309

リバースエンジニアリングのためのユークリッド対称性認識に関する研究(第4報)
~ 対称性を利用したCADモデル再構築手順の導出 ~

北海道大学大学院情報科学研究科 ○溝口 知広，金井 理

要旨．本研究では，既提案法により機械部品の計測メッシュモデル中から認識された対称性を利用し，元来のソリッドモデルを再構築するための全手順を導出し，これらを1つのAND/ORグラフで階層的に表現する手法について報告する．また導出した再構築手順に従って，ソリッドモデルの代わりに点群モデルを構築し，その構築精度検証を行い，本手法の有効性を示す．

1 緒論

近年，産業用X線CTスキャナによる機械部品の計測メッシュの入手が可能となり，この計測メッシュからソリッドモデルを再構築するリバースエンジニアリングへの要求が高まっている．しかし，既存の手法やソフトウェアは，計測メッシュをNURBS曲面や解析曲面で近似し，それらの集合としてのソリッドモデルを再構築するものがほとんどであり，ユーザがCADシステム上で入力するような，コンパクトで品質の高い形状定義方法を再現することは難しい．

本研究ではこれまでに，計測メッシュからコンパクトで高品質なデータ表現を持つソリッドモデルを再構築するため，計測メッシュの持つ複数のユークリッド対称性を網羅的に認識する手法を提案してきた[1]．本報では，既提案法により認識された対称性のうちの平面反射対称性のみを利用し，計測メッシュからソリッドモデルを効率的に再構築可能な全手順を導出し，これを1つのAND/ORグラフで表現する手法を提案する．さらに，このグラフによるソリッドモデル構築手順の正しさを，点群モデルで代替して検証する．

2 関連研究

1つのメッシュが持つ複数の平面反射対称性を階層的に表現する過去の研究例として，Simari らの手法[2]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，階層的表現を生成する．またこの分割の逆手順を辿ることで，もとのメッシュと同等の形状を再構築できる．しかしこの手法では，構築手順が複数ある場合でも，最も小さな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表現できない．

3 提案手法

3.1 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1に示すように，反射平面 P を利用して，メッシュ M を必ず対称領域ペア (S_1, S_2) と非対称領域 (NS) に分割することができる．逆に，対称領域のうちの一方 S_1 を平面 P に対して反射させ，形状 $ref(S_1, P)$ を構築し，さらに非対称領域 NS と和演算することで，もとの形状と同等の形状 $S_1 \cup ref(S_1, P) \cup NS$ を再構築できる．ここで S_1 と NS に相当する部分ソリッドモデルをそれぞれ構築し，同様の手順で和演算を行うことで，効率的な手順で形状全体のソリッドモデルが生成できる．本研究ではこの構築手順の導出のみを目的とする．

本手法ではこの基本的な考えに基づき，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，ソリッドモデルを再構築可能な全構築手順を導出し，これを1つのAND/ORグラフで表現する手法を提案する．さらに，生成したグラフを利用して，任意の対称領域からモデル構築処理を開始し，領域の平面反射と非対称領域との和演算を段階的に行うことで，もとの形状と同等の形状を再構築できることを，ソリッドモデルの代わりに点群モデルで検証する．ただし既提案法[1]では，同じ反射平面が複数回抽出されてしまうので，ユーザが前もって利用する平面を選択するものとする．

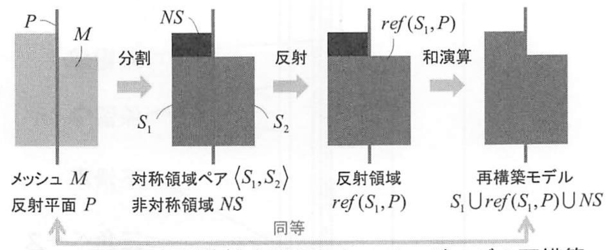

図1：平面反射対称性を利用したソリッドモデル再構築

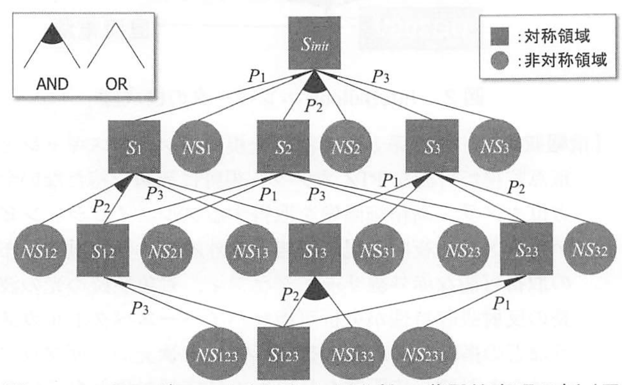

図2：AND/ORグラフを利用した対称性の階層的表現の例（反射平面が3つの場合）

3.2 AND/ORグラフを利用した階層的表現の生成

本手法ではまず，図2のように，入力メッシュを初期対称領域 S_{init} とし，これを N 個の全ての反射平面 $\{P_i \mid i = 1, \ldots, N\}$ を用いてそれぞれ対称領域ペア $\{S_{i1}, S_{i2}\}$ と非対称領域 $\{NS_i\}$ に分割し，図のような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 S_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 S_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，S_{ij} と NS_{ij} を得る．ここで S_{ij} は，対称領域 S_i，S_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 (S_i, S_{ij}) は，領域 S_i を分割し S_{ij} を生成するために用いた反射平面 P_j を表す．

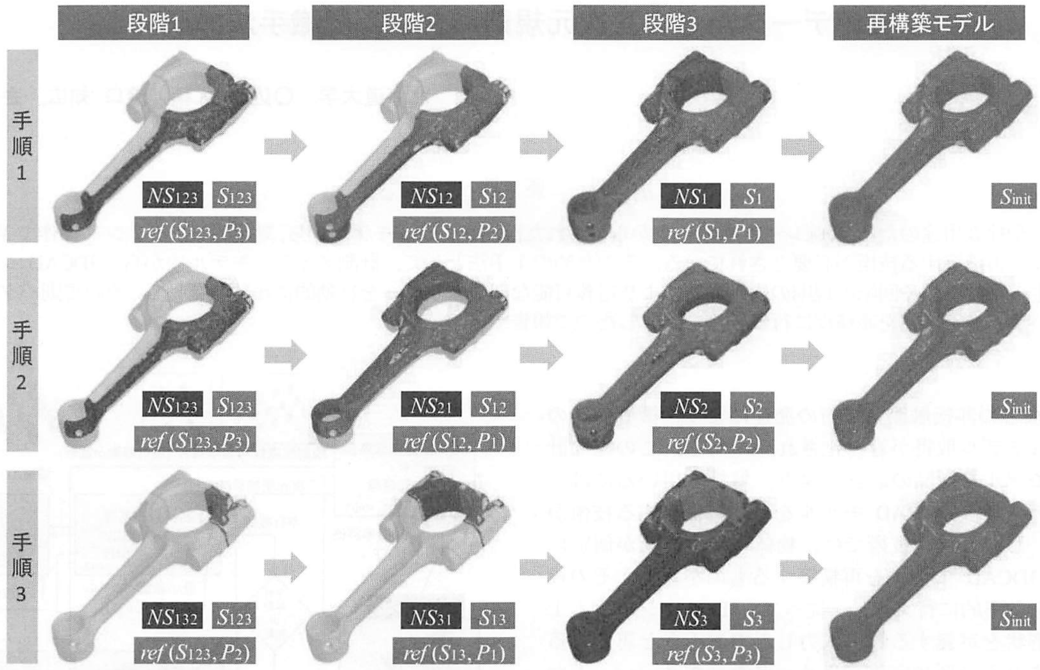

図 4：再構築した点群モデルの例（赤：対称領域，青：反射により生成された領域，黒：非対称領域）

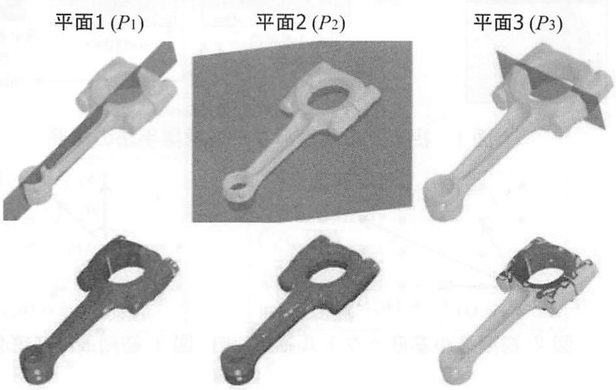

図 3：抽出された反射平面と対称領域ペア

3.3 対称性を利用したモデル再構築手順の導出

ここでは構築したグラフを利用して，ソリッドモデルを構築する手順を導出する．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．

4 実験結果と考察

図 3 に，頂点数約 12 万のコンロッドの X 線 CT 計測メッシュから，既提案法[1]により抽出された反射平面とそれらに対する対称領域ペアを示す．図 4 には，これらの平面を利用し，導出した手順に従って，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 4 中の表記は，図 2 と対応する．また，ある段階において構築したモデル $S_{ijk} \cup ref(S_{ijk}) \cup NS_{ijk}$ を，次の段階では S_{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．処理時間は，ユークリッド対称性認識に 98 秒，AND/OR グラフ構築に 0.5 秒であった．

図 5 左に，図 4 手順 1 で構築した点群モデルの構築精度検証結果を示す．検証のために，対称性から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．また図 5 右のグラフに，図 4 の 3 つの手順で構築したモデルの点間距離分布を示す．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ことになるので，評価の対象外とした．評価の結果，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．メッシュの平均稜線長が約 0.98mm であったことから，本手法により平面対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．

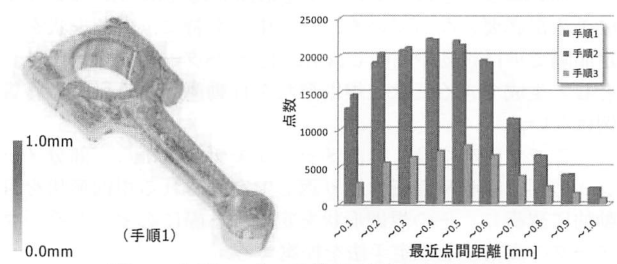

図 5：点群モデル再構築精度の検証結果

5 結論

本報告では，複数個の平面反射対称性を利用し，計測メッシュからソリッドモデルを効率的に再構築可能な全手順を 1 つの AND/OR グラフで表現する手法を提案した．さらに，導出した手順に従って，高精度に点群モデルを再構築できることを確認した．今後は，対称性認識精度の向上，認識処理時間の短縮，部分メッシュからのソリッドモデル構築手法の開発を検討している．

参考文献

[1] 溝口ら，リバースエンジニアリングのためのユークリッド対称性認識に関する研究（第 2 報），精密工学会春季大会，A05，2008.

[2] Simari, P. *et al.*, Folding meshes: Hierarchical mesh segmentation based on planar symmetry, Proc. SGP, 2006.