

要 旨

設計や検査用途のため、X線レーザスキャナから得られた計測メッシュモデルから、効率的なモデリング操作で3D-CADモデルへ再構築する技術が必要とされている。そのための1手法として、計測メッシュモデル中から、3DCADシステムで一定の平行移動や回転の規則の繰り返しにより定義可能な部分メッシュを自動的に複数個発見し、その規則パターンの定義パラメータ推定を高精度に行う手法を開発したので報告する。

1. はじめに

X線 CT などの非接触測定技術の発達により、機械部品の計測メッシュモデル取得が容易化されつつある。このような計測メッシュモデルを製品の設計、検査、解析に用いるには、メッシュモデルから3DCADモデルを自動再構築する技術が必要である。しかし現状技術では、物体の各境界面が個別に定義された3DCADモデルを再構築するものが多く、その後の形状変更を効率的に行えない。従って、3DCADシステム上で設計者が形状を定義する際に入力したであろうと思われる形状定義操作とその形状定義パラメータを計測メッシュ上から自動認識し、そのパラメータを活用した3DCADモデル生成手法が必要となっている。この中でも特に、部分形状を一定間隔で平行移動や回転し、CAD上で「パターンフィーチャ」として生成できる三次元規則形状を自動認識する研究の報告例はない。

そこで本研究では、計測メッシュモデル上から、部分メッシュの平行移動や回転の繰り返しで定義される規則形状を自動的に認識し、その規則形状を定義する際に必要となるパラメータの高精度な推定手法を提案する。

2. 提案する三次元規則パターン認識手法

提案する三次元規則パターン認識手法は、図1に示すように大きく3つのStepから構成される。

Step1) 規則配置候補領域集合と二次元座標の認識

まず、計測メッシュ上の各頂点に対して、二次多項式曲面フィッティングを行い、各頂点の最大主曲率を計算する[1]。この最大主曲率の計算結果より、メッシュ頂点をシャープ頂点と非シャープ頂点とに分類し、シャープ頂点に囲まれた領域にメッシュをセグメンテーションする[1]。次に、セグメンテーションにより得られた領域集合 $\{R^i\}$ から規則配置候補領域のみを選択するために、ICPアルゴリズム[2]を用いる。ICPとは反復計算により対応頂点間の誤差を最小化し領域マッチングを行う手法である。これによって領域形状間の合同性評価を行い、同一なものを規則配置候補領域集合 $\{PDR^i\}$ として抽出する。最後に、 $\{PDR^i\}$ の重心点群 $\{G^i\}$ に対する最小二乗平面フィッティングから各参照平面を推定し、その参照平面へ各領域メッシュ頂点の重心点群 $\{G^i\}$ を投影することにより、その投影領域重心点の二次元座標群 $\{u_i, v_i\}$ を求めると。

Step2) 参照平面上での規則パターン定義パラメータ抽出

重心点群 $\{G^i\}$ に対し、[3]の手法を独自改良した手法を用い、規則パターンの定義パラメータを以下の手法で抽出する。

(a) 初期最小基底ベクトル抽出と2Dindex付け

- Step1で求めた投影領域重心点の座標を、ある投影領域重心点 \mathbf{v}_1 を原点とする位置ベクトル $\mathbf{v}_i = (u_i, v_i)$, $(1 \leq i \leq n)$ に変換する。ただし n は規則配置候補領域数である。
- \mathbf{v}_1 を導出した領域 PDR^i の部分メッシュを、他の領域

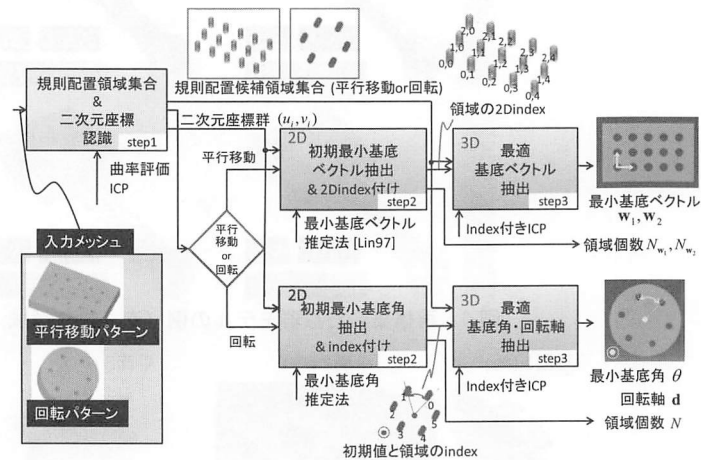


図1 提案する規則パターン認識手法の概要

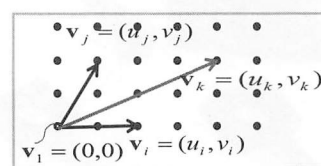


図2 初期最小基底ベクトル抽出

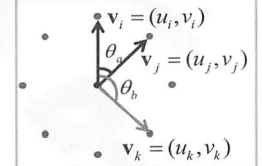


図3 初期最小基底角抽出

PDR^k , $(2 \leq k \leq n)$ に $\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_1$ 分だけ平行移動させ、 PDR^1 の部分メッシュ各頂点と、 PDR^k の部分メッシュ頂点群との最近点を探索する。領域間の全点間の最近距離が一定値以下の場合、 PDR^k に対応する \mathbf{v}_k , $(2 \leq k \leq n)$ を同一パターン間の変位を表すベクトルとして認識する。但し、最近点は頂点法線間の角度が $15.0[\text{deg}]$ 以下の点に限定とする。

- 2)で認識されたベクトルに含まれる任意の $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$, $(2 \leq i < j \leq n)$ を、ベクトルペアとして選択する。
- 2)で認識されたベクトルに含まれる \mathbf{v}_k , $(2 \leq k \leq n)$ に対し、(1)式より a, b を計算し、(2)式のスコア関数 $S(i, j)$ を計算する。但し a', b' は a, b のround integerである。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i & u_j \\ v_i & v_j \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S(i, j) = S(i, j) + \frac{1 - 2\max(|a - a'|, |b - b'|)}{\max(|v_i|, |v_j|)} \quad (2)$$

- 全てのベクトルペア $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ に対してスコア関数 $S(i, j)$ を計算し、スコアが最大となるベクトルペア $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ を、初期最小基底ベクトル $\mathbf{w}_1^{l, \text{init}}, \mathbf{w}_2^{l, \text{init}}$ とする。 l はパターンのindexである。
- 初期最小基底ベクトル $\mathbf{w}_1^{l, \text{init}}, \mathbf{w}_2^{l, \text{init}}$ を(1)式の $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ の代わりに代入し、各領域の2Dindexとなる整数対 (a_i, b_i) を求める。以上の1)~6)を繰り返すことにより、候補領域集合の個数分の $\mathbf{w}_1^{l, \text{init}}, \mathbf{w}_2^{l, \text{init}}$ を求めることができる。

(b) 初期最小基底角抽出と index 付け

- 1) 投影領域重心点群に対して、円フィッティングを行い中心点座標 $\mathbf{p}^{l,init}$ を抽出する。 $\mathbf{d}^{l,init}$ を参照平面法線にとる。
- 2) $\mathbf{p}^{l,init}$ から各投影領域重心点へのベクトル $\mathbf{v}_i = (u_i, v_i)$, $(1 \leq i \leq n)$ を作成する。
- 3) (a)-2) と同様に、同一パターンを表すベクトル \mathbf{v}_k , $(2 \leq k \leq n)$ を認識する。
- 4) (a)-3) と同様に $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$, $(2 \leq i < j \leq n)$ をベクトルペアとして選択する。
- 5) \mathbf{v}_k , $(2 \leq k \leq n)$ に対し、(3)式のスコー関数 $S(i, j)$ を計算する。但し $\theta_a = \text{ang}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j)$, $\theta_b = \text{ang}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_k)$, $c = \theta_b / \theta_a$, c' は c の round integer, θ_a の単位は[deg]とする。

$$S(i, j) = S(i, j) + \frac{1 - 2|c - c'|}{\sqrt{\theta_a}} \quad (3)$$

- 6) 全ベクトルペア $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ に対し、スコー関数 $S(i, j)$ を計算し、スコアが最大となる $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ の間の角度 θ_a を初期最小基底角 $\theta^{l,init}$ とする。
- 7) $c_i = \theta_b / \theta^{l,init}$ より、各領域の index となる c_i を求めることができる。以上の 1)~7) を繰り返すことにより、候補領域集合の個数分だけ $\mathbf{p}^{l,init}, \mathbf{d}^{l,init}, \theta^{l,init}$ を求めることができる。

Step3) メッシュ上での規則/パターン定義パラメータ抽出

(a) 最適基底ベクトル抽出

一つの参照領域を 2Dindex (a_i, b_i) で与えられる基底ベクトルの整数倍分だけ平行移動させ、他の全領域にフィッティングした際、フィット誤差が最小となる最適基底ベクトルを高精度に求める index 付き ICP を以下の手順で行う。ただし 2Dindex $(a_i, b_i) = (i, j)$ とする。

- 1) 参照領域 $R^{0,0}$ のある頂点 $\mathbf{X}_k^{0,0}$ に対する他の各領域 $R^{i,j}$ の対応点 $\mathbf{X}_{c(k)}^{i,j}$ を最近点探索により計算する。
- 2) 式(4)の最小二乗解を、 $\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2$ について線形最小二乗法で求める。ただし、 N_i, N_j は $\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2$ 方向の各領域個数、 $n^{i,j}$ は各領域 $R^{i,j}$ の頂点数である

$$\sum_{i=0}^{N_i-1} \sum_{j=0}^{N_j-1} \sum_{k=1}^{n^{i,j}} \left| \mathbf{X}_{c(k)}^{i,j} - (\mathbf{X}_k^{0,0} + i\mathbf{w}_1 + j\mathbf{w}_2) \right|^2 \quad (4)$$

- 3) 1)~2)を反復計算し対応点間平均誤差 e_n の変化量 $|e_n - e_{n-1}|$ が閾値 th_{error} 以下になった場合、処理を終了し、その最小二乗解を最適な最小基底ベクトル $\mathbf{w}_1^{l,opt}, \mathbf{w}_2^{l,opt}$ とする。
- 4) 1)~3)を繰り返す事により、パターンに含まれる領域集合の個数分だけ $\mathbf{w}_1^{l,opt}, \mathbf{w}_2^{l,opt}$ が求められる。さらに見かけ上異なるパターンのもつ最小基底ベクトルの中で、方向、大きさが同一のパターンで、領域同志が隣接している場合は、これらのパターンを1つに統合する。

(b) 最適基底角・回転軸抽出

一つの参照領域を index c_i で与えられる基底角の整数倍分だけ回転させて、他の全領域にフィッティングした際、フィット誤差が最小となる最適な最小基底角を求める index 付き ICP を以下の手順で行う。ただし index $c_i = i$ とする。

- 1) 参照領域 R^0 のある頂点 \mathbf{X}_k^0 に対する他の各領域 R^i の対応点 $\mathbf{X}_{c(k)}^i$ を最近点探索により計算する。
- 2) (5)式の最小二乗解を $\theta, \mathbf{d}, \mathbf{p}$ について求める。非線形のため Levenberg-Marquart 法を用い、初期値として 2 節(b)で述べた $\theta^{l,init}, \mathbf{d}^{l,init}, \mathbf{p}^{l,init}$ を使用する。

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=1}^{n^i} \left| \mathbf{X}_{c(k)}^i - \{ \text{rot}(i\theta, \mathbf{d})(\mathbf{x}_k^0 - \mathbf{p}) + \mathbf{p} \} \right|^2 \quad (5)$$

- 3) 1)~2)を反復計算し、対応点間平均誤差 e_n の変化量 $|e_n - e_{n-1}|$ が閾値 th_{error} 以下になった場合、処理を終了し、その時の最小二乗解を、最適な最小基底角 $\theta^{l,opt}$ 、回転軸方向

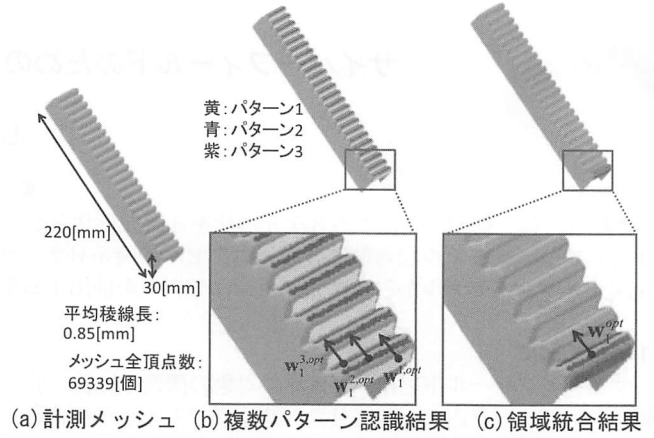


図4 平行移動パターンに対する実行結果

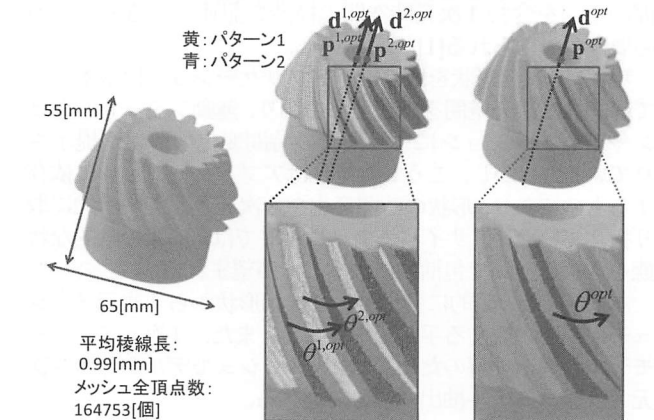


図5 回転パターンに対する実行結果

- $\mathbf{d}^{l,opt}$ 、回転軸上の一点 $\mathbf{p}^{l,opt}$ とする。
- 4) (a)と同様にして、同一パターンを抽出し、それらのパターンを1つに統合する。

3. 実行結果と今後の課題

図 4(a)に示す三次元レーザスキャナから得られたラックの計測メッシュに対する、本手法による平行移動パターンの認識結果を図 4(b), (c)に示す。計測メッシュ内の全規則領域が抽出され、妥当な基底ベクトルが選択されていることがわかる。図 4(b)より、複数のパターンが認識され、抽出された領域間隔は $|\mathbf{w}_1^{1,opt}| = 9.42$ [mm], $|\mathbf{w}_1^{2,opt}| = 9.44$ [mm], $|\mathbf{w}_1^{3,opt}| = 9.39$ [mm] となった。さらに図 4(c)より、同一と思われる基底ベクトルを持つパターンを統合した結果、 $|\mathbf{w}_1^{opt}| = 9.42$ [mm] となった。製品の \mathbf{w}_1 方向の領域間隔の基準値が 9.5[mm]であり、レーザ計測の平均誤差が 0.1[mm]程度である事から、高精度な認識が可能といえる。この例では、一方向にのみの規則性のため、 \mathbf{w}_2 方向の認識は行わなかった。また、図 5(a)に示す X 線 CT スキャナから得られたヘリカルギアのメッシュに対する、本手法による回転パターン認識結果を図 5(b), (c)に示す。実製品の回転角度間隔 24.0[deg]に対し、抽出された角度間隔は 23.992[deg]となり、高精度な認識結果が得られた。今後は、平行移動・回転の組み合わせを用いるパターンの認識が課題となる。

参考文献

- [1] Mizoguchi, T., Date, H., Kanai, S., and Kishinami, T., 2007, "Quasi-optimal mesh segmentation via region growing/merging," Proc. ASME/DETC, No.35171.
- [2] Rusinkiewicz, S., et al. 2001, "Efficient variants of the ICP algorithm," Proc. of 3DIM, pp.145-152.
- [3] Lin, H.C., et al., 1997, "Extracting periodicity of a regular texture based on autocorrelation functions," Pattern Recognition Letters, 18, pp.433-443.