

# エネルギー最小化による三次元欠損修復における 主曲率を用いた類似局所形状探索の効率化と修復結果の定量的評価

## Efficiency Improvement and Quantitative Evaluation for 3D Model Completion by Minimizing Energy

河合 紀彦 佐藤 智和 横矢 直和

Norihiko Kawai, Tomokazu Sato and Naokazu Yokoya

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

**ABSTRACT** 3D mesh models generated with range scanner or video images often have holes due to occlusions and surface characteristics. For this problem, we have proposed a method to complete the missing regions by minimizing the energy function which is defined based on similarity of local shape between the missing region and the rest of the object (data region). However, it took much time for our previous method to complete the missing region because the whole data region is searched for the similar shape. In this report, as extension of our previous method, the cost of the search is reduced by using principal curvature of local shape. In experiments, we also evaluate completed models qualitatively and quantitatively.

### 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・遺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、レーザレンジファインダや画像計測などを用いて現実物体を三次元計測し、三次元モデルを自動的に生成する手法 [1, 2] が提案されている。これらの手法では、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ことで三次元モデルを生成している。しかし、屋外環境のような様々な物体が存在する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、我々は従来、欠損領域と同一物体上の欠損領域以外の領域（以下、データ領域）の局所表面形状の類似度 SSD (Sum of Squared Distances) 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 [3] を提案している。この手法は、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できるという特長を持つ。しかし、この手法では類似形状の探索において、データ領域内の全ての頂点に対して類似度の算出を行うため、結果として欠損修復に多くの処理時間を必要とした。これに対して、

本稿では、我々が従来提案した手法の拡張として、局所形状における主曲率を用いて類似形状の探索を効率化することで、欠損修復を高速化する手法を提案する。また、新たに欠損前のモデルと修復したモデルを比較することで定量的評価を行い、提案手法の有効性を示す。

### 2 関連研究

本節では、三次元モデルにおける欠損領域の修復手法の従来研究を、特別な事例を用いず欠損領域の境界付近の情報のみから修復を行う手法と何らかの形状情報を事例として修復に用いる手法に大別し、本研究の位置づけを述べる。

修復処理において事例を用いず、欠損領域付近の情報のみから修復を行う手法として、微分方程式、Willmore 曲面などを用いる手法 [4, 5, 6] が提案されている。これらの手法では、欠損領域内部で滑らかな表面形状を生成し、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、事例を用いない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 [7, 8, 9, 10, 11] が提案されている。符号付距離場を用いる手法に、従来から、符号付距離場の拡散や逐次的な二次曲面の当てはめにより、欠損領域内の符号付距離場を生成する手法 [7, 8, 9] がある。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。このため近年、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、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。

上記の手法に対して、用いる情報を欠損領域付近に限らず、あらかじめモデル化された対象物体以外の物体や同一物体上の欠損領域以外の領域を事例として利用する手法 [3, 12, 13, 14, 15, 16] が提案されている。これらの手法では事例を用いることで、欠損領域内においても複雑な形状を再現することができる。Kraevoy ら [12] や Pauly ら [13] は事前に準備した対象物体に類似した物体を事例として用い、事例物体全体を対象物体の形状に合わせるように変形し、事例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。これに対して、欠損領域周辺の表面形状と類似した局所形状を同一物体上の他の領域から探索し、その局所類似形状を事例として用い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 [3, 14, 15, 16] が提案されている。手法 [14, 15, 16] では、事例となる局所類似形状を欠損領域内に逐次的にコピーすることで修復を行っている。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の性質に不連続が現れ、違和感が生じる場合がある。このため、我々は従来、欠損領域内の形状と事例の間の局所形状の類似度 SSD に基づいて定義したエネルギー関数を最小化することで欠損を修復する手法 [3] を提案し、表面形状の性質に不連続のない修復を実現した。

しかし、従来我々が提案した手法 [3] を含め、局所形状を事例として用いる手法では、類似形状の探索のための計算コストが大きいという問題が残されている。具体的には、同一モデルにおける類似局所形状の探索には法線軸周りの回転を考慮する必要があるため、これらの手法では、一定角度ずつ回転した全ての局所形状に対して類似度を算出する [14, 15, 16] か、または一定の仮定の下に回転した形状の探索を省略している [3]。また、最も類似した局所形状を探索するためには、データ領域全体に対してこのような回転を考慮した類似度の算出が行われるため、類似形状の探索コストが大きい。

本研究では、このような類似形状の探索を効率化する

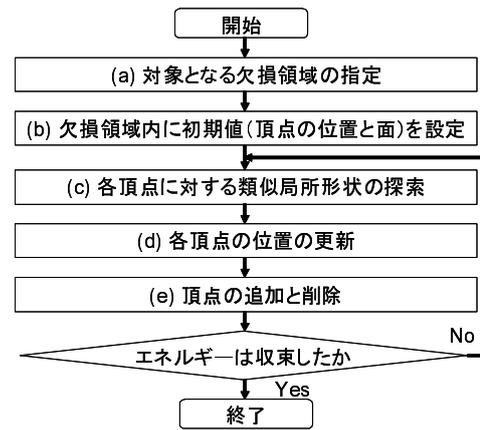


Fig. 1: Flow diagram of the proposed method.

ために、新たに局所形状の最大・最小主曲率の方向を用いることで、局所形状の回転角度を一意に決定する。また、局所形状の曲率を用いて、類似度が低いと考えられる局所形状に対する SSD の算出を省略し、効率的な探索を実現する。更に、三次元欠損修復に関する上記の従来研究では、修復結果に対する定量的評価が行われてこなかったが、本研究では、新たに欠損前のモデルと修復したモデルを比較することで定量的評価を行い、提案手法の有効性を定量的に評価する。

### 3 エネルギー最小化による欠損修復

提案手法による欠損修復の処理の流れを Fig.1 に示す。本手法では、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群とそれらを結ぶ面を与える (b)。次に、各頂点に対する類似局所形状の探索 (c)、各頂点の位置の更新 (d)、頂点群の密度を考慮した頂点の追加と統合 (e) 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。上記の処理の流れは従来研究 [3] と同様であるが、本研究では処理 (c) で新たに局所形状の主曲率を用いることで、効率的に類似形状を探索する。

以下では、まず文献 [3] で提案した局所表面形状の類似度 SSD によるエネルギー関数について述べ、今回新たに提案する類似度算出における主曲率方向を用いた局所形状の位置合わせ手法について述べる。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る。

#### 3.1 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

本節では、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る。次に局所形状の類似度の算出方法について述べ、最後に、今回提案する類似度の算出のための主曲率方向を用いた局所形状の位置合わせ方法について詳述する。

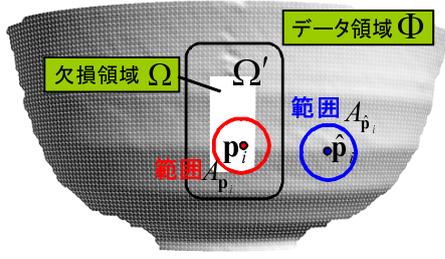


Fig. 2: Missing and data regions in a 3D model.

### 3.1.1 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, Fig.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  $\Omega$  を含む領域  $\Omega'$  と, 同一モデル内の  $\Omega'$  以外のデータ領域  $\Phi$  に分け, 領域  $\Omega'$  内の形状の尤もらしさをデータ領域  $\Phi$  内の局所表面形状を用いて定義する [3]. 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  $\Omega'$  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  $\Phi$  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.

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

ここでは, 重み  $w_{\mathbf{p}_i}$  として, 境界からの距離  $d$  に基づいた  $d$  の関数  $w_{\mathbf{p}_i} = c^{-d/l_{ave}}$  ( $l_{ave}$  はデータ領域における面の頂点間の平均長,  $c$  は定数) を用いる [3]. ただし, 領域  $\Omega$  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, 各頂点の重みが変わるため, 式 (1) では重みの総和による正規化を行っている.

### 3.1.2 局所形状の類似度 $SSD$

本研究では, 欠損領域とデータ領域の局所表面形状の類似度を表す尺度  $SSD(\mathbf{p}_i, \hat{\mathbf{p}}_i)$  を, 領域  $\Omega'$  内の頂点  $\mathbf{p}_i$  を中心とする半径が一定の大きさの球状範囲  $A_{\mathbf{p}_i}$  内の頂点群と領域  $\Phi$  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, Fig.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  $\mathbf{p}_k (\in A_{\mathbf{p}_i})$  の法線方向にある位置合わせ済みのデータ領域の面上の点を  $\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{p}}_i, \mathbf{p}_i} \mathbf{g}_i(\mathbf{p}_k)$ ,  $\mathbf{p}_i$  を中心とする一定半径の球状範囲  $A_{\mathbf{p}_i}$  の内部に存在する点の数を  $N(A_{\mathbf{p}_i})$  とする.

### 3.1.3 主曲率方向を用いた局所形状位置合わせのための変換行列

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

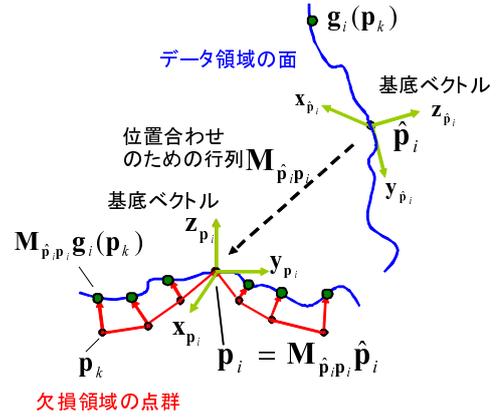


Fig. 3: Alignment of points and surface for similarity measure of local shape.

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.

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

ここで, 従来手法 [3] では, 各頂点の基底ベクトルを, 三次元モデルが平面に対して垂直に存在することを仮定して決定していたが, 本研究では,  $\mathbf{p}_i$ ,  $\hat{\mathbf{p}}_i$  を中心とする一定範囲  $B_{\mathbf{p}_i}$ ,  $B_{\hat{\mathbf{p}}_i}$  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・最小となる主曲率方向をそれぞれ基底ベクトルとして用いる. 具体的には, Fig.4 に示すように頂点  $\mathbf{p}_i$  を中心とする一定範囲  $B_{\mathbf{p}_i}$  内の頂点群の三次元座標に対し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  $\mathbf{p}_i$  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.

$$Q_{\mathbf{p}_i} = \sum_{\mathbf{p}_k \in B_{\mathbf{p}_i}} \lambda_{\mathbf{p}_k} \{z(\bar{x}_k, \bar{y}_k) - \bar{z}_k\}^2 \quad (5)$$

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  $\mathbf{p}_k$  の座標である. また,  $\lambda_{\mathbf{p}_k}$  は頂点の重みであり, 式 (1) の重み  $w_{\mathbf{p}_k}$  と同様に欠損領域の境界からの距離  $d$  を用いて  $\lambda_{\mathbf{p}_k} = s^{-d/l_{ave}}$  ( $s$  は定数) とする. これにより得られた二次曲面から, 各頂点の曲率が最大・最

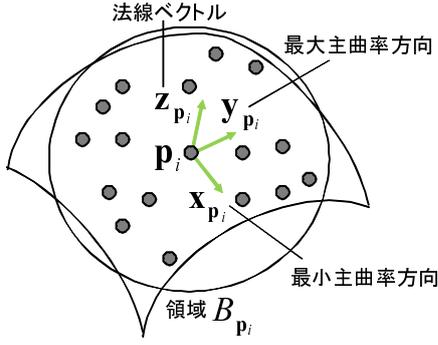


Fig. 4: Determination of basis vector using surface fitting to local points.

小となる主曲率方向および法線方向を基底ベクトル  $x_{p_i}$ ,  $y_{p_i}$ ,  $z_{p_i}$  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曲率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。

### 3.2 エネルギー最小化による頂点の更新

本研究では、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。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  $\Omega$  内の各頂点で独立に扱えることに着目し、

- (i) 各頂点  $p_i$  の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。なお、従来手法 [3] では、プロセス (i) においてデータ領域内に存在する全ての頂点を中心とする局所形状に対して、それぞれ類似度の算出を行っていたが、本研究では主曲率を用いることで効率的に類似形状を持つ頂点位置を探索する。以下、各プロセスについて詳述する。

#### 3.2.1 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更新する。従来手法 [3] は、データ領域  $\Phi$  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  $\hat{p}_i$  を決定することで最も類似した局所形状の位置を決定していた。

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

しかし、データ領域  $\Phi$  の全範囲を対象に  $SSD$  を計算する処理は計算負荷が高い。これに対して、本研究では前節で述べた曲面当てはめの際に算出される最大・最小主曲率を用いて、類似度が低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、まず頂点  $p_i$  とそれに対応する頂点  $\hat{p}_i$  の最大主曲率をそれぞ

れ  $k1_{p_i}$ ,  $k1_{\hat{p}_i}$ , 最小主曲率をそれぞれ  $k2_{p_i}$ ,  $k2_{\hat{p}_i}$  とし、式 (7) で得られるコスト  $K$  を昇順にソートする。次に、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。

$$K_{p_i, \hat{p}_i} = (k1_{p_i} - k1_{\hat{p}_i})^2 + (k2_{p_i} - k2_{\hat{p}_i})^2 \quad (7)$$

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も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  $M_{\hat{p}_i, p_i}$  の要素である基底ベクトル  $x_{p_i}$  または  $y_{p_i}$  の符号を逆にした形状についても類似度を算出する。

#### 3.2.2 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  $p_i$  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。Fig. 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。

$$E(p_i) = \sum_{p_k \in A_{p_i}} \frac{w_{p_k}}{N(A_{p_i})} \|p_i - M_{f(p_k), p_k} g_k(p_i)\|^2 \quad (8)$$

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。

$$E = \sum_{p_i \in \Omega} E(p_i) + C \quad (9)$$

$C$  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、 $p_i$  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、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  $p_i$  は以下のように求められる。

$$p_i = \frac{\sum_{p_k \in A_{p_i}} w_{p_k} M_{f(p_k), p_k} g_k(p_i)}{\sum_{p_k \in A_{p_i}} w_{p_k}} \quad (10)$$

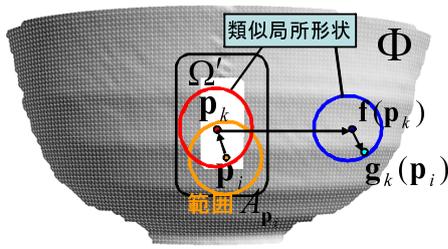


Fig. 5: Relationship between points in energy calculation.

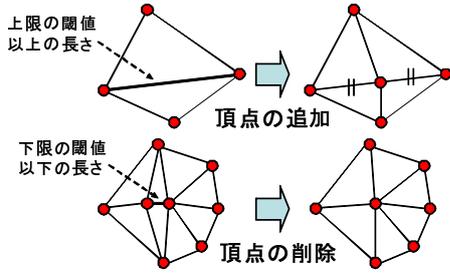


Fig. 6: Addition and integration of points.

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 (10) 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。

### 3.2.3 密度を考慮した頂点の追加と統合

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統合を行う。具体的には、Fig.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。

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。

## 4 実験

本実験では、異なる特徴を持つ 3 種類の欠損を持つ三次元モデルに対して修復実験を行い、まず主観的評価およ

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

粗密法の段階	1	2	3
重み $w$ 中の $c$	1.5		
重み $\lambda$ 内の $s$	1.2		
領域 $A$ の半径	$9l_{ave}$	$6l_{ave}$	$3l_{ave}$
領域 $B$ の半径	$24l_{ave}$ (モデル (III) のみ $6l_{ave}$ )		
探索数上位 $n\%$	10%		
上限の閾値	$4l_{ave}$	$2l_{ave}$	$1.3l_{ave}$
加減の閾値	$1.5l_{ave}$	$0.8l_{ave}$	$0.4l_{ave}$

び定量的評価により提案手法の有効性を示す。次に、主観率を用いることによる修復の効率化について検証を行う。

### 4.1 修復実験および主観的評価

本実験では、Fig.7(a), 8(a), 10(a) に示す異なる特徴を持つ 3 種類の三次元モデル (I), (II), (III) に対して修復実験を行った。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、3 段階の粗密法により修復処理を行った。修復に用いるパラメータは、経験的に Table.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、それら点群の間に面を構成したものをを用いた。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)(Fig.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。Fig.7(b) に示す初期形状では、修復領域と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 (Fig.7(c)) 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、違和感の少ないモデルが生成されている。

モデル (II)(Fig.8(a)) は、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比較的複雑なモデルである。初期形状 (Fig.8(b)) では、周辺と形状の性質が大きく異なり違和感がある。これを初期値として提案手法により生成したモデル (Fig.8(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、全体に違和感の少ないモデルが生成されている。Fig.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わかる。また、Fig.9(b)(c) 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

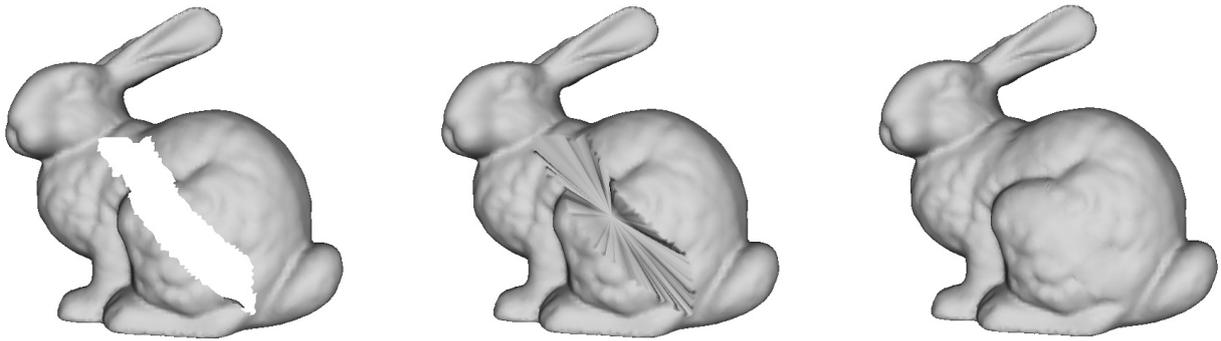


(a) 欠損領域を持つ三次元モデル

(b) 与えられた初期モデル

(c) 提案手法により修復したモデル

Fig. 7: Surface completion for Model (I) with smooth curved surfaces (4241 points in data region and 810 points in missing region after completion).

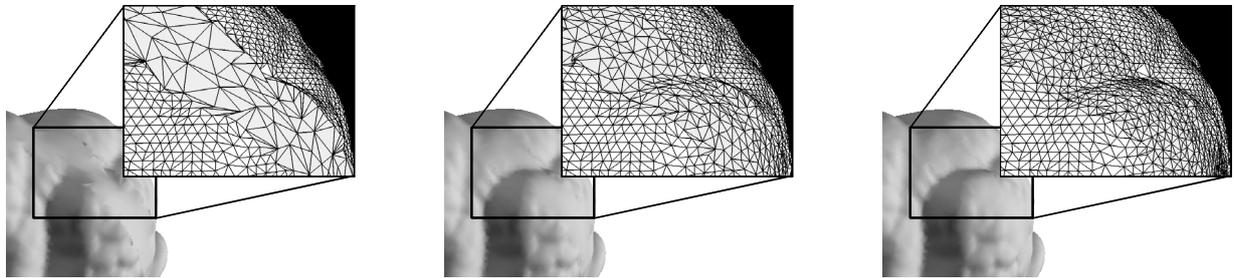


(a) 欠損領域を持つ三次元モデル

(b) 与えられた初期モデル

(c) 提案手法により修復したモデル

Fig. 8: Surface completion for Model (II) with a dent edge and rugged surfaces (17954 points in data region and 952 points in missing region after completion).

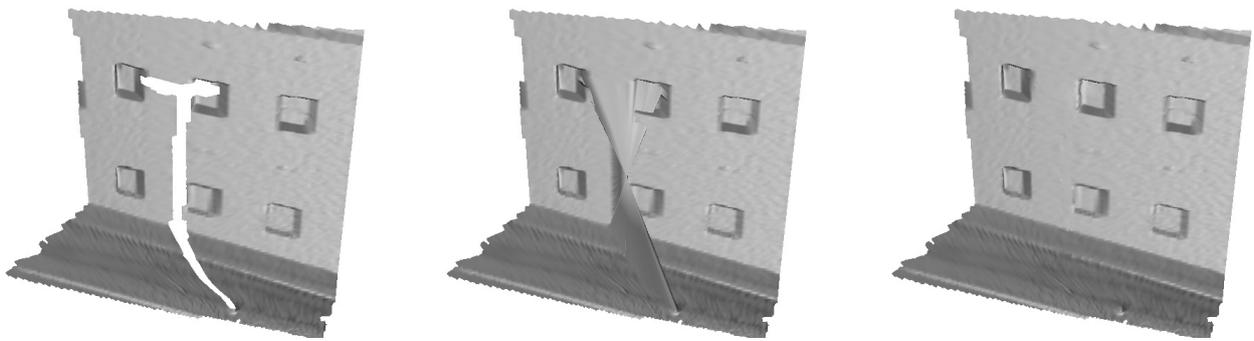


(a) 2 回の反復処理後のモデル

(b) 7 回 (2 段階目で 2 回) の反復  
処理後のモデル

(c) 12 回 (3 段階目で 2 回) の反復  
処理後のモデル

Fig. 9: Changes in shape by iterative process for model (II).



(a) 欠損領域を持つ三次元モデル

(b) 与えられた初期モデル

(c) 提案手法により修復したモデル

Fig. 10: Surface completion for Model (III) of a real outdoor environment (12734 points in data region and 500 points in missing region after completion).

には窪んだ形状が細部まで再現されていることがわかる。

モデル (III) (Fig.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。初期形状 (Fig.10(b)) では、建物と地面から面が飛び出し違和感のあるモデルが生成されている。これを初期値として提案手法により生成したモデル (Fig.10(c)) では、壁・地面・窓枠とも違和感なく修復されている。

## 4.2 定量的評価

本実験では、4.1 で用いたモデルの内、故意に欠損を与えたモデル (I), (II) を用いて、欠損前のモデルと修復されたモデルを比較することで、修復結果を定量的に評価する。ここでは、欠損前のモデルの頂点と修復されたモデルの面の距離に基づいて計算される RMSD (Root Mean Squared Distance) を用いて修復結果を評価する。RMSD は以下のように定義される。

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{\mathbf{p}_i \in \Omega} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{h}(\mathbf{p}_i)\|^2}{N_{\Omega} l_{ave}^2}} \quad (11)$$

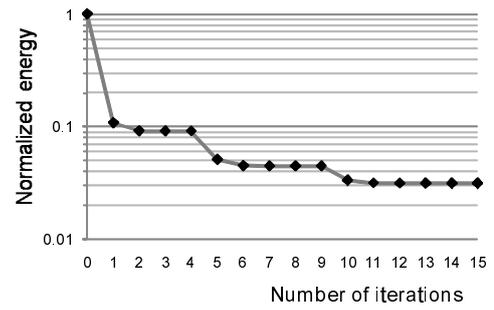
ここで、 $\mathbf{p}_i$  は欠損前のモデル上の頂点、 $\mathbf{h}(\mathbf{p}_i)$  は  $\mathbf{p}_i$  の法線方向にある修復したモデルの面上の点、 $N_{\Omega}$  は欠損前のモデルにおける欠損となる領域  $\Omega$  内の頂点数を表す。

Fig.11, 12 にモデル (I) およびモデル (II) の反復処理におけるエネルギーと RMSD 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、どちら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、エネルギーおよび RMSD が徐々に減少しており、欠損前のモデルに近い形状に修復されていることがわかる<sup>1</sup>。また、粗密法において全体の頂点の密度および類似度 SSD の算出における範囲  $A$  が変化した時点 (モデル (I) では 5 回目、10 回目、モデル (II) では、6 回目、11 回目) においてエネルギーが大きく減少していることがわかる。

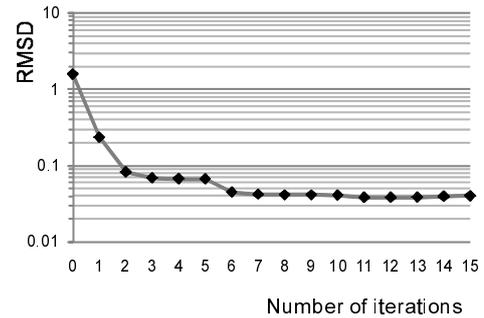
## 4.3 主曲率を用いた修復の効率化の検証

3.2.1 で述べた、処理の高速化手法の効果を確認するために、Fig.7, 8, 10 に示した  $n = 10\%$  による処理の高速化を行った場合と高速化を行わなかった場合 ( $n = 100\%$ ) の比較を行った。 $n = 100\%$  とした場合のモデル (I) ~ (III) の修復結果を Fig.13 に示す。また、欠損前の形状が既知のモデル (I), (II) に対する RMSD の値の比較および全てのモデルに対する処理時間の比較を表 2 に示す。Fig.13 より、 $n = 10\%$  の時の修復結果 (Fig.7, 8, 10(c))

<sup>1</sup>違和感のない修復を目的とする本研究においては、必ずしも RMSD による評価が人間の主観による評価に一致するとは限らないが、文献 [17] では、画像修復において、RMSE (Root Mean Squared Error) による定量的評価が人間の主観による評価とおおむね一致することが述べてられており、三次元モデル修復の品質も、同様の指標である RMSD によって評価できると考える。

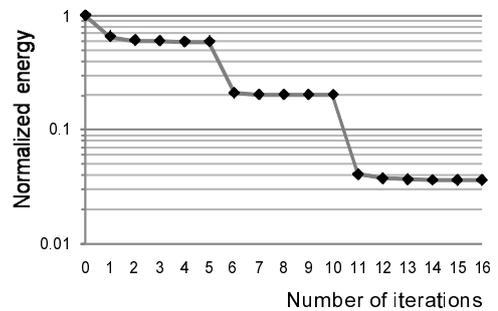


(a) エネルギーの変化

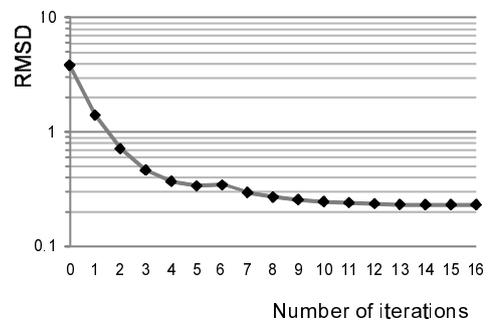


(b) RMSD の変化

Fig. 11: Changes in energy and RMSD for Model (I).



(a) エネルギーの変化



(b) RMSD の変化

Fig. 12: Changes in energy and RMSD for Model (II).

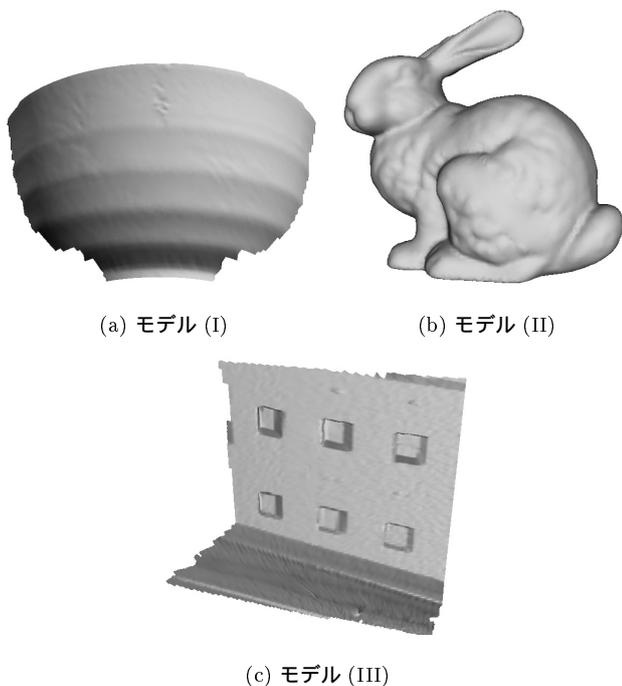


Fig. 13: Results without computational cost reduction.

Table. 2: RMSD and processing time for each model when computational cost is reduced or not.

モデル	RMSD		処理時間 (秒)	
	$n = 10$	$n = 100$	$n = 10$	$n = 100$
(I)	0.0396	0.0399	733	4072
(II)	0.2275	0.2472	3586	21733
(III)	-	-	9979	53010

は、主観的には  $n = 100\%$  の場合の修復結果と差異がなく、Table.2 より定量的にもほとんど同等の結果が得られていることがわかる。また、同表から、各モデルとも計算コストが約  $1/6$  になっており、最大・最小主曲率を考慮した高速化により効率的に修復できていることがわかる。

## 5 おわりに

本稿では、局所表面形状の類似度に基づくエネルギー最小化による三次元欠損修復手法の拡張として、局所形状の主曲率を用いて類似形状の探索を行うことで、効率的に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ない修復が実現できることを主観的評価および定量的評価により示し、また、主曲率を用いることで効率的に修復できることを示した。今後は、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。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 佐藤智和, 神原誠之, 横矢直和, 竹村治雄: “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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, no.2, pp. 275–282, 2002.
- [3] 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和: “局所形状の類似度に基づくエネルギー最小化による三次元欠損領域の修復”, 第12回パターン計測シンポジウム講演論文集, pp. 19–24, 2007.
- [4] J. Verdera, V. Caselles, M. Bertalmio and G. Sapiro: “Inpainting surface holes,” Proc. Int. Conf. on Image Processing, vol.2, pp. 903–906, 2003.
- [5] J. Wang and M.M. Oliveira: “A hole-filling strategy for reconstruction of smooth surfaces in range images,” Proc. SIBGRAPI03, pp. 11–18, 2003.
- [6] 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.
- [7] B. Curless and M. Levoy: “A volumetric method for building complex models from range images,” Proc. ACM SIGGRAPH96, pp. 303–312, 1996.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] V. Kraevoy and A. Sheffer: “Template-based mesh completion,” Proc. Eurographics Symp. on Geometry Processing, pp. 13–22, 2005.
- [13] M. Pauly: “Example-based 3D scan completion,” Proc. Eurographics Symp. on Geometry Processing, pp. 23–32, 2005.
- [14] A. Sharf, M. Alexa and D. Cohen-Or: “Context-based surface completion,” Proc. ACM SIGGRAPH2004, pp. 878–887, 2004.
- [15] T.P. Breckon and R. B. Fisher: “Non-parametric 3D Surface Completion,” Proc. Int. Conf. on 3-D Imaging and Modeling, pp. 573–580, 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.
- [17] 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和: “テクスチャの明度変化と局所性を考慮したパターン類似度を用いたエネルギー最小化による画像修復”, 信学論 (D), vol.J91-D, pp. 2293–2304, 2008.