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

佐川 立昌 † 西野 恒 † 倉爪 亮 ‡ 池内 克史 † † 東京大学 ‡ 九州大学

日本の文化遺産をモデリングする研究が行われているが,これらの文化遺産には巨大でかつ形状が複雑なものがある.したがって,計測そのものに困難さが加わり,また巨大なデータ量を扱う必要が生じる.そこで我々はそれらのモデルの生成に必要な距離センサから得られる幾何的,光学的情報を効率的に統合する枠組みを提案する.まず,幾何情報を統合する手法に光学情報を同時に統合する手法を提案する.次に,大量のデータを扱うために,1.PC クラスタを用いた並列計算,2.データに応じた適応的な解像度による統合処理,という2つのアプローチによる手法を開発し,文化遺産の精細なモデルの生成を可能にした.

Geometric and Photometric Integration System for Large Objects

Ryusuke Sagawa[†] Ko Nishino[†] Ryo Kurazume[‡] Katsushi Ikeuchi[†] †The University of Tokyo ‡Kyushu University

Some researchers have begun projects to model Japanese cultural heritage objects. Some of Japanese cultural heritage objects are large, but their shapes may be intricate. Thus, the measurement becomes difficult and the large data set must be handled. We propose a new geometric and photometric integration framework of range images of those objects. First, we propose a new method which integrates photometric attributes as well as 3D geometric information. Next, we have developed the following methods by two different approach to build the detailed models of cultural heritages: 1. Parallel computation using a PC cluster. 2. Merging by adaptive resolution according to the data.

1 はじめに

近年,文化遺産等の歴史的建造物などの大規模な物体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。これらの建造物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何らかの距離測定システムを用いることになる。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,多く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枚の距離画像は対象の部分的な表面しか計測することができない。したがって,複数の距離画像を共通の座標系に変換し[2,14,13](位置合わせ),1つの幾何形状モデルに再構成する[7,4,16](統合)ことが必要である.

対象とする建造物等の規模が大きくなればなるほ

ど,データ量的にも計算量的にも大規模かつ複雑なものを扱う必要が出てくる.そのため,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,従来の手法では破綻をきたすことになる.

本論文では、複数の距離画像を統合するためWheelerらの手法[16]に基づいて、光学的特徴を持った3次元形状モデルを生成する手法を提案する。Wheelerらの手法は複数の幾何的データを統合する手法であったが、3次元物体認識やトラッキングのような幾何形状モデルを利用する応用を考えた場合、色や輝度値といった付加的な情報をもった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。このような3次元モデルを構築するため、複数の距離画像間で光学的情報の合致をとって画像取得時におけるノイズによる外れ値を除外する距離画像統合法を提案する。また、固定され

た光源環境下において観測対象の見えの変化の少ない部分を抽出することにより, Lambertian 反射特性を持つ3次元モデルも生成できる.

さらに,巨大なメモリ量,計算量が必要とされる 問題に対処すべく,我々は次の2つのアプローチによ る手法を提案する.まず,PC クラスタを用いた並列 統合法を提案する . 我々の手法は Wheeler ら [16, 15] の手法を応用し、3次元空間に設定したボクセルから 距離画像までの符号付距離 (signed distance) を計算し て陰表面関数とし,同位面 (isosurface) を抽出する. 同位面の抽出には, marching cubes algorithm [9](以 下, MC) を利用する. MC については, これまで並 列に計算する研究が行われている[1,10]が,距離画 像の統合における計算時間を減らすためには符号付 距離を並列に計算することが必要である.そのため, 巨大なデータ量を扱うために PC クラスタを用いて 並列に計算する次の二つの要素からなる手法を開発 した.1.距離画像を各PCに分散して保持する.2. octree の部分木に分割して並列に探索する.

もう一つの方法は3次元モデルを適切な細かさで生成する手法である.octreeを用いてボクセルを分割する際に表面の曲率を考慮することにより,曲率の高い部分では細かいボクセルに分割され,平面に近い部分では大きいボクセルで表現する.したがって,生成した幾何モデルはより少ないポリゴン数で物体を表すことが可能になる.さらに光学的情報を考慮して,光学的に変化の大きい部分では細かい3次元モデルを生成することにより,2次元-3次元ロバスト位置姿勢推定法[8]に利用する3次元エッジを平滑化することなく正確に抽出することができる.本論文ではボリューム表現から三角形パッチを用いたメッシュモデルへの変換において,異なる解像度のボクセルを扱うためにMCの拡張をおこなう.

以下では次の内容について説明する .2 ではWheeler の統合アルゴリズムについて説明し,3 では光学的情報を加えたモデリング手法を提案する .4 では統合処理の並列化手法について述べ,5 では表面形状の曲率と光学的情報に基づいた適応的な解像度のモデルを生成する手法について説明する .提案した手法を実データに適用した実験結果を6に示し,7 に結論を述べる.

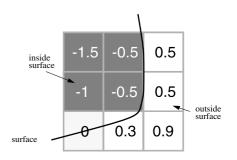


図 1: 各格子点における陰表面のサンプリングを用いた 0 同位面の補間.

2 ボリューム表現を用いた距離画像の統合

本節では提案する手法が基づいている,Wheeler によって提案された距離画像の統合手法を説明する.Wheeler の手法では,まず全ての距離画像をボリューム表現を用いて表現する.空間を格子状に分割し,各ボクセルには陰表面をサンプリングして格納する.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)を計算する.f(x)が正の場合,ボクセルは表面の外側にあるということを表し,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とは,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,実際の表面形状はわからないが多くの表面形状データをもつ場合に,どのように f(x) を計算するか考える.

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.

それまでのノイズに弱いアルゴリズムは陰関数の大きさ |f(x)| を全ての距離画像のうちで最も近い三角形パッチまでの距離と定義していた.しかし,この定義では距離画像に誤差が含まれるときに誤った結果が得られる場合がある.図 2 はそのような状況を示している.x から最も近い点として選ばれた点は正しい表面に含まれておらず,ノイズによる法線の誤差から,誤ってx が物体の内側にあると判断し

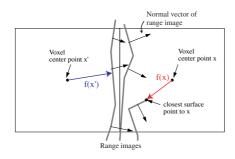


図 2: ノイズに敏感なアルゴリズム: 誤差を含んだ三角パッチによって符号付距離の符号に影響を与える例.

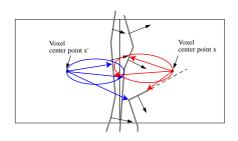


図 3: 合致表面法: 符号付距離は円で囲まれた合致表面から選ばれる.

ている.

距離画像のノイズに対して敏感になることを避けるために、各観測が同じ表面を表しているかどうかを評価して平均をとる。近傍のデータの位置と法線方向を比較して、その差があらかじめ設定した閾値以内であるならば、それらのデータは同じ表面を表していると見なす。近傍のデータの探索には、各距離画像のデータを別々に格納したk-d tree [6]を用いて行う。合致表面法は、ある距離画像の点に位置と法線方向が類似した他の距離画像の点が存在する場合には、その点の合致度が高いと見なす。単純に距離画像が2つの場合には次のようになる。

SameSurface
$$(\langle p_0, n_0 \rangle, \langle p_1, n_1 \rangle) =$$
 (1)

$$\begin{cases}
\text{True} \quad (\parallel p_0 - p_1 \parallel \leq \delta_d) \land (n_0 \cdot n_1 \geq \cos \theta_n) \\
\text{False} \quad \text{otherwise}
\end{cases}$$

ここで , δ_d は距離の差の閾値 , θ_n は法線方向の差の閾値である .

この条件を満たした距離画像の表面部分を合致表面 (consensus surface) と呼ぶ、それらの表面のうちで最も近いものを符号付距離として計算する(図3)、

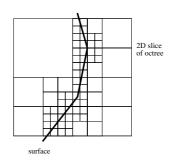


図 4: 空間を octree で分割した様子 . 表面付近では解像度が高く , その他の領域では低い .

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ればよい.Wheelerの手法ではoctreeを用いてボクセルを再帰的に分割する.符号付距離の大きさを調べることにより,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¹.表面を含むボクセルの解像度は等しいので(図 4),MC[9]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.

2.3 アルゴリズム

まとめると合致表面法の手順は以下のようになる.

- 1. 空間に全ての距離データ点を内包する十分大きなボクセルを設定する.
- 2. 注目しているボクセル中心から各距離データ に対して最近傍点を探索し,符号付距離を計算
- 3. 各距離データの最近傍点から,その他の距離 データの最も近い点を探索し,その距離と面 素の法線方向を比較する(合致度の計算).
- 4. 符号付距離の絶対値が現時点のボクセルの大きさから決定される閾値以下であれば, そのボクセルを8分割する. そうでなければ, 符号付距離をボクセルに割り当てて終了する.
- 2,3,4 を分割されるボクセルがなくなるまで繰り返す。
- 6. 分割終了後, 隣り合う8個のボクセルに MC を 適用してメッシュを生成する.

¹詳細は [15, 16] を参照されたい



図 5: LRS 値を輝度値であらわした鎌倉大仏の画像.

光学的情報付き合致表面法 3

本節では合致表面法の枠組みの中で,形状の統合 に加えてレンジファインダによって得られる光学情報 について同時に統合する手法を提案する. レーザレン ジファインダは観測対象に向かってレーザを発射し、 その反射光を受け取って距離を計測するので,発射 光と反射光の強さの比が各3次元点において得られ る.この距離画像がもつ付加的な特徴量を LRS(laser reflectance strength) と呼ぶことにする. レーザ光は ほとんど単一の,非常に幅の狭い波長の光であると 見なせるので,その反射の挙動は一般的な反射と同 ーであると考えてよい.すなわち,拡散反射のよう な全方向への反射と,鏡面反射のような完全鏡面方 向のみへの反射に分けられる.完全鏡面方向への反 射はレンジセンサから多くの場合観測できないと考 えられるので、センサによって観測された反射光は 拡散反射によるものだと見なせる、図5は各3次元 点に与えられた LRS 値を示している . LRS 値は視点 位置に依存しないと見なせるが、多少視点位置に影 響を受ける[12].

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 をとったように,LRS値についても合致をとる.LRS 値の場合では単純に,符号付距離を計算したボクセ ルから最近傍の合致表面を構成する距離画像の LRS 値の中央値をとることにする.十分様々な方向から 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 6).

LRS 値をもった 3 次元モデルの応用の 1 つとして, 2次元-3次元ロバスト位置姿勢推定法[8]が考えら れる. 重さが 20kg 程度ある距離計測センサ [5] に対 して、テクスチャを計測するためのカメラは小型で あるので比較的自由な位置からの観測が可能である. 符号付距離を計算するには,全ての観測で得られた

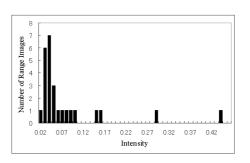


図 6: 合致をとった点における LRS 値のヒストグラムの 例. 鏡面反射による外れ値が見受けられる. この例では中 央値は 0.04.

したがって、あらかじめ距離センサとカメラの相対 位置をキャリブレーションしておく方法ではなく,取 得した距離データとカメラ画像を位置合わせする2 次元-3次元ロバスト位置姿勢推定法 [8] が有効であ る.この手法では2次元画像と3次元モデルの位置 合わせをおこなう、従来は2次元画像のエッジと、3 次元モデルのオクルーディングエッジを比較に用い ていた[15]が,距離画像を計測した際に得たテクス チャ輝度値の3次元エッジを利用してロバストに位 置推定をおこなう.

符号付距離の並列計算

文化遺産のひとつの例として鎌倉大仏の距離画像 を計測し、これまでに開発した統合処理アルゴリズ ムを用いて大仏の全距離画像の統合を試みたところ、 データ量が莫大であるため通常の計算機ではメモリ 量の制約から計算が実行できないことがわかった.そ こで大量のデータを高速に処理するために , PC クラ スタを構築し,統合処理アルゴリズムを PC クラスタ 上で動作させる並列化アルゴリズムを開発した、開 発した並列化アルゴリズムは以下の2つの手法から なる.

- 1. 距離データの分散配置と最近傍点の並列探索
- 2. 分割,探索処理の並列化

距離データの分散配置と最近傍点の並 列探索

2.3 における手順2で, あるボクセルに蓄えられる

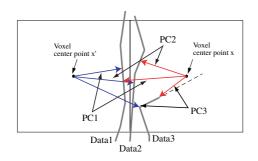


図 7: 符号付距離の並列計算の例

距離画像点とそのボクセルの中心位置との距離を求め、最も近い距離を選択する必要がある.このため各距離画像に大量のデータが含まれ、さらに距離画像自体の数も多い場合には、単一プロセッサで全ての距離情報を保持するのは困難となる.そこで本アルゴリズムでは、これらの距離データ点の情報を複数台の PC に分散し、並列的に符号付距離を計算することにした.具体的には、手順2の代わりに、

2. 最近傍点の符号付距離の計算

- (2-1) 各 PC に距離データを分散配置する.
- (2-2) 各 PC はそれぞれが保持しているデータの中から最近傍点を探索し,各 PC の探索終了後にそれらを比較してデータ全体での最近傍距離データ点を求める.

となる . 図 7 に一例を示す . データ 1,2,3 が PC1,2,3 にそれぞれ保持されている場合 , 点 x からデータ 1 への符号付距離は PC1 により計算され , 同様にデータ 2 までの距離は PC2 により求められる . これらの計算はお互いに独立であるから並列化処理が可能である .

4.2 分割,探索処理の並列化

手順4でボクセルを分割した後,生成された新たなボクセルにおける符号付距離の計算やボクセルの再分割などの一連の処理は,同時に分割されたそれぞれのボクセルの計算とは無関係に独立に行うことができる.そこで図8に示すように,分割されたボクセルのその後処理をそれぞれ別のPCに割り当て,並列処理を行った.この処理では他のPCと同期を取る必要がなく,PCの台数が多いほど少ない計算時間で実行できる.具体的には手順4を以下のように変更する.

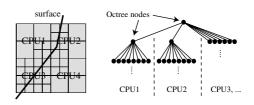


図 8: octree の部分空間を各 PC へ割り当て,各部分木を並列に探索する.

4. ボクセルの分割

(4-1) 符号付距離の絶対値が現時点のボクセルの大きさから決定される,あるしきい値以上であれば,そのボクセルを8分割する.しきい値以下であれば,符号付距離をボクセルに割り当てて終了する.

(4-2) 分割したボクセルのそれ以降の処理を各PC に割り振り, それぞれのPCで2,3を繰り返す新たなプロセスを実行する.

4.3 並列化手法の統合

符号付距離の計算は「分割、探索処理の並列化」で分割されたそれぞれのプロセスで非同期的に発生するので、処理効率を高めるにはこの符号付距離の計算を各プロセスが独立して実行する必要がある。そこで「分割、探索処理の並列化」プロセス1つといくつかの「距離データの分散配置と最近傍点の並列探索」プロセスからなるグループを構成し、そのプロセスのグループを各PCに割り当てる。1つのグループに含まれる「距離データの分散配置と最近傍点の並列探索」プロセスの数は距離データ量に応じて変わる。

現在の実装では32ビットアドレッシングによる制約から,各プロセスが持つことのできるメモリ量は約2GB程度であるので各並列探索プロセスが担当するデータ量がそれを超えないようにプロセス数を増やす.実メモリ以上のデータ量の場合には,実メモリに置くデータのワーキングセットの管理が必要になるが,現在の実装ではOSのメモリマッピング機能を利用している.

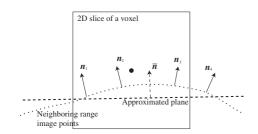


図 9: 主成分分析によって近傍の距離画像を平面に近似し、 法線ベクトル \bar{n} を計算する. 近似された法線ベクトルはボクセル分割の決定に利用する

5 適応的な解像度による統合

元の合致表面法は 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.

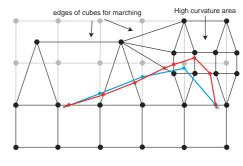
5.1 幾何的特徴に基づいたボクセル分割

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.本論文では表面の曲率を用いることにする.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,計算量を減らしつつ,計算機資源を有効利用して複雑な形状の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.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.そこで,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 9). 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.

5.2 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.ボクセルの分割が幾何的特徴のみについて



2D slice of adaptive octree

図 10: 適応的な octree において隣接するボクセルをつないだ例 . 空間は立方体や四角錘などの形状に分割される . これらの形状は立方体が縮退 , 変形したものあると見なせるので , MC を適用するために必要な表を新しく作成する必要はない . 適応的にボクセル分割をしない場合 (灰色の格子) には立方体の格子上に頂点をもつメッシュ(青) が生成され , 適応的にボクセル分割をした場合には立方体が変形した形状の境界部分に頂点をもつメッシュ(赤) が生成される .

分割が決定される場合やどの特徴も考慮しない場合には、生成されたモデルのテクスチャは平滑化されてしまう可能性がある。2次元-3次元ロバスト位置姿勢推定法[8]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、正確に計算することができない。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。

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.

5.3 適応的な octree のための marching cubes algorithm

元の MC 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.本論文では上述の手法で生成した適応的な解像度のボクセルに対して適用するためにアルゴリズムを拡張する.

隣接するボクセルのサイズが同一の場合には,MC を適用する立方体の各頂点は隣接する8つのボクセルの中央の点である.ボクセルのサイズが異なる場

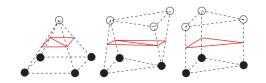


図 11: 縮退した立方体に対して MC を適用した例.

合にも同様に,隣接するボクセルの中央の点をつな いで得られた四角錘やその他の形状に対して MC を 適用する . 図 10 は適応的な octree の隣接するボク セルをつないだ例の2次元断面図を示している.こ れらの形状は立方体が縮退,変形したものであると 考えることにより,元の MC をそのまま適用できる. 適応的にボクセル分割をしない場合(灰色の格子)に は立方体の格子上に頂点をもつメッシュ(青)が生成 され、適応的にボクセル分割をした場合には立方体 が変形した形状の境界部分に頂点をもつメッシュ(赤) が生成される.曲率が高い部分のボクセルを細かく 分割することにより,効率的に正確なメッシュモデル の生成が可能である.縮退した立方体に対して MC を適用した例を図11に示す.MCを適用すると立方 体の頂点の数が減ることによって生成される三角形 の頂点の位置が重複する場合が生じる(図 11 右)の で重複を取り除く.

6 実験

このプロジェクトのために 8 台の PC から構成される PC クラスタを構築した.各 PC はデュアル 800MHz PentiumIII プロセサ,1GB メモリからなり,100BASE-TX イーサネットで接続されている.観測対象は図 12 に示した鎌倉大仏,奈良大仏,竜門石仏(中国),アチャナ仏(タイ)である.距離センサとして,主に Cyrax[5] を用いて大規模な観測対象を計測し,細かい形状については Minolta VIVID[11] を用いた.

6.1 並列化統合アルゴリズムの評価

まず鎌倉大仏のデータを用いて本手法の有効性を示す.鎌倉大仏のデータは Cyrax を用いて計測し, LRS 値を付加した距離画像を 16 枚取得した. 各距離画像は約 30 万点, 60 万ポリゴンから構成されて

表 1: 並列探索数を変えて統合処理した場合の計算時間

# of Traversals	Computation Time	
1	945 min.	
2	450 min.	
4	227 min.	
8	116 min.	
16	61 min.	

いる.

距離データを分散して保持する PC の数と並列に octree の部分木を探索する数を変えて統合アルゴリズムを検証した.その結果を表1に示す.その計算 時間は並列探索数にほぼ反比例しており,提案手法 は計算資源を効率的に利用していることが示された.

6.2 光学的情報付き合致表面法と適応的統 合アルゴリズムの評価

図 16 に 3 つの場合に分けて適用した結果を示す.その結果の統計量を表 2 に示す.モデル A と B , A と C の間でデータ量と正確さを Metro[3] を用いて比較した.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 値の鋭い変化を保っている.

Minolta VIVID は距離画像とともに RGB 画像を取得することができる. 竜門石仏を VIVID によって計測し, 光学的情報として RGB 値を用いて統合処理を行った. その結果を図 13 に示す.

6.3 大規模観測対象のモデリング

奈良大仏,アチャナ仏のデータについては様々な方向から細かい形状まで観測した結果,非常に大量のデータが得られた.奈良大仏のデータは Cyrax を用いて 90 枚の距離画像を取得し,データ量は計約1.3GBとなった.また,アチャナ仏についても同様にCyrax を用いて 176 枚の距離画像(うち大仏部分68枚,壁部分108枚)を取得し,データ量は計約2.5GB(うち大仏 790MB,壁 1.7GB)となった.奈良大仏の距離画像データを統合処理し,720万点,1400万

表 2: 鎌倉大仏のモデルの統計量: 提案する手法によってデータ量と計算量を削減できている. 適応的統合を行わない場合と比較した誤差は大仏の大きさと比べて非常に小さい.

	# of points	Time for Integration	Mean Error
(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

ポリゴンから構成されるモデルを生成した(図 14). 計算時間は約31時間44分であった.また,アチャナ仏の距離画像データを統合処理した結果を図15に示す.大仏のみのモデルは120万点,240万ポリゴンからなり,周囲の壁を加えたモデル全体では計240万点,480万ポリゴンから構成される.

7 おわりに

本論文では文化遺産に多く見られるような巨大な 観測対象の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.問題として観測の難しさと巨大 なデータを扱うということがあり,前者に対しては, テクスチャマッピングに応用するためのモデルを生 成するため,距離画像統合の枠組みの中で光学的情 報付きの3次元モデルを構築する手法を提案した. 後者に対しては巨大なデータを統合処理する手法と して,1.PC クラスタを用いた並列計算,2.データ に応じた適応的な解像度による統合処理という2つ のアプローチを提案した.まず,提案した PC クラ スタを用いた並列計算のアルゴリズムは次の2つの 要素からなる.1.距離画像を各PCに分散して保持 する.2.octree の部分木に分割して並列に探索する. 次に,3次元モデルを観測対象に適した細かさで生 成するアルゴリズムによって,表面の曲率と光学的 情報を考慮することにより、曲率が高い部分や光学 的情報が大きく変化する部分では詳細なモデルを生 成した、そのため計算機資源を有効に利用すること が可能になった.

謝辞

本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進 事業 (CREST) の援助を受けて行われました.鎌倉高











図 12: 上段:鎌倉大仏(左),奈良大仏(右),中段:中 国竜門石仏,下段:アチャナ仏(タイ,スコータイ市)

徳院,奈良東大寺,タイ芸術局,東京文化財研究所の協力によって計測が行われたことに感謝いたします.

参考文献

- [1] D. Bartz and W. Straßer. Parallel construction and isosurface extraction of recursive tree structures. In *Proceedings of WSCG'98*, volume III, Plzen, 1998.
- [2] P.J. Besl and N.D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, 14(2):239–256, Feb 1992.
- [3] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno. Metro: measuring error on simplified surfaces. *Computer Graphics Forum*, 17(2):167–174, June 1998.
- [4] Brian Curless and Marc Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Proc. SIGGRAPH'96*, pages 303–312. ACM, 1996.
- [5] http://www.cyra.com.
- [6] Jerome H. Friedman, Jon Bentley, and Raphael Finkel. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. ACM Transactions on Mathematical Software, 3(3):209–226, 1977.
- [7] A. Hilton, A.J. Stoddart, J. Illingworth, and T. Windeatt. Reliable surface reconstruction from multiple range images. In *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, pages 117–126, Springer-Verlag, 1996.
- [8] 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*, volume 1, pages 99–106, January 2002.



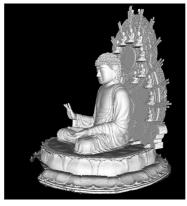
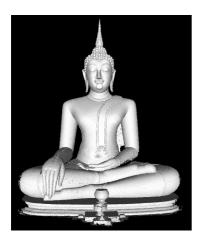
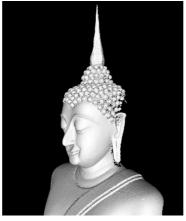




図 14: 統合処理によって生成された奈良大仏のモデル





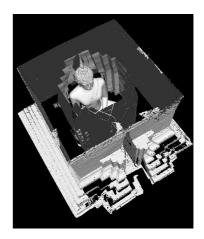


図 15: 生成されたアチャナ仏とその周囲の壁のモデル

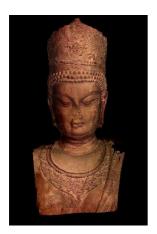




図 13: 竜門石仏: 光学的情報として RGB 値を用いた統合 処理結果

- [9] W. Lorensen and H. Cline. Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm. In *Proc. SIG-GRAPH'87*, pages 163–170. ACM, 1987.
- [10] P. Mackerras. A fast parallel marching-cubes implementation on the fujitsu ap 1000. Technical report, Australian National University, TR-CS-92-10, 1992.
- [11] Minolta. Vivid 900 non-contact digitizer. http://www.minoltausa.com/vivid/.
- [12] S.K. Nayar and M. Oren. Generalization of the lambertian model and implications for machine vision. *Interna*tional Journal of Computer Vision, 14:227–251, 1995.
- [13] K. Nishino and K. Ikeuchi. Robust simultaneous registration of multiple range images. In *Proc. of Fifth Asian Conference on Computer Vision ACCV '02*, pages 454–461, Jan. 2002.
- [14] K. Pulli. Multiview registration for large data sets. In *Second Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, pages 160–168, Oct 1999.
- [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.

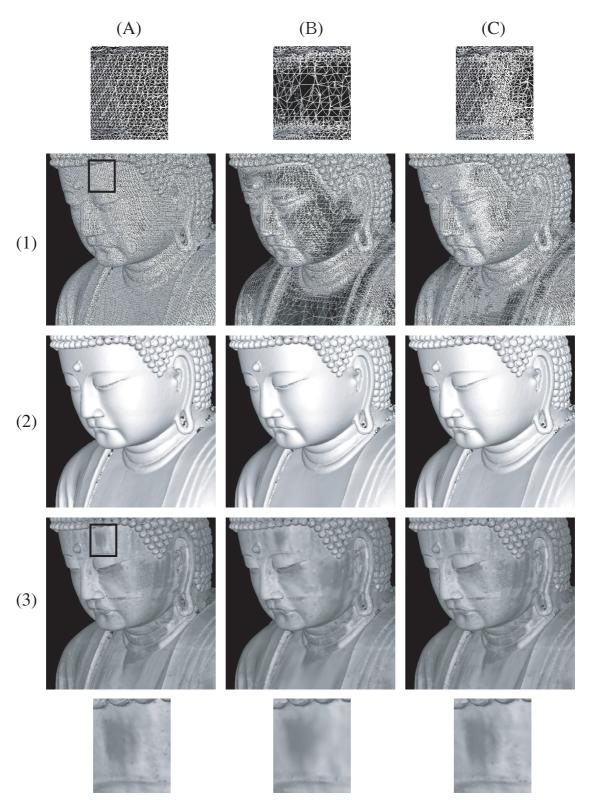


図 16: 鎌倉大仏の統合結果: 列 A,B,C はそれぞれ,適応的統合を行わなかった場合,曲率のみを考慮した場合,曲率と LRS 値の両方を考慮した場合である.行 1,2,3 はそれぞれ,ワイヤフレーム表示,面表示,LRS 値を輝度値として表示した場合である.最上段,最下段は枠で囲まれた大仏の額部分の拡大図である.