

コンピュータビジョンによる マイクロ製品の形状評価方法

末安 秀匡[†] 前川 卓[†]

本研究では、マイクロ光造形技術や超精密加工技術により作成された数百 μm オーダーのマイクロ製品を、光学顕微鏡により撮影した複数枚の画像から 3D-CAD データとして復元し、造形の元になった 3D-CAD モデルと比較する形状評価システムを提案する。形状復元は、Shape From Silhouette (SFS) 法や Shape From Focus (SFF) 法等のコンピュータビジョン技術を用いて行い、三角形メッシュモデルとして出力する。

3D shape evaluation of micro products using computer vision techniques

HIDETADA SUEYASU[†] TAKASHI MAEKAWA[†]

We present a method to evaluate the shape of 3D micro objects with outer dimensions about several hundred microns from multiple 2D images of an object taken from different views. We combine the Shape-From-Silhouette (SFS) method and the Shape-From-Focus (SFF) method to construct a voxel-based 3D model from multiple images. In order to make the resulting model compatible with a commercial CAD/CAM system, the voxel model is converted into a triangular mesh using the marching cubes algorithm. As a final step, we evaluate the shape of reconstructed model by comparing it with the original CAD model.

* [†] 横浜国立大学大学院
Yokohama National University, Department of Mechanical Engineering.

1. はじめに

近年 3D-CAD と光造形技術の発展に伴い、数百 μm オーダーの小さい製品(以下マイクロ製品)を製造することが容易になってきた。しかし、マイクロ製品の形状評価に用いられているレーザー顕微鏡では、レーザーを当てる方向を任意に定めることが困難であり、1方向からのみ照射することで形状評価を行っているため、3次元形状全体を復元することは困難である[1]。Atsushi ら[1]は、Shape From Silhouette(SFS)法に基づいたマイクロ製品の3次元形状評価システムを提案している。しかし、数百 μm より小さい対象物に対しては200倍を超える倍率のレンズを使用しなければならないため、被写界深度が浅くなることによりピンボケが発生し、シルエット抽出が困難となるため Atsushi らの方法をそのまま適用することはできない。そこで本研究では、光学顕微鏡を用いて撮影した複数枚の画像から SFS 法と Shape From Focus (SFF) 法の技術を組み合わせることで上記の問題点を解決し、より高倍率でのマイクロ製品評価システムを開発することを目的とする。

2. 三次元形状復元・評価の方法

2.1 形状復元・評価の流れ

本研究では、対象物体を撮影テーブル上に置き、図 1(a)白枠内及び図 1(b)に示すサーボモータを用いてマイクロスコープを一定間隔で被写体に近づけていき、焦点の合っている位置が異なる画像を複数枚撮影する。各ピクセルについて、合焦判定法により最も焦点が合っている画像を選出し、焦点が合っていると判断したピクセルを抽出する。抽出後の画像に対して、層毎に重ね合わせた結果を物体のシルエットとする。次にターンテーブル(図 1(b))を回転させて他の視点から同様の操作を行うことにより多視点からシルエットを抽出する。得られた複数のシルエットと深さ情報から SFS 法と SFF 法を適用することにより物体の3次元形状を復元し、3D-CAD データとして出力を行う。最後に、元の CAD データとの比較による形状評価を行う。



図 1 (a) 装置概要, (b) 拡大図

Figure 1 (a) Data acquisition system and (b) Close-up view.

2.2 合焦判定法

本研究では、画像をフーリエ変換し、周波数領域においてフィルタリングを行う Malik ら[5]の手法を用いる。

Malik らの手法について、まず、式(1)を用いて全ての画像のピクセルについて合焦値を計算する[8].

$$i_c(x, y) = \text{Re}[F^{-1}(F(|\Gamma_0(x, y)|^2)OTF_\Omega(k_x, k_y))] \quad (1)$$

ここで、 F はフーリエ変換、 F^{-1} は逆フーリエ変換、 Re は実部を表している。また、 OTF は光学的伝達関数(Optical Transfer Function)の略で、フィルタリングの役割を担っており、以下のように表される。

$$OTF(k_x, k_y) = \exp[-\sigma_1(k_x^2 + k_y^2)] - \exp[-\sigma_2(k_x^2 + k_y^2)] \quad (2)$$

式(2)において、 k_x と k_y は空間周波数であり、 σ_1 と σ_2 は定数である。本研究では、[5]より、 $\sigma_1 = 0.01$ 、 $\sigma_2 = 0.1$ を用いる。次に、式(1)より得られた値を式(3)に用いる。

$$FM_o(i, j) = \sum_{x=i-N}^{i+N} \sum_{y=j-N}^{j+N} i_c(x, y) \quad (3)$$

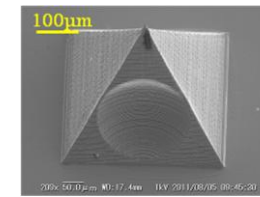
本研究では $N = 5$ を用いる。そして、式(3)から得られた結果と式(4)を用いることにより合焦点であるピクセルを抽出する。

$$[M_p(i, j), M_f(i, j)] = \max_k [FM_o(i, j)_k] \quad (4)$$

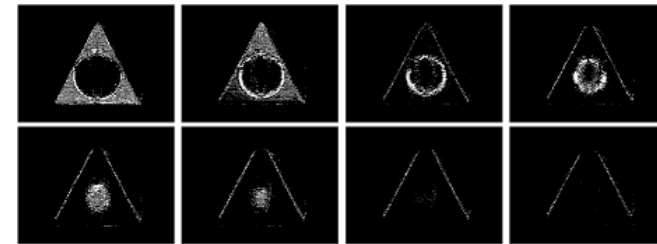
ここで、 k は画像の枚数であり、 M_p は最合焦値を含んだ2次元配列、 M_f はピクセル群が最合焦した場所に相当する画像番号を含む2次元配列となっている。最後に閾値判定を行い、複数枚の画像から焦点が合っているピクセルを抽出し、層毎に重ね合わせることで疑似的にシルエットを抽出する。図2(a)に示す物体に対して、レンズを一定間隔で動かしながら複数回撮影を行い、取得した画像に合焦判定を行った結果を図2(b)に示す。

2.3 Shape From Silhouette (SFS)法

本研究は、光学顕微鏡のターンテーブル上に測定対象物を載せ、ターンテーブルをステップモーターで制御し、一定角度ごとに回転させることで多視点からの撮影を行い、それぞれの視点において得られたシルエットからSFS法[1,6,8]を用いて対象物



(a)



(b)

図2 (a) SEMにより撮影された画像（水平面から45度傾けて撮影）、
(b) 合焦点位置の推移（水平面から30度傾けて撮影）。

Figure 2 (a) Image of the micro object taken by SEM and
(b) Various focus images of object in image(a).

の3次元形状を復元する。SFS法とは、シルエットとカメラの射影中心が形成する錐体をそれぞれの画像間で交差させ、交差する共通部分（以下 Visual Hull）を表現することにより3次元形状を復元する方法である。本研究では Visual Hull の表現方法としてボクセルを用いる。

取得したシルエットから3次元形状を復元するためには2次元の画像座標系と3次元の世界座標系の対応を明確にする必要がある。

一般的なカメラキャリブレーションの手法としてZhang[7]の手法があるが、本研究のようにズームレンズを用いる場合には適用することができない。そこで本研究ではSilhouette Coherenceを用いたカメラキャリブレーションを適用する[2,8].

2.4 Shape From Focus (SFF)法

2.2節において述べた合焦判定法について、撮影時におけるマイクロscopeの移動量を計測しておくことにより、それぞれの画像に関して、視点からの深さ情報を取得することができる[8].

合焦判定法によって、層毎にピントが合った画像を取得し、これらの画像と深さ情

報を用いることにより、3次元の点群を生成することができる。ただし、各層間の点群には段差があるため、層と層が滑らかに繋がるように、近傍点の高さ平均から点群を平滑化することにより形状を復元する。

平滑化処理について、周囲のピクセルの情報を単純に平均化すると、合焦判定において取得した深さと大きく異なる結果となる可能性がある。そこで本研究では、注目するピクセルの深さの特徴を残しながら平滑化を行えるよう、加重平均フィルタを用いる。これは、単純な平均ではなく、処理の対象となる中央のピクセルに対して大きな重みづけを行うフィルタである。その中でも、重みづけをガウス分布に近づけたガウシアンフィルタを使用する。今回、画像がx軸、y軸の2次元で表されているため、ガウス分布は次式で表される。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

ここで、図2(b)の抽出結果を用いて視点からの深さを復元した結果を図3に示す。

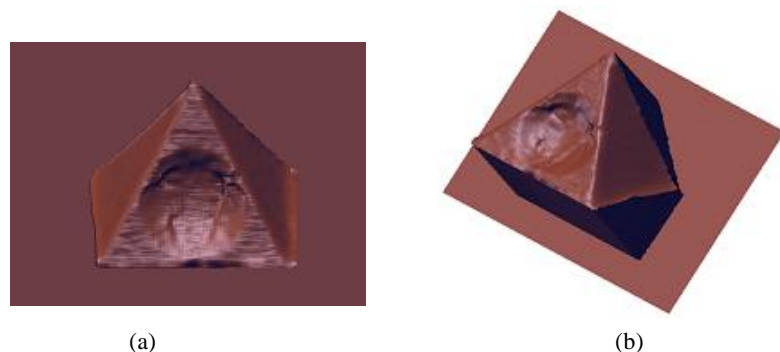


図3 SFFの結果: (a) カメラ視点から見た復元モデル、
(b) (a)の復元モデルを斜め上から見た画像。

Figure 3 Result of SFF: (a) Reconstructed model viewed from camera center and
(b) Result from another viewpoint.

2.5 SFS法とSFF法の統合

本研究において、対象物体の3次元形状を復元する手法としてSFS法を用いるが、SFS法では物体のシルエットを用いるため、シルエットに現れない凹形状部分については復元されないという問題点がある。そこで、SFS法とSFF法を統合することにより、上記問題点を解決した形状復元を行う。統合の具体的な手順を以下に示す。なお、図4に示すモデルは図2、図3に示したものと同一モデルである。

I 視点からの深さ取得: SFF法を用いて、シルエット画像の各ピクセルにおける視点からの深さを算出する(図3)。

II ボクセルモデルの復元: SFS法を用いてボクセルによる3次元形状復元を行う。

III 画像への再投影: IIにおいて復元したモデルの全てのボクセルを、式(6)を用いて画像に再投影し、投影先のピクセルにおける深さ情報を取得する(図4)。また、深さが最小のものを「基準ボクセル」として取得する。

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]\tilde{\mathbf{M}} \quad (6)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{m}}$ は画像座標の同次座標系を、 $\tilde{\mathbf{M}}$ は世界座標の同次座標系を、 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ は世界座標とカメラ座標を対応づける行列、 \mathbf{A} はカメラ座標系と画像座標系を対応づける行列を表す。なお、 $\mathbf{A}[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ はカメラキャリブレーションの際に求めてある。

IV 視点までの距離を取得: IIにおいて復元したモデルの全てのボクセルについて、カメラ座標に変換することにより視点までの距離を取得する。

$$\mathbf{M}_C = [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]\mathbf{M}_W \quad (7)$$

ここで、 \mathbf{M}_C は各ボクセルのカメラ座標を、 \mathbf{M}_W は各ボクセルの世界座標を表す。

V 不要なボクセルの削除: IIIにおいて取得した基準ボクセルに対して、次式に当てはまる(Iで取得した深さを満たさない)ボクセルを削除する。

$$(D_i - MinD) > (Z_{Ci} - MinZ) \quad (8)$$

ここで、 D_i は各ボクセルに関する深さ(IIIで取得した深さ)、 $MinD$ は基準ボクセルの深さ、 Z_{Ci} は各ボクセルの視点までの距離(IVで取得した距離)、 $MinZ$ は基準ボクセルの視点までの距離をそれぞれ表す。

統合におけるボクセル投影の様子を図4に示す。今回、図4の○印の近傍が基準ボクセルとなり、△印の近傍は不要なボクセルとして削除される。なお、図4に示す3つの○印、△印は、それぞれ対応する位置を示している。

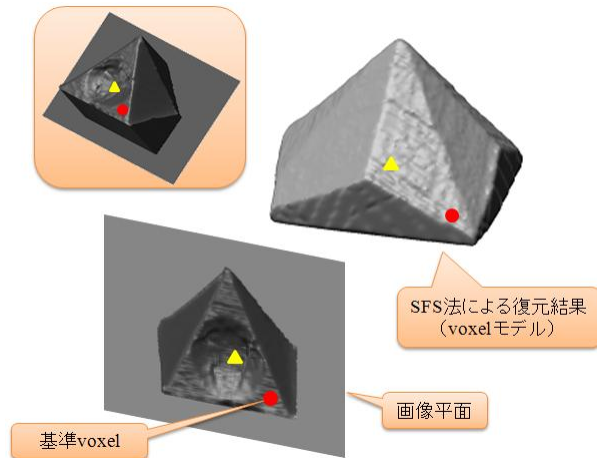


図 4 ボクセルの投影による深さの参照.
Figure 4 Depth reference by projecting voxels onto an image plane.

ここで、図 4 における SFS 法の復元結果が実体とは幾分異なる形状として復元されているのは、視点の数が 4 つ、撮影角度が水平から 30 度、という条件下であることが原因と考えられる。ただし、このような条件下でも、SFF 法と組み合わせることで、より実体に近い形状復元を行うことが可能である。その結果については後述する。

以上の操作を行った後に、Marching Cubes 法[4]を用いて、ボクセルモデルを三角形メッシュモデルに変換する。さらに、得られたメッシュモデルに Laplacian Smoothing を適用することにより最終的な三角形メッシュモデルを生成する。

2.6 形状評価

本研究で形状評価を行うマイクロ製品は 3D-CAD でモデリングし、光造形等で作成されたものを対象としている。従って、復元したモデル (以下モデル A) と造形の元となった 3D-CAD (以下モデル B) を比較することにより形状評価を行う。具体的には、モデル AB 間での Localization[3]を行った後に、モデル A の三角形メッシュモデルの頂点の近傍にあるモデル B のメッシュを探し出し、頂点からメッシュに対して距離計算を行う。その平均値 E_{mean} と、 E_{mean} の値をモデル B のバウンディングボックスの対角線の長さで割った値を百分率で表した値を E_n とする。この 2 つの値を評価指数として形状評価を行った。図 5 に、本研究における 3 次元形状復元・形状評価の Flowchart を示す。なお、図 5 (b)(c)(d) における記号 A, B, C はそれぞれ対応する位置を表す。

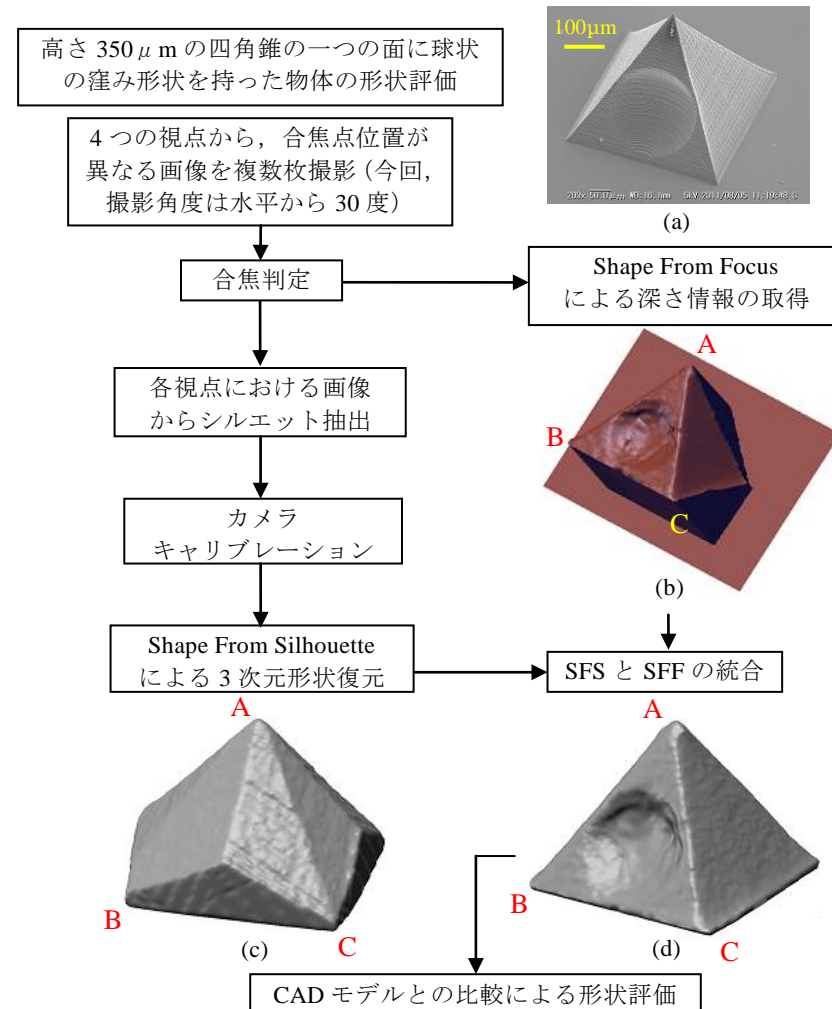


図 5 形状評価の Flowchart: (a) SEM による撮影画像, (b) SFF の結果, (c) SFS の結果, (d) SFS と SFF の統合結果.
Figure 5 Flowchart of evaluation: (a) Image of the micro object taken by SEM, (b) Reconstruction by SFF, (c) Reconstruction by SFS, and (d) Result of the integration of SFS and SFF.

3. 実験結果

本研究では、デジタルマイクروسコープ(KEYENCE社 VHX-900), レンズ(VH-Z100 R)を用いて対象物体を撮影した. 物体をステップモータにより制御されたターンテーブル上に置き, ターンテーブルを 90 度ごとに回転させ, 4 つの視点から, また, 各視点においてサーボモータを用いてマイクروسコープを一定間隔(0.01mm)で対象物に近づけて撮影を行った. また, レンズは水平面から 30 度傾けた状態で撮影を行い, レンズ倍率は 400 倍, 解像度は 1600×1200 (pixels)とした.

対象物体について, 今回, ① 高さ 350 μ m の四角錐の一つの面に球状の窪み形状を持った物体 (図 5(a)), ② 高さ 400 μ m 程度のうさぎのモデル (図 7(a)), ③ 高さ 400 μ m 程度のリスのモデル (図 8(a)), 以上 3 つの物体に対して実験を行った. その結果を表 1, 図 6~8 に示す. また, 評価結果に関しては, 元の CAD モデルに対して凸な部分を赤, 凹み部分を青, 誤差が無い部分を緑, として色付けした結果となっている. 表 1 に示すように, モデル①の最大誤差が比較的大きくなっているが, これは, 図 6 (b) の窪み形状上部の青い部分のように局所的なノイズを十分に除去しきれなかったことに起因している.

表 1 実験結果

Table 1 Reconstructed results of our system.

Object	Bounding box diagonal [mm]	# of vertices	E _{max} [mm]	E _{mean} [mm]	E _n [%]
①	0.663	82314	0.0697	0.00426	0.642
②	0.463	79800	0.0297	0.00863	1.863
③	0.604	110120	0.0435	0.00817	1.353

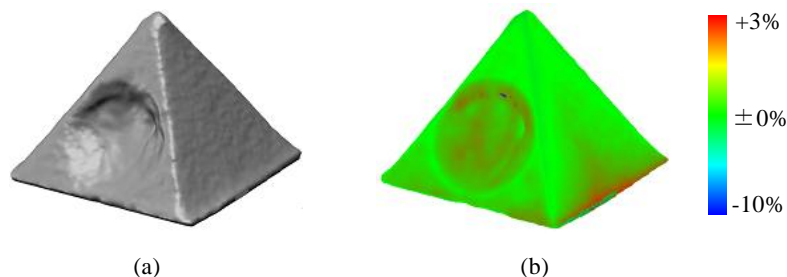
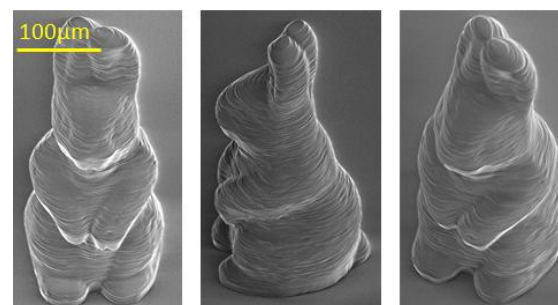


図 6 モデル①の結果: (a) 復元結果, (b) 評価結果.

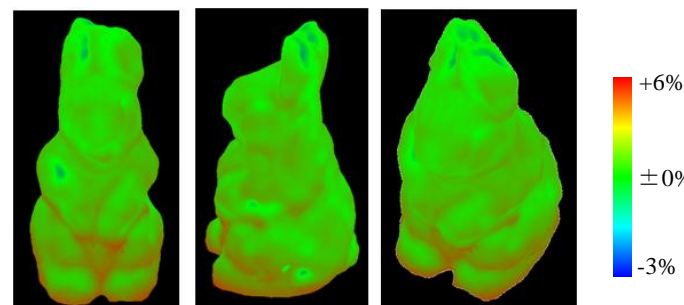
Figure 6 Reconstructed result of model 1: (a) Reconstructed result and (b) Color-coded error.



(a)



(b)



(c)

図 7 モデル②の結果: (a) SEM による撮影結果, (b) 復元結果, (c) 評価結果.

Figure 7 Reconstructed results of model 2: (a) Images of the model taken by SEM, (b) Reconstructed results, and (c) Color-coded error.

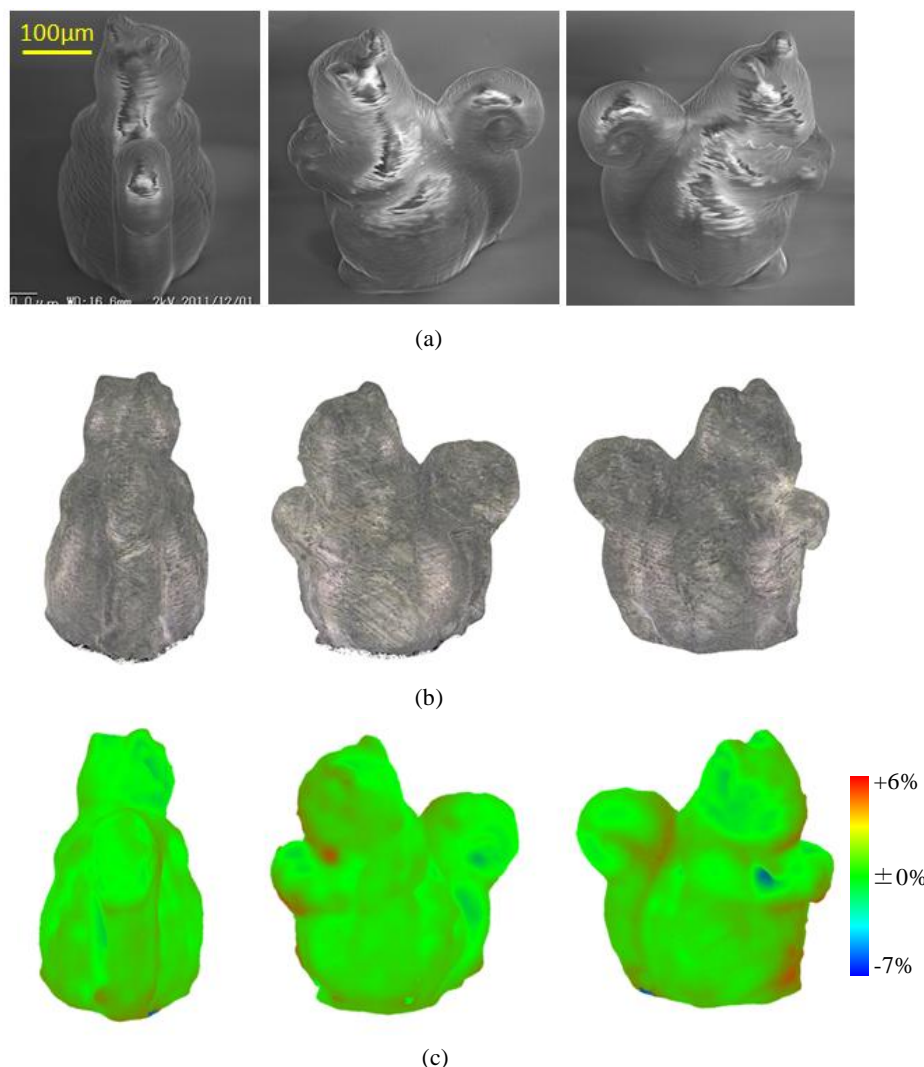


図8 モデル③の結果: (a) SEMによる撮影結果, (b) 復元結果, (c) 評価結果
Figure 8 Reconstructed results of model 3: (a) Images of the model taken by SEM, (b) Reconstructed results, and (c) Color-coded error.

4. 結論

本研究において, SFS法とSFF法の技術を用いることにより, マイクロオーダーの物体の形状評価を行うことが可能となった.

また, 2つの手法を組み合わせることにより, SFS法だけでは復元が困難な凹形状も含めて3次元形状を復元することが可能になった.

現状の課題として, 現在, Laplacian Smoothingを用いてメッシュの平滑化を行っているが, その際にエッジ部分等で誤差が生じていることが挙げられる. 今後は, シルエットの情報やSFF法の結果を, メッシュの平滑化に用いることで高精度の3次元形状復元を行っていく予定である.

謝辞

本研究において, 形状評価に使用した全てのマイクロ製品は, ソニー株式会社の先端マテリアル研究所によって造形されたものである. この支援により研究が推進された. ここに感謝の意を表す. また, 図7にて使用したうさぎのモデルはINRIAのウェブサイトに掲載されているモデルを利用させて頂いた. ここに感謝の意を表す.

参考文献

- [1] K. Atsushi, H. Sueyasu, Y. Funayama, T. Maekawa, System for reconstruction of three-dimensional micro objects from multiple photographic images, *Computer-Aided Design* 43(8): 1045-1055, 2011.
- [2] C. Hernandez, F. Schmit and R. Cipolla, Silhouette Coherence for Camera Calibration under Circular Motion, *IEEE Trans. PAMI* 29(2):343-349, 2007.
- [3] D. Hirano, Y. Funayama, and T. Maekawa. 3D shape reconstruction from 2D images. *Computer-Aided Design and Applications*, 6(5):701-710, 2009.
- [4] W. E. Lorensen. H. E. Cline, Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *SIGGRAPH '87 Proceedings* 27: 163-169, 1987.
- [5] A. S. Malik, T. S. Choi, A novel algorithm for estimation of depth map using image focus for 3D shape recovery in the presence of noise, *Pattern Recognition* 41(7):2200-2225, 2008.
- [6] B. Mercier and D. Meneveau, Shape from Silhouette: Image Pixels for Marching Cubes, *WSCG '05* 13: 112-118, 2005.
- [7] Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Trans. PAMI*, 22(11): 1330-1334, 2000.
- [8] 末安 秀匡, 前川 卓. “SFS法と合焦判定法を用いたマイクロ製品形状評価” *Vision Engineering Workshop* 2011.