

形状とテクスチャの相関を考慮した 類似度に基づくエネルギーの最小化による三次元欠損修復

河合 紀彦[†] Avidesh Zakhori^{††} 佐藤 智和[†] 横矢 直和[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

^{††} University of California at Berkeley Berkeley, CA 94720

E-mail: [†]{norihiko-k, tomoka-s, yokoya}@is.naist.jp, ^{††}avz@eecs.berkeley.edu

あらまし 本稿では、テクスチャを持つ三次元モデルにおいて欠損した領域の形状とテクスチャを同時に修復する手法を提案する。従来、三次元モデルにおける欠損領域の形状とテクスチャを同時に修復する手法として、欠損領域周辺と欠損領域以外の領域間の形状と色の類似度の和を評価値として用い、最も評価値の高い局所パッチを欠損領域内に逐次的にコピーする手法が提案されている。しかし、逐次的なコピーでは、最終的に生成される形状とテクスチャが最適である保証がなく、欠損領域の中心付近において同一物体上に存在しない形状・テクスチャが現れ、違和感が生じる場合がある。本研究では、形状とテクスチャの相関を考慮した二つのエネルギー関数を用い、形状とテクスチャに対する全体最適化処理を交互に繰り返すことでこの問題を解決する。実験では、二つの実モデルに対して提案手法を適用し、提案手法の有効性を検証する。

キーワード 三次元モデル、欠損修復、エネルギー最小化、形状とテクスチャの相関

1. はじめに

仮想的に観光地を体験できるウォークスルーシステムや三次元地図の構築を目的として、実物体の計測による三次元モデルの自動生成の需要が高まっている。しかし、様々な物体が存在する複雑な環境を対象とした計測を行う場合、オクルージョンによる計測漏れや、レーザを用いて計測した場合の対象物体の反射特性により、対象物体の一部が正しく計測されず生成された三次元モデルに欠損が生じる場合がある。このため、三次元モデル中の欠損を違和感なく修復することで、生成データの利用価値を高める研究が近年盛んに行われている。

三次元モデルの欠損修復手法は、欠損領域周辺の情報を用いる手法と三次元モデル中の欠損領域以外の領域(以下、データ領域)の情報を用いる手法に大別できる。前者の欠損領域周辺の情報を用いる手法[1]~[7]は、微分方程式や符号付距離場を用いることで、滑らかな形状を欠損領域内部に生成する。これらの手法は、小さな欠損に対しては有効であるが、欠損領域に複雑な形状を生成できないため、比較的大きな欠損領域に対しては違和感が生じる場合がある。また、これらの手法は形状の修復のみを行い、色情報の修復は行っていない。

このため、欠損領域に複雑な形状が生成できる後者の手法[8]~[12]が近年盛んに研究されており、その中でも、形状と色を同時に修復する手法もいくつか提案されている[10]~[12]。これらの手法は、欠損領域周辺とデータ領域の間の形状と色の類似度の和を評価値とし、最も評価値の高いデータ領域内の局所パッチを欠損領域内にコピーすることで、複雑な形状やテクスチャを欠損領域内

に再現している。しかし、手法[10]では、欠損領域とほぼ同じ大きさの類似したパッチがデータ領域に存在する必要がある。そのため、欠損領域が比較的大きい場合には、それに適したパッチがデータ領域に存在しないことが多い。また、手法[11],[12]では、類似した局所パッチを欠損領域の境界から内部にかけて逐次的にコピーを繰り返すことで修復している。このため、比較的大きな欠損に対しても修復が可能である。しかし、直前の局所形状のコピーによる修復結果を最良とみなし、その時点で最も類似した局所パッチを用いて未修復箇所を修復するため、最終的に生成される形状とテクスチャ全体を評価した場合には、最適な形状・テクスチャが得られている保証がなく、欠損領域の中心付近において同一物体上に存在しない形状・テクスチャが現れ、違和感が生じる場合がある。またこれらの手法では、形状とテクスチャが同一箇所からコピーされる。一般的に、多くの物体において形状とテクスチャの相関が存在する一方、必ずしも類似した形状が類似したテクスチャを持つとは限らない。そのため、データ領域に存在する形状とテクスチャを個別に扱うことで、より多くの対象物体に対して違和感のない修復ができると考えられる。加えて、従来手法[10]~[12]は、各頂点に色を持つモデルに対する欠損修復手法であり、頂点とテクスチャの密度が異なる三次元モデルの欠損修復を扱った研究はこれまでに存在しない。

本稿では、形状とテクスチャ情報を持ち、それぞれの密度が異なる三次元モデルを対象とした、新たな形状とテクスチャの同時欠損修復手法を提案する。本研究では、従来手法[9]で提案されている欠損領域とデータ領域間の形状の類似度に基づくエネルギー関数を基礎とし、形

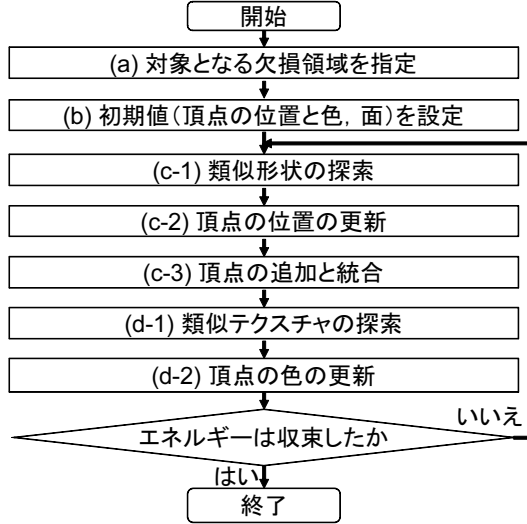


図1 提案手法の処理の流れ

状とテクスチャの正の相関を考慮した異なる二つのエネルギー関数を定義する．定義したエネルギー関数を交互に繰り返し最小化することで，欠損領域の形状とテクスチャの最適な修復を行う．提案手法は，形状とテクスチャの相関を考慮しつつ，データ領域に存在しない形状とテクスチャの組み合わせを許容することで，高品位な修復を実現する．なお，本研究の入力となる三次元モデルは，頂点とそれらと結ぶ三角形の面とテクスチャ画像から成り，面の方向，頂点とテクスチャ画像中の画素の対応関係は既知であるとする．

2. エネルギー最小化による形状とテクスチャの同時修復

提案手法の処理の流れを図1に示す．本研究では，まず修復対象となる欠損領域を手動で指定し (a)，何らかの方法を用いて欠損領域に初期値となる頂点の位置と色および頂点を結ぶ三角形の面を与える (b)．次に，提案する二つのエネルギーを最小化するように，欠損領域の各頂点に対する類似形状の探索 (c-1)，各頂点の位置の並列的な更新 (c-2)，頂点の密度を考慮した頂点の追加と統合 (c-3)，各頂点に対する類似テクスチャの探索 (d-1)，各頂点の色の並列的な更新 (d-2) を繰り返すことで，欠損を修復する．以下，2.1 節でエネルギー関数の定義について述べ，2.2 節で定義したエネルギー関数の最小化手法について述べる．

2.1 形状とテクスチャの類似度に基づくエネルギー関数の定義

本研究では，図2に示すように，三次元モデルをユーザが指定した欠損領域 Ω を含む領域 Ω' と，同一モデル内の Ω' 以外のデータ領域 Φ に分ける．ここでは，三次元モデル内のある頂点 $\mathbf{p}_i$ を中心とする半径 l の球状領域 $A_{\mathbf{p}_i}$ が欠損領域 Ω 内の頂点を一つ以上含む場合，頂点 $\mathbf{p}_i$ は領域 Ω' に属するとする．このとき，形状のためのエ

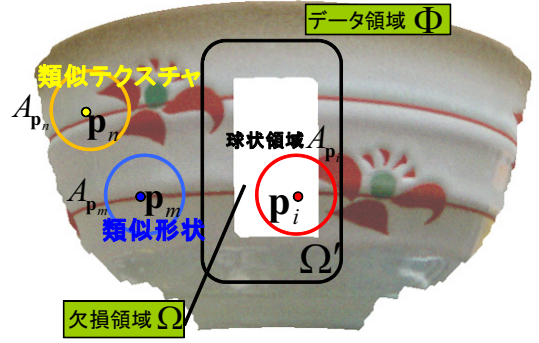


図2 三次元モデルの各領域

ネルギー E_s とテクスチャのためのエネルギー E_t を，形状とテクスチャの正の相関を考慮して，領域 Ω' とデータ領域 Φ 間の形状の類似度 SSD_s とテクスチャの類似度 SSD_t の重み付き和として以下のようにそれぞれ定義する．

$$E_s = \frac{\sum_{\mathbf{p}_i \in \Omega'} w_{\mathbf{p}_i} (SSD_s(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_m) + \alpha SSD_t(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_n))}{\sum_{\mathbf{p}_i \in \Omega'} w_{\mathbf{p}_i}} \quad (1)$$

$$E_t = \frac{\sum_{\mathbf{p}_i \in \Omega'} \lambda_{\mathbf{p}_i} (SSD_t(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_n) + \beta SSD_s(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_m))}{\sum_{\mathbf{p}_i \in \Omega'} \lambda_{\mathbf{p}_i}} \quad (2)$$

定義したエネルギー関数におけるパラメータは，頂点 $\mathbf{p}_i$ の三次元位置，頂点 $\mathbf{p}_i$ に対応するテクスチャの輝度値 $I(\mathbf{p}_i)$ ，頂点 $\mathbf{p}_i$ に対して類似形状を持つ頂点の位置 $\mathbf{p}_m$ ，頂点 $\mathbf{p}_i$ に対して類似テクスチャを持つ位置 $\mathbf{p}_n$ の4種類である．また，重み $w_{\mathbf{p}_i}$ ， $\lambda_{\mathbf{p}_i}$ として，領域 $\Omega' \cap \bar{\Omega}$ 内の頂点 $\mathbf{p}_i$ に対しては，各頂点の位置が固定されているため $w_{\mathbf{p}_i} = 1$ ， $\lambda_{\mathbf{p}_i} = 1$ を，領域 Ω では欠損領域の境界に近いほど頂点の位置の信頼度が高くなるため $w_{\mathbf{p}_i} = c_1^{-d_i}$ ， $\lambda_{\mathbf{p}_i} = c_2^{-d_i}$ (d_i は Ω の境界の頂点から欠損領域内の頂点 $\mathbf{p}_i$ までの最小のリンク数， c_1, c_2 は正の定数) を用いる．重み α, β は類似した形状やテクスチャの探索において，形状とテクスチャの相関を考慮するための重みであり，値が大きくなるほど強い正の相関を考慮する．式 (1), (2) では重みの総和により正規化を行っているが，これは後述のエネルギー最小化処理により領域 Ω 内の頂点の追加と統合が行われ，各頂点の重みが変わるためである．以下では，形状の類似度 SSD_s 及びテクスチャの類似度 SSD_t について詳述する．

形状の類似度 SSD_s については，手法 [13] で提案されたものと同様の類似度尺度を採用する．具体的な SSD_s の算出方法を以下に述べる．まず，図3に示すように，データ領域 Φ 内の頂点 $\mathbf{p}_j$ と領域 Ω' 内の頂点 $\mathbf{p}_i$ の基底ベクトルが一致するよう，頂点 $\mathbf{p}_j$ 周辺の面と頂点 $\mathbf{p}_i$ 周辺の点群を位置合わせする．ここでは，各頂点の基底ベクトルとして各頂点の法線方向及び最大・最小主曲率方

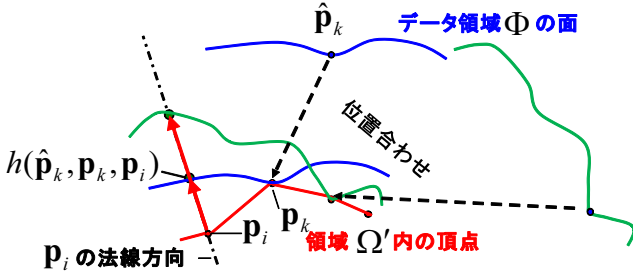


図4 頂点 p_i の法線上に存在する対応点

しかし、エネルギーが収束するに従って、法線方向の変化が小さくなるため、エネルギーが収束するにつれて良い近似解となる。

プロセス (c-3) では、欠損領域 Ω 内の頂点群の密度を一定に保つように頂点の追加と統合を行う。これは、プロセス (c-2) での頂点の位置の移動により、欠損領域 Ω 内の頂点群の分布に偏りが生じ、密度が高すぎる場合には最適化処理が非効率となり、密度が低すぎる場合には形状とテクスチャの細部が再現できなくなるためである。具体的には、面を形成する三角形の辺の長さに対し、上限と下限の閾値を設ける。上限の閾値以上の辺に対しては、その中間地点に頂点を追加し、それに応じて面を分割する。また、追加する頂点の色の初期値は辺の両端の頂点の平均色とする。下限の閾値以下の辺に対しては、辺の両端の頂点を辺の中間位置に統合し、それに応じて面を削除する。統合する頂点の色は、統合前の2頂点の平均色とする。

2.2.2 テクスチャのためのエネルギーの最小化

欠損領域 Ω 内の各頂点位置を更新した後、テクスチャのためのエネルギー E_t を最小化するよう、プロセス (d-1), (d-2) により欠損領域 Ω 内の各頂点の色を更新する。プロセス (d-1) では、欠損領域 Ω 内の頂点位置と色を固定し、領域 Ω' 内の頂点に対応する最も類似したテクスチャの位置を探索する。具体的には、領域 Ω' 内の頂点 p_i 周辺のテクスチャと最も類似したテクスチャの位置 $\tilde{p}_i$ は、データ領域 Φ 内の全ての頂点に対して探索を行うことで、以下の式により算出される。

$$\tilde{p}_i = \underset{p_n \in \Phi}{\operatorname{argmin}} (SSD_t(p_i, p_n) + \beta SSD_s(p_i, p_n)) \quad (9)$$

ここでも、類似形状を探索するときと同様に、 SSD_s と SSD_t のどちらも計算することで、形状とテクスチャの相関を考慮している。

プロセス (d-2) では、プロセス (c-2) と同様の方法を用いて、欠損領域 Ω 内の全ての頂点の色を並列に更新する。テクスチャのためのエネルギー E_t は要素エネルギー $E_t(p_i)$ に以下のように分解できる。ただし、エネルギー E_t 中の SSD_s については、ここでは頂点の位置が固定されているため無視できる。

$$E_t(p_i) = \sum_{p_k \in A_{p_i}} \frac{\lambda_{p_k}}{N(A_{p_i})} \|I(p_i) - I(h(\tilde{p}_k, p_k, p_i))\|^2 \quad (10)$$

各要素エネルギー $E_t(p_i)$ は、各頂点に関して独立であるため、各要素エネルギー $E_t(p_i)$ を個別に最小化することで、エネルギー E_t を最小化する。要素エネルギー $E_t(p_i)$ を最小化する輝度値 $I(p_i)$ は以下のように算出される。

$$I(p_i) = \frac{\sum_{p_k \in A_{p_i}} \lambda_{p_k} I(h(\tilde{p}_k, p_k, p_i))}{\sum_{p_k \in A_{p_i}} \lambda_{p_k}} \quad (11)$$

2.2.3 粗密法による反復処理

本研究では、処理コストの削減と局所解の回避を図るため、エネルギーの最小化において粗密法を導入する。ここでは、類似度 SSD_s 及び SSD_t の計算のための範囲及び頂点の密度とテクスチャの解像度をエネルギーが収束するごとに、段階的に変化させる。

具体的には、類似度計算の範囲に関しては、球状領域 A_{p_i} の半径 l を段階的に減少させる。頂点の密度に関しては、領域 Ω 内ではプロセス (c-3) で用いる頂点の追加と削除の閾値を小さくする。また、領域 $\bar{\Omega} \cap \Omega'$ 内では、頂点の数と位置が固定されているため、初期段階ではこの領域内の頂点を一定の割合で間引いてエネルギーを算出し、間引かれる頂点の割合を断簡的に小さくする。また、最終段階では、三角形の重心位置に頂点を補間する。これらの処理により領域 Ω' 内の頂点の密度を段階的に上げる。

テクスチャの解像度に関しては、予めテクスチャ画像のピラミッドを作成しておき、段階的に解像度を上げる。また、原寸スケールにおいても、頂点の密度とテクスチャの解像度が異なることから、テクスチャの周波数が高い地点では頂点の微小な位置の違いによってテクスチャの類似度 SSD_t の値が大きく変化する。このため、頂点の密度に合うようテクスチャにガウシアンフィルタをかけることで、頂点の位置の微小な違いに頑健なテクスチャの類似度を算出する。

3. 実験

提案手法の有効性を示すために、図5, 6(a)に示す2種類のモデル (I), (II) に対して修復実験を行った。修復実験にはPC (CPU:Core i7 1.6GHz, メモリ:8GB) を用いた。提案手法による修復では、4段階の粗密法により修復処理を行い、修復に用いるパラメータは、経験的に表1に示すように設定した。実験では欠損領域の初期値として、欠損領域境界の頂点群の重心位置に頂点を配置し、境界の頂点群と重心点を結ぶよう面を構成した。頂点の色は境界の頂点群の平均色とした。以下、モデル (I), (II) の修復実験について考察する。

モデル (I)(図5(a)) は手法[14]の著者らにより提供さ

れた 453,281 頂点を持つ屋内モデルである．構築時のレーザスキャナの反射特性により天井の蛍光灯の箇所に欠損が生じている．モデル (I) の修復においては，全体のモデルを 1 つの欠損領域のみを持つ部分モデルに分割し，各部分モデルに対して個別に修復を行った．図 5(b) に修復した結果を，同図 (c), (d), (c) に一つの欠損領域の修復前と修復後とそのメッシュ表示の拡大図を示す．これらの画像から，欠損領域に対して自然な形状とテクスチャが再現されていることが分かる．ただし，修復前から存在する横方向のテクスチャのずれは，手法 [14] による移動計測の蓄積誤差による．なお，このモデル中の全ての欠損の修復には 13,868 秒を要した．

モデル (II)(図 6(a)) は 4,680 頂点を持つお椀のモデルであり，滑らかな湾曲した形状と赤いエッジに沿って隆起した形状を持つ．モデル (II) の欠損領域は手動で与えた．モデル (II) に対する実験では，2 通りのテクスチャのエネルギー E_t 中の形状の類似度 SSD_s に対する重み β を変化させて修復を行った． $\beta = 0.5$ とした時の修復結果を図 6(b) に示す．この結果より，欠損領域でテクスチャのエッジがつながっていることが確認できる．これに対して，図 6(c) に示す $\beta = 0$ とした時の結果では，エッジが途切れてしまっていることが分かる．これらの結果から，形状とテクスチャの類似度の相関を考慮することが有効であることが確認できる．また，図 6(d), (e) に示すように，欠損領域の形状も尤もらしく修復されていることがわかる．しかし，図 6(b) からわかるように，欠損領域内に生成されたテクスチャの解像度が不足していることが確認できる．これは，頂点の密度がテクスチャの解像度に対して低いことが原因と考えられる．なお，このモデルの欠損修復には 512 秒を要した．

4. ま と め

本稿では，形状とテクスチャの類似度に基づく，形状とテクスチャの相関を考慮したエネルギー関数を最小化することにより，三次元モデル中の欠損の形状とテクスチャを同時に修復する手法を提案した．実験では，2 つの三次元モデルに対して修復実験を行い，提案手法の有効性を示した．しかし，頂点とテクスチャの解像度の違

いにより欠損領域のテクスチャがぼけるという問題も確認した．最終的な欠損領域の頂点を増やすことでテクスチャの解像度の向上が見込まれるが，それにより計算コストの大幅な増加も伴うことが考えられる．今後は，計算コストを抑えつつ欠損領域に生成されるテクスチャの解像度を向上する手法について検討する．また，屋外環境モデルなどより複雑で大規模な三次元モデルに対する実験を行う予定である．

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金 (基盤研究 (A), No.23240024) による．

文 献

- [1] J. Davis, S.R. Marschner, M. Garr and M. Levoy: "Filling Holes in Complex Surfaces Using Volumetric Diffusion," Proc. Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, pp. 428–438, 2002.
- [2] J. Verdera, V. Caselles, M. Bertalmio and G. Sapiro: "Inpainting Surface Holes," Proc. Int. Conf. on Image Processing, Vol. 2, pp. 903–906, 2003.
- [3] J. Wang and M.M. Oliveira: "A Hole-Filling Strategy for Reconstruction of Smooth Surfaces in Range Images," Proc. SIBGRAPI, pp. 11–18, 2003.
- [4] H. Xie, K.T. McDonnell and H. Qin: "A Finite Element Method for Surface Restoration with Smooth Boundary Conditions," Computer Aided Geometric Design, Vol.21, No. 5, pp. 427–445, 2004.
- [5] T. Masuda: "Filling the Signed Distance Field by Fitting Local Quadrics," Proc. Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, pp. 1003–1010, 2004.
- [6] R. Furukawa, T. Itano, A. Morisaka and H. Kawasaki: "Improved Space Carving Method for Merging and Interpolating Multiple Range Images Using Information of Light Sources of Active Stereo," Proc. Asian Conference on Computer Vision, pp. 206–216, 2007.
- [7] R. Sagawa and K. Ikeuchi: "Hole Filling of a 3D Model by Flipping Signs of a Signed Distance Field in Adaptive Resolution," , pp. 686–699, 2008.
- [8] A. Sharf, M. Alexa and D. Cohen-Or: "Context-based Surface Completion," Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 878–887, 2004.
- [9] 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和: "局所形状の類似度を用いたエネルギー最小化による三次元欠損修復", 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 5, 2010.
- [10] S. Park, X. Guo, H. Shin and H. Qin: "Surface Completion for Shape and Appearance," Int. J. of Computer Graphics, Vol.22, No. 3, pp. 168 – 180, 2006.
- [11] T.P. Breckon and R. B. Fisher: "Plausible 3D Colour Surface Completion Using Non-parametric Techniques," Proc. Int. Conf. on the Mathematics of Surfaces, pp. 102 – 120, 2005.
- [12] J. Dong, S. Ma, L. Li and Z. Yu: "Hole Filling on Three-Dimensional Surface Texture," Proc. Int. Conf. on Multimedia and Expo, pp. 1299–1302, 2007.
- [13] N. Kawai, T. Sato and N. Yokoya: "Efficient Surface Completion Using Principal Curvature and Its Evaluation," Proc. Int. Conf. on Image Processing, pp. 521–524, 2009.
- [14] G. Chen, J. Kua, S. Shum, N. Naikal, M. Carlberg and A. Zakhor: "Indoor Localization Algorithms for a Human-Operated Backpack System," Proc. Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2010.

表 1 実験に用いたパラメータ (l_{ave} はデータ領域における面の頂点間の平均長)

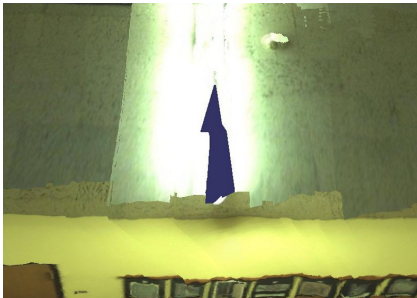
粗密レベル	1	2	3	4
E_s における α	0.1			
E_t における β	0.5			
重み w における c_1	1.2			
重み λ における c_2	1.2			
範囲 A の半径	$9l_{ave}$	$7l_{ave}$	$5l_{ave}$	$3l_{ave}$
領域 $\Omega' \cap \bar{\Omega}$ における 間引く頂点の割合	15/16	8/9	3/4	0 (補間)
上限の閾値	$4l_{ave}$	$2l_{ave}$	$1.3l_{ave}$	l_{ave}
下限の閾値	$1.5l_{ave}$	$0.8l_{ave}$	$0.4l_{ave}$	$0.3l_{ave}$



(a) 欠損領域を持つ三次元モデル（長方形で囲まれた場所に欠損が存在）



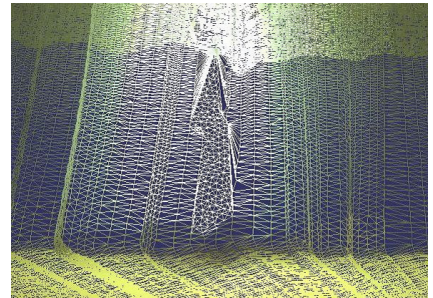
(b) 修復した三次元モデル



(c) 修復前の欠損（拡大図）



(d) 修復後のモデル（拡大図）



(e) 修復結果のメッシュ表示（拡大図）

図 5 屋内モデル（モデル I）に対する修復実験



(a) 欠損領域を持つモデル



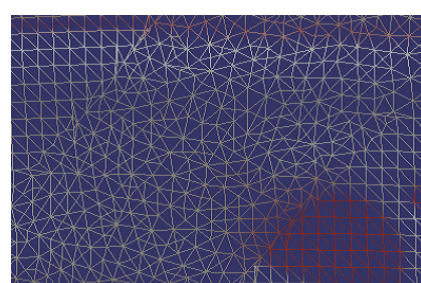
(b) 修復したモデル ($\beta = 0.5$)



(c) 修復したモデル ($\beta = 0$)



(d) 修復したモデル (b) の形状のみ



(e) 修復したモデル (b) のメッシュ表示

図 6 お椀のモデル（モデル II）に対する修復実験