

動的計画法と拘束付フィッティングに基づく 計測メッシュからの回転型形状特徴の認識

北海道大学 ○川島 千明 金井 理

要 旨

非接触3次元計測機の発達により、メッシュモデルから整形された高品質な3DCADモデルを再構築するリバースエンジニアリングが重要となっている。本研究では、2.5次元形状のCADモデル構築によく使われる回転型フィーチャをメッシュモデル自動的に認識し、その定義データを抽出することで、設計者がCADシステム上で定義する場合と同様に定義された高品質なフィーチャ認識型3DCADモデルを構築可能なアルゴリズムの開発を目的とする。

1 はじめに

X線CTスキャナなどの性能向上に伴い、計測メッシュモデルから3DCADモデルを再構築するリバースエンジニアリングの必要性が高まっている。しかし従来のCADモデル再構築手法では、メッシュから個別のモデル境界面を認識する方法が主で[1]、設計者がCADシステム上で定義するフィーチャ認識型モデルとは異なるモデル定義となるため、再構築後のモデルの整形・修正が困難といった問題があった。

そこで本研究では、X線CT計測メッシュから、CADシステム上でのモデル定義に良く利用されるフィーチャを認識し、そのフィーチャ定義パラメータ群を高精度に抽出し、CADモデルを自動再構築する手法の開発を目的とする。既報[2]では、スイープ型フィーチャに対応するCADモデル再構築手法を報告済みであるが、本報では回転型フィーチャ認識とCADモデル再構築手法を新たに開発したので報告する。

2 回転型フィーチャ認識に基づくCADモデル構築

2.1 アルゴリズム概要

本研究で提案するアルゴリズムの概要を図1に示す。フィーチャ認識とCADモデル構築は、以下の手順で行われる。

- ① 入力計測メッシュに対し[3]の手法でセグメンテーションを行い、境界面の領域毎にメッシュ頂点群を分割する。
- ② 分割した各頂点群に対して、主曲率に基づき回転軸を計算し、同一回転軸を持つ頂点群をグループ化する。
- ③ グループ毎に頂点群をスケッチ定義平面に投影し、近似プロフィール点列を作成し、動的計画法を用いて点列から円弧・直線で構成されるスケッチプロフィール認識を行う。
- ④ プロファイルの近くに存在する平面やシャープエッジ上の頂点を計測メッシュから抽出し、投影頂点に加えて、再度精密なスケッチプロフィールを作り直す。
- ⑤ 精密なプロフィールに対して、誤差が収束するまで、3次元拘束付フィッティングによる回転軸とスケッチプロフィールの補正を繰り返す。
- ⑥ フィッティング結果から、回転型フィーチャの定義パラメータ群(回転軸 \mathbf{d}_s 、スケッチ定義平面 P_s 、スケッチプロフィール C_s 、回転角 θ_s)を抽出し、3次元CADのAPIを用い、回転型フィーチャをもつソリッドモデルを定義する。

この一連の処理を全グループの頂点群が解決するまで繰り返す。以下にこれらの処理の詳細を説明する。

2.2 回転軸の認識

2.2.1 回転軸方向ベクトルの認識

計測メッシュを入力として、各頂点の近傍領域に2次陽関数曲面をフィッティングし、メッシュの局所曲率と主方向を計算する。図2のように、最大主単位方向ベクトルを、原点

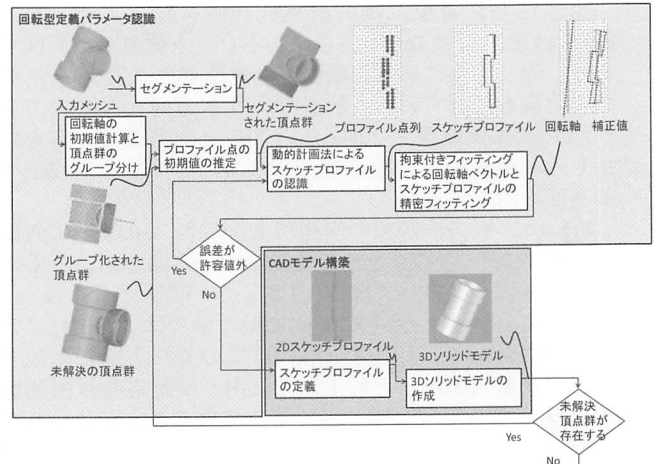


図1 回転型フィーチャ認識に基づくCADモデル再構築

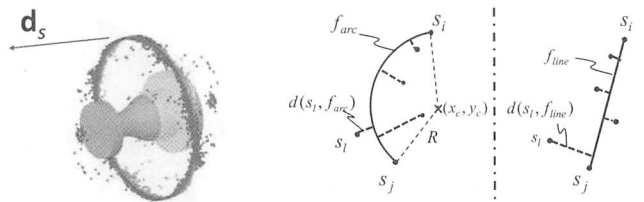


図2 最大主方向ガウス球 図3 円弧・直線のフィッティング

を中心とした単位球に投影し、最大主方向ガウス球イメージを生成する。投影されたガウスイメージに最もフィットする平面をRANSACによって求め、その平面の法線ベクトルを回転軸ベクトルとする。

2.2.2 回転軸上の点の認識

回転軸方向ベクトルを法線とする平面を一定間隔で生成し、各平面の近傍頂点群を投影する。平面ごとに投影された点にフィットする円を計算し、各平面の中心点座標の平均を回転軸上の点とする。

2.3 2Dスケッチプロフィール点列の認識

2.3.1 対象面分重心点のスケッチ定義平面への投影

回転軸を含む平面をスケッチ定義平面として定義し、平面を一定の幅をもつ矩形形状に分割する。矩形格子で囲まれた範囲を $G_w(0 \leq u < W, 0 \leq v < H)$ と定義し、回転軸に属する頂点が構成される三角形の重心点を投影する。

2.3.2 投影画像の閉鎖

3.3.1 節で得たグリッド画像に対して孤立点の消去や細線化処理を行った後に、一つの閉じた輪郭グリッドとなるように端点の間のグリッドを補完する。

2.3.3 2D プロファイル点列の生成

閉じた輪郭グリッドに対し、輪郭追跡処理を行い、追跡されたグリッド内に投影された頂点群の重心点をそのグリッドの代表点として計算することで、順序づけられた2Dスケッチプロファイル点列 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ を得る。

2.4 動的計画法を用いた円弧と直線のフィッティング

3.3.3節で得たプロファイル点列に対して、[4]の手法で動的計画法に基づいた円弧と直線のフィッティングを行う。このフィッティング手法では、円弧、または直線でフィットされる M 個のセグメント端点集合 $V = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ を端点を持つ $M-1$ 個の各セグメントに対して、まずは図3のように、フィッティング誤差 $e_p(v_k, v_{k+1})$ を計算する。

各セグメントのフィッティング誤差 e_k は、直線と円弧のフィッティング誤差 e_{line} , e_{arc} のうち小さい方として計算できる。

さらに、セグメント全体の誤差 E_p が最小となるときのセグメントの集合を2Dスケッチプロファイルとする。なお本処理の詳細は、前報[2]を参照いただきたい。

2.5 拘束付きフィッティングによる回転軸ベクトルと2Dスケッチプロファイルの精密フィッティング

求めた回転軸 (d, p) 周りに2Dスケッチプロファイルを回転してできる回転面 Φ に対して、3.2.4節で選んだ投影対象頂点が最も良くフィッティングするように回転軸を[5]の手法により補正する。この手法では、以下の式(1)で与えられた、頂点群 $X^0 = (x_0^0, x_1^0, \dots, x_N^0) \subset \mathbf{R}^3$ から回転面 Φ までの二乗距離関数 d^2 の二次テイラー近似 $F_2(c, \bar{c})$ が最小となる速度ベクトル $c = (c_1, c_2, c_3)$ と角速度ベクトル $\bar{c} = (\bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{c}_3)$ を、過拘束連立一次方程式から解く。

$$F_2(c, \bar{c}) = \sum_{i,j=1}^2 \alpha_{i,j} [\mathbf{n}_{i,j} \cdot (\bar{c} + c \times \mathbf{x}_i^0)]^2 + \tilde{F}_2(c, \bar{c})$$

$$\tilde{F}_2(c, \bar{c}) = \sum_i [\mathbf{n}_i \cdot (\bar{c} + c \times \mathbf{x}_i^0) + d_i]^2 \quad (1)$$

$$\alpha_{i,1} = \frac{d_i}{d_i - \rho_{i,1}}, \quad \alpha_{i,2} = \frac{d_i}{d_i - \rho_{i,2}}$$

ここで、 $\rho_{i,j} (j=1,2)$, $\mathbf{n}_{i,j} (j=1,2,3)$ は Φ 上の \mathbf{x}_i^0 の最近点 \mathbf{s}_i^0 における、曲率、主方向ベクトルと法線ベクトルを、 d_i は \mathbf{x}_i^0 と \mathbf{s}_i^0 の符号付き距離をあらわす。その後、求めた (c, \bar{c}) を用いて式(2)から補正後の回転軸 (d', p') を求める。

$$p' = p + \bar{c} \times c \times p$$

$$d' = d + c \times d \quad (2)$$

2.6 フィーチャパラメータに基づくCADモデル生成

これまでの処理で得られた回転軸ベクトル、スケッチ定義平面、セグメントの端点座標と種類のパラメータを、APIを介して3DCADシステムに渡すことで回転型フィーチャを持つ三次元ソリッドモデルを生成する。

3 実行結果

3.1 疑似計測モデルに対するフィーチャ認識結果

CADモデルのメッシュ分割に人工的なノイズを重畳した疑似計測メッシュモデル(図4)から認識された回転型フィーチャのプロファイルを図5に示す。回転軸方向の真値に対する角度誤差は最終的に0.1[deg]以下に収束し、プロファイルの各寸法誤差もコーナ部以外はメッシュ稜線長の1/2以内に収まり、提案手法が十分な精度をもつことが判る。



面分数:21044
平均稜線長:2.23[mm]

図4 疑似計測メッシュモデル

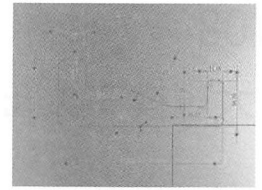


図5 プロファイル認識結果

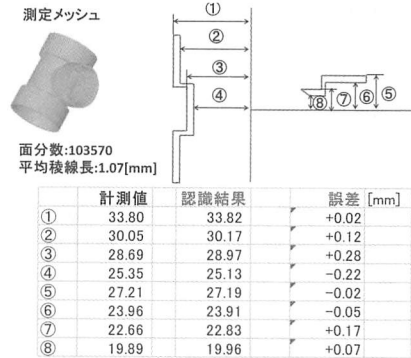


図6 回転型フィーチャ認識精度検証

3.2 CT計測モデルからのフィーチャ認識とCADモデル構築

塩化ビ製T字パイプのX線CTスキャンメッシュに対し、提案アルゴリズムに

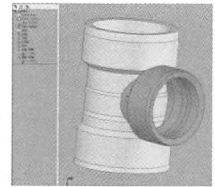


図7 ソリッドモデル再構築結果

による回転型フィーチャ認識とCADモデル生成を行った。図6にフィーチャ認識から最終的に生成されたソリッドモデルを、図7に生成されたモデル各部の内径のデジタルノギスによる計測値との誤差を示す。プロファイル認識の一部で直線が分割される問題があるものの、内径寸法の最大誤差は0.5mm程度であり、メッシュの平均稜線長(1.07mm)を考慮すると十分な精度でCADモデルが再構成できていることが判る。

4 おわりに

動的計画法と拘束付きフィッティングを組み合わせ、計測メッシュから円弧と直線の組み合わせでプロファイルが定義される回転型フィーチャを自動的に認識し、3次元CADモデルを自動生成するアルゴリズムを開発し、計算機実験によりその有効性を確認した。

参考文献

- [1] T. Várady, M.A.Facello, and Z.Terék, "Automatic extraction of surface structures in digital shape reconstruction, Computer-Aided Design, 39(5), pp.379-388.(2007)
- [2] 山下 他:"スウィープ型フィーチャ認識に基づく測定メッシュからのCADモデル自動生成", 精密工学会春季大会学術講演論文集, A10 (2008)
- [3] 溝口 他:"Region Growing/Mergingを用いた効率的なメッシュセグメンテーション", 精密工学会誌74(7) pp.752-759 (2008)
- [4] J. H. Horng, et al.:"A dynamic programming approach for fitting digital planar curves with line segments and circular arcs," Pattern Recognition Letters, 22(2), pp.183-197 (2000).
- [5] Y. Liu, et al.:"Constrained 3D shape reconstruction using a combination of surface fitting and registration," Computer-Aided Design, 38(6), pp.572-583 (2006).