

符号付距離場の整合化による形状モデル補間手法

佐川 立昌[†] 池内 克史^{††}

Taking Consensus of Signed Distance Field for Hole Filling

Ryusuke SAGAWA[†] and Katsushi IKEUCHI^{††}

あらまし レーザレンジファインダなどを用いて現実の物体の形状を計測する際、観測対象の全ての表面形状が観測できず、しばしば隠蔽された部分が残る。このような部分は形状モデルの欠落部分となり、ソリッドモデルの生成やモデルの可視化などの応用にとって望ましくない。本論文ではこのような不完全な形状モデルの欠落部分を埋め、モデルを補間する手法を提案する。本手法では物体表面までの符号付距離を保持したボクセルから構成される符号付距離場を中間表現として用い、その整合性を評価する。不完全な形状モデルから得られた符号付距離場は、法線ベクトルという局所的な情報から符号が計算されているため、整合性がとられていない。そこで反復計算によって大域的に符号を決定し、整合性を向上させる手法を開発した。整合化した符号付距離場を用いて形状メッシュモデルを生成することにより、従来困難であった複雑な形状部分の補間が可能となった。

キーワード 3次元モデリング, 形状モデルの補間, 符号付距離場

1. はじめに

近年、レーザレンジファインダ [6], [13] や光投影型距離センサ [16] を用いて実世界の物体を計測し、その形状をモデリングする手法の研究が盛んになっている。これらのセンサは観測位置から見える部分の表面形状を観測するため、観測対象全体の形状の取得には、複数の視点からの計測が必要である。また観測対象が複雑な形状を持つ場合には、可能な限りの視点位置から計測を行っても、観測できない部分が数多く発生する場合がある。そのため、ソリッドモデルを生成する場合やモデルの可視化を行う場合などの応用において、それらの欠落部分の補間が必要となる。そこで本論文では、欠落部分の周辺の整合性を評価し、それらを補間する手法を提案する。

形状モデルの欠落部分を補間する手法はこれまでいくつかの手法が提案されている。最も簡単な方法は、欠落部分の端に位置するメッシュモデルの頂点をつなぎ、三角形パッチを生成する手法である。欠落部分が小さく、そのトポロジが単純な場合であればこの手法

で十分である。しかし表面形状が複雑で、欠落部分が大きい場合には、補間することが難しい。第2の手法として、欠落部分の周辺にメッシュモデルをフィッティングする方法 [3], [8] が挙げられる。すなわち3次元における snakes [11] といえる手法である。これらの手法は滑らか拘束を満たすように反復計算によってメッシュモデルを変形させるものであるが、あらかじめトポロジが決定されるため、複雑な形状の補間には向いていない。第3の方法には、“space carving” と呼ばれる方法が挙げられる。Curless と Levoy [5] は距離画像を統合する際に、各ボクセルを隠蔽状態、空状態、表面近傍状態に場合分けする。そして隠蔽状態と空状態との間にメッシュを生成することにより、欠落部分の穴埋めを行う。この方法は観測視点位置からの見えのみを考慮するため、他の視点からレンダリングを行った場合、実際の物体と大きく異なり妥当な結果を得られないことがある。第4の方法はボリューム表現を用いた方法である。例えばレベルセット法 [19], [20] や陰関数表面を再計算する方法 [2], [7] が挙げられる。Davis ら [7] は観測された表面の近傍から、空間全体にわたって符号付距離を拡散することによって符号付距離場を再計算する。しかしこの方法では生成された陰関数表面の整合性を考慮していないため、曲率が高い部分では妥当な表面を生成できないことがある。

[†] 大阪大学産業科学研究所
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

^{††} 東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

提案する手法は第3, 第4の方法に類似しており, 複数の距離画像から符号付距離場 (signed distance field, SDF) を計算する手法である. 本手法では, SDF の計算によって空間全体を2つの部分 (物体の内側と外側) に分け, SDF からメッシュモデルに変換することによって閉曲面を生成する. この特徴を利用し, 欠落部分を補間することが可能であるが, SDF の計算はその周辺で不安定になるため, そのままでは妥当な表面形状によって補間することができない. そこで, 本論文では近傍のボクセルの符号付距離の整合性をとることにより, 欠落部分の補間を可能にする手法を提案する.

2. 距離画像から SDF への変換

複数の距離画像を統合する手法 [5], [10], [18], [19], [21] には, 形状を表す中間的な表現として SDF を用いた方法がいくつか提案されている. 符号付距離の計算方法はそれぞれ異なるが, 例えば, Curless と Levoy [5] は各ボクセルから視線方向に沿った距離画像までの距離を用い, Wheeler ら [18] は, ボクセルから最も近い距離画像点までの距離を符号付距離の絶対値として用いている.

本論文で提案する符号付距離の整合性を判定するため, 以下では符号付距離の絶対値として, ボクセルの中心から距離画像の最近傍点までのユークリッド距離を用いていると仮定する. 本論文で用いている距離画像の統合手法 [14], [22], [23] は Wheeler らの合致表面法 [18] に基づいており, 距離画像に含まれる外れ値を除外しつつ距離画像の最近傍点までの距離を, 符号付距離の絶対値として計算する. この手法によって得られた符号付距離は, 上記の仮定を満たしているため, 本論文で提案する手法の入力として利用することができる. また, 他の方法によって計算された符号付距離であっても, 上記仮定を満たしているならば本手法を適用できる.

本手法の距離画像統合法では符号付距離の符号は最近傍点における法線ベクトル n とボクセルから最近傍点までのベクトル v から決定される (法線ベクトルは物体の外側を向いており, 距離画像の各点が属する面の法線ベクトルを平均することで計算される.) すなわち符号付距離 d は以下のように計算される.

$$d = \text{sgn}(-n \cdot v)|v| \quad (1)$$

ここで $\text{sgn}(x)$ は x が正のとき 1, 負のとき -1 である. さらに我々は [22] において, オクトツリーを用いて

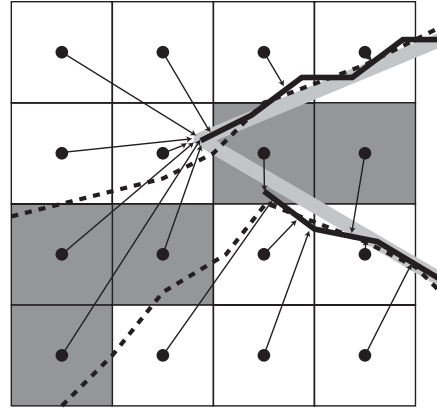


図1 SDF の符号が誤りによる表面形状の誤判定
Fig. 1 Corruption of the surface caused by wrong sign of SDF

適応的な解像度のボクセルで統合する手法を提案した. この方法では, 距離画像まで遠い場合には大きなボクセルを用いて粗く, 近い場合には細かくサンプリングする. この方法におけるボクセルの幅 W は符号付距離の絶対値から次のように決定される.

$$W < \frac{2}{3\sqrt{3}}|d| \quad (2)$$

図 2(d) は適応的な解像度による SDF の例である. 距離画像から遠くなるにしたがって解像度が粗くなっていることがわかる.

3. SDF 符号推定の不安定性

距離画像の統合における符号付距離計算では, 本章で挙げる問題点から誤りが生じることがある. そこで本章では符号付距離計算における問題点を述べたい.

SDF への変換において, 距離画像の法線ベクトルという局所的な情報を用いて符号を決定しているため, その計算に誤りが生じやすい. 特にそれは物体の表面形状が鋭く曲がっている部分で生じやすい. 図 1 は鋭い角を含む物体の符号付距離の計算例である. 灰色の線は実際の表面形状を表し, 黒線は距離画像を示している (この図において, 距離画像の全ての点は整合性を持っているとみなす.) さらに, ボクセル中心からの矢印はその最近傍点へのベクトルを表している. 法線方向からボクセルが物体の内側にあると判断された場合, 符号付距離の符号は負となり, 図 1 では灰色で表されている.

また曲率の高い部分では, 角部分の両側を単一の距離画像によって同時に観測することは難しい. 全体の

形状を得るために複数回の観測を行い、それらの距離画像の位置合わせを行う。図 1 左下の部分は明らかに物体の外側であるが、符号付距離は法線ベクトルから決定されるため、その符号は負となっている。マーチングキューブ法 (marching cubes algorithm) [12] を用いて SDF をメッシュモデルに変換した場合、距離画像の欠落部分や境界部分で符号計算が不安定になるため、点線で表されたように実際の表面形状と非常に異なる結果になる。その原因として、下記の 2 つの理由が考えられる。

(1) 距離画像の位置合わせ時に生じる誤差

距離画像の位置合わせの際に生じる小さな誤差により、SDF の符号が不安定に変化する。このため、生成されたメッシュモデルの形状が SDF の変化に大きく影響を受ける。特に、物体形状の鋭角的な部分において、単一の距離画像でその両側を計測することや、距離画像が重なり合うように計測することが困難である。そのため、わずかな位置合わせ誤差でも、最近傍の距離画像に応じて符号が変わり、符号付距離が急激に変化する。したがって、各ボクセルが物体の外側か内側かを決定することが難しい。

(2) 観測の不足

観測対象によっては全体形状を計測することが困難であり、欠落部分が生じる。欠落部分の SDF は、距離画像の端部分を外挿したものとなるため、わずかな計測誤差によって大きく変化する。その結果、SDF を用いて生成されたメッシュモデルの形状が不安定になる。

図 2(a) は鋭角部分を含む物体の距離画像であり、拡大したものが図 2(e) である。上記のような理由により、鋭角部分ではボクセルが外側にあるか内側にあるか決定することが難しいため、SDF をマーチングキューブ法によってメッシュモデルに変換した結果は図 2(b),(f) のようになる。すなわち、符号の間違ったボクセルが含まれているため、物体の外側にあたる部分でメッシュモデルが生成されてしまっている。

次に絶対値がその幅よりも小さい符号付距離を持つボクセルのみを用いてメッシュモデルを生成した場合、統合結果は図 2(c),(g) のようになる。利用する符号付距離の大きさを制限すると、元々の距離画像の近傍のみが生成されるため、図 2(b),(f) のような誤りとなるパッチが生成されない。しかし、この場合誤差を含む部分は除去できるが、符号付距離がボクセル幅よりも大きな部分で欠落が生じてしまう。

図 2(d),(h) は SDF の 2 次元断面である。黄色と赤の

ボクセルは正の符号付距離を表し、青のボクセルは負の符号付距離を示している (赤、青の符号付距離の絶対値は黄、水色のものよりも大きい。) 緑色は距離画像付近のボクセルである。全てのボクセルを用いてメッシュモデルを生成すると、赤と青のボクセルの間に誤りを含んだモデルが生成される。それに対して、緑のボクセル付近のみを用いてメッシュモデルを生成すると欠落部分が発生する。誤り部分を除去しつつ欠落部分を埋めるためには、符号の計算をロバストに行う手法が必要である。

4. 平均曲率一定の曲面による補間

欠落部分をどのような曲面で補間するかについての基準は場合によって異なる。ここで本論文では欠落部分を補間する形状として、距離画像と滑らかさを保ちつつ曲率が一定となるような曲面を用いることにする。

本章ではレベルセット法 [17] に基づき、0 等値面を変形し欠落を補間する問題を考える。レベルセット法における 0 等値面 $f(x) = 0$ は、以下のような偏微分方程式に従って変化する。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + F|\nabla f| = 0 \quad (3)$$

ここで F は等値面の移動速度をあらわす関数である。時間ステップ n において、 (i, j, k) でインデックス付けされたボクセルを用いた離散近似は以下のようになる。

$$\frac{f_{ijk}^{n+1} - f_{ijk}^n}{\Delta t} + F|\nabla_{ijk} f_{ijk}^n| = 0 \quad (4)$$

Δt は時間ステップの大きさである。

ここで $\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla f}{|\nabla f|}$ によって計算される等値面の平均曲率 κ を考慮すると、速度関数が $F = -\kappa$ で表されるものに熱伝導方程式などが挙げられる。その等値面は伝播するとともに曲率が平滑化され、極小曲面 (minimul surface) に近づくことが知られている [4]。極小曲面とは境界条件を満たしつつ、平均曲率が任意の位置において 0 となり面積が最小となる曲面である。

本論文で補間する曲面の特性は極小曲面に類似しているといえるが、距離画像との整合性を持つために、境界部分の位置だけでなく境界部分の滑らかさについて考慮しなければならない。すなわち、境界部分の位置を境界条件として持つ平均曲率 0 の極小曲面ではなく、法線方向も考慮された平均曲率一定の曲面を求める必要がある。

したがって曲面の変化が、距離画像との整合性を満

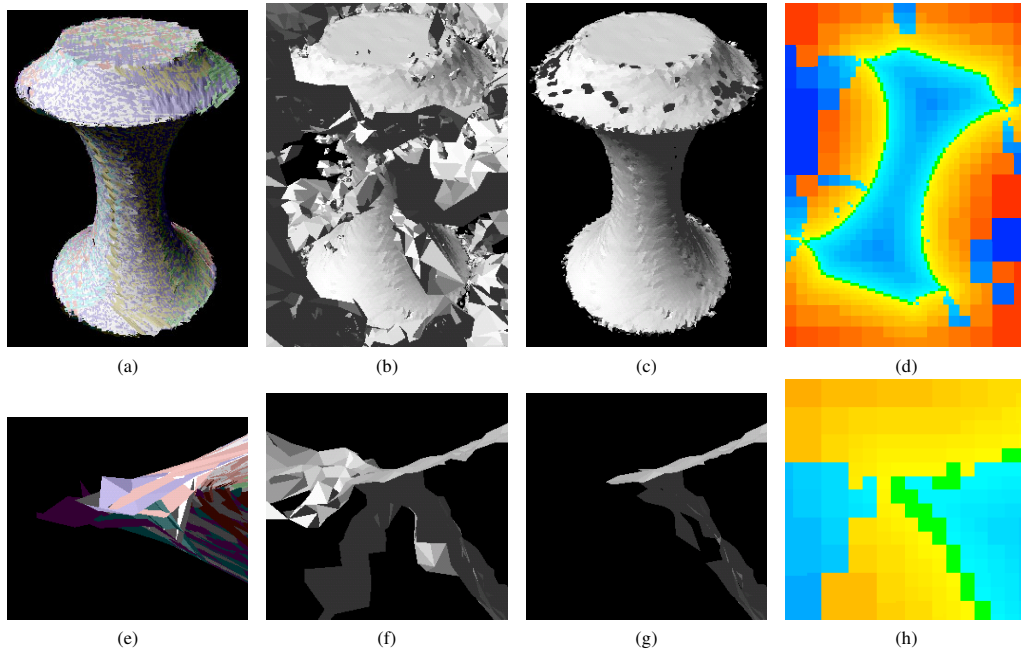


図2 鋭角部分を含む物体の統合結果
Fig. 2 Merging results of an object with sharp corners

たしつつ、曲率を平滑化する速度関数で表すことができたときに、求めるべき曲面が得られるのである。

5. SDF の整合化による補間

レベルセット法などの偏微分方程式に基づく手法 [7], [19], [20] では繰り返し計算の中で SDF を計算するが、本手法では既に距離画像統合の段階で SDF 計算を終えている。そこで本章では、その情報を利用して距離画像との整合性を満たしつつ、平均曲率を一定に近づける手法を提案する [15]。本章の最後に、提案手法が 4. で述べた速度関数の条件を満たし、平均曲率一定の曲面で補間できることを示す。

5.1 隣接ボクセルの符号付距離の整合性

従来提案してきた距離画像統合手法 [23] では、距離画像点の外れ値を取り除くために、距離画像同士の整合性を考慮している。しかし、距離画像の法線ベクトルという局所的な情報を用いて符号を決定しているため、計算が不安定になることを 3. で説明した。そのため、ある点が物体の内側か外側かをロバストに決定するためには、大局的な整合性を計算する必要がある。そこでまず、隣接するボクセルの符号付距離同士の整合性に関する新しい判断基準を提案する。

隣接するボクセルの符号付距離の 3 つの場合を図 3

に示す (ボクセル幅は 1.0 とする。) 図 3(a) では各ボクセルの中心は物体の外側にあり、その符号付距離は 1.0 と 0.8 である。隣接するボクセルの符号が等しい場合、それらには 0 等値面は存在しない。すなわち、ボクセル中心から伸びている矢印は最近傍点までのベクトルを表しており、法線ベクトルは物体の外側を向いている。このような隣接するボクセルの符号が等しい状態は、その間に 0 等値面が存在しない状態であり、整合性を持つといえる。

図 3(b) では隣接するボクセルの符号は異なっており、それらは -0.3 と 0.6 である。灰色のボクセルは負の符号を持ち、2 つのボクセルの間に 0 等値面が存在する。図 3(b) に示す表面形状から計算可能な符号の状態であるため、これらのボクセルは整合性をもつとみなす。

図 3(c) は図 3(b) と同様に隣接するボクセルの符号が異なっており、符号付距離は -1.0 と 0.8 となっている。2 つのボクセル間に表面は存在しないが、SDF には 0 等値面が 2 つのボクセル間に存在するため、表面形状と SDF が整合性を持たない状態である。それらの間に表面が存在した場合、2 つの符号付距離の和はボクセル幅以下となるが、(c) では和が 1 より大き

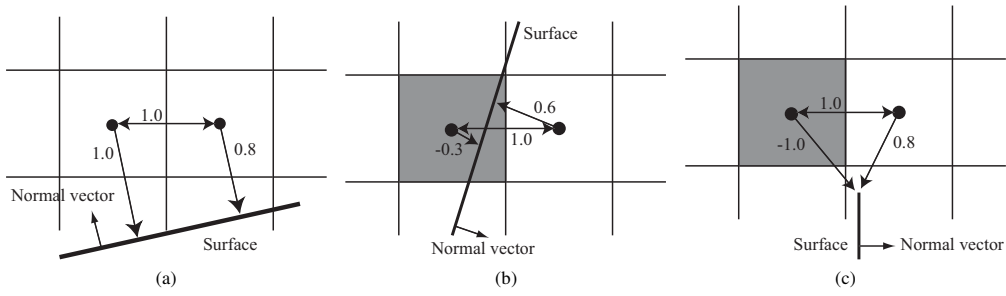


図3 隣接するボクセルの符号付距離

Fig. 3 Three examples of signed distances of adjacent voxels

くボクセル幅より大きい．そこで次式を満たす場合，隣接する2つのボクセルの符号付距離が整合性をもたない状態であると定義する．

$$|d - d'| > W \quad (5)$$

ここで d と d' はそれぞれのボクセルの符号付距離である．本手法では適応的な解像度で統合処理を行うため，隣接するボクセルの大きさが異なる場合がある．そこで (5) を以下のように変更する．

$$|d - d'| > \alpha D \quad (6)$$

ここで D は隣接するボクセル中心間の距離である．また α はユーザが決定するパラメータであり，本論文では $\alpha = 1.0$ を用いている．

5.2 周囲のボクセルとの整合性

次に，あるボクセルが整合性を持つかどうかを判定するために，そのボクセルの周囲全部と比較する（解像度が等しい場合には隣接するボクセルの数は26個である．）ボクセルが整合性を持つかどうかを決定する方法として，以下のような条件を満たす隣接ボクセルの数 N_1, N_2, N_3, N_4 を計算する．

$$\left. \begin{array}{l} N_1 : |d - d'| \leq \alpha D \\ N_2 : |d - d'| > \alpha D \end{array} \right\} \text{sgn}(d) \neq \text{sgn}(d') \text{ の場合} \quad (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} N_3 : |d - d'| \leq \alpha D \\ N_4 : |d - d'| > \alpha D \end{array} \right\} \text{sgn}(d) = \text{sgn}(d') \text{ の場合}$$

ここでボクセル間距離 D は隣接するボクセルによって異なる． d, d' の符号が異なる場合に， N_1, N_2 は現在の状態において整合性の有無によって数えられたボクセル数である．それに対して d, d' の符号が等しい場合に， N_3, N_4 は注目しているボクセルの符号を反転した後に整合性の有無によって数えられたボクセル数で

ある．これらを用いて，

$$N_2 + N_3 > \beta(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \quad (8)$$

となる場合，そのボクセルの符号付距離は周囲のボクセルに対し，整合性を持たないと判断する．すなわち，符号を反転した場合に周囲のボクセルとの整合性が高い場合，そのボクセルの符号付距離は整合性を持たないと判断することができる．ここで β はユーザが決定するパラメータであり，本論文では通常 $\beta = 0.5$ を用いている．

5.3 符号の反転による整合化

(8) から整合性を持たないと判断された符号を反転すると，周囲のボクセルと整合化され，等値面が変形，伝播する．符号が反転した後も同様に (8) を用いて整合性の判定が可能であるため，等値面を伝播させながら整合性の計算を行うことができる．この判定を全てのボクセルについて行い，それらが整合性を持つまで処理を繰り返す．

特定の状況では $|d - d'| > \alpha D$ を満たす場合に，必ずしも $|d - d'| \leq \alpha D$ でないとは限らないので，反転により符号付距離が振動し続ける場合がある．このような場合，反転するボクセル数が0に収束しない．このため，収束が遅くなった場合には α あるいは β を大きくすることにより，反転の条件を緩和し，反転するボクセル数を収束させる．

また，計算量を低減するために，2回目からの反復では整合性を調べるボクセルを限定することが可能である．前回の反復において，あるボクセルとその周囲の隣接ボクセルの符号が反転していない場合，(8) の結果が前回から変化しないため，そのボクセルの整合性を調べる必要がない．そのため前回の反復において反転したボクセルを記憶しておき，次の反復では，それらのボクセルとその周囲についてのみ整合性を調べ

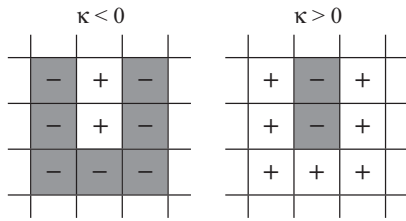


図4 曲率 κ と符号付距離の符号の関係
Fig. 4 The sign of the signed distance is same with the curvature κ .

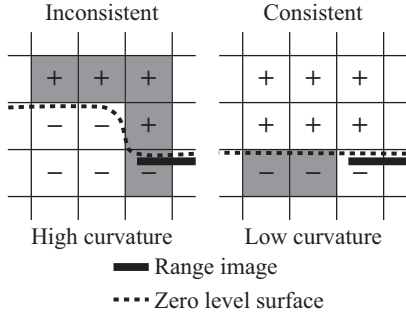


図5 距離画像の境界部分における曲率と整合性の関係
Fig. 5 The relationship of the curvature and consistency on the boundary of range images

ることで十分といえる。

5.4 補間された曲面の分析

ここで、符号の反転によって得られた新しい SDF を用いて 0 等値面を生成すると、どのような曲面が得られるのか分析する。

図4において + と - は SDF の符号を表しており、符号が異なる隣接ボクセルは整合性がないとした場合、図4のどちらの場合も (8) を満たしている。そのとき等値面の曲率 κ の絶対値は大きくなっており、その符号は中央のボクセルの符号の逆である。したがって、整合性を持たないボクセルの数を数えることは、曲率 κ を近似的に計算していることに等しい。また、図5は距離画像の境界部分近傍を示しており、灰色のボクセルは中央のボクセルに対して整合性を計算した場合に、 N_2 あるいは N_3 に分類される。等値面が滑らかな場合は (8) を満たさず整合性を持つ状態になる。そのため、SDF 全体を整合化することにより、元の距離画像との滑らかさの維持という境界条件を満たしつつ、曲率が平滑化された曲面で欠落部分を補間することが可能になる。

符号の反転によって 0 等値面を伝播させる本手法は厳密にはレベルセット法ではないが、本手法をレベル

セット法に基づいて定式化すると、速度関数 F は以下のように表される。

$$F = \begin{cases} \frac{2f_{ijk}^n}{|\nabla_{ijk} f_{ijk}^n| \Delta t} & (8) \text{ を満たしている場合} \\ 0 & \text{上記以外の場合} \end{cases} \quad (9)$$

整合性を持たない表面部分のみ伝播させるため、提案手法では (8) を満たしている部分について f_{ijk} の導関数を考えることになる。等値面の曲率 κ を用いて表記すると、適当なパラメータ ϵ を用いて上記の F は以下のように書き換えられる。

$$F = \begin{cases} -\text{sgn}(\kappa) \frac{2|f_{ijk}^n|}{|\nabla_{ijk} f_{ijk}^n| \Delta t} & \text{整合性がなく、} \\ & \text{かつ } |\kappa| > \epsilon \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (10)$$

この速度関数は $F = -\kappa$ の場合と符号が一致するため、曲率を平滑化する方向に等値面を伝播させることがわかる。したがって、本手法によって得られる曲面は、距離画像と整合性を持ち、かつ、その曲率は一定に近づくといえる。

曲率が 0 に近い場合、整合性の計算による近似的な曲率の計算であるため、完全に曲率が平滑化されていない場合でも整合性を持つ状態となり、等値面の伝播が停止してしまう。特に欠落部分が大きな場合、補間した部分が緩やかな曲面となるため等値面の伝播が不十分となりやすい。このような場合、十分大きなボクセルを用いて大局的に整合性を調べれば、曲率が 0 に近い場合でも整合性を持たない状態と判断されるため、等値面を伝播させることが可能となる。また曲率が緩やかになる大きな欠落部分の場合では、大きなボクセルを用いてサンプリング間隔を大きくしたほうが効率的である。この問題に対し提案手法では、2. で述べたように、距離画像の統合手法の段階でオクトツリーを用い、適応的な解像度のボクセルを生成している。つまり、距離画像から遠い部分では大きなボクセルが生成されている。よって欠落部分が大きな場合でも、曲率を適切に計算することが可能となり、大局的に整合性を持つモデルが生成できる。整合性の計算にあたり、各位置で最も細かい解像度のボクセルを隣接ボクセルとして用いている。

6. 実 験

本論文では Intel Xeon 2.4GHz プロセッサ、1GB メモリを持つ PC を用いて実験を行った。まず図2に示す物体を用いて、隣接するボクセルと符号付距離を

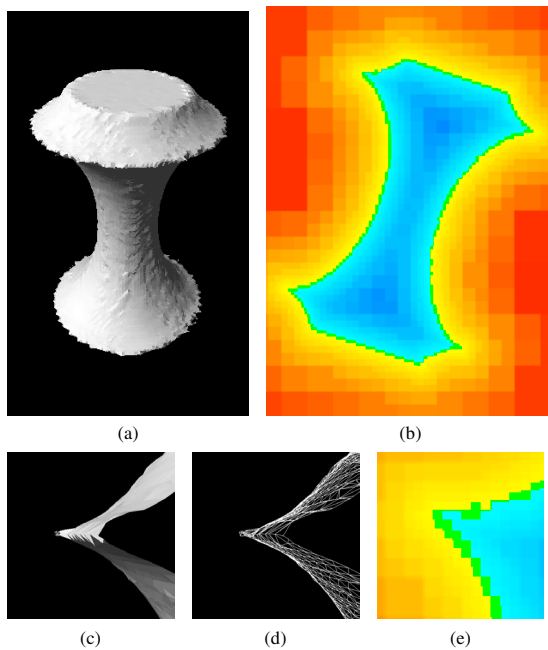


図 6 SDF の整合化の結果
Fig. 6 Result of taking consistency of the SDF

整合化する手法を実験した．図 2 では鋭角な部分で符号付距離が不安定になっているが，提案手法をこの SDF に対して適用し，図 6 に示すモデルを得た．その結果，符号付距離の整合化によって統合処理したメッシュモデルから，誤りであるパッチを取り除くと同時に，統合結果に欠落をなくすることが可能となった(図 6(a),(c),(d))．図 6(b),(e) は整合化後の SDF の 2 次元断面であるが，符号の誤りが修正されていることがわかる．

ここで Davis らの手法 [7] と提案手法を比較する．まず，欠落部分を含む統合結果のメッシュモデル(図 2(c)) を，Allen によって提供されたツール [1] によって，Davis らの手法が用いるボリューム表現に変換する．また，ボクセルのサイズが変換の前後で等しくなるように変換時のパラメータを調節した．図 7 は Davis らの手法による欠落補間の結果である．図 7(a),(b) はそれぞれ，100 回と 300 回反復した時点でメッシュモデルに変換した結果である．300 回反復した後のメッシュモデルにおいても，鋭角部分の周辺で誤りとなるパッチが存在していることがわかる．図 7(d) は (b) に対するボリューム表現の断面図である．左上部分において等値面に誤りがあるため，正しいメッシュモデル

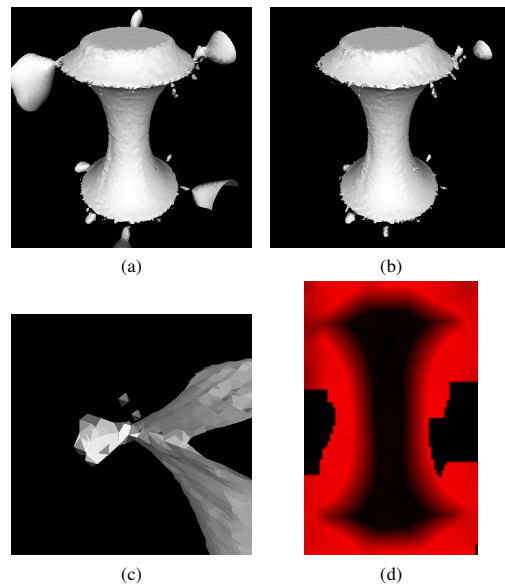


図 7 Davis らの手法による欠落補間の結果
Fig. 7 Result of hole filling by Davis's method

が生成されていないことがわかる．その理由は，この手法が等値面と元のメッシュモデルの整合性を考慮していないためであると考えられる．

提案手法では空間を最も細かい解像度で $128 \times 128 \times 128 (= 2^{21})$ に分割しているが，適応的な解像度のボクセルを用いているため，実際数は 130,521 個であった．本実験では符号の反転処理を 20 回反復して結果を得た． $\alpha = 1$ とし，時間ステップ n において反転するボクセルの数が減らない場合に， $\beta_{n+1} = 1.01\beta_n$ となるように β を増加させた． $\beta = 0.5$ から始め，最終的に $\beta = 0.52$ となった．Davis らの手法が 300 回の反復に 51.4 秒かかったのに対し，提案手法では 20 回の反復に 5.72 秒であった．

次に鎌倉大仏の距離画像に対して，その欠落部分を補間する実験を行う．図 9 は SDF を整合化する前のモデルである．図 9(a) は SDF の断面であり，(b),(c) はボリュームレンダリング [9] によって，SDF を直接レンダリングした結果である．図 9(d),(e),(g) に示すように距離画像に多くの欠落部分が存在するため，全てのボクセルを用いてメッシュモデルを生成すると，誤りのパッチが多数生成されてしまう(図 9(f),(h))．

そこで，SDF を整合化することで欠落部分の補間が可能となり，図 10 に示すモデルが得られた．図 10(a) は SDF の 2 次元断面であり，(b),(c) はボリュームレン

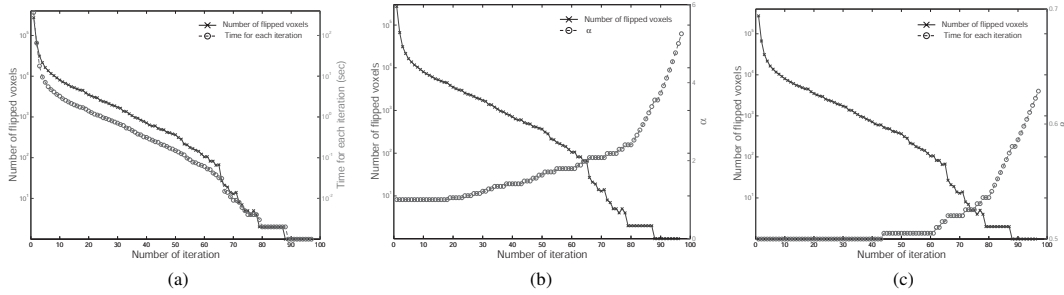


図 8 反転ボクセル数，計算時間， α ， β の関係．計算時間，ボクセル数は対数スケールである．

Fig. 8 The relationship between the number of flipped voxels and the computational time, α and β . The scales of the number of voxels and computational time are logarithmic.

ダリングの結果である．図 10(d),(f),(h) はパッチを用いたレンダリング結果であり，(e),(g) はワイヤフレームで表示したものである．適応的な解像度のボクセルを用いているため，適応的な解像度のボクセルに対するマーチングキューブ法 [22] を用いると，大きな欠落部分では大きなパッチが生成されている．

大仏の SDF は最も細かい解像度で $1024 \times 1024 \times 1024$ 個のボクセルに分割されているが，実際のボクセル数は 17,024,273 個である．これは全て領域で最も細かい解像度に分割した場合の 1.6% のデータ量である．図 8 は反転ボクセル数と一回の反復に要した計算時間，パラメータ α ， β の関係を示している．ボクセル数と計算時間は対数スケールで表されている．2 回目以降の計算時間は，5.3 で述べた計算量削減法によって急激に減少している．全体のボクセル数に比べて非常に小さな値となるため，反転したボクセル周辺のみ限定して整合性を調べる計算量削減法は有効に機能することがわかる．

本実験では α と β を $M_n \geq 0.95M_{n-1}$ のとき $\alpha_{n+1} = 1.05\alpha_n$ ， $M_n \geq M_{n-1}$ のとき $\beta_{n+1} = 1.01\beta_n$ に従って増加させた．ここで M_n は時間ステップ n における反転ボクセル数である．本実験では収束まで 97 回反復し，計算時間は約 14 分であった．その間最大約 550MB のメモリを必要とした．欠落部分があるモデルのパッチ数と面積が 5,241,486 個， 329.23m^2 に対して，欠落を補間したモデルのパッチ数と面積は 5,383,549 個， 402.75m^2 であった（鎌倉大仏の高さは 11.3m である．）面積が約 22% 増加したのに対して，パッチ数が 2.7% の増加に抑えられていることから，提案手法は大幅にパッチ数を増やすことなく欠落を補間していることがわかる．

7. おわりに

本論文では 3 次元モデルの欠落を補間する手法を提案した．欠落部分を含むメッシュモデル（距離画像）から生成した符号付距離場（SDF）は欠落部分の周囲で不安定になり，隣接するボクセルと整合性がない場合がある．このため，提案手法は隣接ボクセルとの符号の整合性を反復的に評価することにより，SDF を大域的に整合化した．本手法により整合化した SDF を用いて，欠落部分を平均曲率一定の曲面で補間したメッシュモデルを効率的に生成することが可能となった．

謝 辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構戦略的基礎研究推進事業 (CREST) の援助を受けて行われた．

文 献

- [1] Brett Allen. <http://grail.cs.washington.edu/software-data/ply2vri/>, 2002.
- [2] J.C. Carr, R.K. Beaton, J.B. Cherrie, T.J. Mitchell, W.R. Fright, B.C. McCallum, and T.R. Evans. Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions. In *Proc. SIGGRAPH 2001*, pp. 67–76. ACM, 2001.
- [3] Y. Chen and G. Medioni. Description of complex objects from multiple range images using an inflating balloon model. *Computer Vision and Image Understanding: CVIU*, Vol. 61, No. 3, pp. 325–334, 1995.
- [4] D.L. Chopp. Computing minimal surfaces via level set curvature flow. *Journal of Computational Physics*, Vol. 106, No. 1, pp. 77–91, 1993.
- [5] B. Curless and M. Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Proc. SIGGRAPH'96*, pp. 303–312. ACM, 1996.
- [6] Cyra Technologies, Inc. CyraX 2500. <http://www.cyra.com>.
- [7] J. Davis, S.R. Marschner, M. Garr, and M. Levoy. Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion. In *Proc. First Inter-*

- national Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2002.
- [8] H. Delingette, M. Hebert, and K. Ikeuchi. Shape representation and image segmentation using deformable surfaces. *Image and vision computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 132–144, April 1992.
- [9] J.D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner, and J. F. Hughes. *Computer Graphics: Principles and Practice in C*. Addison Wesley Professional, 2nd edition, 1995. ISBN:0-201-84840-6.
- [10] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J.A. McDonald, and W. Stuetzle. Surface reconstruction from unorganized points. In *Proc. SIGGRAPH'92*, pp. 71–78. ACM, 1992.
- [11] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos. Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, No. 4, pp. 321–331, 1988.
- [12] W. Lorensen and H. Cline. Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm. In *Proc. SIGGRAPH'87*, pp. 163–170. ACM, 1987.
- [13] MINOLTA Co. Ltd. Vivid 900 non-contact digitizer. <http://www.minoltausa.com/vivid/>.
- [14] Ryusuke Sagawa. *Geometric and Photometric Merging for Large-Scale Objects*. PhD thesis, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 2003.
- [15] Ryusuke Sagawa and Katsushi Ikeuchi. Taking consensus of signed distance field for complementing unobservable surface. In *Proc. 3DIM 2003*, pp. 410–417, 2003.
- [16] K. Sato and S. Inokuchi. Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask. In *Proc. International Conference on Computer Vision*, pp. 657–661, 1987.
- [17] J.A. Sethian. *Level Set Methods and Fast Marching Methods*. Cambridge University Press, 1999.
- [18] M.D. Wheeler, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Consensus surfaces for modeling 3d objects from multiple range images. In *Proc. International Conference on Computer Vision*, January 1998.
- [19] R.T. Whitaker. A level-set approach to 3d reconstruction from range data. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 29, No. 3, pp. 203–231, October 1998.
- [20] H.-K. Zhao, S. Osher, and R. Fedkiw. Fast surface reconstruction using the level set method. In *Proc. First IEEE Workshop on Variational and Level Set Methods, in conjunction with Proc. ICCV '01*, pp. 194–202. IEEE, 2001.
- [21] 増田健. 符号付距離場の一致による複数距離画像からの形状モデル生成. 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 44, No. SIG5(CVIM6), 4月 2003.
- [22] 佐川立昌, 西野恒, 池内克史. 光学的情報付き距離画像のロバストな適応的統合. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-DII, No. 12, pp. 1781–1790, December 2002.
- [23] 佐川立昌, 西野恒, 倉爪亮, 池内克史. 大規模観測対象のための幾何形状および光学情報統合システム. 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 44, No. SIG5(CVIM6), pp. 41–53, 4月 2003.

付 録

本手法の擬似コードを以下に示す. N, N' はオクトリーのノード (ボクセル), d, d' はそれぞれの符号

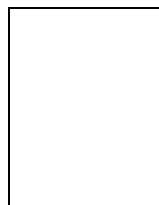
付距離, α, β は本文中のパラメータである. 隣接ボクセルには各位置で最も細かい解像度のボクセルを用いている. d_o は出力される新しい符号付距離であり, 回目の反復では, d_o を用いて計算する. この **FlipSign** をルートノードから開始して 1 回の反復とし, 反転するボクセルがなくなるまで繰り返す.

```

Algorithm: FlipSign(N)
if need to examine  $N$  then
   $n_1, n_2, n_3, n_4 \leftarrow 0$ 
  for all adjacent voxels  $N'$  of  $N$  do
     $D \leftarrow$  the distance of  $N$  and  $N'$ 
    if  $\text{sgn}(d) \neq \text{sgn}(d')$  then
      if  $|d - d'| \leq \alpha D$  then
         $n_1 \leftarrow n_1 + 1$ 
      else
         $n_2 \leftarrow n_2 + 1$ 
      end if
    else
      if  $| -d - d'| \leq \alpha D$  then
         $n_3 \leftarrow n_3 + 1$ 
      else
         $n_4 \leftarrow n_4 + 1$ 
      end if
    end if
  end for
  if  $n_2 + n_3 > \beta(n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$  then
     $d_o \leftarrow -d$ 
  else
     $d_o \leftarrow d$ 
  end if
  if  $N$  is nonterminal then
    for all children  $N_i (i = 0, \dots, 7)$  of  $N$  do
      FlipSign( $N_i$ )
    end for
  end if

```

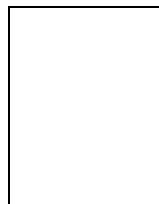
(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)



佐川 立昌 (正員)

1998 年京都大学工学部情報工学科卒業. 2000 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻修士課程修了. 2003 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了. 現在, 大阪大学産業科学研究所助手. 実時間視覚処理と物体のモデリングの研究

に従事.



池内 克史 (正員)

1973 年 京大・工・機械卒. 1978 年東大・院・工・情報工・博士了. 工博. MIT 人工知能研究所 (3 年間), 電子技術総合研究所 (5 年間), CMU 計算機科学科 (10 年間) を経て, 1996 年より東京大学教授 (生産技術研究所, 大学院情報学環). 人間の視覚機能, 明るさ解析, 物体認識, 人間による組み立て作業の自動認識などの研究に従事.

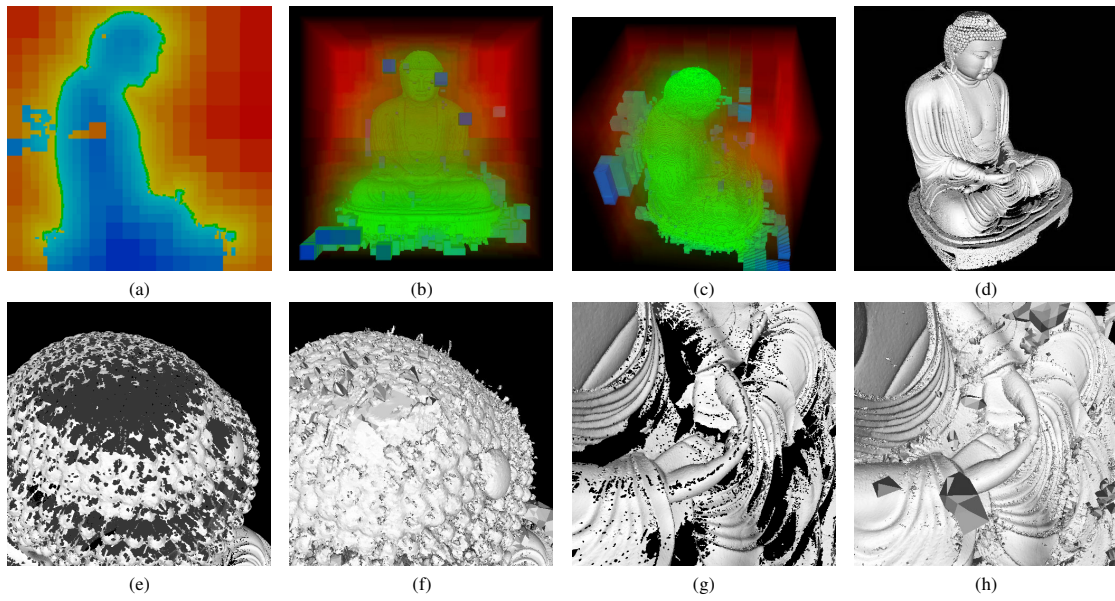


図9 整合化する以前の鎌倉大仏の SDF とメッシュモデル
Fig. 9 The SDF and mesh models of the Great Buddha of Kamakura before taking consistency of SDF

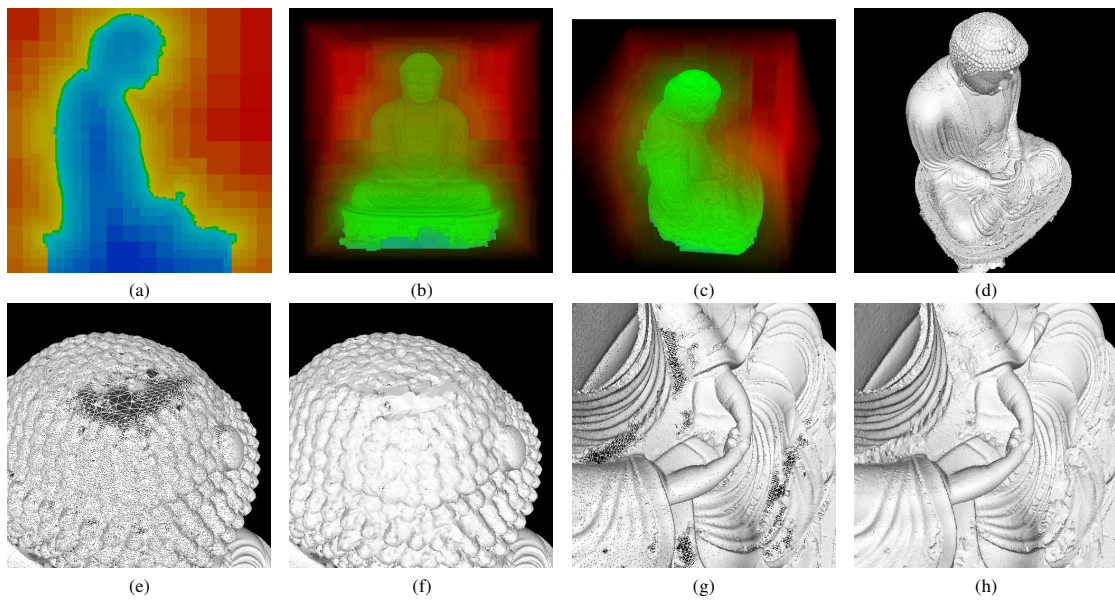


図10 整合化した鎌倉大仏のモデル
Fig. 10 The models after taking consistency of the SDF of the Buddha

Abstract When we use range finders to observe the shape of an object, many occluded areas may occur. These become holes and gaps in the model and make it undesirable to utilize the model for various applications. We propose a novel method to fill holes and gaps and complement such an incomplete model. We use a signed distance field (SDF) as an intermediate representation, which stores Euclidean signed distances from a voxel to the nearest point of the mesh model. Since the signs of a SDF is computed by using normal vectors, which are local features of range images, the signs of a SDF become unstable around holes or gaps. Thus, we take a consensus of the signed distances of neighbor voxels by estimating the consistency of the SDF. Once we make the SDF globally consistent by iterative computation, we can efficiently fill holes and gaps.

Key words 3D modeling, interpolation of a mesh model, signed distance field