

## 大規模観測対象のための幾何および光学情報の統合

佐川立昌<sup>1</sup> 増田智仁<sup>1</sup> 大石岳史<sup>1</sup> 西野恒<sup>2</sup>  
中澤篤志<sup>2</sup> 倉爪亮<sup>3</sup> 池内克史<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 東京大学 <sup>2</sup> 科学技術振興事業団 <sup>3</sup> 九州大学

### 概要

本論文では比較的小さな物体を対象としていた3次元形状を計測する従来の研究では問題とならなかったが、文化遺産の中には建物や大仏などの大規模な構造物を観測対象とする幾何的および光学的モデリングにおいて発生する様々な新しい問題について解決する手法を提案する。まず、観測対象が大規模かつ複雑な形状を持つ場合、大量のデータを取り扱う必要があるため、まずk-d treeの探索方法を拡張し、効率的に最近傍点を探索する方法を開発し、距離画像の統合過程における計算コストの大部分を占める最近傍点探索を高速化した。次に効率的に計算資源を利用するため観測対象の形状やテクスチャに応じて適応的に距離画像の統合を行った。また、複数の距離画像に付加された光学情報の合致をとることにより光学情報のノイズを取り除き、距離画像統合の枠組みにおいて光学情報の統合を行う手法を開発した。最後に、様々なセンサを用いて計測を行った場合においても計測できない部分が発生するため、そのような形状データの欠落を補う手法を開発した。これらの手法を用いていくつかの文化遺産についてモデリングを行い、大規模かつ複雑な形状をもつ観測対象のモデリングが可能になったことを示す。

## Geometric and Photometric Merging for Large-Scale Objects

Ryusuke Sagawa<sup>1</sup> Tomohito Masuda<sup>1</sup> Takeshi Oishi<sup>1</sup> Ko Nishino<sup>2</sup>  
Atsushi Nakazawa<sup>2</sup> Ryo Kurazume<sup>3</sup> Katsushi Ikeuchi<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> University of Tokyo <sup>2</sup> Japan Science and Technology Corporation  
<sup>3</sup> Kyushu University

### Abstract

In this paper, we consider the geometric and photometric modeling of large-scale and intricately shaped objects, such as cultural heritage objects. When modeling such objects, new issues occurred during the modeling steps which had not been considered in the previous research conducted on the modeling of small, indoor objects. First, when modeling a large-scale and intricately shaped object, a huge amount of data is required to model the object. We would like to propose two approaches to handling this amount of data. We propose a novel method for searching the nearest neighbor by extending the search algorithm using a k-d tree. We constructed a merged model in adaptive resolution according to the geometric and photometric attributes of range images for efficient use of computational resources. Second, we reconstructed a 3D model with an appearance which successfully discarded outliers due to specular reflection, by taking a consensus of the appearance changes of the target object from multiple range images. The photometric attribute of the model can be used for aligning with 2D color images. The third issue is complementing unobservable surfaces of an object. We propose a novel method to complement such holes or gaps in the surfaces, areas which are not observed by any scans. In this novel method, the surface of an object is scanned using various kinds of sensors. We efficiently complement them by taking a consensus of the signed distances of neighbor voxels.

# 1 はじめに

近年、歴史的建造物など大規模な文化遺産の見えや形状を電子的に保存する研究が盛んにおこなわれるようになってきている。これらの大規模対象物体の幾何形状を保存する際、対象物体の3次元座標値を測定できるステレオ視や光投影型距離計測法、レーザレンジファインダといった距離測定システムが用いられる。しかしこれらの距離計測システムでは特定の視点から距離画像を計測するために、得られた1枚の距離画像には対象の部分的な表面しか含まれない。したがって、観測対象全体の幾何モデルを生成するには複数の距離画像を共通の座標系に変換し [1, 12, 11] (位置合わせ)、1つの幾何形状モデルに再構成する [8, 4, 16] (統合) 処理が必要となる。しかし、対象物体の規模が大きくなればなるほど、データも計算も膨大となり、特に位置合わせされた距離画像群の統合をおこなう際に、従来の手法では事実上処理が不可能になる場合がある。そこで本論文では Wheeler らの手法 [15, 16] を基に、巨大なメモリ量、計算量が必要とされる複数の距離画像の統合において、k-d tree [7] を用いた最近傍点探索を拡張する方法と3次元モデルを適切な細かさで生成する手法の2つの手法を提案する。

また本手法を距離画像取得時に得られる光学情報を同時に統合するように拡張する。これは Wheeler らの手法が複数の幾何的データを統合する手法であったのに対し、3次元物体認識やトラッキングなどに幾何形状モデルを利用する場合、色や輝度値といった光学情報をもった3次元モデルを用いることができれば、精度やロバスト性が向上することが期待できる。本手法はこのような光学情報を含む3次元モデルを構築するため、画像取得時におけるノイズによる外れ値を除外するように複数の距離画像間で光学的情報の合致をとって距離画像を統合する。

さらに観測対象が大規模かつ複雑な形状を持つ場合、全ての表面を計測することは困難であるため、距離画像が欠落した部分が発生する。メッシュモデルを変形して補間を行なう手法 [6, 2] やボリューム表現を用いた補間手法 [17, 5] が提案されているが、本手法では後者と類似して統合過程において計算した SDF (signed distance field) の整合性を取ることで、距離画像が欠落した部分の形状を補間する手法を提案する。

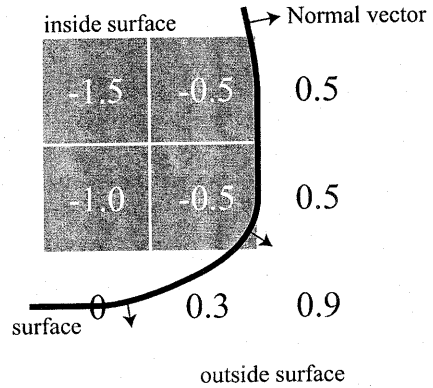


図 1: Zero-crossing interpolation from the grid sampling of an implicit surface

## 2 ボリューム表現を用いた距離画像の統合

本章ではまず Wheeler によって提案された距離画像の統合手法を説明する。この手法は全ての距離画像をボリューム表現を用いて表現することとし、空間を格子状に分割し、各ボクセルには陰表面関数、すなわち、ボクセルの中心  $x$  から最も近い物体の表面までの符号付距離  $f(x)$  を格納する。 $f(x)$  が正の場合、ボクセルは表面の外側にあることを表し、負の場合には内側にあることを表す。距離画像の統合問題は、複数の距離画像から陰表面関数が与えられたときに、この関数が 0 となる同位面を抽出する問題となる (図 1)。この問題を解くためにまず、多くの表面形状データが与えられた場合に、 $f(x)$  を計算する手法である合致表面法を説明する。

### 2.1 合致表面法

物体を様々な方向から観測した  $N$  枚の距離画像が与えられたときに任意の点  $x$  から符号付距離  $f(x)$  を計算するために、Wheeler らは合致表面法 (consensus surface algorithm) を提案した。合致表面法では、まずそれぞれの距離画像に対して最近傍点を別々に求め (図 2 矢印 A,B,C)、その最近傍点の周りに他の距離画像が存在しているかどうかを調べる。最近傍点とその周囲の他の距離画像の位置と法線方向を比較し

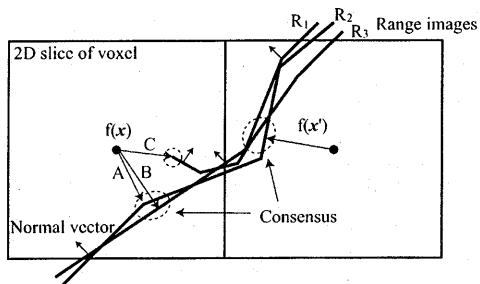


図 2: Consensus surface algorithm: The signed distance is chosen from the consensus surfaces inside the gray circle.

て差が小さいならば、それらの距離画像は同じ表面を表していると見なす。同じ表面を表している複数の距離画像がある場合、これらを合致表面 (consensus surface) と呼ぶ。それらの表面のうちで  $x$  から最も近いものを最終的な符号付距離として計算する。これにより距離画像の外れ値は合致表面に含まれず、符号付距離の計算から除外することが可能になる。図 2 では、合致表面法ではそれぞれの 3 つの距離画像について 2 つのボクセルの中心  $x, x'$  から最近傍点までの符号付距離を計算し、最近傍点における合致度を計算する。その結果、合致表面となるのは A, B の場合であり、最終的な符号付距離はこれらの絶対値の小さいものが選択される。また残りの外れ値の部分で得られた最近傍点 C は合致表面とはみなされないため、符号付距離計算から取り除くことができる。

## 2.2 Octree に基づいたボクセル分割

ボリューム表現で表面を表す場合、全ての領域で固定されたボクセルを用いる [4] 代わりに、表面が存在する付近でのみ細かく分割することでメモリ量が節約できる。そこで Wheeler の手法では octree を用いてボクセルを再帰的に分割する。すなわち符号付距離の大きさを調べる陰表面関数が 0 付近のボクセルのみ最も細かい解像度まで分割する [16]。具体的には符号付距離  $f(x)$  がボクセルの幅  $w$  に対して  $f(x) < \frac{\sqrt{3}}{2}w$  を満たす場合にボクセルを分割する。このとき表面を含むボクセルの解像度は等しいので (図 3), MC [10] をそのまま適用可能であり、メッシュモデルの表面形状を生成できる。

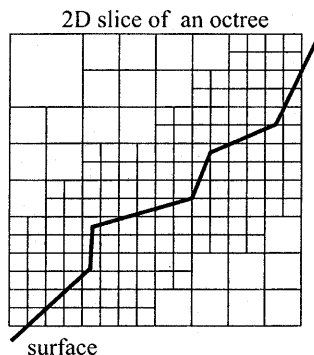


図 3: A 2D slice of the octree splitting volume. The resolution is high around the surface and low elsewhere.

## 3 最近傍点探索の効率化

合致表面法 [16] ではボクセルの中心から距離画像の最近傍点を探索する際に k-d tree [7] を用いている。k-d tree は多次元データにおいて最近傍となるデータを探索する問題においてよく用いられるデータ構造である。k-d tree を構成する要素が  $n$  個の場合、その理想的な探索コストは  $O(\log_2 n)$  となる。しかし実際には最悪  $O(n)$  の探索コストとなることがある。図 4 は 4 つの葉ノード A, B, C, D から構成される k-d tree を表している。点  $p$  からの最近傍点を探索する場合、点  $p$  はノード A の内部にあるのでまずノード A の要素との距離を計算し、その中で最近傍点を選択する。つぎに k-d tree をたどりノード B について調べるが、ノード B の要素について調べる必要があるか判断するため点  $p$  からノード B までの距離  $d_B$  と最近傍点までの距離  $d$  を比較する。ここで  $d$  は  $d_B$  よりも大きいので、ノード B 内部にある要素を調べる必要がある。同様にノード C, D についてもノードまでの距離  $d_C, d_D$  と最近傍点までの距離  $d$  を比較し、各要素を調べる必要があるかどうか判断する。この例ではノード C, D についても調べる必要があるため、結果的に探索コストは  $O(\log_2 n)$  ではなくなる。

これに対し、統合処理において最近傍点までの距離がボクセルの大きさに比べて大きい場合、結果的にそのボクセルは表面生成には利用されない。したがって、最近傍点が遠いということがわかれば十分である。そこで本論文では閾値よりも最近傍点が遠い場合には探索の枝狩りをおこなう手法 (Bounds-Overlap-

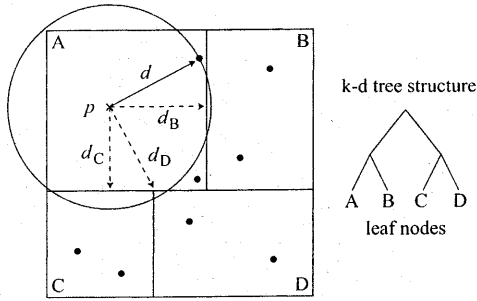


図 4: A 2-D example of a k-d tree

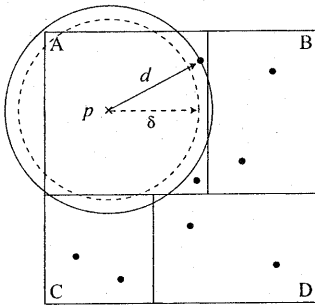


図 5: The Bounds-Overlap-Threshold (BOT) test

Threshold (BOT) test) を提案する。図 5 は図 4 における探索に閾値  $\delta$  による枝狩りを加えた様子を示している。ノード A の要素との距離を計算するところまでは同様であるが、ノード B の要素を調べるか判断する際に、最近傍点までの距離  $d$  に加えて閾値  $\delta$  も距離  $d_B$  と比較する。 $d > d_B$  あるいは  $\delta > d_B$  を満たすならばノード B の要素は点  $p$  から十分遠いと判断し、ノード B の要素は調べない。ノード C, D についても同様に、距離  $d_C, d_D$  と閾値  $\delta$  を比較すると  $\delta < d_C, \delta > d_D$  となるので、ノード C の要素は調べ、ノード D の要素は探索から除外する。閾値  $\delta$  の決め方が重要となるが、統合処理においてはボクセル分割の基準から  $\delta = \frac{\sqrt{3}}{2}w$  と決定できる。

## 4 解像度適応型統合アルゴリズム

文献 [16] の合致表面法は octree を用いて効率的に符号付距離を計算するが、生成したメッシュモデルは全ての部分で最も細かい解像度で生成されている。

観測対象を表現するためのデータ量を減らして計算機資源を効率的に利用するために、観測対象の幾何的、光学的特徴に応じて適した解像度でメッシュモデルを生成する手法を提案する。

従来の MC[10] は同一の解像度 (サイズ) のボクセルにしか適用することができないので、適応的な解像度のボクセルに対して適用するように拡張した MC のアルゴリズムを用いる [13, 18]。

### 4.1 幾何的特徴に基づいたボクセル分割

最終的なメッシュモデルを効率的に生成するために観測対象の形状に応じて符号付距離を計算するサンプリング間隔を決定する。ただし観測対象の形状を表す指標として本論文では表面の曲率を用いることにする。すなわち表面の曲率に応じて、平面に近い部分では粗くサンプリングしてデータ量、計算量を減らし、複雑な形状の部分では細かくサンプリングして、物体の精細なモデルを構築する。

本手法では曲率の変化を表面の法線方向を比較して計算する。まず主成分分析によって距離画像の点の分布を調べ、最も固有値の大きさが小さい固有ベクトルを法線ベクトル  $\bar{n}$  とすることによって平面に近似する。次に、ボクセル内部にある距離画像の点の法線ベクトル  $n_i$  と近似平面の法線ベクトル  $\bar{n}$  を比較する (図 6)。( $n_i$  は距離画像の点が属する距離画像面の法線ベクトルの平均として計算される。)  $n_i$  と  $\bar{n}$  のなす角が十分小さければ、サンプリング間隔は十分細かく、さらにボクセルを分割する必要はないと判断する。

### 4.2 光学的特徴に基づいたボクセル分割

光学的特徴に基づいたボクセル分割も同様の方法で行う。5 で提案する光学的情報付き合致表面法では各ボクセルにそれぞれ 1 つの LRS 値や RGB 値などの光学情報が与えられる。ボクセルの分割が幾何的特徴のみに基づいて行なわれる場合や、どの特徴も考慮しない場合には、距離画像に含まれるテクスチャを表すには不十分なボクセルのサンプリング間隔になる可能性がある。2 次元-3 次元ロバスト位置姿勢推定法 [9] では 3 次元モデルが持つテクスチャ輝度値の 3 次元エッジを利用する。光学的特徴を考

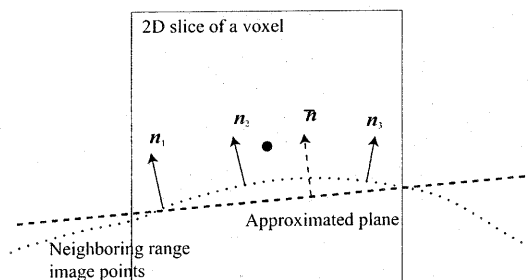


図 6: Our method approximates neighboring range image points to a plane and computes its normal vector  $\bar{n}$  by principal component analysis (PCA) for the cloud of range image points. The approximate normal is then used to determine further subdivision.



図 7: Two images of the Great Buddha in Kamakura, using LRS values as pixel values.

慮せずにボクセル分割を評価すると、3次元エッジが平滑化されてしまい、正確に3次元エッジを求めることができない。したがって、光学的特徴に基づいてボクセル分割を評価することが不可欠である。

光学的特徴に基づくボクセル分割は曲率に基づいた分割の場合と同様に、ボクセル内部にある距離画像の点の光学的な変化を計算する。ボクセル内部にある点の光学情報の差が十分小さければ、距離画像に対してサンプリング間隔は十分細かいと判断する。光学情報には、LRS 値、輝度値、RGB 値などが考えられるが、差の評価には LRS 値や輝度値の場合にはスカラー値であるので差を用い、RGB の場合には RGB 空間での距離を用いている。

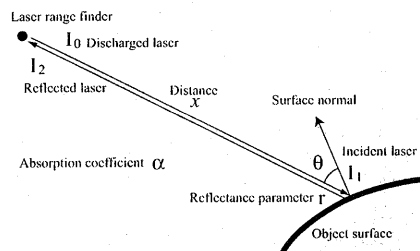


図 8: Reflection model of a laser light

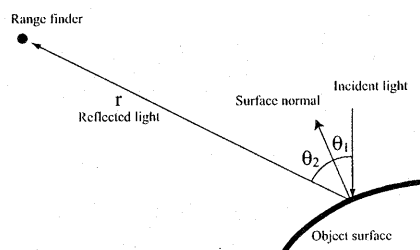


図 9: Reflection model of natural light

## 5 光学的情報付き合致表面法

レーザレンジファインダなどの距離計測装置は発射光と反射光の強さの比である LRS (laser reflectance strength) 値や RGB 値といった光学情報を形状とともに取得することができる。それらの光学的特徴をもつ 3次元モデルを生成することにより、トラッキング、テクスチャマッピングといった応用の精度とロバスト性の向上が期待できる。図 7 は各 3次元点に与えられた LRS 値を示している。LRS 値の場合、図 8 で示すように対象までの距離と、入射光の角度に影響され、そのモデルは

$$\frac{I_2}{I_0} = re^{-2\alpha x} \cos \theta. \quad (1)$$

となると仮定する。ここで観測される反射率は  $I_2/I_0$  であり、 $r$  は物体表面の特性による反射パラメータであるので、距離  $x$  と入射角度  $\theta$  から  $r$  を計算し、LRS 値を補正する。

自然光の場合には、本論文では入射光の角度は一定であり、反射光は Lambertian 反射が観測されると仮定すると、観測対象の 1 点において観測される光学情報は一定となる (図 9)。

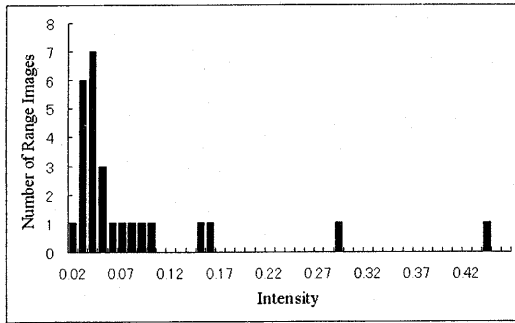


図 10: An example of the histogram of the intensity values of consensus points. Some outliers due to specular reflection are observed. In this case, the median value is 0.04.

実際の反射光には鏡面反射成分が含まれるので、複数の視点からの観測を利用して拡散反射成分を抽出する手法を提案する。すなわち、各頂点に LRS 値をもった 3 次元モデルを構築するために、統合において距離画像間で幾何形状の合致をとったのと同様に、LRS 値についても合致をとる。LRS 値の場合では単純に、ボクセルから最近傍の合致表面を構成する距離画像の LRS 値の中央値を選択することにする。様々な方向から物体を観測した場合、LRS 値のヒストグラムは拡散反射成分の値に鋭いピークをもつ(図 10)。したがって選択した中央値は拡散反射成分であると考えられる。

## 6 観測の欠落の補間

観測が得られなかった対象物体の表面を補間する方法として、統合処理において計算した SDF の 0 同位面による補間が考えられる。しかし観測が欠落した部分では SDF の符号の計算が不安定になるため、そのまま欠落を補間することはできない。特に鋭い角の部分では符号の推定が誤りやすく、図 6 では小さい観測の欠落が統合後のモデルに大きな影響を及ぼしている状況を表している。実際の形状は灰色の実線、距離画像は黒の実線で表されている。計算された SDF の符号が正ならばボクセルは白、負ならば灰色で表されている。このとき統合後のメッシュモデルの形状は点線のようになり実際の形状と大きく

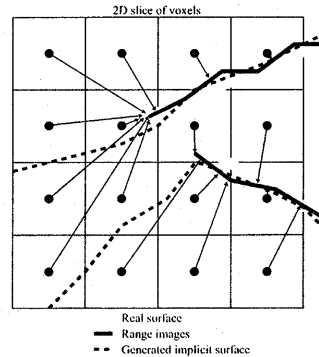


図 11: Corruption of the surface caused by wrong sign of SDF

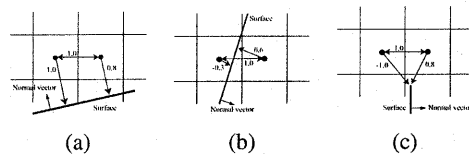


図 12: Three examples of signed distances of adjacent voxels

異なった結果になる。

そこで隣接するボクセルの符号付距離  $d, d'$  の整合性を考えると、

$$|d - d'| > W, \quad (2)$$

の場合には整合性がないと考えられる。すなわち、図 12 において (a),(b) の場合には隣接するボクセルの符号付距離に整合性があるが、(c) の場合には 2 つのボクセルの間に物体表面がないにもかかわらず 0 同位面が生成されるため、符号付距離に整合性がないと判断される。

本論文では周囲のボクセルと符号付距離の整合性がないボクセルの符号を反転し、SDF の整合性を向上させる手法を提案する。あるボクセルの周囲 26 個のボクセル (図 13 はその 2 次元断面を表している) と符号付距離を式 (2) にしたがって比較し、整合性のある隣接ボクセルの数を  $n$ 、整合性の無い隣接ボクセルの数を  $n'$  とすると、 $n < n'$  の場合には注目しているボクセルの符号を反転する。この計算を全てのボクセルについて行い、反転する符号付距離がなくなるまで反復する。

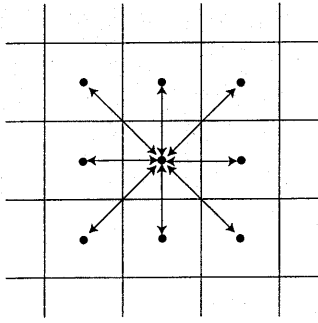


図 13: Adjacent voxels to take consistency of the signs of SDF

## 7 実験

本論文で提案する手法を検証するために 8 台の PC から構成される PC クラスタを構築し、並列化統合処理を行なった [14]. 各 PC はデュアル 800MHz Pentium-III プロセッサ, 1GB メモリからなり, 100BASE-TX イーサネットで接続されている.

### 7.1 最近傍点探索の効率化の評価

図 14 は統合処理において k-d tree を用いて最近傍点探索を行なったときに, 最近傍点を決定するまでに調べた葉ノード数を示している. 最近傍点までの距離が遠くなると調べられる葉ノード数が増加しているのがわかる. そこで BOT test を追加し探索の枝狩りを行なうと図 15 のようになる. 閾値はグラフ中で点線で表しているが, octree を用いているのでボクセルの大きさによって閾値は異なる. 最近傍点までの距離が遠い場合でも調べる葉ノード数が抑えられていることがわかる. k-d tree を用いた探索のコストは調べる葉ノード数に依存するが, この例では BOT test によって探索コストを 22.9% に軽減可能となった.

### 7.2 光学的情報付き合致表面法と解像度適応型統合アルゴリズムの評価

図 16 に鎌倉大仏の距離データに対して解像度適応型統合アルゴリズムを適用した結果を示す. 図中の列 A は適応的統合を行わなかった場合, 列 B は曲率

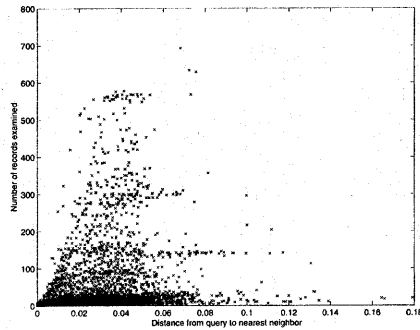


図 14: Relationship between distance from a query to the nearest neighbor and the number of records examined using the basic search algorithm for merging range images.

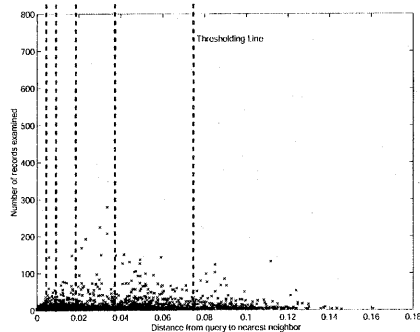


図 15: Relationship between distance from a query to the nearest neighbor and the number of records examined with the BOT test for merging range images.

のみを考慮した場合, 列 C は曲率と LRS 値の両方を考慮した場合である. その統合結果の統計量を表 1 に示す. 適応的な統合を行わなかったモデル A に比べて, 適応的な統合を行なったモデル B, C ではデータ量, 計算量ともに小さくすることが可能であった. また, モデル A と B, A と C の間で Metro[3] を用いて形状の差を比較し, 適応的な統合を行ってデータ量を削減した場合に形状がどれだけ保持できているかを評価した (表 1 中の Mean Difference). その結果, その差は鎌倉大仏の大きさに比べて非常に小さく ( $< 1\text{mm}$ ), 形状を変化させることなくデータ量を削減できていることがわかる.

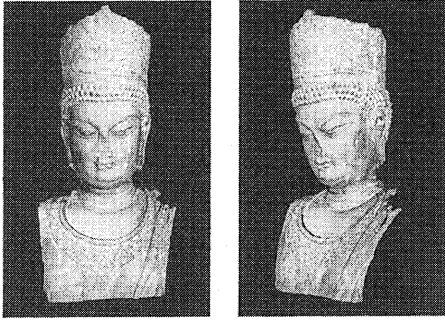


図 17: The model of China Buddha with RGB values as photometric attributes

鎌倉大仏の距離画像は平均して同一部分に 3-5 枚の距離画像が重なるように取得している。しかし部分的には距離画像を取得した視点位置によってオクルージョンが発生し、距離画像が重ならない部分が一部存在する。鎌倉大仏の顔の部分には取得した距離画像の境界部分が元々存在するが、図 16(3) 列に示した統合モデルの LRS 値にはその境界が表れておらず、本論文で提案した光学情報の統合手法が有効性であるといえる。距離画像の重なりが 3-5 枚である場合、中央値を求めるにはサンプル数が不十分であると考えられるが、LRS 値の場合はほとんどの場合分散が小さく、3-5 程度のサンプル数でも実用上十分であると考えられる。また、LRS 値付きでレンダリングされた図を比較すると、(B3) は (A3) に比べて平滑化されているが、(C3) ではデータ量は削減しつつ、LRS 値の鋭い変化が保たれている。したがって正確な光学情報を保存する必要がある場合には光学情報を評価基準とした適応的統合が有効である。

次に、距離画像とともに RGB 画像を取得することができる Minolta VIVID を用いて龍門石仏を計測し、光学的情報として RGB 値を用いて統合処理を行った (図 17)。距離画像は石仏の顔の部分を中心に 40 枚取得し、7-10 枚の距離画像が各部分で重なっている。その結果光学情報に含まれる鏡面反射成分を取り除くことが可能となった。

### 7.3 観測の欠落の補間の評価

取得した鎌倉大仏の距離画像は頭頂部、肩、手の内側などに欠落部分が存在する。統合処理後、整合性

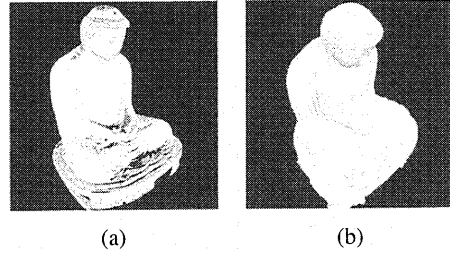


図 18: Complementing the unobserved surfaces of the Buddha

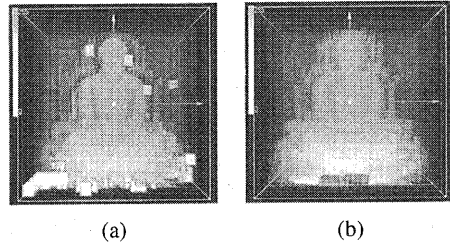


図 19: SDF of Kamakura Buddha rendered by volume renderer

のある符号付距離をもつボクセルのみを用いて MC を適用すると図 18(a) のようになり、統合後のモデルにも欠落部分が残る。そこで本論文で提案した整合性を向上させる手法を適用し、全てのボクセルを用いて MC を適用すると図 18(b) に示すように欠落部分を埋めることが可能となった。整合性を向上させる前の SDF をボリュームレンダラによって表示すると図 19(a) となる。暗い領域、明るい領域はそれぞれ符号付距離が正、負の値を持つボクセルを表し、本来は物体の外側の部分に符号付距離が負のボクセルが存在し、符号の推定が誤っていることがわかる。それに対して整合性を向上させた後は図 19(b) となり、それらの符号が修正されたことがわかる。

## 8 おわりに

本論文では大規模な観測対象の幾何および光学モデルを生成するための距離画像統合システムを提案した。まず大規模な距離画像を用いて統合処理を行なうため、最近傍点探索を効率化する手法とデータに応じた適応的な解像度による統合処理を提案した。



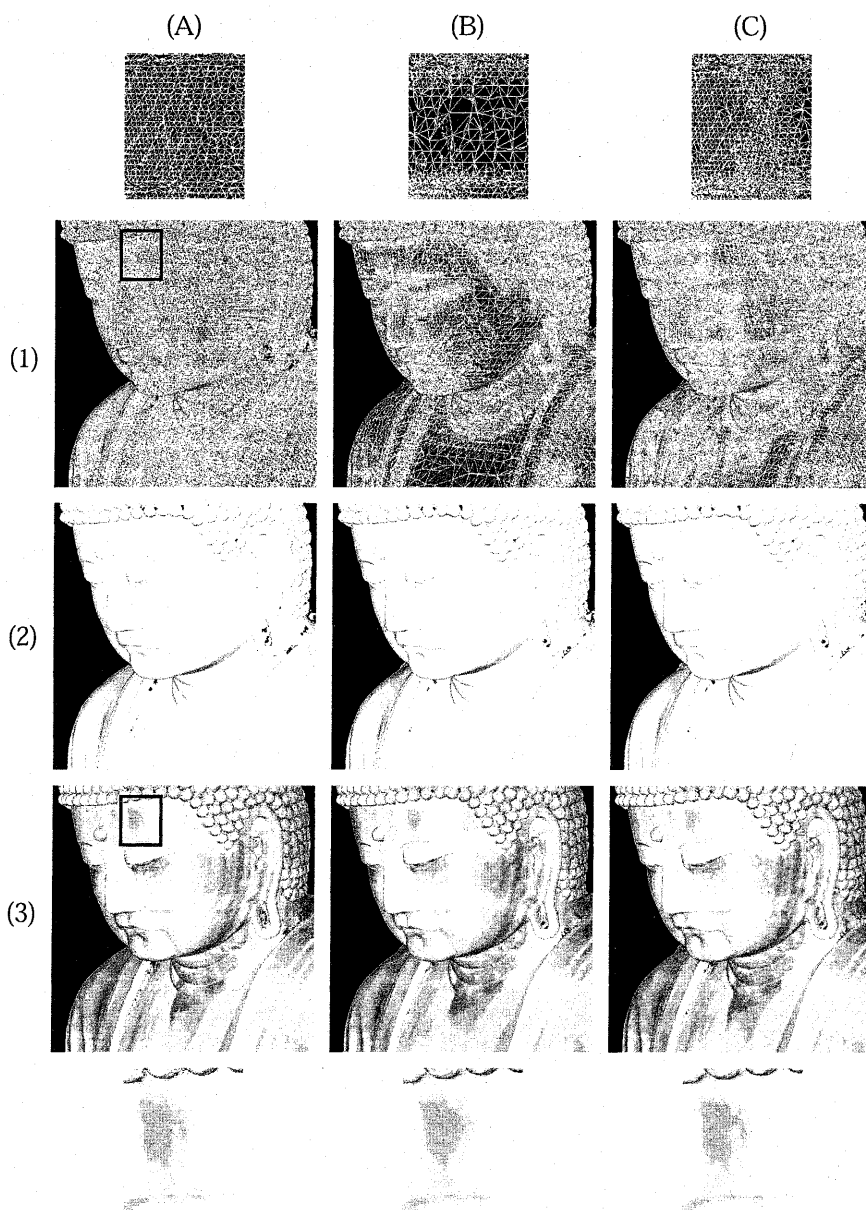
表 1: Statistics of models of the Buddha: Our method reduces the amount of data and computation time. However, the mean differences are quite small compared to the Buddha size.

	# of points	Time for Integration	Mean Difference
(A)	3.0 million	61 min.	N/A
(B)	1.4 million	25 min.	0.99 mm
(C)	1.7 million	30 min.	0.44 mm

次に光学情報を含む幾何モデルを生成するため、距離画像統合の枠組みの中に光学的情報を取り入れ、3次元モデルを構築する手法を提案した。また符号付距離の整合性をとる手法を提案し、距離画像が欠落した部分の補間することが可能となった。

## 参考文献

- [1] P.J. Besl and N.D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, Feb 1992.
- [2] 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.
- [3] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno. Metro: measuring error on simplified surfaces. *Computer Graphics Forum*, Vol. 17, No. 2, pp. 167–174, June 1998.
- [4] B. Curless and M. Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Proc. SIGGRAPH'96*, pp. 303–312. ACM, 1996.
- [5] J. Davis, S.R. Marschner, M. Garr, and M. Levoy. Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion. In *Proc. First International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 2002.
- [6] 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.
- [7] J.H. Friedman, J. Bentley, and R. Finkel. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 3, No. 3, pp. 209–226, 1977.
- [8] A. Hilton, A.J. Stoddart, J. Illingworth, and T. Windett. Reliable surface reconstruction from multiple range images. In *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, pp. 117–126, Springer-Verlag, 1996.
- [9] R. Kurazume, K. Nishino, Zhengyou Zhang, and Katsushi Ikeuchi. Simultaneous 2d images and 3d geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute. In *Proc. The 5th Asian Conference on Computer Vision*, Vol. 1, pp. 99–106, January 2002.
- [10] W. Lorensen and H. Cline. Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm. In *Proc. SIGGRAPH'87*, pp. 163–170. ACM, 1987.
- [11] K. Nishino and K. Ikeuchi. Robust simultaneous registration of multiple range images. In *Proc. Fifth Asian Conference on Computer Vision ACCV '02*, pp. 454–461, Jan. 2002.
- [12] K. Pulli. Multiview registration for large data sets. In *Second Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 160–168, Oct 1999.
- [13] R. Sagawa, K. Nishino, and K. Ikeuchi. Robust and adaptive integration of multiple range images with photometric attributes. In *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2001*, Vol. 2, pp. 172–179, December 2001.
- [14] R. Sagawa, K. Nishino, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi. Parallel processing of range data merging. In *Proc. 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 577–583, Oct. 2001.
- [15] Mark D. Wheeler. *Automatic Modeling and Localization for Object Recognition*. PhD thesis, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1996.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 佐川立呂, 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.



16: Merging results of the Kamakura Buddha: Column (A) are the models created without adaptive integration. Column (B) are the ones created by adaptive subdivision only based on the curvature of the surface. Column (C) are the ones with adaptive subdivision by the estimation of curvature and LRS. Row (1) are wireframe representations and row (2) are polygonal representations of these models. Row (3) are the images rendered with LRS values. The far upper and far lower rows are zoom-ups of the forehead of the Buddha.