章で述べる。

3.4 誤差評価と曲面種類の決定

3.3節のリージョングローイングにより抽出された領域に対して、解析曲面をフィットし、そのフィッティング精度を検証し、領域の曲面種類を決定する。フィッティングと誤差の計算方法は、曲面種類に応じて異なるため、第5章でまとめて述べる。本手法

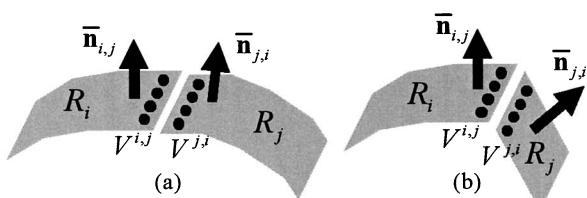


Fig.6 Graph simplification by evaluating the smoothness of neighboring regions connectivity

で、領域がある解析曲面で十分にフィットできているとは、領域内の頂点のうち式(5), (6)の条件を満たす頂点数 n^{fit} が、領域内の全頂点数 n^{all} に対して $n^{fit} > \alpha n^{all}$ である場合を意味する。本手法ではすべてのメッシュに対して $\alpha = 0.9$ に設定する。閾値は、リージョングローイングにおける頂点追加時と同様に、すべて $th_{dis} = 0.5l_{avg}$, $th_{nm} = 5.0 \text{deg}$ に設定する。

4. リージョンマージングを用いた最終セグメンテーション

リージョングローイングアルゴリズムは、メッシュに測定ノイズが含まれていなければ領域とそれを近似する曲面を適切に抽出することができる。しかし、実際の測定メッシュにはノイズが多く含まれ、リージョングローイングを適用しただけでは十分な結果が得られないことが多い。例えば、本来単一の曲面で表現されていた領域に、2つ以上の領域が生成されることもある。そのようなセグメンテーションは、エンジニアリングのアプリケーションにおいては利用上望ましくない。

そこで本手法では、複雑かつ大規模なメッシュも効率的に処理できるように、Djebali らの手法¹⁰⁾を改良したリージョンマージングを用いて、ユーザが指定した閾値内で、領域数をできるだけ減少するように効率的に初期領域を統合する。

本手法は以下の 3 つのサブステップから構成される。まず、step2 で得られる初期領域のグラフを構築し、またその簡略化を行う(step3-1)。次に、外挿誤差評価に基づきリージョンマージングを行へ(step3-2)。最後に、曲面再フィッティングに基づいてリージョンマージングを行う(step3-3)。

本手法と、Djebali らの手法の相違点を以下に簡単に述べる：

1) 初期セグメンテーション (step2, 3 章)

本手法では初期セグメンテーションにリージョングローイングを利用する。このリージョングローイングは、指定された閾値内で最大限大きな領域を抽出するアルゴリズムであるため、本手法は領域統合処理を比較的少ない数の初期領域数から開始でき、計算時間を短縮できる。

2) 領域統合候補の削減 (step3-1, 4.1 節)

Djebali らの手法はすべての領域ペアを対象に領域統合のテストを行ったが、そのような手法は非効率的であり、数千の領域を含む複雑形状には適用し難い。本手法では、隣接領域間の接続の滑らかさを評価し、また、領域間の曲面種類を比較することで領域統合の候補となるペア数を削減し、計算時間を短縮できる。

3) 領域統合の順序 (step3-3, 4.3 節)

Djebali の手法では、最初にすべての領域ペアに対して曲面フィッティングを行い、最もフィッティング精度がよいペアから領域統合を開始した。これに対して本手法では、より頂点数の大きな領域ほど曲面フィッティング精度が高いと仮定し、最も大きな領域に隣接する領域のうち、フィッティングできる頂点数が最も多いペアから順に領域統合を行う。これによって計算時間を短縮できる。

4) 領域統合の条件 (step3-2, 3-3, 4.2, 4.3 節)

Djebali らの手法では頂点と曲面の距離誤差のみを評価し、領域ペアを統合した。これに対して本手法では、距

離誤差のみならず方向誤差も考慮して領域統合を行い、これによって過剰な統合を防ぐことができる。

4.1 領域グラフの構築とその簡略化

領域グラフの構築

本手法で提案する領域統合アルゴリズムでは、まず初期領域集合 $RS_{init} = \{R_1, \dots, R_{N_{init}}\}$ の隣接グラフを構築する。このグラフでは、各ノードは領域 R_i に対応し、各アーケ $e_{i,j}$ は隣接する領域 R_i と R_j 間の接続を表す。各領域 R_i 内の頂点には領域ラベル i が割り当てられ、各領域 R_i には 3.4 節の処理でそれぞれ曲面種類が割り当てられているものとする。

本手法では、領域 R_i の境界にある頂点 v_k^i の近傍領域 $N(k, W_s)$ 内に、ラベル j を持つ頂点があれば、 R_i と R_j は隣接しているとみなし、アーケ $e_{i,j}$ を生成し、初期グラフを構築する。本手法ではすべてのメッシュに対して、 $W_s = 5.0$ に設定している。

隣接領域境界の接続の滑らかさ評価によるグラフ簡略化

次にこの初期グラフを、隣接領域 R_i と R_j の接続の滑らかさを評価することでグラフの簡略化を行う。接続の滑らかさを評価するため、図 6 に示すように、まず、 R_i , R_j の境界頂点 $v_k^i \in V^i$, $v_l^j \in V^j$ のうち、互いに $N(k, W_s)$, $N(l, W_s)$ 内にラベル j , i を持つ頂点集合 $V^{i,j}$, $V^{j,i}$ を抽出する。本手法ではすべてのメッシュに対して、 $W_s = 5.0$ に設定する。次に、それぞれの頂点群の平均法線ベクトル $\bar{n}_{i,j}$, $\bar{n}_{j,i}$ を計算する。これらのなす角度が閾値 th_{bnd} よりも小さければ、図 6(a)のように 2 つの領域の接続は滑らかであるとみなし、アーケ $e_{i,j}$ を保存する。そうでなければ、図 6(b)のように鋭利であるとみなし、アーケ $e_{i,j}$ をグラフから除去し簡略化する。ここで閾値はすべてのメッシュにおいて $th_{bnd} = 45.0[\text{deg}]$ に設定している。

隣接領域の曲面種類比較によるグラフ簡略化

次に、隣接領域の曲面種類を比較することでグラフを簡略化する。領域 R_i が平面、円筒面、球面、円錐面のうちのいずれかである場合、領域 R_j が同じ種類を持っているか、もしくは 2 次曲面を持っている場合のみ、アーケ $e_{i,j}$ を保存し、その他の場合は $e_{i,j}$ をグラフから削除し、簡略化する。もし R_i の持つ種類が一般 2 次曲面であれば、 R_i はいずれの領域とも統合される可能性があると考え、 R_j の持つ曲面種類によらずアーケを保存する。

4.2 外挿誤差評価に基づくリージョンマージング

次に本手法では、初期セグメンテーションで得られる初期領域集合 $RS_{init} = \{R_1, \dots, R_{N_{init}}\}$ に対して、領域に対してフィットした曲面に対する隣接領域の外挿誤差評価に基づいて領域統合の可否判定を行い、条件を満たす領域ペアを統合する。この処理は頂点数の大きな領域から順に開始する。手順を以下に示す。

- (1) 領域 R_i に隣接する領域 $R_j (j=1, \dots, m)$ 内の頂点 $v_k \in R_j (k=1, \dots, l)$ の、領域 R_i を近似する曲面 f_i に対する距離誤差 $e_i^{dis}(v_k)$ と方向誤差 $e_i^{dirm}(v_k)$ を式(5), (6)の左辺を用いて計算する。
- (2) これらの誤差が閾値以下である頂点数を数え、これが β_1 よりも大きければ領域 R_j を R_i に統合する。(ここではすべてのメッシュに対して $\beta_1 = 0.9$ に設定している。)
- (3) 一組の領域ペアが統合されると、領域の隣接グラフを更新する。
- (4) 上記(1)-(3)の処理を、条件を満たすペアが存在しなくなるまで繰り返す。

この処理の結果として、中間領域集合 $RS_{mid} = \{R_1, \dots, R_{N_{mid}}\}$ とそれらを近似する曲面集合が得られる。

4.3 曲面再フィッティングに基づくリージョンマージング

本手法の最後のステップでは、先のステップで得られる領域集合 $RS_{mid} = \{R_1, \dots, R_{N_{mid}}\}$ に対して、隣接領域ペアに対する曲面再フィッティングとフィッティング誤差評価により、

領域統合を行う。この処理は頂点数の大きな領域から順に、以下の手順で統合を行う。

- (1) 領域 R_i と R_j に隣接するすべての領域ペア $\langle R_i, R_j \rangle$ に対して、 R_i の持つ種類の曲面 $f_{i,j}$ をフィットする。ここで $f_{i,j}$ は、 $R_i \cup R_j$ に対してフィットされた曲面である。
- (2) R_i と R_j 内のすべての頂点 $v_k \in R_i \cup R_j (k=1, \dots, n_{i,j})$ の $f_{i,j}$ に対する距離誤差 $e_{i,j}^{dis}(v_k)$ と方向誤差 $e_{i,j}^{nm}(v_k)$ を計算し、これらが閾値以下である頂点数 $n_{i,j}^{fit}$ を数える。
- (3) いづれの誤差もが閾値以下である頂点の数が最も大きなペアを探し、その頂点数が閾値 $\beta_2 n_{i,j}$ 以上であれば、それらの 2 つの領域を 1 つに統合する。(ここでもすべてのメッシュに対して、 $\beta_2 = 0.9$ に設定している。)
- (4) 一組の領域ペアが統合されると、領域の隣接グラフを更新する。
- (5) 上記(1)-(4)の処理を、条件を満たすペアが存在しなくなるまで繰り返す。

この処理の結果として、最終セグメンテーションとなる領域集合 $RS_{fin} = \{R_1, \dots, R_{N_{fin}}\}$ とそれらを近似する曲面集合が得られる。

5. 曲面フィッティングと誤差計算

5.1 2 次曲面のフィッティング

2 次曲面は、実数係数 c_0, \dots, c_9 を用いて式(7)で表現される。

$$f(x, y, z) = c_0x^2 + c_1y^2 + c_2z^2 + c_3xy + c_4yz + c_5zx + c_6x + c_7y + c_8z + c_9 = 0 \quad (7)$$

測定データへの 2 次曲面フィッティングに関する手法は、現在でも研究が行われており、様々な手法が提案されている。本手法では、リージョングローイングとリージョンマージングの中でこの 2 次曲面フィッティングを多く繰り返すため、測定メッシュに対して高速かつ高精度にフィッティングが行える手法が必要となる。そこで本手法では、Kanai らの手法¹²⁾を単純化した手法を利用する。Kanai らは三角形と曲面との誤差を評価したのに対し、本手法では頂点と曲面との誤差を評価し、式(8)で表現される距離誤差と方向誤差を統合した評価関数を最小化することでフィッティングを行うが、このことは Kanai らの手法の利点を損なうものではない。

$$E = \sum_{i=1}^n |f(v_i)|^2 + \lambda \sum_{i=1}^n |\mathbf{n}_i - \nabla f(v_i)|^2 \quad (8)$$

ここで v_i はメッシュ頂点の座標値であり、 \mathbf{n}_i はメッシュ頂点の法線ベクトルである。 λ は重みパラメータであり、本手法では 2 つの項のオーダーを揃えるために、フィッティングに用いられる頂点に接続する三角形の面積の総和に一致するように設定する。

5.2 解析曲面のフィッティング

本手法では、リージョングローイングとリージョンマージングでこの解析曲面フィッティングを多く繰り返すため、ここでもやはり測定メッシュに対して高速かつ高精度にフィッティングが可能な手法が必要となる。

本研究では、円筒面、円錐面のフィッティングには、メッシュ頂点と曲面との距離の二乗和を最小化することでフィッティングを行う、Shakarji の非線形最小二乗法を用いた手法¹³⁾を利用する。初期値の計算には、先行研究¹⁴⁾を利用する。この手法では、曲率計算の際に各頂点近傍にフィッティングした曲面より算出した平滑法線ベクトル \mathbf{n}'_i を利用することで、より高精度な初期値が推定でき、収束演算の

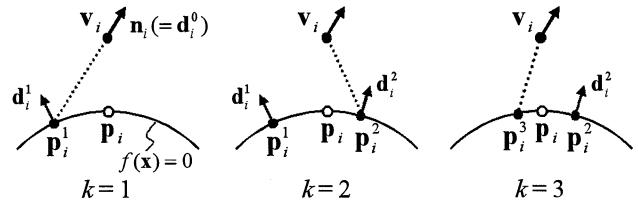


Fig.7 Finding corresponding point on quadratic surface

回数を減少できる。

平面フィッティングはよく知られた線形最小二乗法で十分な精度が得られる。球面フィッティングには、Attene らの線形最小二乗法を用いた手法¹⁵⁾を利用する。

5.3 メッシュ頂点と曲面との誤差計算

本手法 step2, step3 で必要な、メッシュ頂点と曲面との距離誤差、方向誤差の計算は、以下の方法で行う。

2 次多項式曲面との誤差計算

メッシュ頂点と 2 次多項式曲面との誤差を計算するため、まず、 v_i の平面投影後の点 v'_i と、この投影点における平面上でのパラメータ (u_i, w_i) を計算する。これらが求まるとき、位置誤差、方向誤差は容易に計算できる。

2 次曲面との誤差計算

メッシュ頂点と式(7)の 2 次曲面との誤差を計算するためには、各メッシュ頂点 v_i に対応する 2 次曲面上の点 p_i を求める必要がある。これは通常、6 次の 1 变数方程式をニュートン法などの反復的解法を利用して求めることができるが、計算コストが高い⁷⁾¹⁰⁾。そこで本手法では、図 7 に示すように、以下の手順で行う、効率的に p_i の近似点 p_i^{appx} を求める手法を提案する。

1. メッシュ頂点の法線ベクトル \mathbf{n}_i を初期ベクトル \mathbf{d}_i^0 とする。 $k=0$ とする。
2. メッシュ頂点 v_i を通って、 \mathbf{d}_i^k に平行な直線と 2 次曲面との交点位置 p_i^{k+1} を求める。
3. 交点位置 p_i^{k+1} における曲面 $f(x, y, z)$ の勾配ベクトルを \mathbf{d}_i^{k+1} とし、 $k \leftarrow k+1$ に更新して手順 1 に戻る。

本手法では、上記のステップを 3 回繰り返すことで、効率的かつ十分な精度で近似点位置 p_i^{appx} を求めることができることを実験より確認した。このことは、2 次曲面の性質上からも理解できる。 p_i^{appx} が求められると、式(5), (6)の距離誤差、方向誤差は容易に求まる。

解析曲面との誤差計算

メッシュ頂点に対応する解析曲面（平面、円筒面、球面、円錐面）上の点を見つけることは自明である。

6. 実験結果

図 8 に示す機械加工されたアルミニウム製のテストピースの X 線 CT による計測から得られた三角形数 501,164 の測定メッシュを用いて、本手法の曲面パラメータ抽出精度の検証を行った。測定における CT 画像分解能は 0.4mm である。このメッシュは、全周、半分割、四分割の円筒面、円錐面をそれぞれ 1 つずつ含むが、本手法によりそれらの全ての領域が抽出できた。また、3 つの円筒面と全周・半分割円錐面の曲面種類が適切に判定できた。ただし、この例題についてのみ、円筒面と円錐面の区別を行うため、円筒・円錐のいづれの曲面をも領域に対してフィットし、そのフィッティング精度が高い種類の曲面を領域の曲面種類として判定した。四分割円錐面に対しては適切なフィッティングができなかつたため、評価の対象外とした。一方、各円筒面の半径と各円錐面の上半径・下半径、さらに、テストピース上面の（図 8(b)にピンク色で示す）平面の法線方向に対する軸の倒れを、機械式 3 次元座標

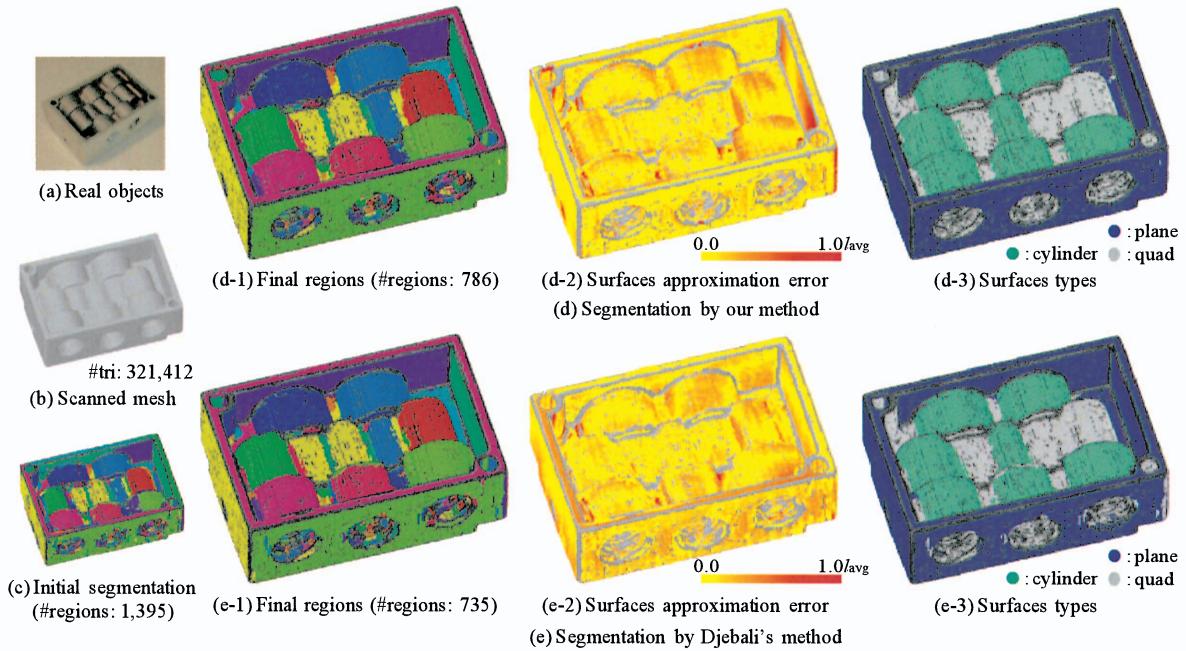


Fig.9 Comparison of segmentation results for the X-ray CT scanned mesh (valve manifold)

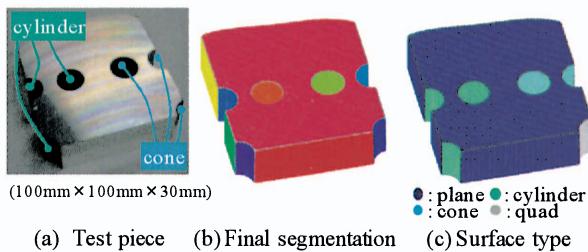


Fig.8 Results for surfaces parameters extraction

Table1 Accuracy of cylindrical surfaces extraction

	full	half	quarter
radius from C.M.M. [mm]	10.00	10.00	10.01
radius from our method [mm]	9.99	9.95	10.23
error [mm]	-0.01	-0.05	0.22
angular dev. from C.M.M. [deg]	0.42	0.05	0.30
angular dev. from our method [deg]	0.36	0.42	0.37
error [deg]	-0.06	0.37	0.07

Table2 Accuracy of conical surfaces extraction

	full	half
upper radius from C.M.M. [mm]	10.52	10.53
upper radius from our method [mm]	10.51	10.52
error [mm]	-0.01	-0.01
bottom radius from C.M.M. [mm]	10.01	10.02
bottom radius from our method [mm]	9.99	9.93
error [mm]	-0.02	-0.09
angular dev. from C.M.M. [deg]	0.42	0.05
angular dev. from our method [deg]	0.44	0.26
error [deg]	0.02	0.21

Table3 Thresholds settings and running time

model	th_{sv}	th_{dis}	th_{nrm}	step1	step2	step3
valve	4.0	$0.5l_{avg}$	8.0deg	11.1s	5.0s	36.3s
crankshaft	8.0	$1.5l_{avg}$	8.0deg	22.6s	5.6s	15.9s

測定器で精密に測定した。計測機の精度は $1.0 \mu\text{m}$ である。測定したこれらのパラメータと、本手法で抽出された値とを比較した結果を表 1、表 2 に示す。本手法での半径パラメータ抽出誤差は、

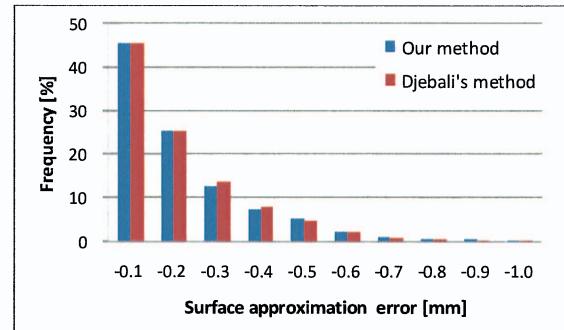


Fig.10 Distributions of surface approximation error

全周、半分割円筒面・円錐面では画像分解能に対して十分に小さく、実用レベルに達していることがわかる。四分割円筒面では、その開き角が小さいため、CT 画像分解能程度の半分程度の誤差が見られた。一方、軸方向抽出誤差はいずれの円筒・円錐面でも 0.5deg 以下であり、実用レベルであることが分かる。

図 9、図 11 に X 線 CT による計測から得られたメッシュに対するセグメンテーション結果を示す。これらより、提案するアルゴリズムがノイズを含んだ測定メッシュからも適切に領域とそれらを近似する解析曲面を抽出できることがわかる。表 3 にその処理時間と、メッシュ主曲率算出ステップ、リージョンマージングステップで設定した閾値を示す（クランクシャフトモデルについては、図 11(f)の場合の値）。実験はすべて、Core 2 Duo 2.41GHz、2GB RAM の環境で行った。これらより、本手法では約 100 万三角形を含む大規模測定メッシュからでも、1 分以内に効率的にセグメンテーションが行えることがわかる。また、Djebali らの手法との処理速度を比較するため、図 9 のモデルで、4.3 節の統合手順を用いて、Djebali らの手法中の、本手法 step3-3 に該当する処理を実行し、本手法 step3-3 の処理時間と比較した。Djebali らの手法ではこの処理に約 63 秒を要したのに対し、本手法では約 33 秒であり、処理時間を半分程度にまで短縮できた。また、抽出した領域の曲面による近似誤差の分布を図 10 に示す。これより、提案手法が Djebali らの手法と同等の精度で近似できていることがわかる。

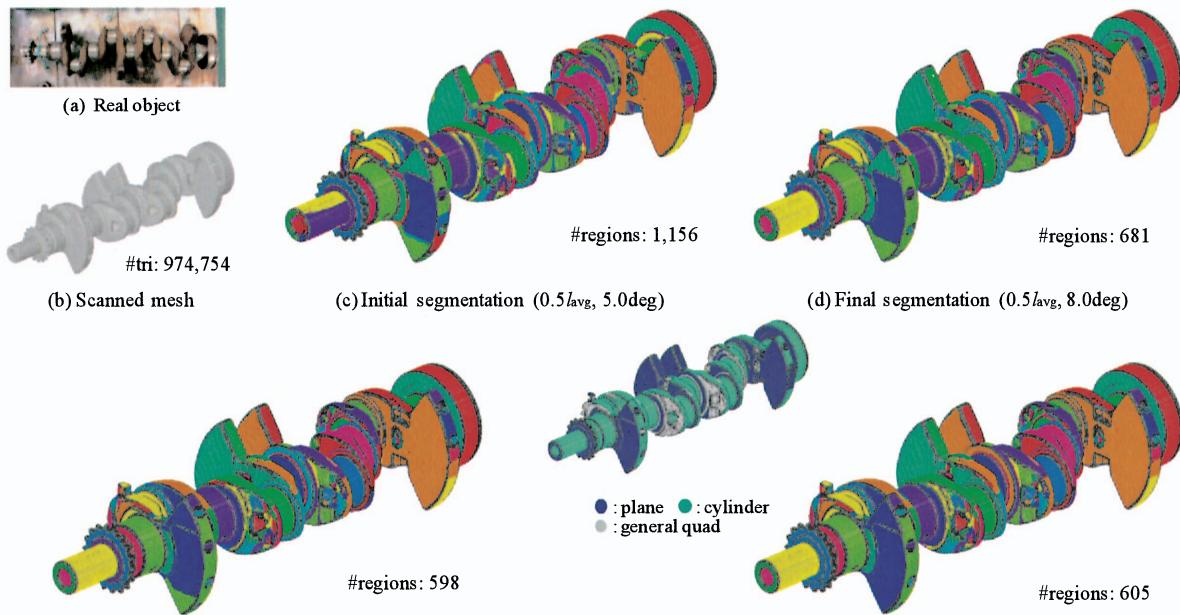


Fig.11 Segmentation results with different thresholds settings for the X-ray CT scanned mesh (crankshaft)

本手法では、各ステップにおいていくつかのパラメータや閾値を設定するが、シャープエッジ抽出のための閾値とリージョンマージングにおける閾値以外は、すべて論文中で示した値を用いている。これらは実測定メッシュに対する様々な実験から経験的に発見された値であり、ほとんどのメッシュで良い結果が得られている。図 11(c)-(f)のキャプション中の数値は、設定した閾値(th_{dis} , th_{nm})を示す。これらの図に示すように、閾値を大きくすることにより少ない数の領域が抽出されていることが確認できる。

7. 結論と今後の課題

本論文では、大規模測定メッシュから効率的にメッシュ上の解析曲面で近似可能な部分領域を抽出するための、効率的なセグメンテーションアルゴリズムを提案した。提案するアルゴリズムは、高精度かつ測定ノイズに対してロバストに算出できるメッシュ主曲率算出法、領域が滑らかに交わる場合でもそれらの境界を特定し、それぞれの領域と解析曲面を抽出できるリージョングローリング、さらに、単一の曲面で近似可能な領域を効率的に統合するリージョンマージングに基づいている。テストピースによる検証と、様々な実製品のX線CT測定メッシュに対する実験より、本手法が大規模かつ複雑形状の測定メッシュを効率的に、かつ、実用レベルの精度でセグメンテーションできることを確認した。

提案するセグメンテーションアルゴリズムの主要な応用として、検査、CADモデル再構築、解析用メッシュ生成などが考えられる。

本アルゴリズムでは、リージョンマージングステップにおいて、一通りのみの閾値を設定しているが、X線CT測定メッシュでは部分的にノイズのレベルが異なるため、適切にセグメンテーションが行えない場合もある。この問題に対して本研究では、ノイズレベルに応じて適応的に閾値を設定する手法の開発を考えている。

謝 辞

この研究は、科学研究費（補助金基盤 B(19360067)、特別研究員奨励費(18004488-00)）の支援によって行われた。また、本研究で使用したX線CT測定メッシュは日立製作所、定岡紀行様、西垣一朗様、矢敷達朗様の御厚意によりご提供頂いた。

参考文献

- 1) 鈴木宏正: 3次元計測とデジタルエンジニアリングの融合、精密工学会誌, 70, 10, (2005) 1205.
- 2) S. Katz and A. Tal: Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts, ACM Transaction on Graphics, 22, 3, (2003) 954.
- 3) T. Funkhouser, M. Kazhdan, P. Shilane, P. Min, W. Kiefer, A. Tal, S. Rusinkiewicz, and D. Dobkin: Modeling by example, ACM Transaction on Graphics, 23, 3, (2004) 652.
- 4) A. P. Mangan, and R. T. Whitaker: Partitioning 3D Surface Meshes Using Watershed Segmentation, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, 5, 4, (1999) 308.
- 5) P. Benkő and T. Várady: Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects, Computer-Aided Design, 36, 6, (2004) 511.
- 6) M. Vieira and K. Shimada: Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing, Computer-Aided Geometric Design, 22, 8, (2005) 771.
- 7) A. W. Fitzgibbon, D. W. Egger, and R. B. Fisher: High-level CAD Model Acquisition from Range Images, Computer-Aided Design, 29, 4, (1997) 321.
- 8) 矢敷達郎、定岡紀行、須能恵、高木太郎: フィーチャ抽出に基づく3次元計測データからのCADデータ生成、精密工学会論文誌, 73, 5, (2007) 593.
- 9) J. Wu and L. Kobbelt: Structure Recovery via Hybrid Variational Surface Approximation, Proc. of Eurographics, 24, 3, (2005) 277.
- 10) D. M. Yang, Y. Liu, and W. Wang: Quadric Surface Extraction by Variational Shape Approximation, Proc. of Geometric Modeling and Processing, (2006) 73.
- 11) M. Djebali, M. Melkemi, and N. Sapidis: Range-Image segmentation and model reconstruction based on a fit-and-merge strategy, Proc. of ACM symposium on Solid modeling and applications, (2002) 127.
- 12) T. Kanai, Y. Ohtake, and K. Kase: Hierarchical Error-Driven Approximation of Implicit Surfaces from Polygonal Meshes, Proc. of Symposium on Geometry Processing, (2006) 21.
- 13) C. M. Shakarji: Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 103, 6, (1998) 633.
- 14) T. Mizoguchi, H. Date, S. Kanai, and T. Kishinami: Segmentation of Scanned Mesh into Analytic Surfaces Based on Robust Curvature Estimation and Region Growing, Proc. of Geometric Modeling and Processing, (2006) 644.
- 15) M. Attene, B. Falciadino, and M. Spagnuolo: Hierarchical Mesh Segmentation based on Fitting Primitives, The Visual Computer, 22, 3, (2006) 181.