

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手法

北海道大学 ©溝口 知広, 金井 理

本研究では、測定メッシュから、よりコンパクトで設計意図に近いデータ構造を持つ CAD モデルを再構築するための、メッシュ上のユークリッド対称性認識手法を提案する。これにより、3DCAD システムにおいて「ミラー」や「コピー」コマンドで生成されたと考えられる CAD モデル上の部分形状が、メッシュ上で認識できる。本手法では、大規模測定メッシュに対しても効率的に、また、測定ノイズに対してロバストに対称性を認識できるといった特徴を持つ。

1 結論

近年、産業用X線CTスキャナによる、機械部品の測定メッシュモデルが入手可能となり、この測定メッシュからCADモデルを再構築する、リバースエンジニアリングの要求が高まっている。リバースエンジニアリングにおける問題点として、測定データには測定誤差やノイズが含まれるため、測定物を忠実に再現したCADモデルを必ずしも得られるとは限らないことがある。さらに、既存の手法やソフトウェアは、測定メッシュをNURBS曲面や解析曲面で近似し、それらの集合としてのCADモデルを再構築するものがほとんどであり、ユーザがCADシステム上でユーザが入力するような、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できない。

本研究では、ノイズを含んだ3次元測定メッシュから、ユークリッド対称な部分形状の認識を行い、その結果をコンパクトに表現し、CADシステムにおけるモデリング操作手順との対応付けを行うことにより、より品質の高いコンパクトな定義方法を持つCADモデルを再構築する手法の開発を目的とする。ここで、本研究においてユークリッド対称とは、平行移動対称、回転移動対称、平面反射対称を意味する。

2 対称性認識に基づくリバースエンジニアリング

本研究では、入力として実在の機械部品の測定メッシュを想定している。機械部品の多くは、その機能からユークリッド対称性を持つ場合が多い。

本研究の概要と位置づけを図1に示す。まず市販CADシステム(CATIA)におけるモデリング操作コマンドを分析した結果、図1上のように、2Dスケッチデータの定義(A1)、2Dスケッチから3Dソリッドデータの生成(A2)、コピーと平行移動・回転、ミラーリングなどの操作を組み合わせた、対称性に基づく3Dソリッドデータの生成(A3)の手順でモデリングされることが多いことがわかった。そこで本研究では、図1下のように、CADシステムにおけるこれらのモデリング手順の入力となる2Dスケッチ、押し出しや回転による2Dから3Dへのソリッド化パラメータ、平行移動、回転移動、平面反射等の対称パラメータを測定データから逆算し、測定データからのCADモデル再構築を支援する。

本報では、図1下B1の測定メッシュのユークリッド対称性認識手法について述べる。この手法では、入力測定メッシュから、CADシステム上で1つの部分ソリッドを生成しコピーした後、平行移動、回転移動、平面反射移動(ミラー)といったコマンドを適用することで生成されたと考えられる形状に対応する部分メッシュ、さらに、生成する際に定義された平行移動量や方向などの対称パラメータを推定する。

3 関連研究

リバースエンジニアリングに関する近年の代表的な手法として、松崎らの手法[1]、Varadyらの手法[2]、矢敷らの手法[3]

研究で対象とする3Dソリッドモデルの定義プロセス

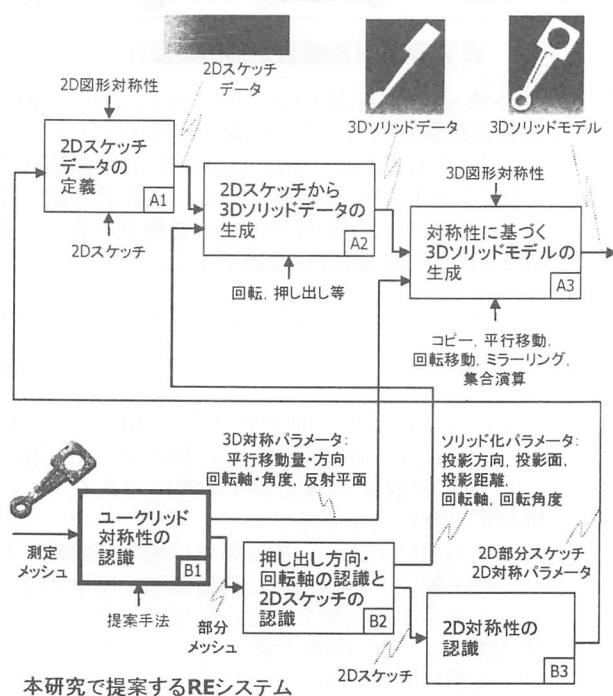


図1: 本研究の概要

が挙げられる。しかし、これらの手法で得られる CAD モデルは、メッシュ表面を曲面の集合で近似したものであり、CAD システムにおけるモデリング操作手順を直接導出するものではない。

一方、メッシュの対称性認識に関する近年の代表的な手法として、Mitra らの手法[4]が挙げられる。この手法ではまず、メッシュ各頂点の主方向ベクトルを計算する。次に、メッシュ頂点のペアに対して、それらの法線ベクトルと主方向ベクトルを互いに一致させる3つの回転成分、さらに、頂点位置が一致するように平行移動成分3つとスケール成分を計算し、それらを7次元空間に投票する。最後にこの投票空間において、投票数の大きな bin に対応する点のペアを抽出することで、互いにユークリッド対称な部分メッシュと、それらのアフィン変換行列が抽出できる。しかしこの手法は、メッシュの主方向ベクトルが定義できない平面領域を多く含む機械部品のメッシュには適用できないといった問題がある。

4 提案手法

本研究では、Mitra らの手法では不可能な平面領域間のユークリッド対称性を認識可能な、図2に示すような3ステップからなる改良手法を提案する。平面を多く含む機械部品のメッシュ

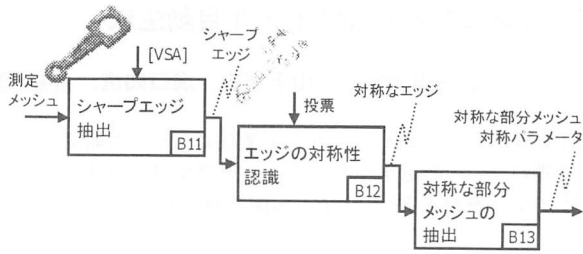


図2: 提案アルゴリズムの概要

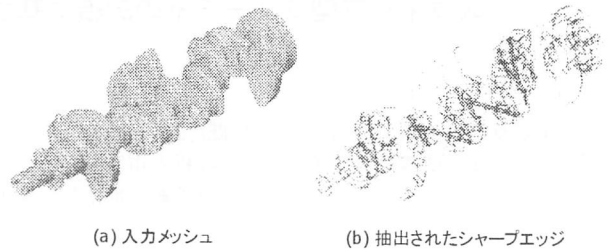


図3: X線CT測定メッシュでの実験結果

ユークリッド対称性を認識するため、まず、その形状特徴を反映するシャープエッジを抽出し(step1)、このシャープエッジに対してスムージングを適用した後、エッジの対称性認識を行い(step2)、最後に、互いにユークリッド対称な部分メッシュとそれらの対称パラメータを抽出する(step3)。以下、step1, 2の手法について述べる。

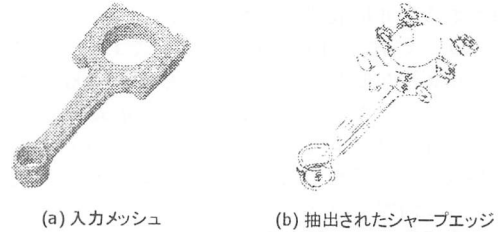


図4: X線CT測定メッシュでの実験結果

4.1 Variational Shape Approximation(VSA)を用いたシャープエッジ抽出(step1)

本手法ではまず、VSA[5]を適用し、メッシュを領域 R_1, R_2, \dots に分割し、各三角形に対してその領域ラベルを割り当てる。次に、各領域の境界線を抽出し、境界線上の各稜線に隣接する2つの三角形の領域ラベルペア (i, j) が一致する稜線集合を $E_{i,j}$ とする。最後に、各 $E_{i,j}$ に隣接する領域 R_i と領域 R_j をそれぞれ近似する平面の法線ベクトルのなす角度を計算し、これが閾値 th_{sharp} 以上である $E_{i,j}$ 内の各稜線をシャープエッジとする。閾値はいずれのメッシュに対しても、 $th_{sharp} = 45.0(\text{deg})$ に設定している。

またここで、各領域 R_i の平面度 $p(R_i)$ を式(1)で計算する。

$$p(R_i) = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} \cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_k) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{n}_i は領域を近似する平面の法線ベクトル、 \mathbf{n}_k は領域内の三角形の法線ベクトルである。ここで N_i は領域 R_i 内の三角形数である。

4.2 投票によるエッジの対称性認識(step2)

Step1 で得られるシャープエッジは、メッシュ上の稜線の集合であるため、滑らかな曲線とはならない。そこで、この曲線を2次多項式曲線で近似し、この近似曲線上にシャープエッジ上の頂点を投影することで、シャープエッジのスムージングを行う。

まず、各シャープエッジ集合 $E_{i,j}$ に隣接する2つの領域 R_i, R_j のうち、平面度が小さな領域を近似する平面上に、 $E_{i,j}$ 内のエッジに接続している N_k 個のメッシュ頂点をそれぞれ投影し、各頂点 p_k の投影平面上での局所パラメータ (u_k, v_k) を計算する。次にこれらの点に対して、式(2)で表される2次多項式曲線を最小二乗法を用いてフィッティングする。

$$f(u_k, v_k) = au_k^2 + bu_k + c \quad (2)$$

さらに、メッシュ各頂点の投影点をフィッティングされた曲線上へ投影し、この投影点 q_k における曲線の接線ベクトル \mathbf{t}_k も計算しておく。

次に、Mitraらの手法[4]をベースにした手法で、エッジ集合 $E_{i,j}$ のすべてのペア $(E_{i,j}, E_{k,l})$ に対して、対称性認識を行う。ユークリッド対称な関係にある頂点、接線ベクトル、法線ベクトルのペア $\langle (\mathbf{p}_\alpha, \mathbf{t}_\alpha, \mathbf{n}_\alpha), (\mathbf{p}_\beta, \mathbf{t}_\beta, \mathbf{n}_\beta) \rangle$ は、同じ3次元アフィン変換

行列によって一方から他方へ一意にマッピングされる。そこでまず、シャープエッジ上の頂点の接線ベクトル $\mathbf{t}_\alpha, \mathbf{t}_\beta$ と、投影に用いた平面の法線ベクトル $\mathbf{n}_\alpha, \mathbf{n}_\beta$ を互いに一致させるオイラー角 $(\theta_{\alpha\beta}, \varphi_{\alpha\beta}, \psi_{\alpha\beta})$ を計算し、これを回転移動成分とする。次に、 p_α と p_β を一致させるための各方向の移動量 $(d_{x,\alpha\beta}, d_{y,\alpha\beta}, d_{z,\alpha\beta})$ を計算し、これを平行移動成分とする。

各ペアの座標変換パラメータ6成分に対応させ、分割数 $(N_{d_x}, N_{d_y}, N_{d_z}, N_\theta, N_\varphi, N_\psi)$ で分割された、 $\theta-\varphi-\psi-d_x-d_y-d_z$ 空間の対応するbinへ投票を行い、投票数が最も多いbinのパラメータから変換パラメータを推定する。本手法では、投票数閾値 N_{vote} を設定し、これを超える投票数を持つ場合のみ、ユークリッド対称性があると判定し、bin内に投票された各パラメータの平均値を変換パラメータとして算出する。

5 実験結果と考察

図3、図4に、三角形数がそれぞれ約100万、30万のX線CT測定メッシュ(a)に対して、本手法step1までを適用した結果を示す。図(b)に示すように、適切にシャープエッジが抽出できていることが分かる。処理時間はstep1のシャープエッジ抽出に、図3のモデルに約4分、図4のモデルに約17秒であった。

6 結論

本報告では、リバーエンジニアリングのための測定メッシュのユークリッド対称性認識手法の一部について報告した。また、それらを実装し、その有効性を検証した。今後はstep3のアルゴリズムの詳細を検討するとともに、残りの実装を行い、検証・比較を行う予定である。

参考文献

- [1] 松崎ら. リバーエンジニアリングソフト MOSAIC の開発(第3報). 精密工学会秋季大会, A44, 2007.
- [2] T. Varady *et al.*. Automatic extraction of surface structures in digital shape reconstruction, *CAD*, 39(5), 379-388, 2007.
- [3] 矢敷ら. 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, 5, 593-599, 2007.
- [4] N. J. Mitra *et al.*. Partial and approximate symmetry detection for 3D geometry, *ACM TOG*, 25(3), 2006.
- [5] D. C. Steiner *et al.*. Variational shape approximation, *ACM TOG*, 23(3), 2004.