

局所形状の類似度評価に基づくエネルギー最小化による三次元欠損修復

河合 紀彦[†] 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

E-mail: †{norihiko-k,tomokazu-s,yokoyama}@is.naist.jp

あらまし 本稿では、レーザレンジファインダや画像計測により取得した実物体の三次元メッシュモデルにおける、計測もれにより生じる欠損領域を自動的に修復する新たな手法を提案する。従来、三次元形状の欠損修復手法として、欠損領域周辺の表面形状と類似した形状を同一物体上の欠損領域以外の領域から探し、それを欠損領域に逐次的にコピーすることで欠損領域を修復する手法が提案されている。しかし、逐次的な表面形状のコピーでは、局所形状の接続部において形状に不連続が現れ、違和感が生じる可能性がある。そこで、本研究では、欠損領域とデータ領域間の局所表面形状の類似度を用いて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修復する。実験では、様々な特徴を持つ三次元モデルに対して欠損領域の修復を行うことで、提案手法の有効性を示す。キーワード 三次元モデル、欠損修復、形状補間、エネルギー最小化、形状の類似度

Surface Completion by Minimizing Energy Based on Similarity Measure of Local Shape

Norihiko KAWAI[†], Tomokazu SATO[†], and Naokazu YOKOYA[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Takayama 8916-5, Ikoma, Nara, 630-0192 Japan

E-mail: †{norihiko-k,tomokazu-s,yokoyama}@is.naist.jp

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

Key words Surface Completion, 3D Inpainting, Energy Minimization, Shape Similarity

1. はじめに

現実環境の三次元モデルは、ゲーム・映画などのエンタテインメントや建物・歴史物などのデジタルアーカイブなど幅広い応用分野で利用することができる。このため、近年、現実物体の三次元モデルの計測に関する様々な手法が提案されている。これら実物体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] など様々な手法が存在するが、これらの計測手法では、センサの位置から観測できる部分形状しか得られない。このため、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、屋外環境のような広域で複雑な環境を対象とした場合、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多くの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多数提案されている。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について詳述し、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、直線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] ~ [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、違和感が生じることが多い。

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] ~ [11] 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。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。これらに対して、ベイズ推定により各ボクセルの状態を推定する手法 [10] 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 [11] 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、これらの符号付距離場を用いる手法でも、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。

これらの手法に対して、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を利用する事例ベースの手法 [12] ~ [16] が提案されている。これらの手法では欠損領域の局所的な表面形状と類似したデータ領域内の局所形状を欠損領域に逐次的にコピーすることで欠損領域を修復する。これらは、データ領域の表面形状を欠損領域にコピーすることから、欠損領域内部において複雑な形状を再現することができる。しかし、逐次的な表面形状のコピーでは、局所形状の接続部において形状の性質に不連続が現れ、違和感が生じる可能性がある。

本稿では、このような問題を解決するために、欠損領域とデータ領域間の局所表面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の修復を行う手法を提案する。本研究では、局所表面形状の類似度を用い、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ことで、表面形状の性質に不連続がないモデルを生成する。

2. エネルギー最小化による形状の修復

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

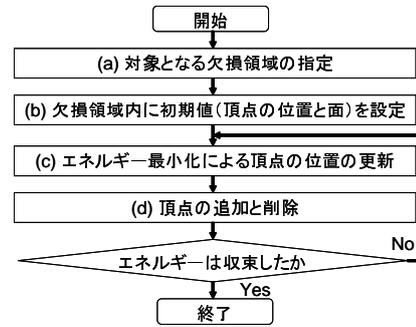


図 1 提案手法の処理の流れ

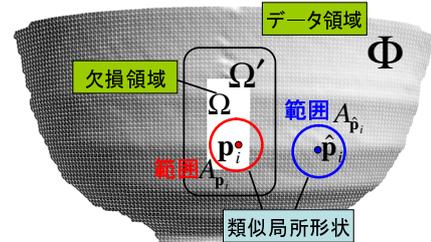


図 2 三次元モデルの各領域

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群とそれらを結ぶ面を与える (b). 次に、エネルギー最小化による頂点位置の更新 (c) および頂点群の密度を考慮した頂点の追加と削除 (d) を繰り返すことで、欠損領域の形状の修復を行う。本節では、まず局所表面形状の類似度 SSD によるエネルギー関数を定義する。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、最後に密度を考慮した頂点の追加と削除について述べる。

2.1 局所表面形状の類似度 SSD 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、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状範囲 A の内部に一部でも欠損領域 Ω 内の頂点（初期位置）が含まれる範囲 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 p_i 周辺の頂点群と点 p_i に対応するデータ領域 Φ 内の頂点 \hat{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。

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

ここで、重み w_{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 $w_{p_i} = 1$ 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 $w_{p_i} = c_1^{-c_2 d}$ (d は Ω の境界からの距離、 c_1, c_2 は定数) を用いる。ただし、領域 Ω 内の点の位置は後述のエネルギー最小化処理 (c) により移動し、各頂点の重みが増加するため、式 (1) では重みの総和による正規化を行っている。本研究では、欠損領域とデータ領域の表面形状の類似度を表す $SSD(p_i, \hat{p}_i)$ を、領域 Ω' 内の頂点 p_i を

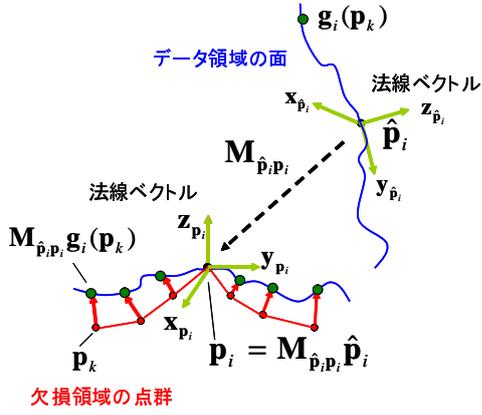


図3 類似度算出における頂点群と表面の位置合わせ

中心とする一定範囲 A_{p_i} 内の頂点群と領域 Φ 内の頂点 \hat{p}_i 周辺の面を位置合わせした上での点群と面の距離の総和として以下の式で定義する.

$$SSD(p_i, \hat{p}_i) = \frac{1}{N(A_{p_i})} \sum_{p_k \in A_{p_i}} \|p_k - M_{\hat{p}_i, p_i} g_i(p_k)\|^2 \quad (2)$$

ただし, $M_{\hat{p}_i, p_i}$ 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, 頂点 $p_k (\in A_{p_i})$ の法線方向にある位置合わせ済みのデータ領域の面上の点を $M_{\hat{p}_i, p_i} g_i(p_k)$, p_i を中心とする一定半径の球状範囲 A_{p_i} の内部に存在する点の数を $N(A_{p_i})$ とする.

局所形状位置合わせのための変換行列 $M_{\hat{p}_i, p_i}$ は, 頂点 $p_i = (x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i})$, 頂点 $\hat{p}_i = (x_{\hat{p}_i}, y_{\hat{p}_i}, z_{\hat{p}_i})$ 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 p_i, \hat{p}_i における物体の座標系での基底ベクトルを, $(x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}), (x_{\hat{p}_i}, y_{\hat{p}_i}, z_{\hat{p}_i})$ とする. この時, 座標変換行列 $M_{\hat{p}_i, p_i}$ は以下の式により算出できる.

$$M_{\hat{p}_i, p_i} = \begin{pmatrix} x_{p_i} & -x_{p_i} \\ y_{p_i} & -y_{p_i} \\ z_{p_i} & -z_{p_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{\hat{p}_i} & -x_{\hat{p}_i} \\ y_{\hat{p}_i} & -y_{\hat{p}_i} \\ z_{\hat{p}_i} & -z_{\hat{p}_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

図4に示すように, 対象物体が地平面 (xz 平面) に対して水平に設置されていると仮定すると, 一般に, 物体上の類似した局所形状同士的位置合わせにおいて, 局所形状に対する法線軸周りの形状の回転が発生することは少ない. このため, 本研究では, 各頂点の法線方向を z_p とし, x_p, y_p を以下の式により算出する.

$$x_p = \frac{(0, 1, 0)^t \times z_p}{\|(0, 1, 0)^t \times z_p\|} \quad (4)$$

$$y_p = z_p \times x_p \quad (5)$$

2.2 エネルギー最小化による頂点位置の更新

本研究では, Greedy Algorithm の枠組みを用いて式 (1) で

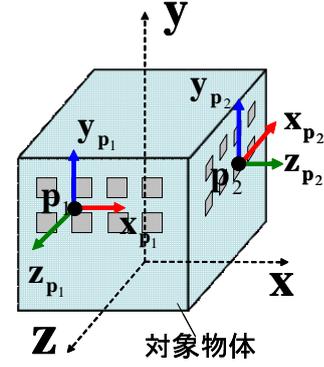


図4 各頂点での基底ベクトル

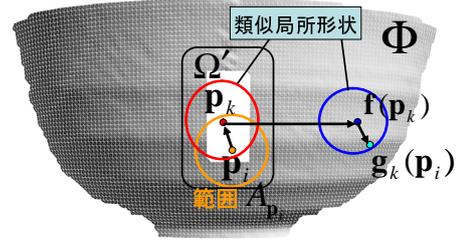


図5 エネルギー算出時の頂点の関係

定義したエネルギー E を最小化する. ここでは, 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 の位置の更新
 - (ii) 欠損領域内の各頂点 p_i の位置の並列的な更新
- の2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.

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更新する. 具体的には, 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.

$$f(p_i) = \hat{p}_i = \underset{p' \in \Phi}{\operatorname{argmin}} (SSD(p_i, p')) \quad (6)$$

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 を最小化する欠損領域内の頂点 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 p_i の位置の更新方法について詳述する. ここではまず, エネルギー E を, 欠損領域内の各頂点の要素エネルギー $E(p_i)$ に分解することで各頂点を独立に扱うことを可能にする. 図5に示すように, 更新対象となる頂点の位置を p_i とすると, 点 $p_k (\in A_{p_i})$ を中心とする局所形状に対して式 (6) で求まる類似局所形状の位置は $f(p_k)$ であり, この類似局所形状上において p_i と対応する面上の点の位置は $g_k(p_i)$ となる. ここで, 注目点 p_i に関する E の要素エネルギー $E(p_i)$ は, $p_i, g_k(p_i)$, および点 $f(p_k)$ から点 p_k への位置合わせのための座標変換行列 $M_{f(p_k), p_k}$ を用いて, 以下のように表すことができる.

$$E(p_i) = \sum_{p_k \in A_{p_i}} \frac{w_{p_k}}{N(A_{p_i})} \|p_i - M_{f(p_k), p_k} g_k(p_i)\|^2 \quad (7)$$

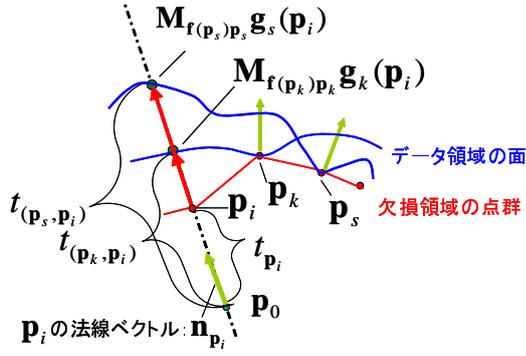


図 6 パラメータの置換

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 $E(p_i)$ の関係は、以下のように表せる。

$$E = \sum_{p_i \in \Omega} E(p_i) + C \quad (8)$$

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 p_i に対応する全ての点 $M_{f(p_k)p_k} g_k(p_i)$ ($\forall p_k \in A_{p_i}$) は、必ず頂点 p_i の法線上に存在することから、図 6 に示すように、頂点 p_i と点 $M_{f(p_k)p_k} g_k(p_i)$ は、頂点 p_i の単位法線ベクトル n_{p_i} と、頂点 p_i の法線上の任意の三次元点 p_0 を用いて以下のように表せる。

$$p_i = p_0 + t_{p_i} n_{p_i} \quad (9)$$

$$M_{f(p_k)p_k} g_k(p_i) = p_0 + t_{(p_k,p_i)} n_{p_i} \quad (10)$$

これらを、式 (7) に代入すれば次式が得られる。

$$E(p_i) = \sum_{p_k \in A_{p_i}} \frac{w_{p_k}}{N(A_{p_i})} (t_{p_i} - t_{(p_k,p_i)})^2 \quad (11)$$

ここで、 p_i の更新前後において法線ベクトル n_{p_i} が変化しないと仮定すれば、 $E(p_i)$ の変数は t_{p_i} の 1 パラメータのみとなり、加えて t_{p_i} の変化は 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 $E(p_i)$ 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_{p_i} は以下のように求められる。

$$t_{p_i} = \frac{\sum_{p_k \in A_{p_i}} w_{p_k} t_{(p_k,p_i)}}{\sum_{p_k \in A_{p_i}} w_{p_k}} \quad (12)$$

従って、式 (9), (10), (12) から、頂点 p_i の位置は以下のように算出できる。

$$p_i = \frac{\sum_{p_k \in A_{p_i}} w_{p_k} M_{f(p_k)p_k} g_k(p_i)}{\sum_{p_k \in A_{p_i}} w_{p_k}} \quad (13)$$

ただし、実際には頂点の位置の更新によって、補間される形状も更新され、法線ベクトル n_{p_i} および $M_{f(p_k)p_k} g_k(p_i)$ の位置が変化するため、式 (13) 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。

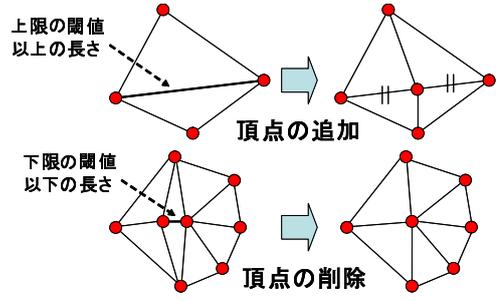


図 7 頂点の追加と削除

2.3 密度を考慮した頂点の追加と削除

前項で述べ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削除を行う。具体的には、図 7 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。

また、本研究では最適化の繰り返し処理において粗密法を利用する。具体的には、SSD の算出に用いる局所形状の範囲 A_p の半径および頂点群の追加と削除の閾値を、エネルギーが収束するごとに段階的に小さくすることで処理コストの低減と局所解の回避を図る。

3. 実験

提案手法の有効性を示すために、PC(CPU:Xeon 3.0GHz メモリ:8GB) を用い、図 8, 10, 11(a) に示す異なる特徴を持つ 3 種類の三次元モデル A, B, C に対して修復実験を行った。本実験では、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における重心点と境界の頂点群を結ぶ直線上の中間点に点群を配置した。また、比較に用いる局所形状の範囲 A_p の半径と頂点の追加と削除に関する閾値を 3 段階で変化させ、徐々に点群の密度を高めながら反復処理を行った。以下、三次元モデル A, B, C に関して考察する。

モデル A は、図 8(a) に示すように欠損領域の周辺で滑らかな曲面形状が存在するモデルである。境界の点群とそれらの重心位置とを結んでできた初期形状 (図 8(b)) では、周辺との形状が大きく異なり違和感が生じている。これを初期値として、提案手法による最適化を行ったモデル (図 8(c)) では、欠損領域に滑らかな曲面形状が生成されており、また、境界部分の隆起している箇所では、欠損領域内へも滑らかな隆起が続いているため、違和感の少ないモデルが生成されている。また、図 9 に反復処理による形状の変化とその時のメッシュを示す。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わかる。また、図 9(b)(c) より、徐々に頂点群の密度を増やしながらから反復処理を行うことによって、起伏した形状が細部まで再現

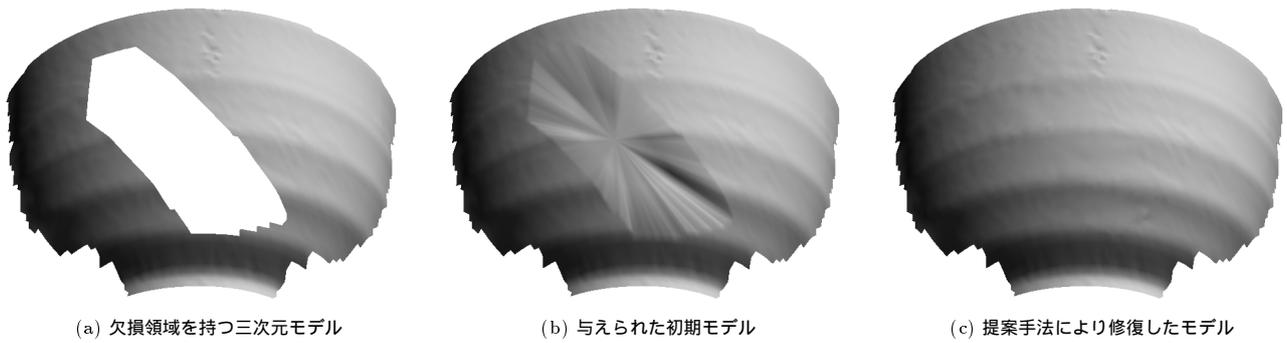


図 8 滑らかな曲面形状を持つモデル A に対する欠損修復

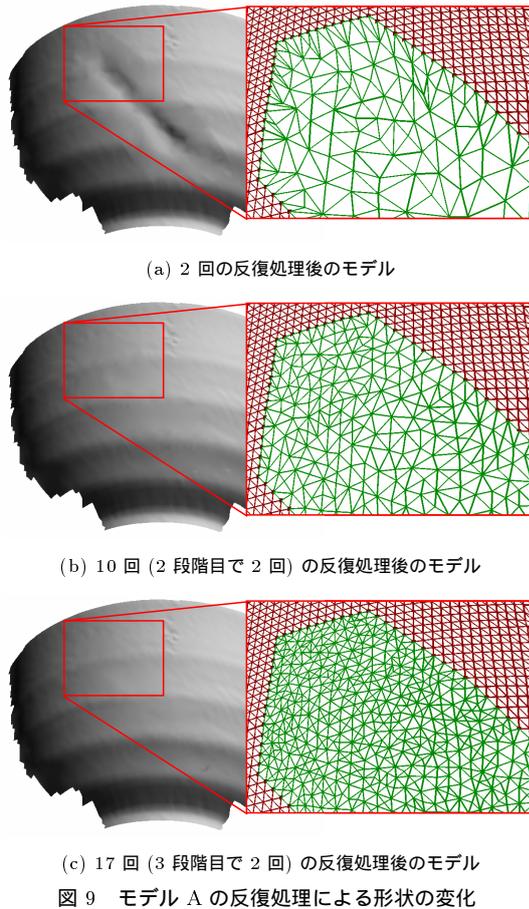


図 9 モデル A の反復処理による形状の変化

されていることがわかる。

モデル B は、図 10(a) に示すように欠損領域の周辺で鋭いエッジが存在するモデルである。初期形状(図 10(b))では、欠損領域が窪み、違和感のある形状が生成されている。これを初期値として、提案手法により最適化を行ったモデル(図 10(c))では、欠損領域境界部分のエッジがつながり、またエッジ以外の領域では平らな表面形状が生成され違和感のないモデルが生成されている。

モデル C は、図 11(a) に示すように欠損領域の周辺で起伏のある表面形状と、窪んだエッジが存在するモデルである。初期形状(図 11(b))では、他のモデルと同様に直線的な表面が生成されているため違和感がある。これを初期値として提案手法により生成したモデル(図 11(c))では、起伏のある表面形状が再現されており、また、窪んだ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。また、図 11(d) に異なった角度の視点からのモデルの修復結果とそのメッシュを示す。図から、頂点群と面が起伏のある表面と窪んだエッジの両部分においても違和感のないモデルが生成されている。

表 1 に各モデルにおける頂点数と処理時間を示す。表から、処理時間が対象モデルの形状や頂点数によって変化することがわかる。これは修復処理のうち類似局所形状の探索に多くのコストがかかることによる。

4. まとめ

本稿では、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の修復を行う手法を提案した。実験では、滑らかな曲面形状を持つモデル、鋭いエッジを持つモデル、起伏のある複雑な形状を持つモデルに対して違和感のない修復を実現できることを示した。今後は、屋外環境の広域モデルなどより複雑な三次元モデルに対する実験を行う予定である。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, および、若手研究(B), No.20700162)による。

文献

- [1] 西野, 池内: “大規模画像群の頑健な同時位置合せ”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J85-D-II, No. 9, pp. 1413-1424, 2002.
- [2] 浅井, 神原, 横矢: “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] 佐藤, 神原, 横矢, 竹村: “マルチベースラインステレオ法を利用した動画からの屋外環境の三次元モデル化”, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 275-282, 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: “In-painting Surface Holes,” Proc. Int. Conf. on Image Process-

表 1 各モデルの頂点数と処理時間

モデル	欠損領域以外の領域内の頂点数	修復後の欠損領域内の頂点数	処理時間
A	5122	1094	21 分 44 秒
B	3329	1432	3 分 6 秒
C	18610	667	67 分 50 秒

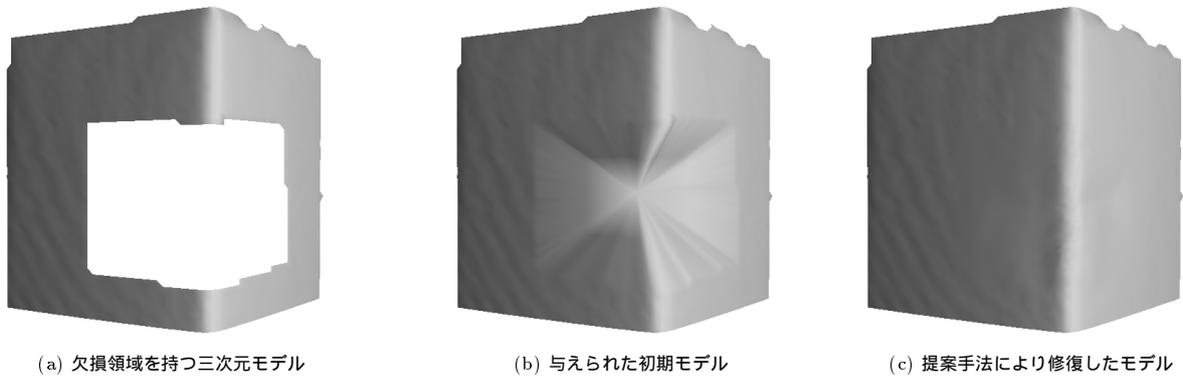


図 10 鋭いエッジのある表面形状を持つモデル B に対する欠損修復

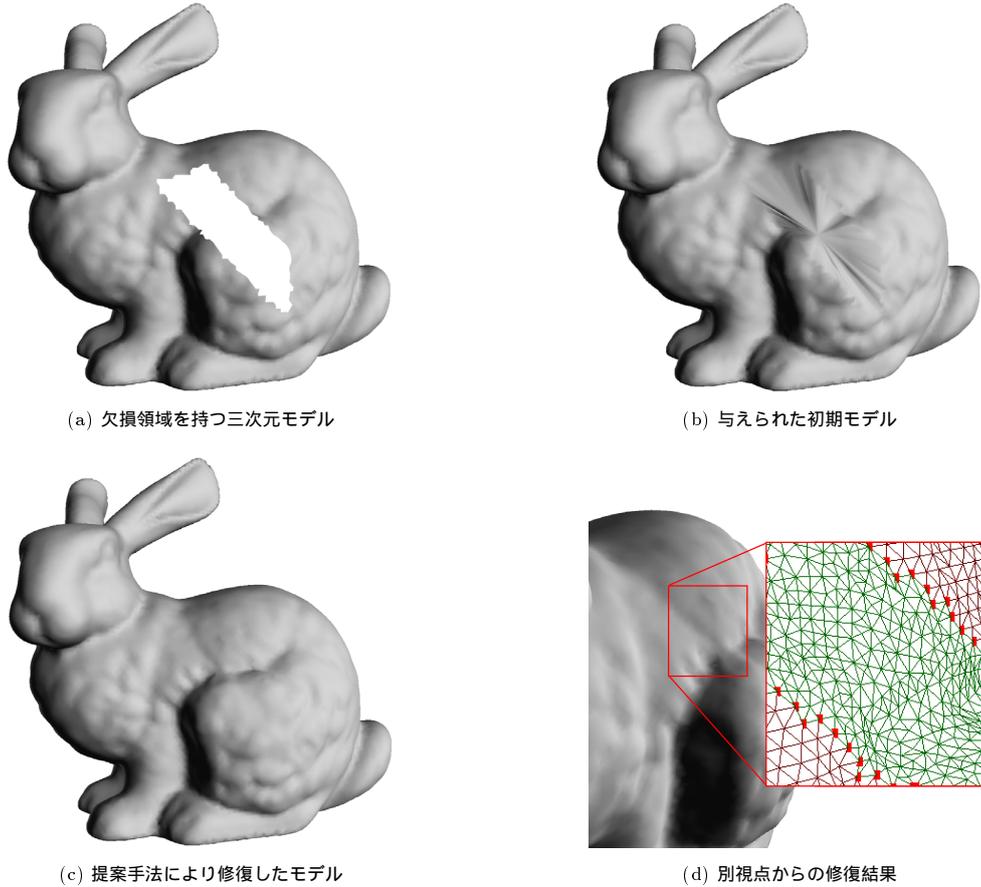


図 11 起伏のある表面形状と窪んだエッジを持つモデル C に対する欠損修復

ing, 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] 坂野, 森栄, 古川, 川崎: “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.

[11] 佐川, 池内: “符号付距離場の整合化による形状モデル補間手法”, 電子情報通信学会論文誌, vol.J88-D-II, pp. 541–551, 2005.

[12] A. Sharf, M. Alexa and D. Cohen-Or: “Context-based Surface Completion,” Proc. ACM SIGGRAPH2004, pp. 878–887, 2004.

[13] M. Pauly: “Example-Based 3D Scan Completion,” Proc. Eurographics Symp. on Geometry Processing, pp. 23–32, 2005.

[14] V. Kraevoy and A. Sheffer: “Template-Based Mesh Completion,” Proc. Eurographics Symp. on Geometry Processing, pp. 13–22, 2005.

[15] 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.

[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.