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

Surface completion by minimizing energy based on pattern similarity of shape

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 many occlusions by other objects and the object itself. In this paper, we propose a novel method to complete the missing parts in the incomplete models. The missing parts are completed by minimizing the energy function, which is defined based on pattern similarity of shape between the missing region and the rest of the object (data region). This method can generate complex and consistent shapes in the missing region. In the experiment, the effectiveness of the proposed method is successfully demonstrated by applying the method to various objects with missing parts.

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，移動最小二乗法，Willmore 曲面を用いた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，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, 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，欠損領域の境界から符号付距離場のボリュームデータを拡散させていくことで，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 [13, 14, 15, 16, 17] 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データ領域における局所的な表面形状の類似度を算出し，類似した局所形状を欠損領域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，単純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．

本研究では，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を表す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．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させていく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 Fig.1 に示す．本研究では，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，エネルギーを最小化することで，欠損領域の形状の修復を行う (c)．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，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 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

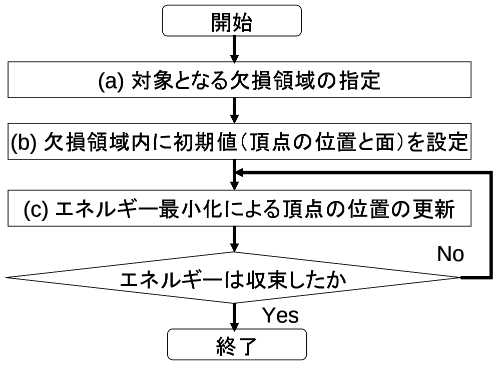


Fig. 1: Procedure of the proposed method.

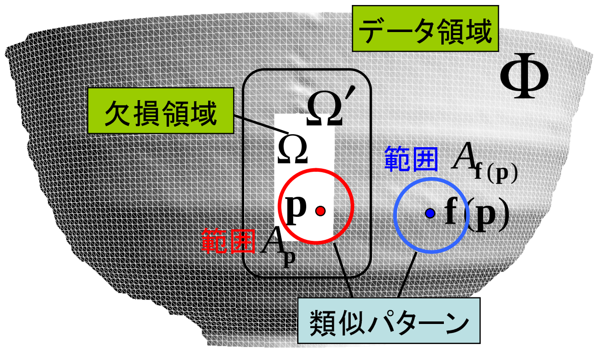


Fig. 2: Missing and data regions in a 3D model.

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を表すエネルギー E を，領域 Ω' 内の点 $\mathbf{p}$ 周辺の頂点群とデータ領域 Φ 内の点 $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ 周辺の表面形状との距離に基づくパターン類似度 SSD の重み付き総和として以下のように定義する．

$$E = \frac{\sum_{\mathbf{p}\in\Omega'} w_{\mathbf{p}} SSD(\mathbf{p}, \mathbf{f}(\mathbf{p}))}{\sum_{\mathbf{p}\in\Omega'} w_{\mathbf{p}}} \tag{1}$$

ここで，重み $w_{\mathbf{p}}$ として，領域 $\Omega'\cap\overline{\Omega}$ では各点の位置が固定であるため $w_{\mathbf{p}} = 1$ 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 $w_{\mathbf{p}} = c_1^{-c_2 d}$ (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により移動し，各頂点の重みが変化するため，式 (1) では重みの総和による正規化を行っている．また，$\mathbf{f}(\mathbf{p})$ は領域 Ω' 内の頂点 $\mathbf{p}$ 周辺の局所表面形状と最も類似した表面形状を持つデータ領域 Φ 内の頂点であり，E を最小化する $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ は次式により決定する．

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}) = \operatorname*{argmin}_{\mathbf{p}'\in\Phi}(SSD(\mathbf{p}, \mathbf{p}')) \tag{2}$$

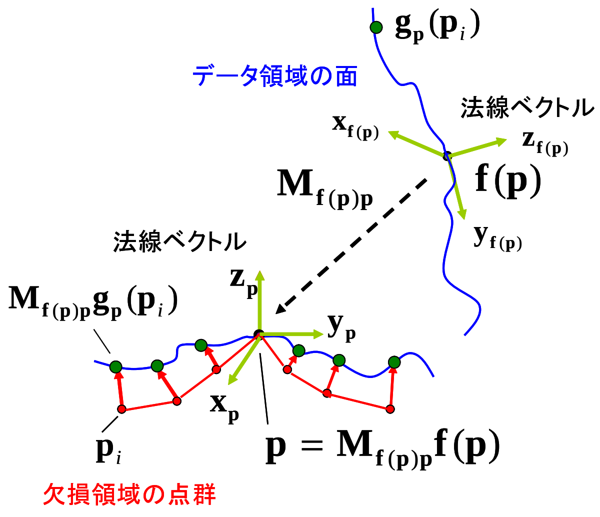


Fig. 3: Alignment of point clouds and surface when calculating shape similarity.

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 $SSD(\mathbf{p},\mathbf{f}(\mathbf{p}))$ を，領域 Ω' 内の頂点 $\mathbf{p}$ を中心とする一定範囲 $A_{\mathbf{p}}$ 内の頂点群と領域 Φ 内の頂点 $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ 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．

$$SSD(\mathbf{p},\mathbf{f}(\mathbf{p})) = \frac{1}{N(A_{\mathbf{p}})}\sum_{\mathbf{p}_i\in A_{\mathbf{p}}} \| \mathbf{p}_i - \mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p})\mathbf{p}}\mathbf{g}_{\mathbf{p}}(\mathbf{p}_i) \|^2 \quad (3)$$

ただし，$\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p})\mathbf{p}}$ 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，頂点 $\mathbf{p}_i(\in A_{\mathbf{p}})$ 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 $\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p})\mathbf{p}}\mathbf{g}_{\mathbf{p}}(\mathbf{p}_i)$，$\mathbf{p}$ を中心とする一定半径の球状範囲 $A_{\mathbf{p}}$ の内部に存在する点の数を $N(A_{\mathbf{p}})$ とする．

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

$$\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p})\mathbf{p}} = \begin{pmatrix} & \mathbf{x}_{\mathbf{p}} & & -x_{\mathbf{p}} \\ & \mathbf{y}_{\mathbf{p}} & & -y_{\mathbf{p}} \\ & \mathbf{z}_{\mathbf{p}} & & -z_{\mathbf{p}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} & \mathbf{x}_{f(\mathbf{p})} & & -x_{\mathbf{f}(\mathbf{p})} \\ & \mathbf{y}_{f(\mathbf{p})} & & -y_{\mathbf{f}(\mathbf{p})} \\ & \mathbf{z}_{f(\mathbf{p})} & & -z_{\mathbf{f}(\mathbf{p})} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Fig.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の位置合わせにおいて，鉛直上方向を基準とした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 $\mathbf{z}_{\mathbf{p}}$ とし，$\mathbf{x}_{\mathbf{p}}$，$\mathbf{y}_{\mathbf{p}}$ は以下の式により算出する．

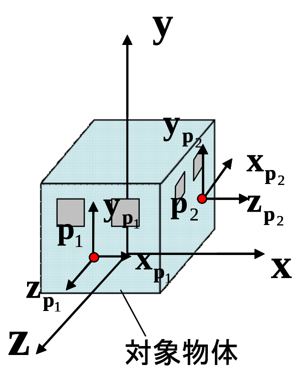


Fig. 4: Basis vectors in each point.

$$\mathbf{x}_{\mathbf{p}} = \frac{(0,1,0)^t \times \mathbf{z}_{\mathbf{p}}}{\| (0,1,0)^t \times \mathbf{z}_{\mathbf{p}} \|} \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_{\mathbf{p}} = \mathbf{z}_{\mathbf{p}} \times \mathbf{x}_{\mathbf{p}} \quad (6)$$

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) で定義したエネルギー E を最小化する．ここでは，式 (2) によって求まる類似局所形状の組 $(\mathbf{p},\mathbf{f}(\mathbf{p}))$ を固定することで，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 $\mathbf{p}$ に対する類似形状を持つ頂点 $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ の位置の更新

(ii) 欠損領域内の各頂点 $\mathbf{p}$ の位置の並列的な更新

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．

処理 (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 (3) で SSD を算出し，最小値をとる頂点を類似局所形状の位置として決定する．処理 (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 $\mathbf{p}$ 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 $\mathbf{p}$ 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 $E(\mathbf{p})$ 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 $\mathbf{p}$，$\mathbf{p}$ を中心とする一定範囲 $A_{\mathbf{p}}$ 内の任意の頂点を $\mathbf{p}_i$ とする．この時，点 $\mathbf{p}_i$ を中心とする局所形状に対して式 (2) で求まる類似局

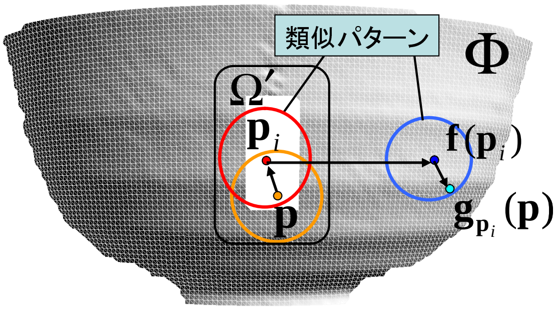


Fig. 5: Relationship between points in energy calculation.

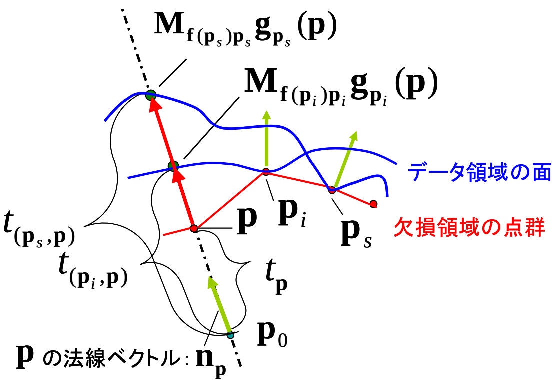


Fig. 6: Conversion of parameters.

所形状の位置は $\mathbf{f}(\mathbf{p}_i)$ であり，この類似局所形状上において $\mathbf{p}$ と対応する面上の点の位置は $\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}(\mathbf{p})$ となる．ここで，注目点 $\mathbf{p}$ に関する E の要素エネルギー $E(\mathbf{p})$ は，$\mathbf{p}$, $\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}(\mathbf{p})$，および点 $\mathbf{f}(\mathbf{p}_i)$ から点 $\mathbf{p}_i$ への位置合わせのための座標変換行列 $\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_i)\mathbf{p}_i}$ を用いて，以下のように表すことができる．

$$E(\mathbf{p}) = \sum_{\mathbf{p}_i \in A_\mathbf{p}} \frac{w_{\mathbf{p}_i}}{N(A_\mathbf{p})} \parallel \mathbf{p} - \mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_i)\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}(\mathbf{p}) \parallel^2 \qquad (7)$$

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

$$E = \sum_{\mathbf{p}_k \in \Omega'} E(\mathbf{p}_k) + C \qquad (8)$$

C は，領域 $\Omega' \cap \overline{\Omega}$ 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 $\mathbf{p}$ に対応する全ての点 $\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_i)\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}(\mathbf{p})$ $(\forall \mathbf{p}_i \in A_\mathbf{p})$ は，必ず頂点 $\mathbf{p}$ の法線上に存在することから，Fig.6 に示すように，頂点 $\mathbf{p}$ と点 $\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_i)\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}(\mathbf{p})$ は，頂点 $\mathbf{p}$ の単位法線ベクトル $\mathbf{n}_\mathbf{p}$ と，頂点 $\mathbf{p}$ 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．

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_0 + t_\mathbf{p}\mathbf{n}_\mathbf{p} \qquad (9)$$

$$\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_i)\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}(\mathbf{p}) = \mathbf{p}_0 + t_{(\mathbf{p}_i,\mathbf{p})}\mathbf{n}_\mathbf{p} \qquad (10)$$

これらを，式 (7) に代入すれば次式が得られる．

$$E(\mathbf{p}) = \sum_{\mathbf{p}_i \in A_\mathbf{p}} \frac{w_{\mathbf{p+i}}}{N(A_\mathbf{p})}(t_\mathbf{p} - t_{(\mathbf{p}_i,\mathbf{p})})^2 \qquad (11)$$

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

$$t_\mathbf{p} = \frac{\sum_{\mathbf{p}_i \in A_\mathbf{p}} \frac{w_{\mathbf{p}_i}}{N(A_\mathbf{p})} t_{(\mathbf{p}_i,\mathbf{p})}}{\sum_{\mathbf{p}_i \in A_\mathbf{p}} \frac{w_{\mathbf{p}_i}}{N(A_\mathbf{p})}} \qquad (12)$$

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

$$\mathbf{p} = \frac{\sum_{\mathbf{p}_i \in A_\mathbf{p}} \frac{w_{\mathbf{p}_i}}{N(A_\mathbf{p})} \mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_i)\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}(\mathbf{p})}{\sum_{\mathbf{p}_i \in A_\mathbf{p}} \frac{w_{\mathbf{p}_i}}{N(A_\mathbf{p})}} \qquad (13)$$

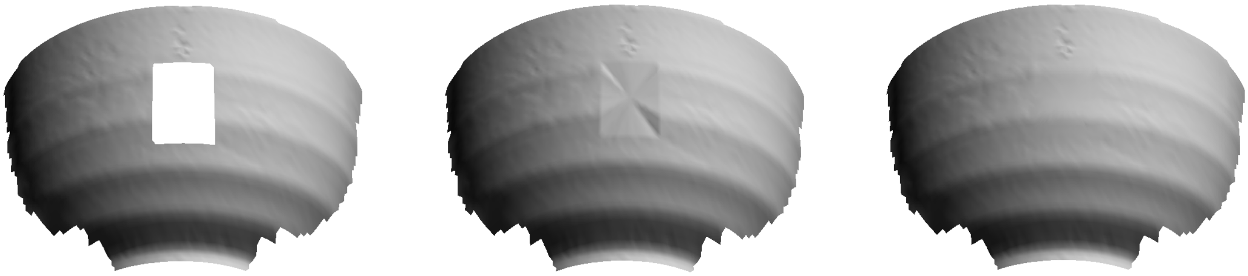
ただし，実際には頂点の位置の更新によって補間される形状も更新され，法線ベクトル $\mathbf{n}_\mathbf{p}$ および，$\mathbf{M}_{\mathbf{f}(\mathbf{p}_i)\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}(\mathbf{p})$ の位置が変化するため，式 (13) で得られる値は近似解となる．しかし，エネルギーが収束するに従って，法線ベクトルの変化が小さくなるため，エネルギーが収束するにつれて良い近似解となる．

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，Fig.7(a) に示す異なる特徴を持つ 2 種類の三次元モデル A，B 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，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に，頂点の密度がおおよそ欠損領域の周辺領域と一致するように頂点群を配置した．以下，三次元モデル A，B に関して考察する．

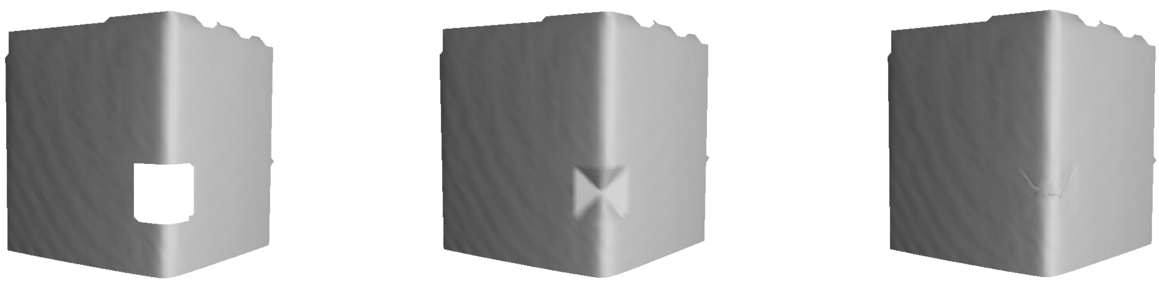
モデル A は，欠損領域の周辺で滑らかな曲面形状が存在するモデルである．Fig.7(b) に示す境界点群とそれらの重心位置とを結んでできた初期形状では，周辺との形状が大きく異なり違和感が生じている．これを初期値として，Fig.7(c) に示す提案手法による最適化を行ったモデルでは，欠損領域では滑らかな曲面形状が生成されており，また，境界部分の隆起している箇所では，欠損領域内へも滑らかな隆起が続いているため，違和感の少ないモデルが生成されている．

モデル B は，欠損領域の周辺で鋭いエッジが存在するモデルである．Fig.7(c) に示す提案手法をにより生成され



(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

モデル A：滑らかな曲面形状を持つモデル



(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

モデル B：鋭いエッジのある表面形状を持つモデル

Fig. 7: Surface completion for various models.

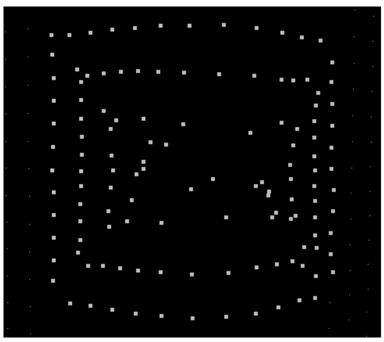


Fig. 8: Points in the missing region of Model B.

たモデルでは，欠損領域境界部分のエッジがうまくつながり，比較的違和感のないモデルが生成されている．しかし，Fig.8 に示すように，エネルギー収束後の点群の位置がかなり偏っている．これは，エネルギーの変化に伴う点群の移動による．表面形状が複雑な場合には，点群の偏りによって良好なモデルが生成できない可能性があることから，今後は点群の密度が一定になるよう，頂点の削除や追加が必要になると考えられる．

Fig.9 に欠損領域修復時のエネルギー E の変化と反復回数の関係を示す．図から近似解を用いた場合でも，エネルギーは単調に減少していることが確認できる．また，Fig.10，11 に反復回数とモデルの変化を示す．図からエネルギーが下がるに従って欠損領域における形状の違和感が少なくなっていることがわかる．

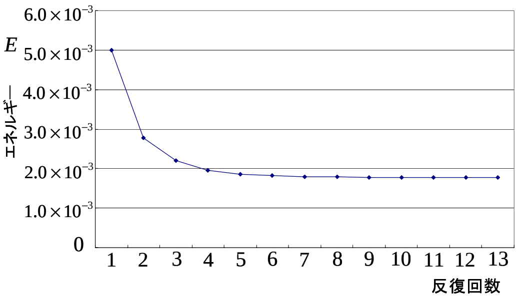
4　まとめ

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を表すエネルギー関数を，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，鋭いエッジのある形状や滑らかな曲面形状を持つ三次元モデルに対して違和感なく修復できることを示した．今後は，エネルギーの変化により点群の移動を考慮し，点の追加や削除を行う必要がある．また，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，三次元モデルの形状だけでなく，テクスチャを持つモデルの形状とテクスチャの同時修復手法を開発する．

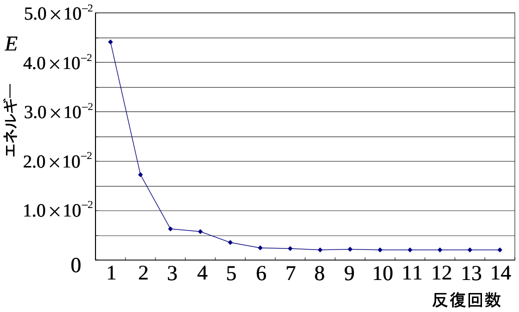
参考文献

[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.



(a) モデル A



(b) モデル B

Fig. 9: Relationship between energy and number of iteration.

[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像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: “Inpainting Surface Holes,” Proc. Int, Conf. on Image Processing, vol. 2, pp. 903–906, 2003.

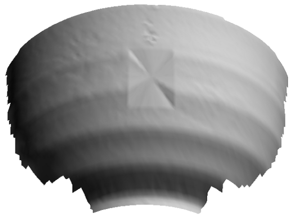
[6] J. Wang and M.M. Oliveira: “A Hole-Filling Strategy for Reconstruction of Smooth Surfaces in Range Images,” IProc. SIBGRAPI03, pp. 11–18, 2003.

[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, Issue 5, pp. 427–445, 2004.

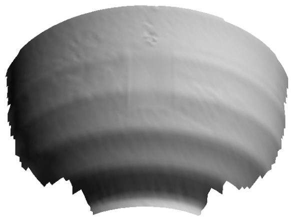
[8] B. Curless and M. Levoy: “A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images,” Proc. ACM SIGGRAPH96, pp. 303–312, 1996.

[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 (MIRU2007) 講演論文集, pp. 365–371, 2007.

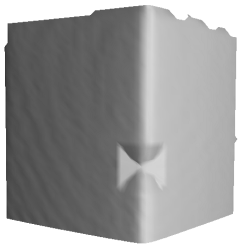


(a) 2 回の反復後のモデル

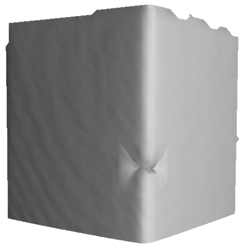


(b) 4 回の反復後のモデル

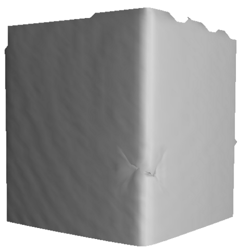
Fig. 10: Completion process of model A.



(a) 2 回の反復後のモデル



(b) 4 回の反復後のモデル



(b) 6 回の反復後のモデル

Fig. 11: Completion process of model B.

[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] T. Masuda: “Filling the Signed Distance Field by Fitting Local Quadrics,” Proc. Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, pp. 103–1010, 2004.

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

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

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

[16] T.P Breckon and R. B. Fisher: “Plausible 3D Colour Surface Completion Using Non-parametric Techniques,” LNCS, vol. 3604, pp. 102 – 120, 2005.

[17] 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.