

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

河合 紀彦^{*1*2}

佐藤 智和^{*1}

横矢 直和^{*1}

3D Surface Completion by Minimizing Energy Based on Similarity of Local Shape

Norihiko Kawai^{*1*2}, Tomokazu Sato^{*1} and Naokazu Yokoya^{*1}

Abstract – 3D mesh models generated with a range scanner or video images often have holes due to occlusions by other objects and the object itself. This paper proposes a novel method to fill in the missing regions in incomplete models. The missing regions are filled in by minimizing an energy function that is defined based on the similarity of local shapes between the missing region and the rest of the object. The proposed method can generate complex and consistent shapes in the missing region. In experiments, the effectiveness of the proposed method is successfully demonstrated by applying it to various objects with missing regions.

Keywords : Surface Completion, 3D Inpainting, Energy Minimization, Similarity of Shape

1 はじめに

仮想的に観光地を体験するウォークスルーや都市計画のための景観シミュレーションを目的とした、現実環境に基づく仮想環境の構築が近年盛んである。このような仮想環境の構築には、CGによる三次元モデルが用いられることが多いが、現状ではこれらをCADなどを用いて作成することが一般的であり、詳細な形状を再現するためには多くの人的コストが必要となる。このため、近年、実物体を計測することで、三次元モデルを自動的に生成する研究が盛んに行われている。三次元モデルを生成するための三次元計測手法としては、レーザレンジファインダを用いる手法 [1, 2] や画像計測による手法 [3] などが存在するが、いずれの計測手法も、センサの位置から観測できる部分形状しか得られない。従って、完全なモデルを得るためには、対象物体を複数地点から計測し、得られた部分形状を統合する必要がある。しかし、屋外環境のような様々な物体が存在する環境や複雑な構造を持つ物体を対象とした場合、各計測によって得られる部分形状にオクルージョンによる計測もれが発生するため、欠損のない完全なモデルを作成することは難しい。この問題に対して、計測もれによって発生する欠損領域を自動的に修復することで、完全な三次元モデルを生成する手法が提案されている。以下では、従来提案されている三次元モデルの欠損領域の修復手法を概観し、本研究

の位置づけを述べる。

従来の欠損修復手法の大半は、頂点群と面により構成される三次元メッシュモデルを対象としている。これら三次元メッシュモデルに対する欠損領域修復の最も基礎的な方法として、欠損領域の境界上の頂点同士を結ぶことで欠損領域に表面形状を生成する手法が古くから用いられているが、平面的な表面形状しか生成できないため、大きな欠損領域に対する修復に用いた場合には違和感が生じることが多い。このため、単純に頂点を結ぶのではなく、欠損領域周辺の情報を修復に利用する手法が提案されている。Castellani ら [4] は、欠損領域の境界におけるエッジを直線的に伸ばすことで、エッジや角を違和感なく修復できる手法を提案しているが、この手法は曲面形状には対応できない。これに対して、微分方程式、Willmore 曲面などを用いることで滑らかな補間を行う手法 [5, 6, 7] が提案されている。これらの手法では、小さな欠損領域に対しては良好な結果を得ることができる。しかし、欠損領域内部で複雑な形状を再現することは難しく、大きな欠損領域を修復した場合、周囲と三次元構造の性質が大きく異なる形状が生成されることが多い。

また、欠損領域周辺の情報を利用する別のアプローチとして、三次元空間をボクセルに分割し、符号付距離場を用いて補間する手法 [8, 9, 10, 11, 12] が提案されている。Curless ら [8] は、各ボクセルを Unseen, Nearsurface, Empty の 3 種類に分類し、Unseen と Empty の間にメッシュを張ることで欠損を修復する手法を提案している。Davis ら [9] は、欠損領域の境界

^{*1}奈良先端科学技術大学院大学

^{*2}日本学術振興会特別研究員 DC2

^{*1}Nara Institute of Science and Technology

^{*2}JSPS Research Fellow

から符号付距離場のボリュームデータを拡散させることで、欠損領域内の符号付距離場を生成する手法を提案している。また、Masuda[10]は、符号付距離場に対して逐次的に二次曲面を当てはめていくことで、滑らかな面を生成する手法を提案している。これらの手法では、観測の位置や数に依存する符号付距離場に結果が大きく影響されるため、観測位置が不均等で数も多くない場合には、良い結果を得ることは難しい。このような問題に対して、ベイズ推定により各ボクセルの状態を推定する手法 [11] や、周辺のボクセル間の関係から符号付距離場を整合化する手法 [12] が提案されており、これらの手法では結果が観測の位置や数に依存する問題は解決されている。しかし、これらの手法においても、修復に用いる情報が欠損領域の境界付近に限定されているため、欠損領域内部に複雑な形状を再現することは難しい。

これまでに挙げた手法に対して、用いる情報を欠損領域周辺に限定せず、同一物体上の欠損領域以外の領域 (以下、データ領域) やデータベース上の対象物体以外の物体の表面形状も利用するの手法 [13, 14, 15, 16, 17, 18] が提案されている。これらの手法は、欠損領域周辺で複雑な形状が存在する場合でも、データ領域中の類似した形状を用いることで欠損領域内に複雑な形状を再現することができる。Kraevoy ら [13] や Pauly ら [14] は、事前に準備した対象物体に類似した物体を用い、その類似物体全体を対象物体の形状に合わせるように変形し、類似物体上における対象物体の欠損にあたる領域の形状を欠損領域に当てはめることで修復を行っている。これらの手法では、対象物体と類似した事例物体をあらかじめモデル化した上でデータベース化する必要がある、データベースの構築に人的コストがかかるという問題がある。

一方、同一物体上のデータ領域の表面形状を利用することで特別なデータベースを用いることなく欠損領域を修復する手法 [15, 16, 17, 18] が提案されている。これらの手法は、欠損領域周辺の構造をモデル化することで欠損領域内の形状を予測する手法 [15] と、データ領域内の局所形状を修復のための事例として欠損領域にコピーすることで修復する手法 [16, 17, 18] に分類できる。前者の手法 [15] は、対象物体中に周期的な構造が存在するという仮定の下、構成要素形状とその周期をモデル化することで、欠損領域内の形状を予測し頂点を与えている。この手法は、集合住宅のような周期的な構造を持つ物体中の欠損に対しては有効である。しかし、周期構造を自動的に発見することが前提となるため、欠損領域周辺で周期的な構造を持たない物体に対しては修復が難しい。後者の手法 [16, 17, 18] は、欠損領域周辺の表面形状と類似した局所形状をデータ

領域全体から探索し、それを欠損領域にコピーする処理を、欠損領域の境界付近から逐次的に繰り返すことで修復を行う。このため、欠損領域周辺で周期的な構造を持たない場合でも、データ領域全体の類似形状を利用し修復することができる。しかし、これらの手法では、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形状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全体を評価した場合には、最適な形状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ない形状が現れ、違和感が生じる場合がある。

本研究では、従来手法 [16, 17, 18] と同様にデータ領域内の類似した形状を利用し修復するアプローチを採用するが、従来の逐次的なコピーによる修復で生じる問題に対して、本論文では、欠損領域とデータ領域間の局所形状の類似度を用いて欠損領域の形状の尤もらしさに基づくエネルギー関数を定義し、これを欠損領域全体に対して最小化することで欠損領域を違和感なく修復する手法を提案する。本手法では、予め欠損領域に頂点と面から成る初期形状を与えた上で、欠損領域の局所形状と類似した局所形状をデータ領域から探索し、データ領域の局所形状に類似するよう欠損領域の表面形状を変形することで複雑な形状を再現する。また、エネルギーを欠損領域全体で最小化するよう欠損領域内の頂点の位置を並列に更新することで、欠損領域内の任意の場所における局所形状がデータ領域内の形状と類似するよう最適化され、違和感のない形状を生成する。

以下、2節では、局所形状の類似度に基づくエネルギー関数を最小化することで、欠損領域を修復する提案手法について述べる。3節では、様々な特徴を持つモデルに対して欠損修復を行い、従来手法による修復結果と比較することで提案手法の有効性を示す。最後に4節で、まとめと今後の課題について述べる。

2 エネルギー最小化による三次元欠損修復

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、何らかの方法を用いて欠損領域に初期値となる頂点群とそれらを結ぶ面を与える。次に、各頂点に対する類似局所形状の探索 (i)、各頂点の位置の並列的な更新 (ii)、頂点群の密度を考慮した頂点の追加と統合 (iii) を繰り返すことでエネルギーを最小化し、欠損領域の修復を行う。本節では、まず局所形状の類似度 SSD (Sum of Squared Distances) によるエネルギー関数を定義し、次に定義したエネルギー関数の最小化手法について述べる。最後に、エネルギー関数の最小化処理で用いる粗密法について述べる。

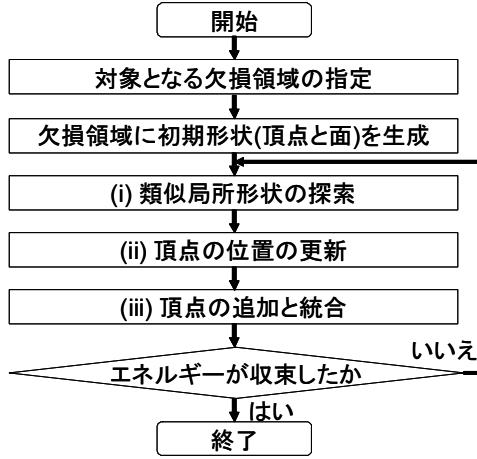


図1 提案手法の処理の流れ

Fig. 1 Flow diagram of the proposed method.

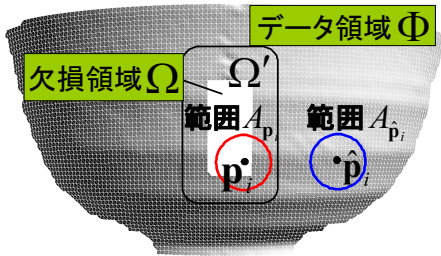


図2 三次元モデルの各領域

Fig. 2 Missing and data regions on a surface model.

2.1 局所形状の類似度 SSD に基づくエネルギー関数の定義

以下では、まず欠損領域内の局所形状とデータ領域内の局所形状の類似度を用いたエネルギー関数の定義について述べ、次に局所形状の類似度の算出方法について述べる。

局所形状の類似度を用いた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、領域 Ω' 内の形状の尤もらしさをデータ領域 Φ 内の局所表面形状を用いて定義する。ここでは、三次元モデル内において、ある頂点を中心とする半径が一定の大きさの球 A の内部に一部でも欠損領域 Ω 内の頂点（初期位置）が含まれる球 A の中心点の集合を Ω' とする。本研究では、欠損領域の表面形状の尤もらしさに基づくエネルギー E を、領域 Ω' 内の頂点 \mathbf{p}_i 周辺の頂点群と点 \mathbf{p}_i に対応するデータ領域 Φ 内の頂点 $\hat{\mathbf{p}}_i$ 周辺の表面形状との距離に基づく局所形状類似度 SSD の重み付き

総和として以下のように定義する。

$$E = \frac{\sum_{\mathbf{p}_i \in \Omega'} w_{\mathbf{p}_i} SSD(\mathbf{p}_i, \hat{\mathbf{p}}_i)}{\sum_{\mathbf{p}_i \in \Omega'} w_{\mathbf{p}_i}} \quad (1)$$

ここで、重み $w_{\mathbf{p}_i}$ として、領域 $\Omega' \cap \bar{\Omega}$ では各点の位置が固定であるため $w_{\mathbf{p}_i} = 1$ 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 $w_{\mathbf{p}_i} = 1/s^m$ (m 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、 s は正の定数) を用いる。ただし、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、各頂点の重みは変化するため、式(1)では重みの総和による正規化を行っている。

局所形状の類似度 SSD

三次元モデルの生成における物体計測の条件等により、三次元モデル中の頂点群の密度は位置によって異なる場合が多い。このため、本研究では、欠損領域の頂点とデータ領域の面の距離を用いることで密度に依存しない類似度 SSD を定義する。具体的には、欠損領域とデータ領域の表面形状の類似度を表す $SSD(\mathbf{p}_i, \hat{\mathbf{p}}_i)$ を、領域 Ω' 内の頂点 \mathbf{p}_i を中心とする一定球状範囲 $A_{\mathbf{p}_i}$ 内の頂点群と領域 Φ 内の頂点 $\hat{\mathbf{p}}_i$ 周辺の面を位置合わせした上での頂点と面の距離の総和として以下の式で定義する。

$$SSD(\mathbf{p}_i, \hat{\mathbf{p}}_i) = \sum_{\mathbf{p}_k \in A_{\mathbf{p}_i}} \frac{\|\mathbf{p}_k - \mathbf{M}_{\hat{\mathbf{p}}_i \mathbf{p}_i} \mathbf{g}_i(\mathbf{p}_k)\|^2}{N(A_{\mathbf{p}_i})} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{p}}_i \mathbf{p}_i}$ は、図3に示すように局所形状を位置合わせするための座標変換行列を表す。また、欠損領域内の頂点 $\mathbf{p}_k (\in A_{\mathbf{p}_i})$ の法線と位置合わせ済みのデータ領域の面の交点を $\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{p}}_i \mathbf{p}_i} \mathbf{g}_i(\mathbf{p}_k)$ (ただし、 $\mathbf{g}_i(\mathbf{p}_k)$ は \mathbf{p}_k に対応する位置合わせ前におけるデータ領域の面上の点)、 \mathbf{p}_i を中心とする一定半径の球状範囲 $A_{\mathbf{p}_i}$ の内部に存在する頂点の数を $N(A_{\mathbf{p}_i})$ とする。

局所形状位置合わせのための変換行列 $\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{p}}_i \mathbf{p}_i}$ は、頂点 $\mathbf{p}_i = (x_{\mathbf{p}_i}, y_{\mathbf{p}_i}, z_{\mathbf{p}_i})$ 、頂点 $\hat{\mathbf{p}}_i = (x_{\hat{\mathbf{p}}_i}, y_{\hat{\mathbf{p}}_i}, z_{\hat{\mathbf{p}}_i})$ を原点とする座標系をそれぞれ設定し、算出する。ここでは、頂点 \mathbf{p}_i 、 $\hat{\mathbf{p}}_i$ における物体の座標系での基底ベクトルをそれぞれ、 $(x_{\mathbf{p}_i}, y_{\mathbf{p}_i}, z_{\mathbf{p}_i})$ 、 $(x_{\hat{\mathbf{p}}_i}, y_{\hat{\mathbf{p}}_i}, z_{\hat{\mathbf{p}}_i})$ とする。この時、座標変換行列 $\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{p}}_i \mathbf{p}_i}$ は以下の式により算出できる。

$$\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{p}}_i \mathbf{p}_i} = \begin{pmatrix} x_{\mathbf{p}_i} & -x_{\mathbf{p}_i} \\ y_{\mathbf{p}_i} & -y_{\mathbf{p}_i} \\ z_{\mathbf{p}_i} & -z_{\mathbf{p}_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{\hat{\mathbf{p}}_i} & -x_{\hat{\mathbf{p}}_i} \\ y_{\hat{\mathbf{p}}_i} & -y_{\hat{\mathbf{p}}_i} \\ z_{\hat{\mathbf{p}}_i} & -z_{\hat{\mathbf{p}}_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

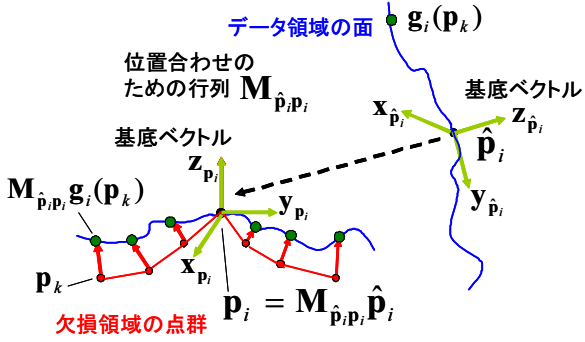


図3 類似度算出における欠損領域の頂点群とデータ領域の表面の位置合わせ
Fig.3 Alignment of vertices and surface for similarity measure of local shape.

ここで、類似度 SSD は各頂点に対する基底ベクトル (x, y, z) に大きく依存する. 従来手法 [16, 17, 18] では、頂点の法線ベクトルを軸とし一定角度ずつ回転させた基底ベクトルを設定し、全ての回転させた表面形状に対して類似度を計算していたため、効率的でなく、類似形状の探索に多くの時間を必要とした. これに対して、本研究では、頂点 p_i , \hat{p}_i を中心とする一定範囲 B_{p_i} , $B_{\hat{p}_i}$ 内の頂点群に対してそれぞれ二次曲面当てはめを行い、曲面の法線方向および曲率が最大・最小となる主方向を算出することで、最適な基底ベクトルを一意に決定する. これにより複数の回転させた表面形状に対する不要な類似度の計算を省略し、計算コストを削減できる. 以下では、基底ベクトルとなる法線方向および曲率が最大・最小となる主方向の算出方法について述べる. まず、頂点 p_i を中心とする一定範囲 B_{p_i} 内の頂点群を用いて主成分分析を行い、第一・第二・第三主成分の方向が、 x 軸、 y 軸、 z 軸、かつ p_i が原点となる座標系を構成し、以下の式で表わされる二次曲面関数を当てはめる.

$$z(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (4)$$

ただし、二次曲面関数の各パラメータ (a, b, c, d, e, f) は、以下のコスト関数 Q が最小となるよう最小二乗法を用いて決定する.

$$Q_{p_i} = \sum_{p_k \in B_{p_i}} \{z(\bar{x}_k, \bar{y}_k) - \bar{z}_k\}^2 \quad (5)$$

なお、 $(\bar{x}_k, \bar{y}_k, \bar{z}_k)$ は、主成分分析により構成した座標系における p_k の座標である. 次に、得られた二次曲面から、曲率が最大・最小となる主方向および法線方向を算出する. 具体的には、曲率が最大・最小となる主方向を算出するために、以下に示す二次曲面関数 $z(x, y)$

のヘッセ行列 H を導出する.

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2a & c \\ c & 2b \end{pmatrix} \quad (6)$$

このとき、行列 H の固有ベクトルは、主成分分析により構成した座標系において、頂点 p_i の曲率が最大・最小である主方向を表している. また、同座標系における頂点 p_i の法線ベクトル \bar{n}_i は、以下のように算出する.

$$\bar{n}_i = \left(-\frac{\partial z(0, 0)}{\partial x}, -\frac{\partial z(0, 0)}{\partial y}, 1 \right) = (-d, -e, 1) \quad (7)$$

これにより得られた主方向および法線方向を元の物体座標系に変換し、それぞれの単位ベクトルを基底ベクトル $x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}$ として設定する. ただし、平面を対象とした場合など、得られた二次曲面の主方向が一意に決まらない場合は、各ベクトルが直交するように任意の方向を用いて x_{p_i}, y_{p_i} を設定する.

2.2 欠損修復のためのエネルギー最小化手法

本項では、Greedy Algorithm の枠組みを用いて式 (1) で定義したエネルギー E を最小化する手法を述べる. 類似形状の逐次的なコピーにより修復を行う従来手法 [16, 17, 18] では、欠損領域の中心付近においてデータ領域にはない形状が現れ違和感が生じる場合が多いが、これに対して本手法では欠損領域全体でエネルギーを最小化することで、欠損領域内の任意の場所における局所形状がデータ領域内の形状と類似するように全ての頂点の位置が並列に更新され、違和感のない表面形状を生成する. 具体的には、全ての類似局所形状の組 (p_i, \hat{p}_i) を固定すると、エネルギー E を欠損領域 Ω 内の各頂点で独立に扱えることに着目し、
(i) 各頂点 p_i に対する類似形状を持つ頂点 \hat{p}_i の探索
(ii) 欠損領域内の各頂点 p_i の位置の並列的な更新
(iii) 密度を考慮した頂点の追加と統合
の3つのプロセスをエネルギーが収束するまで繰り返すことで、表面形状全体のエネルギーを最小化する. 以下、各プロセスについて詳述する.

(i) 類似形状を持つ頂点の探索

プロセス (i) では、欠損領域内の頂点位置を全て固定することで、対応する類似局所形状の位置を探索する. 基本的には、データ領域 Φ 内の全ての頂点に対して式 (2) で SSD を算出し、以下の式を満たす頂点の位置 \hat{p}_i を決定することで類似局所形状の位置を更新する.

$$f(p_i) = \hat{p}_i = \operatorname{argmin}_{p' \in \Phi} (SSD(p_i, p')) \quad (8)$$

ただし、データ領域 Φ の全範囲を対象に SSD を計算する処理は計算負荷が高いため、本研究では前節で述

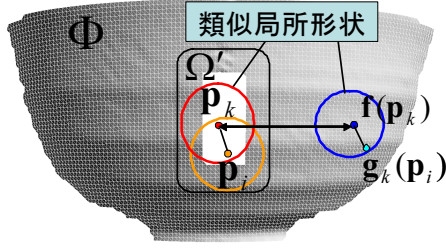


図4 エネルギー算出時の頂点の関係
Fig. 4 Relationship between vertices in energy calculation.

べた当てはめた曲面から算出される最大・最小主曲率を用いて、類似していないと考えられる局所形状同士に対する類似度の算出処理を省略する. 具体的には、まず各頂点において式 (6) で表されるヘッセ行列 \mathbf{H} の固有値のうち、値が大きい方を最大主曲率、値が小さい方を最小主曲率として算出する. ここでは、頂点 \mathbf{p}_i とそれに対応する頂点 $\hat{\mathbf{p}}_i$ の最大主曲率をそれぞれ $k1_{\mathbf{p}_i}$, $k1_{\hat{\mathbf{p}}_i}$ 、最小主曲率をそれぞれ $k2_{\mathbf{p}_i}$, $k2_{\hat{\mathbf{p}}_i}$ とする. 次に、式 (9) で得られるコスト K を昇順にソートし、データ領域中の頂点のうち上位 $n\%$ の K に対応する頂点の組に対してのみ SSD を算出することで処理の高速化を図る.

$$K_{\mathbf{p}_i\hat{\mathbf{p}}_i} = (k1_{\mathbf{p}_i} - k1_{\hat{\mathbf{p}}_i})^2 + (k2_{\mathbf{p}_i} - k2_{\hat{\mathbf{p}}_i})^2 \quad (9)$$

なお、本研究では、一般に三次元物体上の局所形状には面対称なものが多く存在することを考慮し、面対称形状も修復に利用する. 具体的には、座標変換行列 $\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{p}}_i\mathbf{p}_i}$ の要素である基底ベクトル $\mathbf{x}_{\mathbf{p}_i}$ または $\mathbf{y}_{\mathbf{p}_i}$ の符号を逆にした形状についても類似度を算出する.

(ii) 欠損領域内の各頂点の位置の並列的な更新

プロセス (ii) では、類似局所形状の組を固定し、式 (1) で定義したエネルギー E を最小化するように欠損領域内の頂点 \mathbf{p}_i の位置を並列に更新する. 以下では、類似局所形状の組を固定した場合の頂点 \mathbf{p}_i の位置の更新方法について詳述する. 類似局所形状の組を固定した場合、エネルギー E を決定する変数は欠損領域内の頂点数だけ存在するが、本研究で定義したエネルギー E は、欠損領域内の各頂点 \mathbf{p}_i のみを含む要素エネルギー $E(\mathbf{p}_i)$ に分解できることに着目し、各頂点を独立に扱うことを可能にする. 図4に示すように、更新対象となる頂点の位置を \mathbf{p}_i とすると、点 $\mathbf{p}_k (\in A_{\mathbf{p}_i})$ を中心とする局所形状に対して式 (8) で求まる類似局所形状の位置は $\mathbf{f}(\mathbf{p}_k)$ であり、この類似局所形状上において \mathbf{p}_i と対応する面上の点の位置は $\mathbf{g}_k(\mathbf{p}_i)$ となる. ここで、注目点 \mathbf{p}_i に関する E の要素エネルギー $E(\mathbf{p}_i)$ は、 \mathbf{p}_i , $\mathbf{g}_k(\mathbf{p}_i)$ 、および点 $\mathbf{f}(\mathbf{p}_k)$ から点 \mathbf{p}_k への位置合わせのための座標変換行列 $\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_k)\mathbf{p}_k}$ を用い

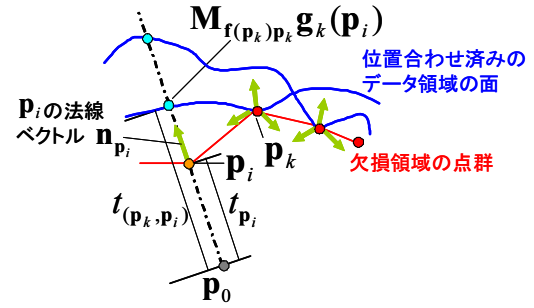


図5 パラメータの置換
Fig. 5 Conversion of parameters.

て、以下のように表すことができる.

$$E(\mathbf{p}_i) = \sum_{\mathbf{p}_k \in A_{\mathbf{p}_i}} \frac{w_{\mathbf{p}_k}}{N(A_{\mathbf{p}_i})} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_k)\mathbf{p}_k} \mathbf{g}_k(\mathbf{p}_i)\|^2 \quad (10)$$

この時、欠損領域全体のエネルギー E と各頂点での要素エネルギー $E(\mathbf{p}_i)$ の関係は、以下のように表せる.

$$E = \sum_{\mathbf{p}_i \in \Omega} E(\mathbf{p}_i) + C \quad (11)$$

C は、領域 $\Omega' \cap \bar{\Omega}$ 内にある頂点に関するエネルギーであり、ここでは類似局所形状の位置が固定されているため、定数として扱える.

ここで、頂点 \mathbf{p}_i に対応する全ての点 $\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_k)\mathbf{p}_k} \mathbf{g}_k(\mathbf{p}_i)$ ($\forall \mathbf{p}_k \in A_{\mathbf{p}_i}$) は、必ず頂点 \mathbf{p}_i の法線上に存在することから、図5に示すように、頂点 \mathbf{p}_i と点 $\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_k)\mathbf{p}_k} \mathbf{g}_k(\mathbf{p}_i)$ は、頂点 \mathbf{p}_i の単位法線ベクトル $\mathbf{n}_{\mathbf{p}_i}$ と、頂点 \mathbf{p}_i の法線上の任意の三次元点 \mathbf{p}_0 を用いて以下のように表せる.

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_0 + t_{\mathbf{p}_i} \mathbf{n}_{\mathbf{p}_i} \quad (12)$$

$$\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_k)\mathbf{p}_k} \mathbf{g}_k(\mathbf{p}_i) = \mathbf{p}_0 + t_{(\mathbf{p}_k,\mathbf{p}_i)} \mathbf{n}_{\mathbf{p}_i} \quad (13)$$

これらを、式 (10) に代入することにより次式が得られる.

$$E(\mathbf{p}_i) = \sum_{\mathbf{p}_k \in A_{\mathbf{p}_i}} \frac{w_{\mathbf{p}_k}}{N(A_{\mathbf{p}_i})} (t_{\mathbf{p}_i} - t_{(\mathbf{p}_k,\mathbf{p}_i)})^2 \quad (14)$$

ここで、 \mathbf{p}_i の更新前後において法線ベクトル $\mathbf{n}_{\mathbf{p}_i}$ が変化しないと仮定すれば、 $E(\mathbf{p}_i)$ の変数は $t_{\mathbf{p}_i}$ の1パラメータのみとなり、加えて $t_{\mathbf{p}_i}$ の変化は \mathbf{p}_i 以外の点の要素エネルギーには影響しない. よって、このような仮定の下では、要素エネルギー $E(\mathbf{p}_i)$ を独立に最小化することで、全体のエネルギー E を最小化できる. すなわち、 E を最小化する $t_{\mathbf{p}_i}$ は以下のように求められる.

$$t_{\mathbf{p}_i} = \frac{\sum_{\mathbf{p}_k \in A_{\mathbf{p}_i}} w_{\mathbf{p}_k} t_{(\mathbf{p}_k,\mathbf{p}_i)}}{\sum_{\mathbf{p}_k \in A_{\mathbf{p}_i}} w_{\mathbf{p}_k}} \quad (15)$$

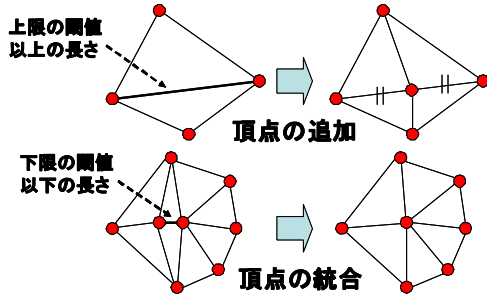


図6 頂点の追加と統合
Fig.6 Addition and integration of vertices.

従って、式 (12), (13), (15) から、頂点 \mathbf{p}_i の位置は以下のように算出できる。

$$\mathbf{p}_i = \frac{\sum_{\mathbf{p}_k \in A_{\mathbf{p}_i}} w_{\mathbf{p}_k} \mathbf{M}_{f(\mathbf{p}_k)\mathbf{p}_k} \mathbf{g}_k(\mathbf{p}_i)}{\sum_{\mathbf{p}_k \in A_{\mathbf{p}_i}} w_{\mathbf{p}_k}} \quad (16)$$

ただし、実際には各頂点位置の更新によって、法線ベクトル $\mathbf{n}_{\mathbf{p}_i}$ および $\mathbf{M}_{f(\mathbf{p}_k)\mathbf{p}_k} \mathbf{g}_k(\mathbf{p}_i)$ の位置が変化するため、式 (16) で得られる値は近似解となる。しかし、エネルギーが収束するに従って、法線ベクトル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。

(iii) 密度を考慮した頂点の追加と統合

前述したエネルギー最小化処理により頂点の位置が移動すると、欠損領域内の頂点群の分布に偏りが生じる。このとき、頂点の密度が必要以上に高い場合には、最適化処理が非効率となり、また、点が疎な箇所では、形状の細部を再現することができない。そこで本研究では、反復処理の中で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。具体的には、図6に示すように、頂点間の線分の長さに関して上限と下限の閾値を設ける。上限の閾値以上の長さの線分に対しては中間に頂点を追加し、それに応じて面を分割する。下限の閾値以下の長さの線分に対しては、線分の両端の頂点をそれらの中間位置に統合し、それに応じて面を削除する。

2.3 粗密法による反復処理

本研究では前項で述べた最適化の繰り返し処理において、SSDの算出に用いる局所形状の範囲および、領域 Ω' 内のエネルギーの算出に用いる頂点数をエネルギーが収束するごとに段階的に変化させる粗密法により、処理コストの低減と局所解の回避を図る。具体的には、SSDの算出に用いる局所形状の範囲 $A_{\mathbf{p}}$ の半径を段階的に小さくする。また、領域 Ω' 内のエネルギー計算に用いる頂点数を段階的に増やす。ここでは、領域 Ω' 内の欠損領域 Ω においては、前節で述べた頂点群の追加と削除の閾値を段階的に小さくすることで、欠損領域内の頂点の密度を段階的に上げる。これにより、初期段階ではおおまかな形状を生成し、最終段階

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)
Table 1 Parameters in experiments (l_{ave} indicates average length between points in data region).

粗密レベル	1	2	3
重み w における s	2.0 (モデル (I), (II)) 3.0 (モデル (III))		
範囲 A の半径	$9l_{ave}$	$7l_{ave}$	$5l_{ave}$
範囲 B の半径	$12l_{ave}$ (モデル (I)) $26l_{ave}$ (モデル (II)) $8l_{ave}$ (モデル (III))		
探索における割合 n	10%		
領域 $\Omega' \cap \bar{\Omega}$ における 間引く頂点の割合	8/9	3/4	0
上限の閾値	$4l_{ave}$	$2l_{ave}$	$1.3l_{ave}$
下限の閾値	$1.5l_{ave}$	$0.8l_{ave}$	$0.4l_{ave}$

では細かい形状まで再現する。また、領域 Ω' 内の残りの領域 $\Omega' \cap \bar{\Omega}$ では、形状が既に与えられているため頂点の数と位置が固定されているが、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の算出を行う。間引かれる頂点の割合を段階的に小さくしながら最適化処理を繰り返すことで、効率的に修復処理を行う。

3 実験

本節では、まず3種類の欠損を持つ三次元モデルに対する提案手法と従来手法による修復結果を比較することで、提案手法の有効性を示す。次に、提案手法におけるパラメータの結果への影響を考察する。

3.1 修復結果の比較による提案手法の評価

本実験では、図7, 8, 10(a)に示す3種類の三次元モデル (I), (II), (III) に対して修復実験を行う。ここでは、提案手法と同様に欠損領域に予め初期形状を与えた上で、逐次的なコピーにより修復を行う従来手法 [18] を実装し、従来手法と提案手法による修復結果 (各図の (c) と (d) にモデル全体図及び部分拡大図) を比較することで、提案手法の有効性を示す。なお、(I), (II) は故意に欠損領域を与えたモデルであり、(III) は実際に建物を計測した際のオクルージョンにより欠損が生じたモデルである。

各モデルの修復実験にはPC(CPU:Xeon 3.0GHz メモリ:8GB)を用いた。提案手法による修復では、3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。また、頂点群の初期値として、各図 (b) に示すように、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な面を構成したものをを用いた。従来手法 [18] による修復では、欠損領域の初期形状として滑らかな表面形状を与えることが前提となってい

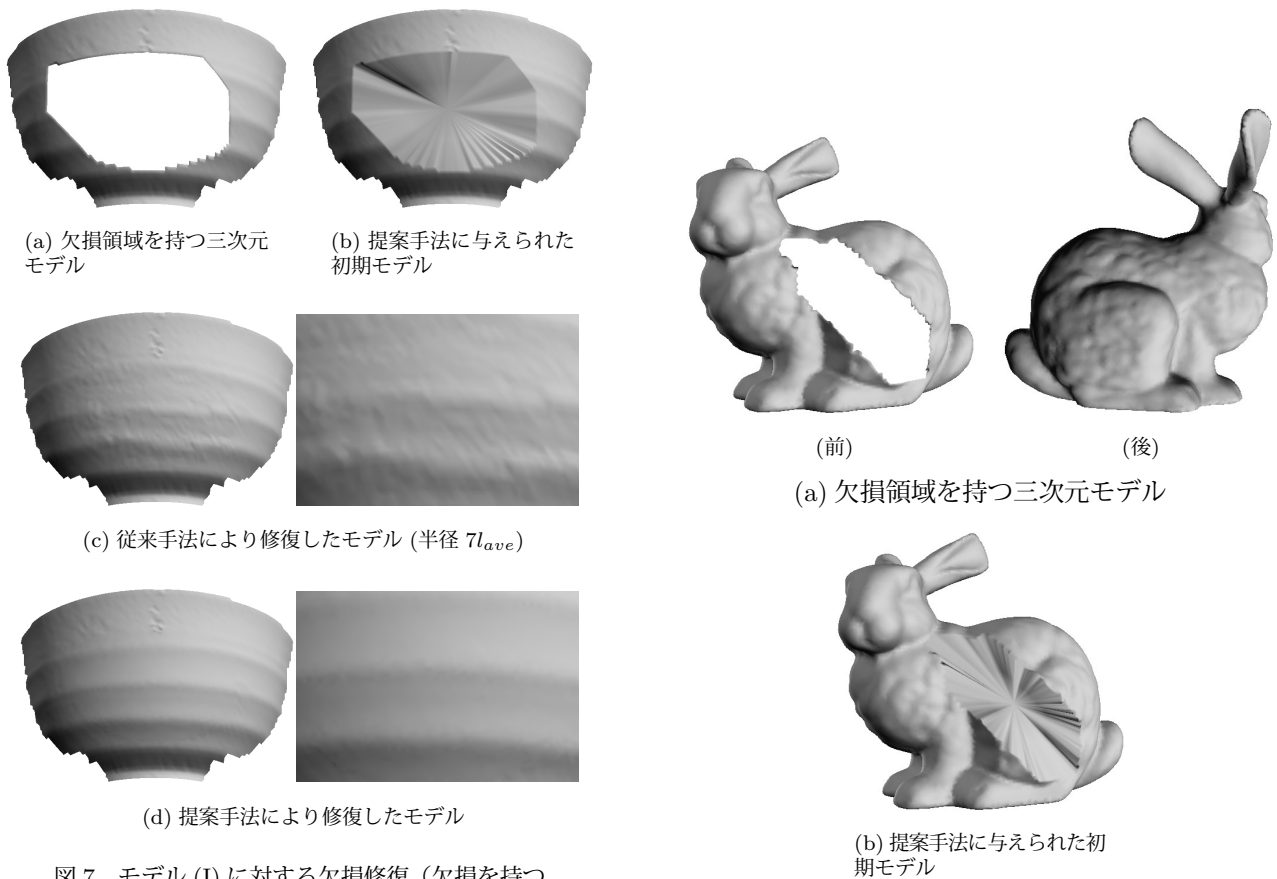


図7 モデル (I) に対する欠損修復 (欠損を持つモデル (a) の頂点数 3404, 修復後 (d) の欠損領域内の頂点数 1579, 処理時間 234 秒)
Fig. 7 Surface completion for Model (I).

る. このため本実験では, 従来手法にとって適切な初期形状を与えるために, モデル (I), (II) では欠損を与える前の元の表面形状を平滑化したものを, モデル (III) では元の形状が存在しないため, 提案手法により修復した形状を平滑化したものを初期形状とした. また, 従来手法のパラメータである類似度評価に用いる局所形状の範囲 A の半径を $9l_{ave}$ から $5l_{ave}$ の間で $1l_{ave}$ ずつ変化させながら修復を行い, 最も違和感の小さい修復結果を各図 (c) 示した. 以下, 各三次元モデルの修復結果について考察する.

モデル (I) (図 7(a)) は, 欠損領域の周辺に滑らかな曲面形状が存在する比較的単純な形状のモデルである. 図 7(c) より, 従来手法による修復モデルでは, 欠損領域の中心付近で隆起したエッジが歪み, データ領域にないエッジが現れているため違和感が生じていることが分かる. これに対して, 図 7(b) に示すモデルを初期値として, 提案手法による最適化を行ったモデル (図 7(d)) では, 欠損領域に滑らかな曲面形状が生成され, また, 境界部分の隆起している箇所が, 欠損領域内で連続的に接続されることで, 違和感のないモデルが生成されている.

モデル (II) (図 8(a)) は, 欠損領域の周辺で起伏のあ

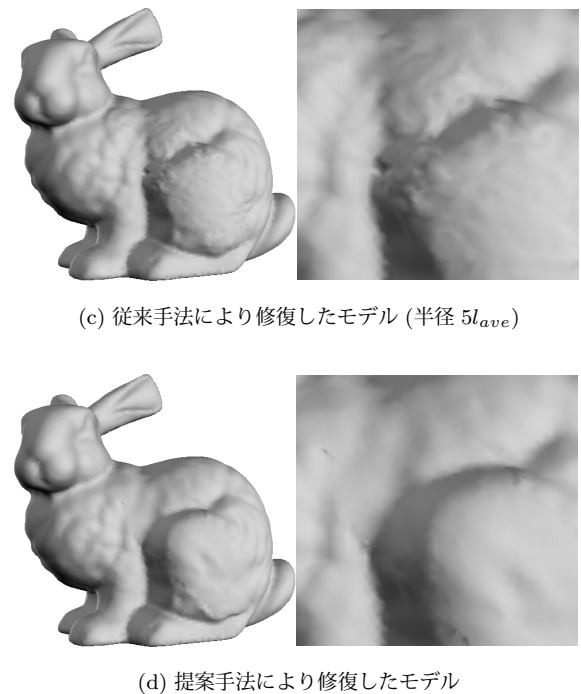


図8 モデル (II) に対する欠損修復 (欠損を持つモデル (a) の頂点数 17522, 修復後 (d) の欠損領域内の頂点数 1505, 処理時間 1682 秒)
Fig. 8 Surface completion for Model (II).

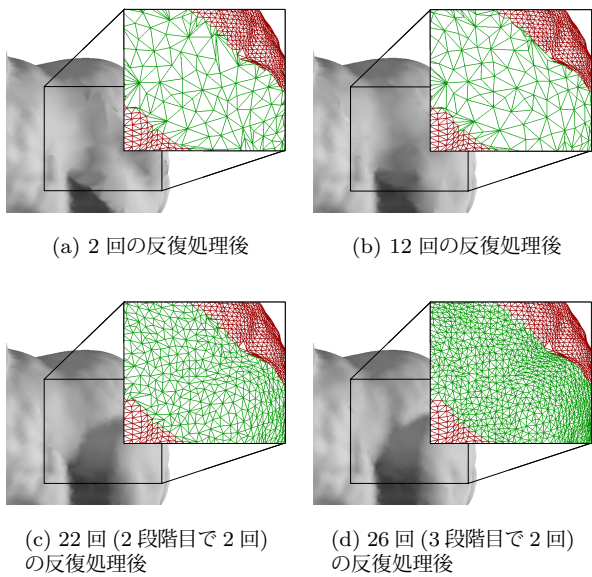


図9 モデル (II) の反復処理による形状の変化
Fig.9 Changes in shape with iterations for Model (II).

る表面形状と、窪んだエッジが存在する比較的複雑なモデル (Stanford Bunny) である。図 8(c) に示す従来手法による修復モデルでは、欠損領域の中心付近でエッジがつながっているものの、データ領域には存在しない滑らかなエッジが現れ違和感のある形状が生成されている。これに対して、初期形状 (図 8(b)) から提案手法により生成したモデル (図 8(d)) では、起伏のある表面形状が再現されており、また、Bunny の後ろ側の足と同様の滑らかなエッジも再現されているため、全体に違和感の小さいモデルが生成されている。図 9 に反復処理による形状の変化を示す。同図から、反復回数に応じて形状が徐々に修復されていることが分かる。また、図 9(c)(d) から、徐々に頂点群の密度を増やしながら反復処理を行うことによって、最終的には窪んだ形状が細部まで再現されていることが分かる。

モデル (III) (図 10(a)) は、現実の屋外環境を計測した際に、街灯によるオクルージョンにより建物の壁と窓および地面が欠損したモデルである。逐次的なコピーにより修復したモデル (図 10(c)) では、窓の付近に違和感のある形状が生じているのに対し、初期形状 (図 10(b)) から提案手法により生成したモデル (図 10(d)) では、壁・地面・窓枠とも違和感なく修復されている。

図 11 に各モデルの反復処理におけるエネルギーの変化を示す。ただし、図中のエネルギーは初期モデルのエネルギーを 1 として正規化している。図から、どのモデルにおいても、初期モデルから反復処理を行うことによって、エネルギーが徐々に減少していることが確認できる。ただし、粗密法において全体の頂点の

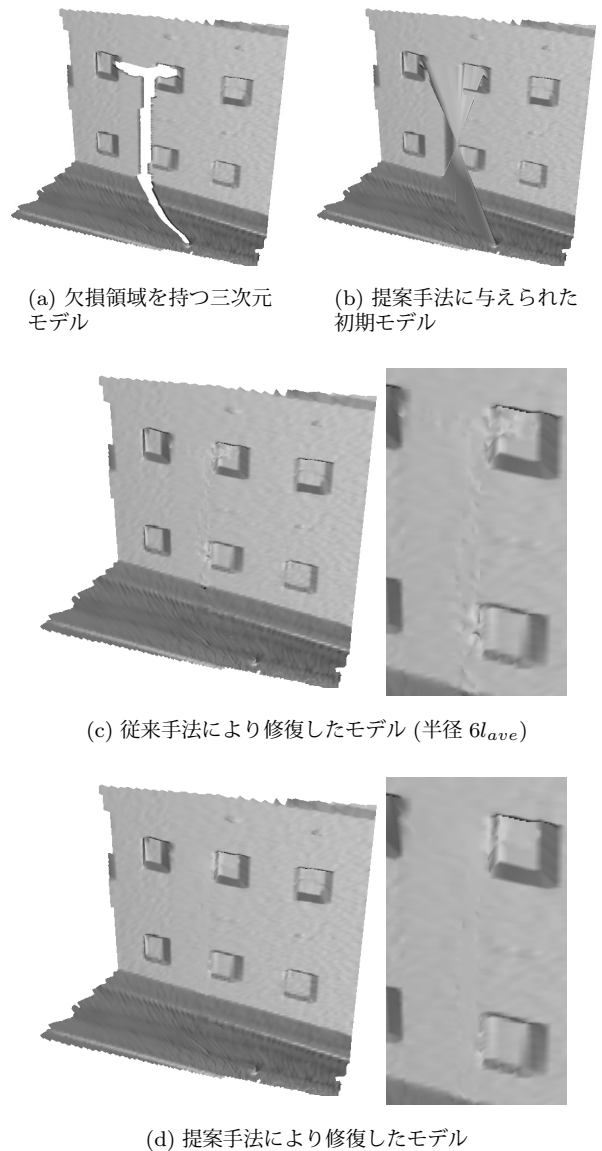


図 10 モデル (III) に対する欠損修復 (データ領域の頂点数 12749, 修復後の欠損領域の頂点数 474, 処理時間 1688 秒)
Fig. 10 Surface completion for Model (III) .

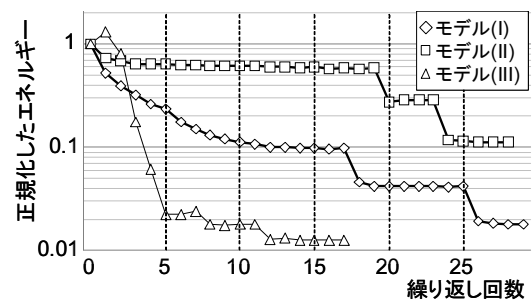


図 11 各モデルのエネルギーの変化
Fig. 11 Changes in energy with respect to iterations for each model.

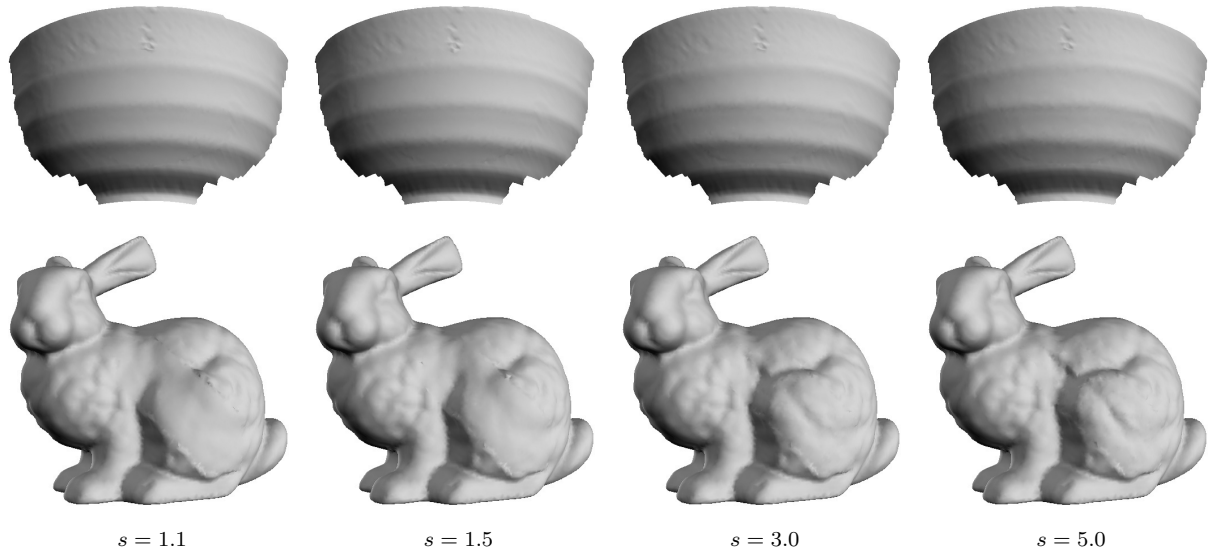


図 12 重み w の s を変化させた時の修復結果 (上段: モデル (I), 下段: モデル (II))
Fig. 12 Results with different values of parameter s .

表 2 重み w の s を変化させた時の処理時間
Table 2 Processing time with different values of parameter s for each model.

s	処理時間 (秒)				
	1.1	1.5	2.0	3.0	5.0
モデル (I)	467	303	234	215	174
モデル (II)	1891	1307	1682	1237	958

密度および類似度 SSD の算出における範囲 A が変化した時点 (モデル (I) では 18 回目, 26 回目, モデル (II) では, 20 回目, 24 回目, モデル (III) では, 8 回目, 12 回目) においてはエネルギーが不連続に変化する.

3.2 パラメータの結果に対する影響の考察

提案手法では, 表 1 に示すような複数のパラメータを決定する必要があるが, 本項では特に結果への影響が大きい, エネルギー関数 (式 (1)) における重み w 中の s の変化による処理時間および修復結果を考察する. 表 2 と図 12 に, 3.1 節で示した実験に対して s を変化させた場合のモデル (I), (II) の処理時間と修復結果を示す.

まず処理時間に関して表 2 から, s が大きくなる, すなわち欠損領域の境界からのリンク数に基づく頂点間の重みの変化率が大きくなるに従って, 処理時間が短くなる傾向が見られた. これは, 重みの変化率が大きいほど, 頂点位置の更新の際に欠損領域の境界に近い頂点が欠損領域のより内部にある頂点に及ぼす影響が大きくなるため, 一度の反復処理で欠損領域内部の形状が大きく変化し, 結果的に反復回数が減少することによる.

次に修復結果に関して, 図 12 に示すように, 比較

的形狀が単純なモデル (I) では重みの変化による修復結果への影響は小さかったが, モデル (II) においては修復結果への大きな影響が見られた. 具体的には, s が小さすぎる場合 ($s \leq 1.5$), 窪んだエッジがつかず, 欠損領域内の表面形状が全体的に滑らかになる傾向が見られた. 一方, s が大きすぎる場合 ($s \geq 3.0$), 窪んだエッジがつかず, 起伏のある表面形状が生成されているが, 欠損領域の中心付近でデータ領域に存在しない違和感のある形状が生成されやすいことが確認できた.

これらの結果から, 重み w 中の s を大きくすることでエネルギーの収束を早め効率的に修復できることが考えられるが, 修復結果に関しては, 現状において最適なパラメータを自動で決定することは難しく, 試行錯誤による調整が必要である. このため, 今後, 効率的かつ違和感のない修復を実現するためには, 欠損領域周辺の形状の特徴や修復過程における形状の変化を分析することにより重みのパラメータを適応的に決定する手法を確立する必要がある.

4 まとめ

本論文では, 三次元表面形状モデルにおける欠損領域の尤もらしさに基づくエネルギー関数を, 局所表面形状の類似度 SSD を用いて定義し, これを最小化することで, 三次元モデルにおける欠損領域を修復する手法を提案した. 実験では, 滑らかな曲面形状を持つ単純な形状のモデル, 起伏のある複雑な形状のモデル, 実際の屋外環境を計測したモデルに対して違和感のない修復が実現できること示した. しかし, 修復結果がパラメータに大きく依存することも確認した. 今後,

様々な特徴を持つ三次元モデルに対して違和感のない修復を実現するためには、三次元モデルの特徴や修復過程における形状の変化から最適なパラメータを自動的に決定する手法を確立する必要がある。また、形状とテクスチャの同時修復を実現する手法を開発する。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (基盤研究 (A), No.19200016, 若手研究 (B), No.20700162, および, 特別研究員奨励費, No.8045) による。

参考文献

- [1] C. Früh, A. Zakhor: "An automated method for large-scale, ground-based city model acquisition", *Int. Jour. of Computer Vision*, vol.60, pp. 5–24, 2004.
- [2] 浅井俊弘, 神原誠之, 横矢直和: "全方位距離画像と全方位カラー画像の統合による屋外環境の三次元モデル化", *画像電子学会誌*, vol.34, no.5, pp. 529–538, 2005.
- [3] T. Sato, M. Kanbara, N. Yokoya and H. Takemura: "Dense 3-D reconstruction of an outdoor scene by hundreds-baseline stereo using a hand-held video camera," *Int. Jour. of Computer Vision*, vol.47, no.1-3 pp. 119–129, 2002.
- [4] U. Castellani, S. Livatino and R.B. Fisher: "Improving environment modelling by edge occlusion surface completion," *Proc. Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, pp. 672–675, 2002.
- [5] J. Verdera, V. Caselles, M. Bertalmio and G. Sapiro: "Inpainting surface holes," *Proc. Int. Conf. on Image Processing*, vol.2, pp. 903–906, 2003.
- [6] J. Wang and M.M. Oliveira: "A hole-filling strategy for reconstruction of smooth surfaces in range images," *Proc. SIBGRAPI03*, pp. 11–18, 2003.
- [7] H. Xie, K.T. McDonnell and H. Qin: "A finite element method for surface restoration with smooth boundary conditions," *Computer Aided Geometric Design Archive*, vol.21, no.5, pp. 427–445, 2004.
- [8] B. Curless and M. Levoy: "A volumetric method for building complex models from range images," *Proc. ACM SIGGRAPH96*, pp. 303–312, 1996.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 板野友哉, 森栄晃彦, 古川亮, 川崎洋: "未観測ボクセルのクラス推定を用いた形状の統合及び補間手法とGPUを用いた高速な実装", *画像の認識・理解シンポジウム講演論文集*, pp. 365–371, 2007.
- [12] R. Sagawa and K. Ikeuchi: "Hole filling of a 3D model by flipping signs of a signed distance field in adaptive resolution," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.30, no.4, pp. 686–699, 2008.
- [13] V. Kraevoy and A. Sheffer: "Template-based mesh completion," *Proc. Eurographics Symp. on Geometry Processing*, pp. 13–22, 2005.
- [14] M. Pauly: "Example-based 3D scan completion," *Proc. Eurographics Symp. on Geometry Processing*, pp. 23–32, 2005.
- [15] M. Pauly, N.J. Mitra, J. Wallner, H. Pottmann and L.J. Guibas: "Discovering structural regularity in 3D Geometry," *Proc. ACM SIGGRAPH2008*, vol.27, no. 3, #43, pp. 1–11, 2008.
- [16] S. Park, X. Guo, H. Shin and H. Qin: "Surface completion for shape and appearance," *Int. J. of Computer Graphics*, vol.22, pp. 168–180, 2006.
- [17] A. Sharf, M. Alexa and D. Cohen-Or: "Context-based surface completion," *Proc. ACM SIGGRAPH2004*, pp. 878–887, 2004.
- [18] T.P. Breckon and R.B. Fisher: "Non-parametric 3D Surface Completion," *Proc. Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 573–580, 2005.

(2009年9月18日受付)

[著者紹介]

河合 紀彦



2005年京大・工・情報卒。2007年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在、同大博士後期課程に在学中。2009年日本学術振興会特別研究員 (DC2)。2009年電子情報通信学会学術奨励賞受賞。電子情報通信学会、情報処理学会、IEEE各会員。

佐藤 智和 (正会員)



1999年阪府大・工・情報工卒。2003年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。現在、同大情報科学研究科助教。コンピュータビジョンの研究に従事。2001年電子情報通信学会学術奨励賞受賞。博士 (工学)。電子情報通信学会、情報処理学会、IEEE各会員。

横矢 直和 (正会員)



1974年阪大・基礎工・情報工卒。1979年同大大学院博士後期課程修了。同年電子技術総合技術研究所入所。以来、画像処理ソフトウェア、画像データベース、コンピュータビジョンの研究に従事。1986～87年マツギル大・知能機械研究センター客員教授。1992年奈良先端科学技術大学院大学・情報科学センター教授。現在、同大情報科学研究科教授。1990年、2007年情報処理学会論文賞受賞。2005年情報処理学会フェロー、電子情報通信学会フェロー、工博。電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会、日本認知科学会、映像情報メディア学会、IEEE、ACM SIGGRAPH各会員。