



ICP とリージョングローイングを組み合わせた 機械部品計測メッシュのユークリッド対称性認識手法*

溝 口 知 広** 金 井 理***

Euclidean Symmetry Detection from Scanned Meshes of Mechanical Objects
based on a Combination of ICP and Region Growing Algorithms

Tomohiro MIZOGUCHI and Satoshi KANAI

Recently scanned meshes from mechanical objects can be easily acquired using high-energy industrial X-ray CT scanning technologies, and these meshes are widely used in various fields of product developments. Mechanical objects often exhibit symmetries for their functionality. They are originally defined by creating a copy of the solid and then by placing it with a certain transformation including an arbitrary set of translations, rotations, and reflections. Therefore it is desired to detect such symmetries from the scanned meshes for their effective use in mesh applications, such as reconstruction of CAD models with compact data representations or CAE mesh enhancement using the symmetries. In this paper, we propose a method that can detect multiple Euclidean symmetries from scanned meshes of mechanical objects based on a combination of ICP and region growing algorithms. We define *Euclidean symmetries detection* as to detect both pairs of regions that match under certain transformations and their transformations including arbitrary sets of translations, rotations, and reflections. We also propose a method that derives all possible sequences for reconstructing an entire model from the original mesh using planar-reflective symmetries among all the detected symmetries, and represents them in an AND/OR graph in order to compactly represent the mesh. Our proposed method contains several advantages. It can robustly detect symmetries from noisy scanned meshes that include many planar regions. Our method also can detect both global and local Euclidean symmetries from meshes. Moreover it can detect maximally large pairs of regions under user specified tolerances. We demonstrate the effectiveness of the proposed method from various experiments using X-ray CT scanned meshes of mechanical objects.

Key words: X-ray CT scanning, reverse engineering, Euclidean symmetry

1. 緒 言

1.1 背 景

近年、産業用高エネルギー X 線 CT 計測器の性能向上により、複雑な内部構造を持つ機械部品からも、容易に 3 次元計測画像データを入手することが可能となった¹⁾。これらの計測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。機械部品表面はその機能の観点から、表面部分領域同士が、平行移動、回転、平面反射といった対称な関係にある場合が多い。このような対称性をメッシュ上から認識し、また認識した対称性を利用して全体形状を構築可能な手順も推定することは、コンパクトなデータ表現を持つ CAD モデル再構築や解析メッシュサイズ縮小等に極めて有効である。

このような機械部品の計測メッシュから対称性を認識する際の要求として、以下の 6 点が考えられる。

(1) 認識可能な対称性のクラス

CAD システムの定義コマンドや解析時のモデルサイズ縮小に対応する、平行移動、回転、平面反射の任意の組み合わせからなるユークリッド対称性²⁾を認識可能のこと。

(2) 大局的・局所的な認識

形状全体に存在する全局的対称性、形状の部分領域間に

存在する局所的対称性のいずれをも認識可能のこと。

(3) 平面領域を多く含むメッシュからの認識

機械部品によく見られる、平面領域を多く含むメッシュからも認識が可能のこと。

(4) 計測ノイズに対するロバスト性

計測メッシュに含まれる計測ノイズの影響を受けにくく認識が可能のこと。

(5) 最大限大きな対称領域ペアの抽出

ユーザが指定したトレランス以内で、最大限大きな対称領域ペアを抽出可能のこと。

(6) 全体形状構築手順の推定

抽出した対称性を利用して、モデルの全体形状を構築可能な、全ての構築手順を推定可能のこと。

1.2 関連研究

3 次元形状の対称性認識：3 次元形状の対称性認識は、コンピュータビジョンやコンピュータグラフィクスの分野で古くから研究されており、これまでに様々な手法が提案されている。上述の要求(1)～(5)の観点から既存手法を比較すると、以下のようになる。

Sun ら³⁾は、ガウスイメージを用いて、3 次元モデルの対称性を認識する手法を提案している。また Martinet ら⁴⁾は、一般化モーメントの極値と球面調和係数を評価することで、メッシュの対称性を認識する手法を提案している。しかしこれらの手法は、全局的対称性の認識のみを目的としており、局所的対称性の認識は行えず、要求(2)を満たさない。

* 原稿受付 平成 20 年 8 月 4 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）

Simari ら⁵⁾は、ロバスト推定に基づいて、メッシュの平面反射対称性を認識する手法を提案している。また Podolak ら⁶⁾は、ボクセル化と投票に基づく手法で、3 次元モデル中に存在するあらゆる平面反射対称性を認識する手法を提案している。しかしこれらの手法は、平面反射対称性の認識のみを目的としており、その他のクラスの対称性認識は行えず、要求(1)を満たさない。

一方 Mitra ら⁷⁾は、メッシュ上から、平行移動、回転、平面反射、均等スケーリングの任意の組み合わせからなる対称性を認識可能な、主方向算出と投票に基づく手法を提案している。この手法ではまず、メッシュ各頂点において主方向を計算する。次に、算出した主方向を利用して、各頂点ペアの一方を他方に一致させるための変換パラメータを計算し、各変換パラメータを投票空間中の対応する 1 点へ投票する。次に、この投票空間中で、平均値シフト法を利用し、投票点が形成する大きなクラスタを見つけることで、このクラスタ内に投票された頂点ペアとその変換パラメータを対称性として認識する。しかしながらこの手法では、メッシュ各頂点において主方向を計算するため、計測ノイズを多く含むメッシュからは主方向算出誤差が大きくなるため、ロバストな対称性認識が行えないといった問題があり、要求(4)を満たさない。また、主方向が一意に計算できない平面領域を多く含むメッシュからは認識が行えず、要求(3)を満たさない。

対称性を利用したモデル構築手順の導出：1 つのメッシュが持つ複数の対称性を利用し、モデル全体の構築手順を導出する過去の研究例として、Simari らの手法⁵⁾が挙げられる。この手法ではまず、入力メッシュを初期対称領域とし、抽出した平面反射対称性のうちの最大領域（対称な三角形数が多い領域）から順に、対称領域を段階的により小さな対称領域に分割し、これらを 1 つのグラフで階層的に表現する。またこの分割の逆手順を辿ることで、初期モデルと同等の形状を再構築できる。しかしこの手法では、認識する対称性と構築する手順が複数個存在する場合でも、対称な三角形数が少ない対称性から順にモデルを構築する 1 通りの手順のみしか導出できず、要求(6)を満たさない。

1.3 提案アルゴリズムの概要とその特徴

上述の比較により、6 つの要求全てを満たす手法は存在しないと言える。そこで本研究では、これら全ての要求を満たす、ICP(Iterative Closest Point)⁸⁾⁻¹⁰⁾とリージョングローイング¹¹⁾⁻¹²⁾を組み合わせた機械部品計測メッシュの対称性認識手法を提案する。さらに認識した複数の対称性のうちの単一平面反射対称性のみを利用し、考えられる全てのモデル全体形状の構築手順を導出し、これを 1 つの AND/OR グラフで階層的に表現する手法を提案する。

メッシュのユークリッド対称性認識のために、領域ペアをマッチングさせるための変換パラメータを ICP で算出することは有効な手段である。しかしこの ICP では、マッチングさせる領域ペアがそれぞれ別々の平面上をサンプリングした領域の場合には、適切に変換パラメータを計算できないといった問題があり⁸⁾、本研究のように平面領域を多く含む計測メッシュを対象とする場合には、この手法を簡単には利用できない。そこで本手法では、図 1 に示す、この問題を解決できる 5 つのステップから構成される手法を提案する。

Step1: 主曲率算出に基づく特徴領域の抽出 (2 章)

まず、局所 2 次多項式曲面フィッティングに基づく手法で、メッシュ各頂点の主曲率を計算し、これを用いて、

計測メッシュ中のシャープエッジ上にあると推定される頂点を、シャープ頂点と分類する¹¹⁾⁻¹²⁾。次に、このシャープ頂点を利用して、平面領域の境界近傍にある頂点集合を特徴領域として抽出する。

Step2: 局所形状マッチングに基づくシード特徴領域ペアの生成 (3 章)

次に、抽出された特徴領域に対して主成分分析を行った後、(1) 頂点数評価、(2) 重心・主軸一致によるマッチングと最近点間距離評価、(3) ICP マッチングと最近点間距離評価の 3 つの評価を段階的に行うことで、その形状がおおよそ一致する特徴領域ペアをシード特徴領域ペアとして抽出する。本手法では、この平面領域を含まないシード特徴領域ペアからユークリッド対称性認識処理を開始するため、平面領域を多く含むメッシュからも対称性認識が可能となり、要求(3)を満たす。

Step3: ICP とリージョングローイングを用いたユークリッド対称性認識 (4 章)

次に、ICP⁸⁾⁻¹⁰⁾とリージョングローイング¹¹⁾⁻¹²⁾を組み合わせた手法を用いて、同一の変換パラメータでマッピング可能な頂点ペアを、逐次的に各シード特徴領域に追加することで領域ペアをそれぞれ反復的に拡大し、互いにユークリッド対称な最大限大きな面積を持つ領域ペアとその変換パラメータを抽出する。ICP を利用することで、マッチングのための、平行移動、回転、平面反射の任意の組み合わせからなる変換を求めることが可能となり、要求(1)を満たす。また ICP では、比較的大きな数の頂点集合の頂点位置のみを評価し、法線ベクトルや主曲率等の算出を利用せずにマッチングを行うため、計測ノイズに対してロバストな対称性認識が可能となり、要求(4)を満たす。リージョングローイングでは、条件を満たすメッシュ頂点ペアを 1 つずつ逐次的にそれぞれのシード特徴領域に追加し領域拡大を行うため、大局的・局所的対称性のいずれをも認識可能であり、要求(2)を満たす。さらに、このアルゴリズムの性質上、ユーザが指定したトランクス内で、最大限大きな表面積を持つ対称領域ペアを抽出可能であり、要求(5)を満たす。

Step4: 対称性を陽に表す表現への変換 (5 章)

Step3 で抽出された変換パラメータを、单一平面反射、2-fold 回転、单一平行移動といった、対称性を表す陽な表現に変換可能な場合はその変換を行う。

Step5: AND/OR グラフを用いた平面反射対称性の階層的表現生成 (6 章)

Step4 で抽出された全ての単一平面反射対称性のみを利用し、入力メッシュを段階的に分割し、モデル全体形状を構築可能な全手順を導出し、これを 1 つの AND/OR グラフでコンパクトに表現する。これにより要求(6)を満たす。

対象とするメッシュ：本論文では、X 線 CT 計測データからマーチングキューブ法¹³⁾をベースにした手法で生成された計測メッシュを研究対象とする。一般的に、このようなメッシュは、その稜線長にばらつきが少ない。

2. メッシュ主曲率算出に基づく特徴領域の抽出

提案手法ではまず、メッシュの主曲率算出に基づき、特徴領域と呼ぶ、平面領域の近傍にあって、その内部にはない連結頂点集合を抽出する。この過程を、実機械部品(図 2(a))を X 線 CT 計測して生成したメッシュ(図 2(b))を例に説明する。

まず、局所 2 次多項式曲面フィッティングに基づく主曲

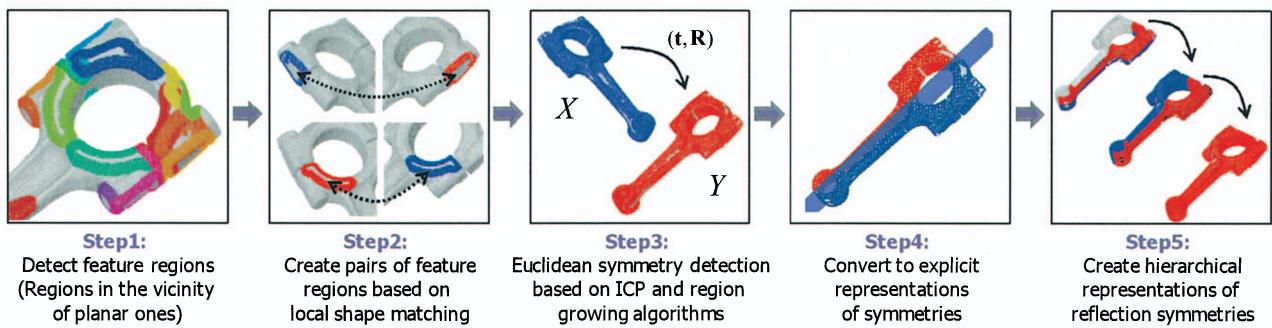


Fig.1 Overview of our proposed method for Euclidean symmetry detection

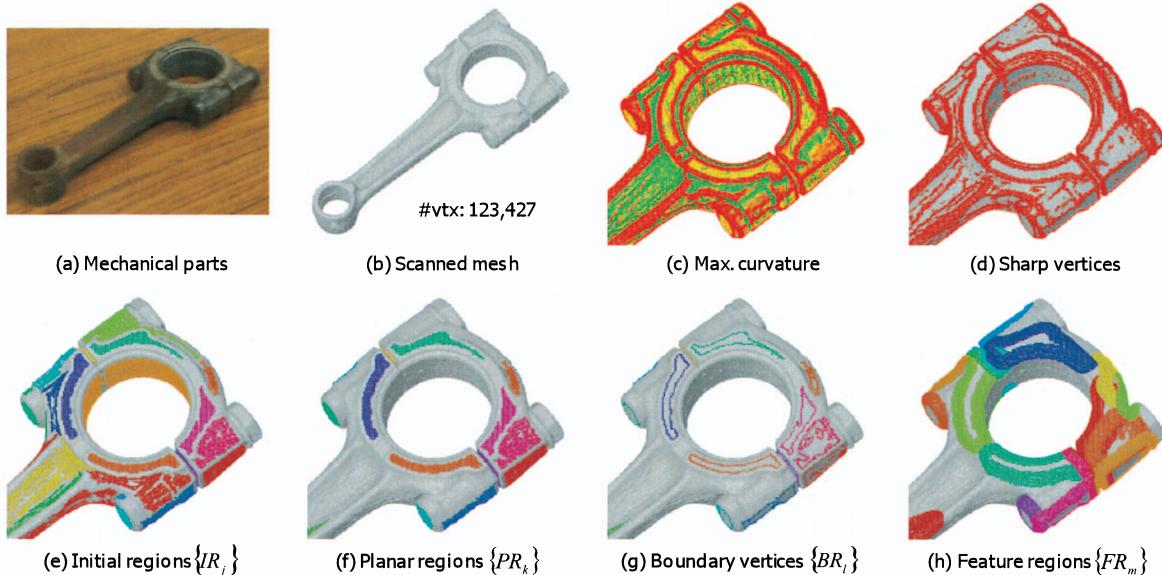


Fig.2 Detection of feature regions

率算出法¹¹⁾¹²⁾を利用し、メッシュ各頂点 v_i の最大主曲率を算出し(図 2(c)), 算出した主曲率をもとに、シャープエッジ上にあると考えられる頂点を“シャープ頂点(図 2(d))”, それ以外の頂点を“非シャープ頂点”と分類する。次に、位相的に連結された非シャープ頂点集合を、それぞれ初期領域 IR_j として抽出する(図 2(e))。次に、抽出された各 IR_j に対して最小二乗平面をフィットし、その平均誤差 \bar{e}_j を計算する。 \bar{e}_j がトレランス $\tau_{pla} l_{avg}$ 以下である IR_j のみを、平面領域 PR_k として抽出する(図 2(f))。ここで l_{avg} は計測メッシュの平均稜線長である。本論文中的例題では全て、 $\tau_{pla} = 0.5$ に設定した。次に、抽出された PR_k 内の、位相的に連結された領域境界頂点集合を BR_i として抽出する(図 2(g))。ここで 1 つの PR_k から、2 つ以上の BR_i が抽出される場合もあることに注意する。最後に、各 BR_i からあるユークリッド距離 $W_{feature} l_{avg}$ 内にあり、 PR_k 内にはない連結頂点集合を特徴領域 FR_m として抽出する(図 2(h))。この特徴領域サイズを決定するパラメータ $W_{feature}$ を大きく設定すると、次章で述べる特徴領域ペアのマッチング精度が向上するが、大きく設定しすぎると、本来対称ではない部分の頂点をも特徴領域に含んでしまい、適切な対称性認識が行えなくなる。通常 $W_{feature} = 10.0 \sim 20.0$ に設定する。

3. 局所形状マッチングに基づくシード特徴領域ペア生成

本章では、局所形状マッチングに基づいて、抽出した特徴領域の全ペア $\{ \langle FR_i, FR_j \rangle \}$ のうち、その形状がおおよそ一致するペアのみを、シード特徴領域として抽出する手法に

ついて述べる。本研究では平面反射対称性をも認識するため、各 FR_i と鏡像の関係にある FR_i^{ref} を含めたペア $\langle FR_i^{ref}, FR_j \rangle$ をも処理の対象とするが、これらは $\langle FR_i, FR_j \rangle$ と同様の手法で扱えるため、以下説明は $\langle FR_i, FR_j \rangle$ のみに限定する。

3.1 ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム

ICP は、計測データペア $\langle X, Y \rangle$ のマッチングを行う手法として広く用いられている。この手法では、対応点の探索と変換パラメータの計算を反復的に行うことにより、点 $\mathbf{x}'_i \in X'$ とその対応点 $\mathbf{y}_{c(i)} \in Y$ との点間距離の二乗和を最小化するよう、 \mathbf{x}'_i を $\mathbf{x}'_i = \mathbf{t}_{xy} + \mathbf{R}_{xy} \mathbf{x}'_i$ のように変換するパラメータ $\langle \mathbf{t}_{xy}, \mathbf{R}_{xy} \rangle$ を、線形最小二乗法を用いて求めることができる。ここで $c(i)$ は、 Y' 内にある \mathbf{x}'_i に対応した最近点 $\mathbf{y}_{c(i)}$ のインデックスである。

3.2 シード特徴領域ペア生成

ここではまず、抽出された各特徴領域 FR_i の重心 \mathbf{b}_i と、主成分分析に基づき固有値 $\lambda_{i,1} \geq \lambda_{i,2} \geq \lambda_{i,3}$ に対応する主軸 $\mathbf{A}_i = \langle \mathbf{a}_{i,1}, \mathbf{a}_{i,2}, \mathbf{a}_{i,3} \rangle$ を計算する。その後、各ペア $\langle FR_i, FR_j \rangle$ に対して、以下の 3 つの評価を行い、互いの形状がおおよそ一致するペアを、シード特徴領域ペアとして生成する。

(1) 頂点数評価

本研究で対象とする計測メッシュは、その三角形サイズや稜線長がほぼ一様であるといった性質をもつため、領域ペアの形状がおおよそ一致するならば、その領域内の頂点数もおおよそ一致するはずである。そこで 2 つの特徴領域内の頂点数 $|FR_i|$, $|FR_j|$ を評価し、これらが $1.0 - \alpha < |FR_i|/|FR_j| < 1.0 + \alpha$ を満たすならば次の手順に進

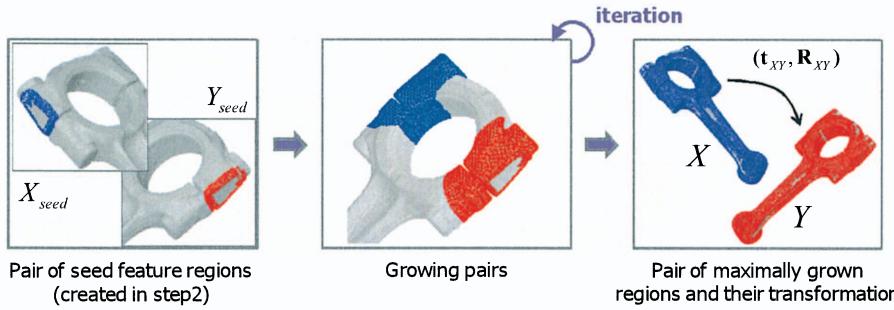


Fig.3 Overview of our region growing

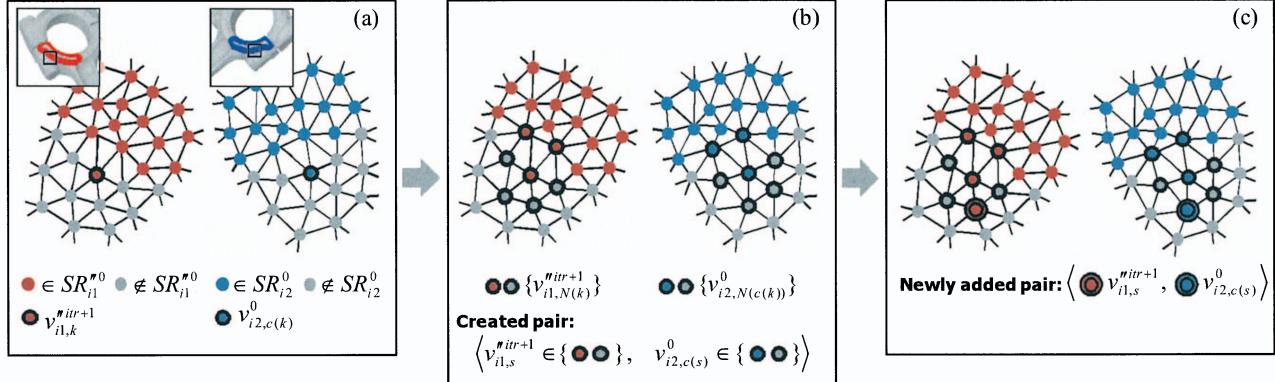


Fig.4 An example of vertex addition to seed feature regions

み、満たさない場合は処理を終了する。本論文中の例題では全て $\alpha = 0.15$ に設定した。

(2) 重心・主軸一致によるマッチングと最近点間距離評価

次に、互いの重心 $\langle \mathbf{b}_i, \mathbf{b}_j \rangle$ と主軸 $\langle \mathbf{A}_i, \mathbf{A}_j \rangle$ を一致させるための変換パラメータ $\langle \mathbf{t}_{ij}^{pca}, \mathbf{R}_{ij}^{pca} \rangle$ を計算し、これを用いて各頂点 $v_{i,k} \in FR_i$ を $v'_{i,k} = \mathbf{t}_{ij}^{pca} + \mathbf{R}_{ij}^{pca} v_{i,k}$ と変換し、これにより初期マッチングを行う。さらに、 $FR'_i = \{v'_{i,k}\}$ の中からランダムに選択された $\beta^{pca}(\%)$ の各頂点に対して、 FR_j の中から $v'_{i,k}$ との点間距離が最小となる頂点 $v_{j,c(k)}$ を見つけ、その点間距離 $e_{i,j,k}$ を計算する。最後に、平均点間距離 \bar{e}_{ij}^{pca} を計算し、これがトレランス $\tau^{pca}l_{avg}$ 以下であれば次の手順に進み、トレランス以上であれば処理を終了する。本論文中の例題では全て $\beta^{pca} = 5.0$ 、 $\tau^{pca} = 3.0$ に設定した。

(3) ICP を用いたマッチングと最近点間距離評価

さらに、変換後の特徴領域ペア $\langle FR_i, FR_j \rangle$ に対して ICP を適用し、変換パラメータ $\langle \mathbf{t}_{ij}^{icp}, \mathbf{R}_{ij}^{icp} \rangle$ を計算し、各頂点 $v'_{i,k} \in FR'_i$ を $v''_{i,k} = \mathbf{t}_{ij}^{icp} + \mathbf{R}_{ij}^{icp} v'_{i,k}$ と変換し、より高精度にマッチングを行う。さらに、ランダムに選択された $\beta^{icp}(\%)$ の各 $v'_{i,k}$ から、手順(2)と同様に平均点間距離 \bar{e}_{ij}^{icp} を計算する。これがトレランス $\tau^{icp}l_{avg}$ 以下であれば、 $\langle FR_i, FR_j \rangle$ をシード特徴領域ペア $\langle FR_i^{seed}, FR_j^{seed} \rangle$ として抽出する。本論文中の例題では全て $\beta^{icp} = 5.0$ 、 $\tau^{icp} = 1.0$ に設定した。

4. ICP とリージョングローイングを組み合わせた ユークリッド対称性認識手法

本章では、ICP⁸⁻¹⁰⁾とリージョングローイング¹¹⁾¹²⁾を組み合わせた手法により、生成した各シード特徴領域ペアを反復的に拡大し、ユークリッド対称性認識を行う手法について述べる。本手法の概要を図 3 に示す。

ここでは、生成したシード特徴領域ペア $\langle FR_i^{seed}, FR_j^{seed} \rangle$ を初期ユークリッド対称領域ペア $\langle SR_i^0 = \{v_{i,k}^0\}, SR_j^0 = \{v_{j,k}^0\} \rangle$ とおき、以下の手順で各 SR_i^0 、 SR_j^0 を反復的に拡大し、最終的なユークリッド対称領域ペアとそれらの変換パラメータ

を抽出する。

(1) 初期変換パラメータの計算と初期マッチング

3.2 節手順(2)と同様の手法で、 $\langle SR_i^0, SR_j^0 \rangle$ に対して、まず初期変換パラメータ $\langle \mathbf{t}_i^{init}, \mathbf{R}_i^{init} \rangle$ を計算し、これをもとに頂点 $v_{i,k}^0$ を $v'_{i,k} = \mathbf{t}_i^{init} + \mathbf{R}_i^{init} v_{i,k}^0$ と変換することで、これにより初期マッチングを行う。ここで $itr = 0$ と設定する。

(2) 変換パラメータの計算とマッチング

ICP を用いて、 SR_i^{itr} を SR_j^{itr} にマッチングする変換パラメータ $\langle \mathbf{t}_i^{itr}, \mathbf{R}_i^{itr} \rangle$ を計算し、頂点を $v''_{i,k} = \mathbf{t}_i^{itr} + \mathbf{R}_i^{itr} v'_{i,k}$ と更新し、これによりマッチングを行う。

(3) 頂点ペア追加による領域拡大

次に、シード特徴領域に隣接する頂点ペアのうち、条件を満たすペアをそれぞれシード特徴領域に追加することで、領域拡大を行う。この手順の例を図 4 に示す。この例では、 $v_{i1,k}^{itr+1}$ と $v_{i2,c(k)}^0$ がシード特徴領域内にあり、 $v_{i1,k}^{itr+1}$ が $v_{i2,c(k)}^0$ に最近点として対応付けられており、その点間距離が閾値 $\tau^{add}l_{avg}$ 以下であるとする(図 4(a))。次に、 $v_{i1,k}^{itr+1}$ を含む $v_{i1,k}^{itr+1}$ の 1 近傍隣接頂点集合 $\{v_{i1,N(k)}^0\}$ と、 $v_{i2,c(k)}^0$ を含むその 1 近傍隣接頂点集合 $\{v_{i2,N(c(k))}^0\}$ のうちから、 $\langle v_{i1,k}^{itr+1}, v_{i2,c(k)}^0 \rangle$ を除く全ての組み合わせの頂点ペア $\langle v_{i1,s}^{itr+1}, v_{i2,c(s)}^0 \rangle$ を生成する(図 4(b))。この例では 48 個のペアが生成される。次に各ペア間の点間距離 $e_{i,s}$ を計算し、これが閾値 $\tau^{add}l_{avg}$ 以下であれば、 $v_{i1,s}^{itr+1}$ を SR_i^{itr} に、 $v_{i2,c(s)}^0$ を SR_j^{itr} にそれぞれ追加する(図 4(c))。この処理を条件を満たす頂点が存在しなくなるまで繰り返し、拡大された領域 SR_i^{itr+1} と SR_j^{itr+1} を抽出する。本論文中の例題では全て $\tau^{add} = 1.0$ に設定した。

(4) 終了条件

もし $|SR_i^{itr+1}| > |SR_i^{itr}|$ であれば、 $itr \leftarrow itr + 1$ と更新し、手順(2)に戻る。そうでなければ、 $\langle SR_i^{itr}, SR_j^{itr} \rangle$ をユークリッド対称領域ペアとして抽出し、さらに、 $\langle \mathbf{t}_i^{itr}, \mathbf{R}_i^{itr} \rangle$ と $\langle \mathbf{t}_i^{init}, \mathbf{R}_i^{init} \rangle$ を用いて、最終変換パラメータを $\mathbf{t}_i^{fin} = \mathbf{t}_i^{itr} + \mathbf{R}_i^{itr} \mathbf{t}_i^{init}$ 、 $\mathbf{R}_i^{fin} = \mathbf{R}_i^{itr} \mathbf{R}_i^{init}$ として抽出し、処理を終了する。

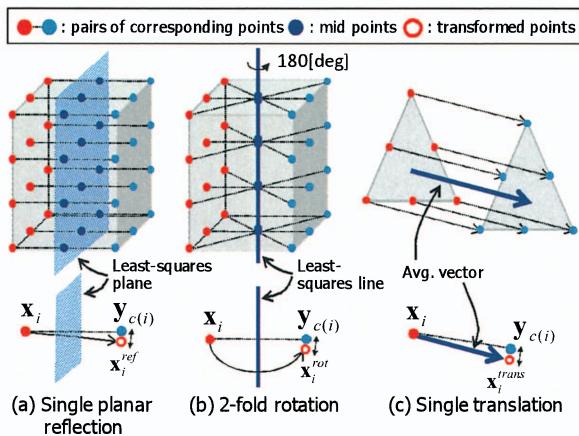


Fig.5 Conversion of symmetries to explicit representations

5. 陽な対称性表現への変換

本章では、step3 (4 章) で抽出された変換パラメータ $\langle \mathbf{t}_i^{fin}, \mathbf{R}_i^{fin} \rangle$ を、可能な場合は、単一平面反射、2-fold 回転、単一平行移動といった、対称性を表す陽な表現に変換する手法について述べる。このような表現変換を行うことで、CAD システム等での形状定義が容易となる。

もし対称領域ペア $\langle X, Y \rangle$ が単一平面反射対称性を示すならば、それらの各点ペア $\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{y}_{c(i)} \rangle$ の中点は、ある反射平面上に分布するはずである。そこで図 5(a)のように、この中点集合に最小二乗平面をフィットし、次に X 内の各点 \mathbf{x}_i をこの平面に対して反射させ、反射後の点 \mathbf{x}_i^{ref} とその対応点 $\mathbf{y}_{c(i)}$ との平均点間距離 \bar{e}_i^{ref} を計算し、これが閾値 $th_{exp}l_{avg}$ 以下であれば単一平面反射対称性であると判定し、最小二乗平面を反射平面として抽出する。

同様に、2-fold 回転対称性の判定を行うには、図 5(b)のように、対応点間の中点に最小二乗直線をフィットし、その直線周りの回転後の平均点間距離 \bar{e}_i^{rot} を評価し、これが閾値 $th_{exp}l_{avg}$ 以下であれば2-fold 回転対称性であると判定し、最小二乗直線を回転軸として抽出する。

さらに、単一平行移動対称性の判定を行うには、図 5(c)のように、各点ペアを結ぶベクトルの平均ベクトルを計算し、そのベクトルに沿った平行移動後の平均点間距離 \bar{e}_i^{trans} を評価し、これが閾値 $th_{exp}l_{avg}$ 以下であれば単一平行移動対称性であると判定し、平均ベクトルを平行移動ベクトルとして抽出する。

いずれの場合も、本論文中の例題では全て $th_{exp} = 1.0$ に設定した。

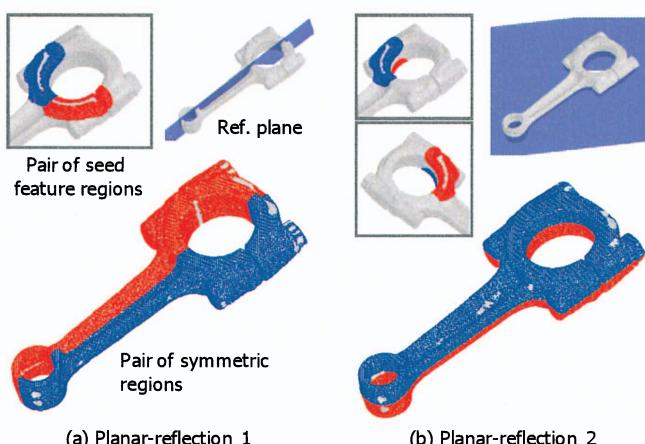


Fig.8 Results of Euclidean symmetry detection for connecting rod model

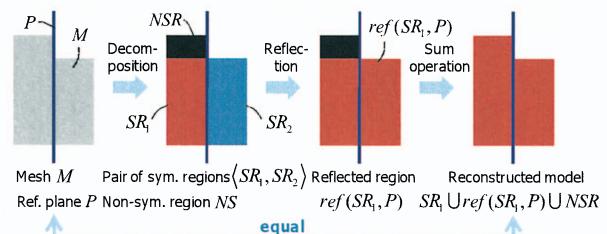


Fig.6 A sequence for a solid model reconstruction based on planar-reflective symmetries

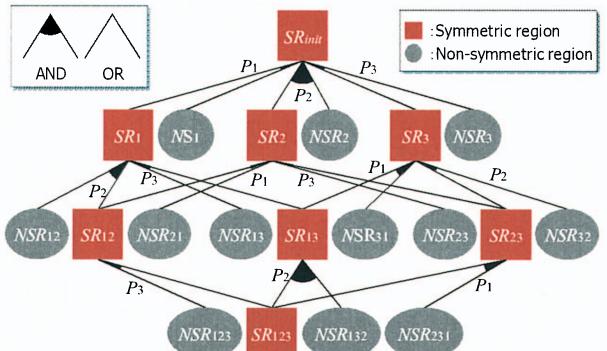


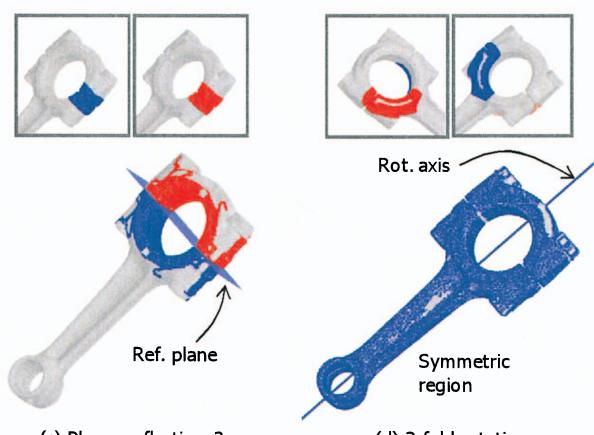
Fig.7 An example of hierarchical representation of planar reflective symmetries

6. AND/OR グラフを用いた平面反射対称性の階層的表現生成

6.1 提案手法の概要

あるメッシュ M が平面反射対称性を持つ場合、図 6 に示すように、反射平面 P を利用し、メッシュ M を対称領域ペア (SR_1, SR_2) と非対称領域 (NSR) に分割することができる。また、対称領域のうちの一方 SR_1 を平面 P に対して反射させ形状 $ref(SR_1, P)$ を構築し、さらに非対称領域 NSR と和演算することで、もとの形状と同等の形状 $SR_1 \cup ref(SR_1, P) \cup NSR$ を再構築できる。ここで SR_1 と NSR に相当する部分メッシュのみを保存し、同様の手順で反射と和演算を行うことで、形状全体のよりコンパクトな表現が生成できる。

一般的には、1 つのメッシュから複数個の平面反射対称性が認識されるので、全体形状を構築可能な複数通りの手順を導出することが必要となる。本手法ではこれを実現するため、抽出した全ての反射平面で入力メッシュを段階的に分割し、モデルの全体形状を再構築可能な全手順を導出し、これを1つの AND/OR グラフでコンパクトに表現する。



6.2 AND/OR グラフを利用した対称性の階層表現生成

本手法ではまず、図 7 のように、入力メッシュを初期対称領域 SR_{init} とし、これを抽出された N 個全ての反射平面 $\{P_i | i=1, \dots, N\}$ を用いてそれぞれ対称領域ペア $\{SR_{i1}, SR_{i2}\}$ と非対称領域 $\{NSR_i\}$ に分割し、図 7 のような AND/OR グラフの階層構造で管理する。グラフ中のノードには、各対称領域ペアの一方（以下、これらを SR_i と表記する）と、それに対応する非対称領域 NS_i をそれぞれ保存する。次に、各対称領域 SR_i をさらに P_i 以外の $(N-1)$ 個の全平面 $\{P_j\}$ で同様に分割し、 SR_{ij} と NSR_{ij} を得る。ここで SR_{ij} は、対称領域 SR_i 、 SR_j 内いずれにも含まれる頂点集合とする。以下、この処理を分割に用いる平面がなくなるまで繰り返す。このグラフにおいてエッジ (SR_i, SR_{ij}) は、領域 SR_i を分割し SR_{ij} を生成するために用いた反射平面 P_j を表す。

6.3 対称性を利用したモデル再構築手順の導出

生成したグラフを利用して、モデル全体形状を構築する手順を、以下の方法で導出できる。ユーザは構築処理に利用する $n (\leq N)$ 個の反射平面と、構築の際にリーフからルートへと辿るエッジの順序を選択できる。選択された平面と順序に該当する部分グラフがグラフ内に必ず存在するので、この部分グラフ中のリーフノードに該当する対称領域から、選択された平面に相当するエッジをルート方向にたどり、反射と和演算を繰り返すことで入力メッシュと同等のモデルが構築できる。

7. 実験結果

提案手法を、実機械部品の X 線 CT 計測メッシュに適用し、その有効性を検証した。実験は全て Core 2 Quad 2.4 GHz CPU の環境で行った。

ユークリッド対称性認識結果

図 8 に、コンロッドの X 線 CT 計測メッシュから、本手法によりユークリッド対称性を認識した結果の例を示す。このメッシュは 123,427 個の頂点から構成され、平均稜線長は約 0.98mm であった。このモデルからは 18 個の特徴領域が抽出され、29 個の対称性が認識できた。この例題では、特徴領域抽出のために $W_{feature} = 20.0$ に設定した。認識された対称性のうち、9 個は単一平面反射対称性、4 個は 2-fold 回転対称性へと変換できた。図 8(a), (b) に、認識された対称性のうちの、2 つの大局的な単一平面反射対称性を示す。これら 2 つの反射平面の法線ベクトルのなす角度が約 89.7deg であったことより、本手法により高精度に単一平面反射対称性が認識できていることが分かる。またこのメッシュからは、図 8(c) に示す局所的な単一平面反射対称性、図 8(d) に示す 2-fold 回転対称性も認識できた。計算時間は約 98 秒であった。

図 9 に、クランクシャフトの X 線 CT 計測メッシュでのユークリッド対称性認識結果を示す。このメッシュは 487,357 個の頂点から構成され、平均稜線長は約 1.02mm であった。このモデルからは 100 個の特徴領域が抽出され、114 個の対称性が認識できた。この例題でも、特徴領域抽出のために $W_{feature} = 20.0$ に設定した。これらの対称性の中に、図 9(a), (b) に示す 2 つの平面反射対称性、図 9(c), (d) に示す 2 つの異なる 2-fold 回転対称性が含まれていることが確認できた。計算時間は約 19 分であった。

階層的表現を利用した点群モデル再構築結果

図 10 に、コンロッドの X 線 CT 計測メッシュから、図 8 に示す 3 つの平面反射対称性を利用し、導出した構築手順に従って、ソリッドモデルの代わりに構築した点群モデル

を示す。図 10 中の表記は図 6 と対応する。ある段階において構築したモデル $SR_{ijk} \cup ref(SR_{ijk}) \cup NSR_{ijk}$ を、次の段階では SR_{ij} として利用し、これを赤色で示した。このモデルからは合計 6 通りの手順が導出され、それらのうちの特徴的な 3 つを示している。いずれの手順でも、入力メッシュとほぼ同等の点群モデルが構築できていることが分かる。なお、AND/OR グラフ構築に要した計算時間は約 0.5 秒であった。

図 11 に、図 10 で構築した点群モデルの構築精度検証結果を示す。検証のため、対称性を利用して構築された点群モデル内の各点から、入力メッシュ内の頂点のうちで点間距離が最小となる頂点を見つけ、これらの点間距離を評価した。ただし、点群モデル中の各非対称領域とリーフノードに対応する領域内の点は、入力メッシュ上の頂点を直接利用するので、検証の対象外とした。図 11(a) には、手順(1)で構築したモデルの点間距離分布を、その距離に応じて色分けして表示させた結果を示す。また図 11(b) のグラフには、3 つの手順で構築したモデルの点間距離分布をヒストグラムで示す。検証の結果、平均点間距離はいずれの手順でも約 0.4mm であり、また約 98% の点間距離が 1.0mm 以下であった。計測メッシュの平均稜線長が約 0.98mm であったことから、本手法により平面对称性を利用して高精度に点群モデルを再構築できることが確認できた。

8. 結論と今後の課題

本論文では、ICP とリージョングローイングを組み合わせた、機械部品 X 線 CT 計測メッシュのユークリッド対称性認識手法を提案した。また、抽出された複数個の平面反射対称性を利用し、モデル全体形状を再構築可能な複数個の手順を導出し、これを 1 つの AND/OR グラフで階層的に表現する手法を提案した。さらに、機械部品の計測メッシュに対する様々な実験より、本手法により高精度に複数のユークリッド対称性が認識できることが確認できた。また、導出した構築手順に従って、モデル全体形状が抽出した平面反射対称性に従って高精度に構築できることも確認した。

今後の課題として、抽出された部分メッシュからのソリッドモデル再構築、抽出した対称性を利用して CAE メッシュの単純化や整形を考えている。

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) P. C. Bressloff, J. D. Cowan, M. Golubitsky, P. J. Thomas, and M. C. Wiener: Geometric visual hallucinations, Euclidean symmetry and the functional architecture of striate cortex, Philosophical Transactions of the Royal Society, 356, 1407, (2001) 299.
- 3) C. Sun and J. Sherrah: 3D symmetry detection using the extended Gaussian image, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19, 2, (1997) 164.
- 4) A. Martinet, C. Soler, N. Holzschuch, and F. Sillion: Accurate detection of symmetries in 3D shapes, ACM Transactions on Graphics, 25, 2, (2006) 439.
- 5) P. Simari, E. Kalogerakis, and K. Singh: Folding meshes: Hierarchical mesh segmentation based on planar symmetry, Proc. Eurographics Symposium on Geometry Processing, (2006) 111.
- 6) J. Podolak, P. Shilane, A. Golovinskiy, S. Rusinkiewicz, and T. Funkhouser: A planar-reflective symmetry transform for 3D shapes, ACM Transactions on Graphics, 25, 3, (2006) 549.

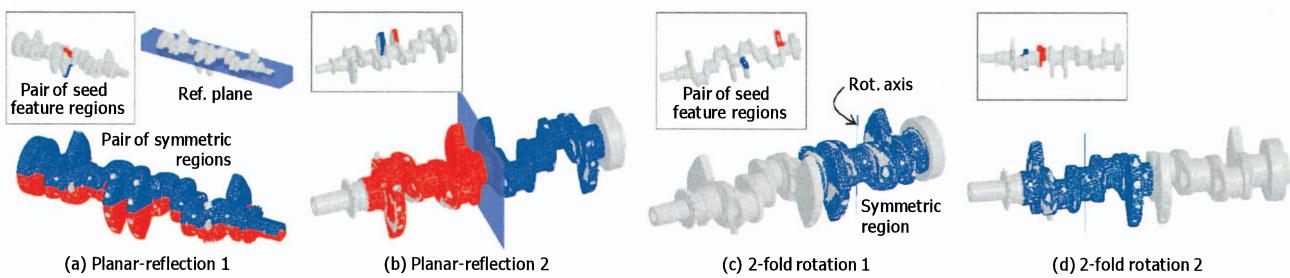


Fig.9 Results of Euclidean symmetry detection for crankshaft model



Fig.10 Results of point models reconstruction based on planar-reflective symmetries

- 7) N. J. Mitra, L. J. Guibas, and M. Pauly: Partial and approximate symmetry detection for 3D geometry, ACM Transactions on Graphics, **25**, 3, (2006) 560.
- 8) S. Rusinkiewicz and M. Levoy: Efficient variants of the ICP algorithm, Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, (2001) 145.
- 9) P. Besl and N. McKay: A method for registration of 3-D shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **14**, 2, (1992) 239.
- 10) Y. Chen and G. Medioni: Object modeling by registration of multiple range images, Image and Vision Computing, **10**, 3, (1992) 145.
- 11) 溝口知広, 伊達宏昭, 金井理: Region Growing/Merging を用いた効率的なメッシュセグメンテーション, 精密工学会論文誌, **74**, 7, (2008) 752.
- 12) M. Vieira and K. Shimada: Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing, Computer-Aided Geometric Design, **22**, 8, (2005) 771.
- 13) W. E. Lorensen and E. C. Harvey: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm, Proc. ACM SIGGRAPH, **21**, 4, (1987) 163.

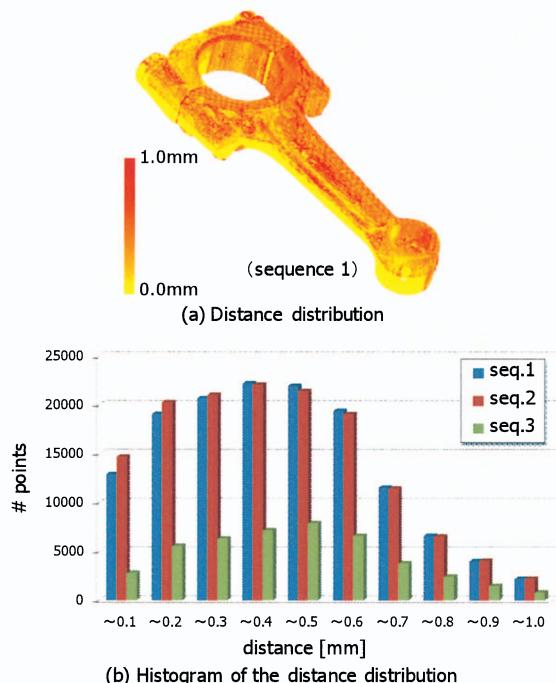


Fig.11 Accuracy evaluation of the reconstructed models