

## 1.1.2 有形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発

### (a) 大型有形文化財のデジタル化

東京大学池内研究室では、距離センサやカラーカメラを用いて実物体の3次元形状・色彩モデルを自動的に取得する技術を開発している。本プロジェクトでは100m以上の大型有形文化財を対象として、従来法に比して高速、高精度かつ大容量データを扱うことが可能なソフトウェア群の開発を目的としている。

実物体デジタル化の基本要素と手順を示すと図19のようになる。幾何形状のデジタル化では、まず距離センサを利用して各種の方向から距離画像を取得する。次に位置あわせ処理を行うソフトウェアを用いて、これらの距離画像間の位置関係を決定する。最後に統合処理を行うソフトウェアにより、これらのデータを繋ぎ合わせて対象の幾何形状を現す一元化されたメッシュデータを得る。一方、光学デジタル化では取得したカラー画像から太陽光の影響を除去し、物体色（反射特性）を推定する処理を行う。処理された色彩画像と距離画像の相対関係を得ることで、光学情報データを形状データの上に貼り合わせる。さらに任意光源下でリライトをおこなうことで最終的な見えの表示が可能である。



図19 大型有形文化財デジタル化の手順

平成16年度にはデータ取得のためのレーザレンジセンサの設計と製作、PCクラスタ環境の整備、3次元表示装置の整備といった基盤整備と、大規模データのための高速・高精度位置合わせ手法の開発を行った。また整備したPCクラスタ上では付加分散・データ分散を考慮した並列同時位置合わせ手法を開発した。この手法により大容量の距離画像を大量に高速・高精度に位置合わせを行うことが可能となった。

平成17年度は部分形状データの高精度化、歪み補正、統合手法や穴埋め手法の開発を行った。また取得した大規模3次元形状データの表示手法の開発を行った。さら

に得られた3次元モデルに、カラーカメラによって撮影された色彩画像を貼り付ける手法の開発も進めている。

以下では平成16年度及び平成17年度に開発した項目の概要をそれぞれ説明していく。

## (b) 大型有形文化財の高精度デジタル化技術の概要

### 【1】部分3次元データの取得

平成16年度には、市販センサでは計測不可能な箇所のデータ取得のために50Mレンジ空中移動型レンジセンサと狭隘部用移動はしごセンサという2つの異なる形式のレンジセンサを新たに開発した。

#### ■ 50Mレンジ空中移動型レンジセンサ

50Mレンジ空中移動型レンジセンサは、屋外大型有形文化財の計測に使われるものである。一般にある物体の3次元データを取得するためには、その物体をレーザセンサで計測することが精度も信頼性も高い結果が得られると知られている。この時、レーザには直進性があるため、物体の表面に対してすべての方向からレーザを照射したデータを取得しなければ完全な3次元形状が得られないことに注意する。特に、屋外大型有形文化財の3次元データを取得するためには、その物体の上方からもレーザを照射する必要がある。従来は、対象物体より高い足場を組むといった方法で解決していたが、センサ位置が限定されるといった問題がある。本研究では、気球からセンサを吊るすことで解決を図る(図20)。気球にした理由はその運動が比較的low周波の低速運動のため、短時間で計測すれば、気球の運動は線形運動で近似できると期待されるからである。以下に50Mレンジ空中移動レンジセンサのスペックを示す。

- バルーン部
  - ◇ 直径: 4.5 m
  - ◇ ヘリウムガス
  - ◇ 最大浮力: 46 Kg
- レーザスキャナ部
  - 重量: 21.2 kg (コントロール PC と IF ボックス: 16kg は除く)
  - 外形寸法: 27 x 53 x 30 (cm)
  - 計測時間: 1 秒
  - 解像度: 900 \* 160 pixels
  - スポット・レーザレーダ+2D 偏向ミラー
  - レーザレーダユニット : Lara 53500 (Z+F inc.)
- レーザレーダユニット Lara 53500
  - 位相差式レーザレーダ
  - 変調周期: 53.5 m
  - レーザ光源: 32mW, 780nm
  - 直線性エラー: < 5mm
  - 計測レート: 500,000 points / sec

また、本センサは次のような偏向機構を有している。

- 水平スキャン：ポリゴンミラー (2,400 rpm)
- 垂直スキャン：平面ミラー (1 往復 2 秒)

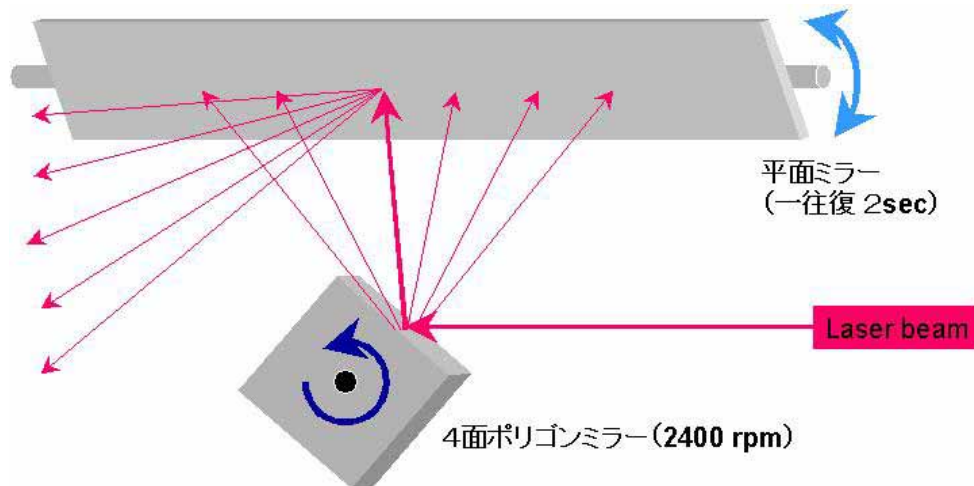


図 2 0 空中移動型センサの偏光機構

なおレーザセンサには、反射光との位相差を利用して対象物体までの距離を測るいわゆる **time of phase** システムである。

図 2 1 は、50Mレンジ空中移動型レンジセンサのテストを行っている様子である。平成16年12月のテストの結果、ミラーに汚れがあることが判明しミラーの交換を行った。このセンサを用いる事により今までは困難であった高所から大型有形文化財を計測する事が可能となった。



図 2 1 50Mレンジ空中移動型レンジセンサ

## ■ 狭隘部計測用はしごセンサ

狭隘部計測用はしごセンサは、従来のレーザレンジセンサでは、不可能であった垂直方向に長い狭隘部の計測を可能にするセンサである。この狭隘部用はしごセンサの設計・製作を平成16年度に行った。このセンサは伸縮式のはしご上をモータにより垂直に移動するプラットホームからなり、その上に2台のラインレーザスキャナが直行するように設置されている（図22）。第一のラインセンサは、水平方向にラインを描き、画角内の計測対象の距離データを収集する。第二のラインセンサは、垂直方向にラインを描き、画角内にはしごのステップ部を含むことより、2つのセンサを含む移動機構の移動速度を得るために用いられる。2番目のラインセンサは、センサの移動速度がはしごの設置条件により変化するため必要となる。この速度を推定する新手法として時空間距離画像を考案した。これは垂直方向のスキャン結果を時間軸に沿って水平方向に並べたものであり、そのエッジを検出することによりセンサの移動速度は容易かつ安定に得ることが可能である。

このセンサのスペックを以下に示す。

- 伸縮はしご部
  - 最大長: 4.5 m
  - 最短長: 1.2 m
  - 最大速度: 25 m/min
- レーザスキャナ部（水平・垂直方向各1）
  - 重量: 4.5kg
  - 外形寸法: 155 x 210 x 156 mm (WxHxL)
  - 最大角度解像度: 0.5°
  - 計測時間: 26.7 ms/line（最大解像度時）
  - スポット・レーザレーダ LMS200 (Sick 社)

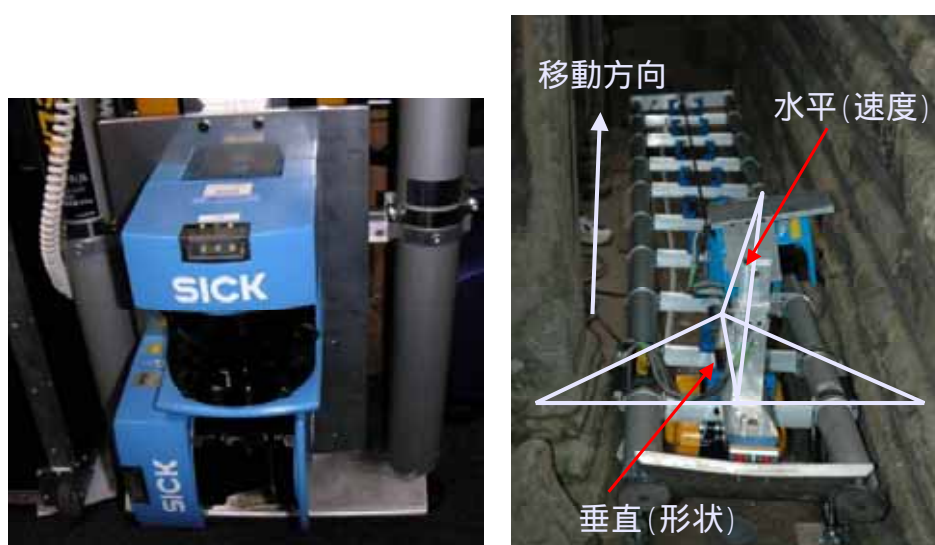


図22 狭隘部用はしごセンサ

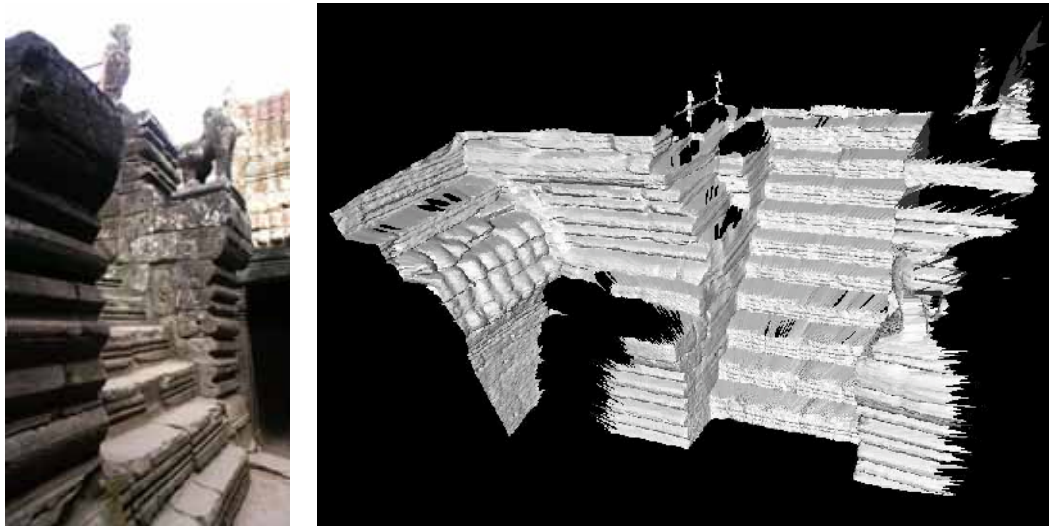


図 2 3 はしごセンサによって得られた形状データ

このはしごセンサの原理は次のようなものである。ラインスキャンセンサ 1 台を図のように設置して、水平方向にセンサが移動する。ただし、このままではセンサが等速直線運動をするという仮定をおかない限り、水平方向の正確な大きさがわからない。そこでもう一台水平方向にスキャンを行うセンサを用意することで、水平方向の運動を推定する。その結果、必ずしも等速直線運動でない場合でも水平方向の移動量が計算できることとなり、はしごセンサによる物体計測が可能となる。

このセンサによって計測した例を図 2 3 に示す。このはしごセンサによって今までは計測不可能であった狭い場所でもはしごセンサの入る隙間だけがあれば、対象物体の正面からの形状データを取得できる。

## 【 2 】部分形状データの位置合わせ

レンジセンサによって得られた多数の距離画像を、高速・高精度に位置合わせ可能な同時位置合わせ手法を開発した。また大容量データを扱うために PC クラスタ上で並列同時位置合わせ手法を実装した。さらに移動型レンジセンサから得られた形状データの歪み補正と位置合わせを同時に行うパラメータつき同時位置合わせ手法の開発を行った。

### 高精度位置合わせアルゴリズムの開発

レンジセンサによって得られる距離画像は例えば次に示す図 2 4 のようなものである。この計測対象は奈良大仏であるが、上部の距離画像は、センサを大仏様の正面、下側に置き、正面の距離画像を取得し、その計測データを大仏様の正面やや情報の視点から眺めたものである。下部の距離画像は、センサを大仏様の正面に向かってやや左側下側に置き、そこから大仏様の正面方向の距離画像を取得したものを、やはり大仏様の正面やや上方の視点から眺めたものである。

これらの図からわかるように、光の直進性のため、ただ 1 度の計測だけでは、その計測点から見ることで見ることのできる物体の一部の形状しか計測することができない。したがって、必然的に複数の距離画像を取得し、かつ、それら距離画像を正確に位置合わせ

しなければ、物体全体の幾何形状の再現は行うことができない。この事情は、レーザセンサでなくとも、ステレオ手法のようなカメラを使う場合でも同じ問題が発生する。すなわち、ただ一度の計測では、計測対象物体の一部のデータしか得られないのである。対象が大型有形文化財となれば、必要な計測数も大きくなり、多数のこうした距離画像の位置合わせが必要となる。

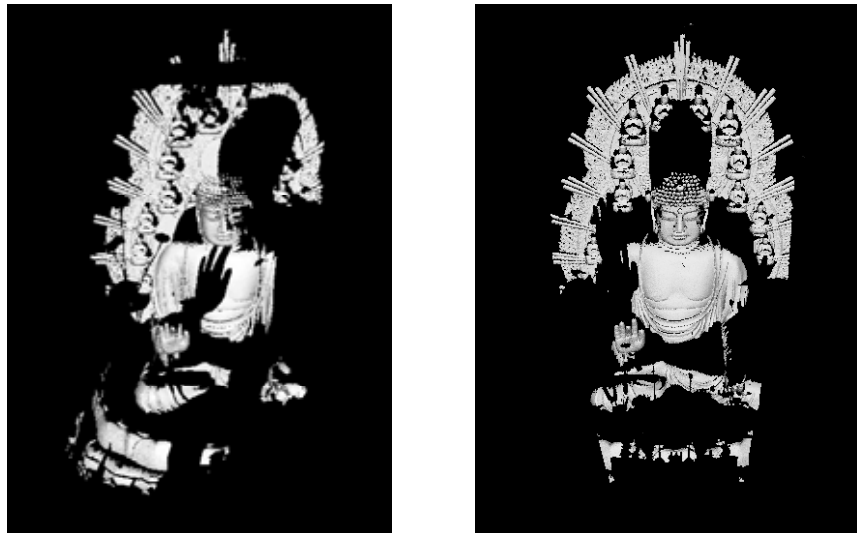


図 2 4 部分形状を表す距離画像（奈良大仏）

従来手法であるICP（Iterative Closest Point）[1]を基本とした、ペアワイズな位置合わせ手法（すなわち、距離画像を1枚ずつ次々と位置合わせを行う手法）を用いた場合、多数の距離画像を順次位置合わせしていくと誤差の蓄積が生じてしまう。つまり、距離画像枚数が多くなるに従って位置合わせ精度は低くなっていくという問題点がある。また、大型有形文化財のように、複数の距離画像で周囲を計測する場合、1枚ずつ合わせていく手法では、最後に1周する部分で誤差のためにきちんと合わないおそれがある。そのため、全ての距離画像間の相対位置姿勢を同時に推定する手法（同時位置合わせ手法）を開発する必要がある。図 2 5 に両手法の違いを表す概念図を示す。図中の番号が位置合わせの順番を示す。左のようにペアワイズで位置合わせを行うと最後に合わせる？の部分で誤差の蓄積により位置合わせに大きな誤差がおきる可能性がある。しかしながら、右のように一度にすべての距離画像の位置合わせを行えば、こうした一部に誤差が蓄積するような事態をさけることができる。

当然ながら、同時位置合わせ手法は、1枚ずつ合わせる手法とは違い、すべての距離画像を一度に必要とするため、多くの計算機のリソースを必要とする。これは大型有形文化財の幾何モデルを生成する上で避けて通れない問題である。

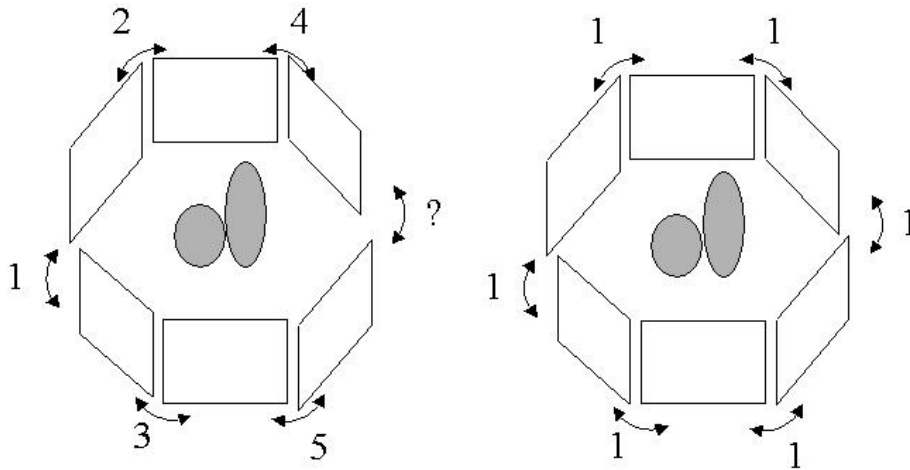


図 2.5 位置合わせ手法の概念図 (左：ペアワイズ、右：同時位置合わせ)

これまでに、いくつかの同時位置合わせ手法が提案されているが、計算時間やメモリ使用量の問題から500枚～1000枚といった多数の距離画像を扱う事はできなかった。そこで東京大学池内研究室では、これらの問題を考慮して多数の距離画像を同時位置合わせ可能な手法を開発した。

位置合わせ計算で最も問題となるのは距離画像間の対応点探索である。図 2.6 に対応点探索の概念を示す。

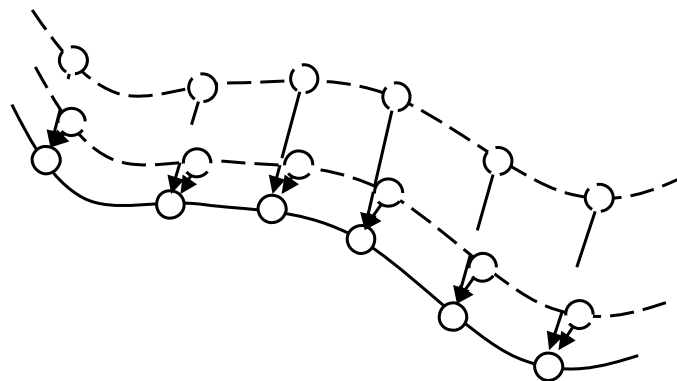


図 2.6 対応点探索と位置合わせの概念

この図では2次元の距離画像ではなく、その断面（あるいは1次元の距離画像）の場合を例にとっている。破線と実線がそれぞれ1枚の距離画像に対応する。同じ場所を計測したと思われる2枚の距離画像に対して、初期の位置合わせ（破線上部）が与えられたときに、その距離画像の各点に対して、もう一方の距離画像（実線部分）から対応点を選択することが本質的である。一旦この対応関係がわかれば、図に示すように、初期位置の距離画像をどのように動かせばより適切であるかが計算できる。図では、下部の破線の位置に動かすとより正確に位置合わせができることがわかる。したがって、正確な位置合わせ手法とは、2枚の距離画像間での適切な対応点を求める問題に帰着されるのである。

従来手法であるICPの対応点探索の計算量は、2枚の距離画像に含まれる頂点数を等

しく $n$ とした場合に、 $O(n^2)$ である。また、高速化を行うためには、探索木 (Kd-tree) や参照テーブルなどに多くのメモリ空間が必要である。

そこで、距離画像の各メッシュを特有な色で描画する事で得られる2次元画像 (インデックス画像) を用いて、計算量 $O(n)$ で対応点探索を行う手法を開発した。本手法はグラフィックスハードウェアを用いる事で、より高速な計算が可能となり、且つ少ないメモリ使用量で実行可能である。全ての距離画像の位置姿勢を推定するためには、線形化した誤差評価式を用いる。また、不完全コレスキー分解共役勾配法 (ICCG) を適用する事によって、多数の距離画像に対しても短時間で計算する事が可能となる。

人工データを用いた実験では、高さ13mの建造物から取得した3次元モデルから、50枚の距離画像を人工的に生成し、これらを本手法によって同時位置合わせした。この実験では、位置合わせによる平均誤差は1mm程度である事を確認した。

今後は実データの精度評価を行っていく予定である。500枚以上の距離画像を同時位置合わせした場合に、人工データで行った実験と同様に高い精度が得られるかが問題である。また、実データの位置合わせ精度を評価する方法についても検討する必要がある。

#### ■高精度位置あわせアルゴリズムの並列・高速化

データのサイズが数百メガ~数ギガバイト、もしくはそれ以上のサイズの大規模モデルを現実的な時間で処理するために、PCクラスタシステムを構築しこれを用いた並列同時位置合わせソフトウェアを開発した。前項で説明した同時位置合わせ手法はGPU (Graphics Processing Unit) の機能を利用するようアルゴリズムを工夫することで、従来の手法 (3DTM) に比べて10~20倍程度の時間効率が得られる。この手法を更に高速化するために並列手法の開発を行った。また同時にデータ分散も考慮する事によって、この手法では多数の距離画像を実メモリ上で扱うことが可能である。

対応点探索及び誤差計算を2枚の距離画像の組合せごとに各プロセッサに割当てて並列計算を行う。計算時間・メモリ空間を最も必要とする対応点探索及び誤差計算は、2枚の距離画像ごとに独立に行われる。そこで2枚の距離画像の組合せを複数のスレーブプロセッサに割当て、これらの計算を並列に処理する。移動行列の計算は全ての距離画像間の誤差を用いる必要があり、且つ計算時間・メモリ使用量とも小さい。そこで、この計算は1つのマスタープロセッサによって行う。

負荷分散とデータ分散を同時に実現するために、グラフ分割の手法を用いて組合せの割当て方を求める。各距離画像間の接続関係をハイパーグラフによって定義し、頂点数からノードとネットの重みを与える。そして、分割後の部分グラフに含まれるノード重みの和とネット重みの和がそれぞれ均等、最小となるように全体グラフを分割する。各スレーブプロセッサには、各部分グラフに含まれる距離画像の組合せが割当てられる。

提案した手法の有効性を確認するために、16プロセッサのPCクラスタを用いて多数の距離画像に対して同時位置合わせ実験を行った。50枚の人工データでは、16並列時に1プロセッサに比べて11.5倍の計算時間効率が得られた。また、各プロセッサで使われる最大メモリ量も17%まで減少させる事が可能になった。



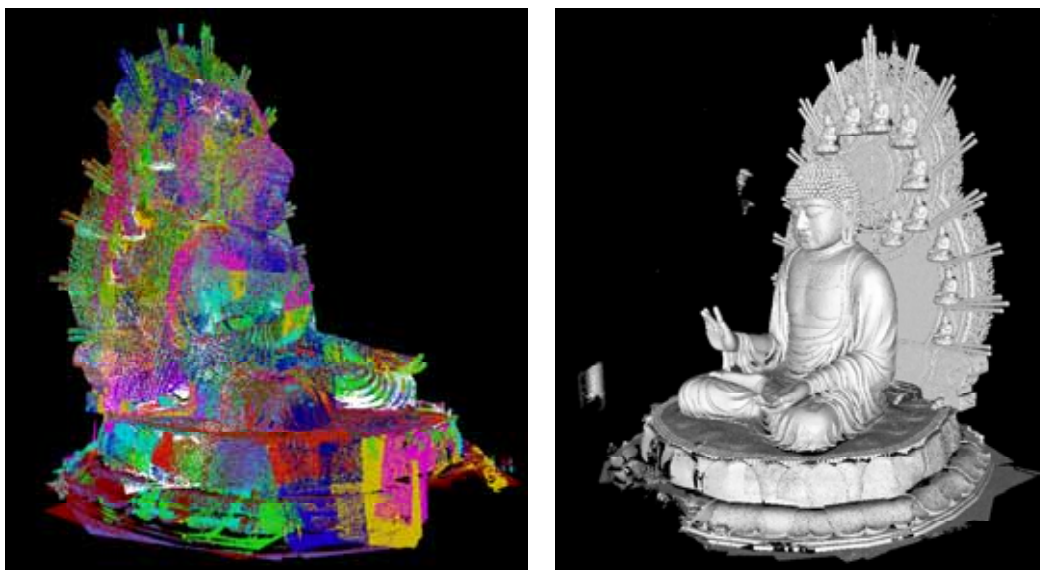


図 2.7 同時位置合わせ結果

実データでは、114枚の距離画像の同時位置合わせを行った。図 2.7 に同時位置合わせを行った結果を示す。今後は、更に多くの距離画像に対して実験を行う予定である。また本手法は500枚以上の距離画像に対しても問題無く適用できると考えられる。

#### 大規模データのためのパラメータつき位置合わせ手法の開発

気球搭載型レーザレンジセンサから得られた距離画像の位置合わせ及び歪み補正を同時に行う手法を開発した。昨年度開発した気球搭載型レーザレンジセンサは1秒間に900 x 160点の計測を行う事が可能な高速レンジセンサである。しかし計測中のセンサの動きに起因して、得られる距離画像には少なからず歪みが生じてしまう。我々が開発した手法では、この距離画像の歪みを位置合わせの段階で同時に補正することが可能である。

位置合わせ及び歪み補正は、地上から計測された距離画像を参照画像として行う(図 2.8)。地上からの計測は安定した状態で長時間掛けて行うため、得られた距離画像の精度は高く歪みを含んでいない。地上から計測された距離画像と、気球センサから得られた距離画像間に十分な重なりがある場合、この重なり領域の形状から相対位置の推定及び歪み補正を行う事が可能である。

求めるパラメータは、通常回転・平行移動に加えて歪みを表すパラメータである。計測中のセンサの移動は非常に滑らかであると仮定し、計測時間が十分短いものとする。センサの移動は等速直線運動で表わすことができる。移動速度を $\mathbf{v}$ とした場合、距離画像 $\mathbf{x}$ 中の $i$ 番目の点 $\mathbf{x}_i$ の移動量 $\mathbf{g}$ は以下のように定義される。

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}) = \mathbf{x}_i - \Delta\tau_i \mathbf{v} \quad (1)$$

$\Delta\tau_i$ は $\mathbf{x}_i$ を計測したときのスキャン開始時からの時間である。また歪みを補正した際の変形による距離画像の移動量を $(\mathbf{R}_0, \mathbf{t}_0)$ とすると、式(1)は以下ようになる。

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}) = \mathbf{R}_0(\mathbf{x}_i - \Delta\tau_i \mathbf{v}) + \mathbf{t}_0 \quad (2)$$

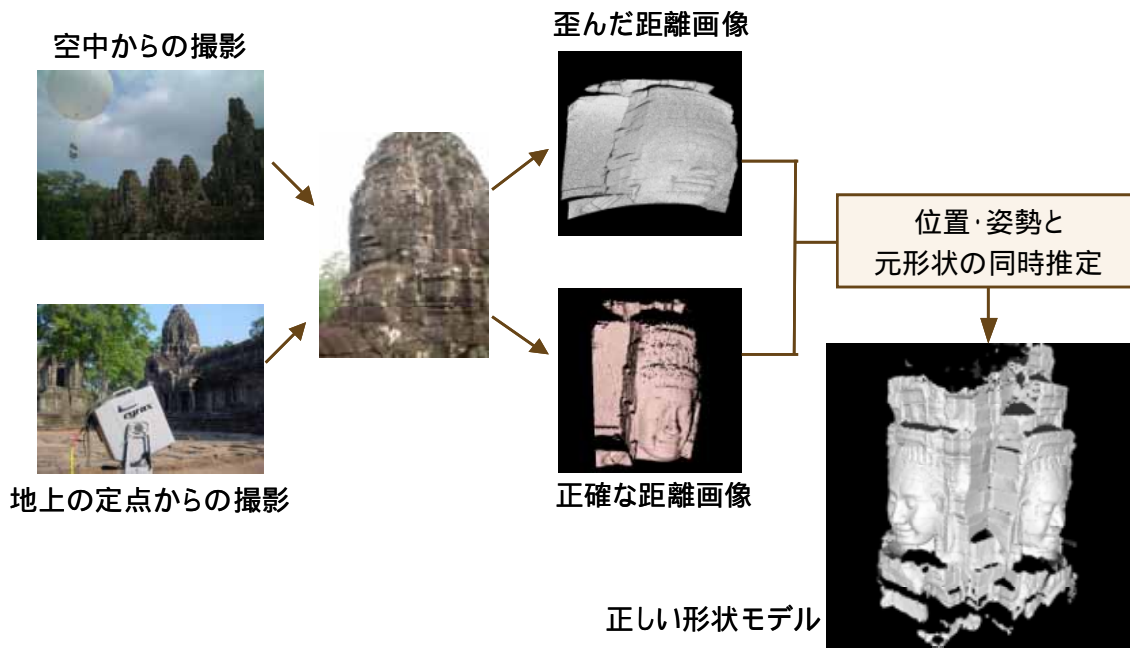


図 2 8 パラメータ付き位置合わせ

これに通常的位置合わせのパラメータ ( $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{t}$ ) を加えると移動後の点  $\mathbf{x}'$  は以下のように表される。

$$\mathbf{x}'_i(\mathbf{p}) = \mathbf{R}\{\mathbf{R}_o(\mathbf{x}_i - \Delta\tau_i\mathbf{v}) + \mathbf{t}_o\} + \mathbf{t} \quad (3)$$

最近傍点を対応点として求め、対応点間誤差が最小となるようなパラメータ  $\mathbf{p}(\mathbf{R}, \mathbf{t}, \mathbf{v})$  を求める事によって、位置合わせ及び歪み補正を同時に行われる。

実験では、実際に気球搭載型レーザレンジセンサから得られた歪みのあるデータを変形位置合わせによって補正を行った。図 2 左は回転・平行移動のみをパラメータとして位置合わせを行った場合であり、図 2 右は歪みパラメータを加えた場合である。これらの図から、本手法によって正しい位置及び形状が同時に得られることが分かる。

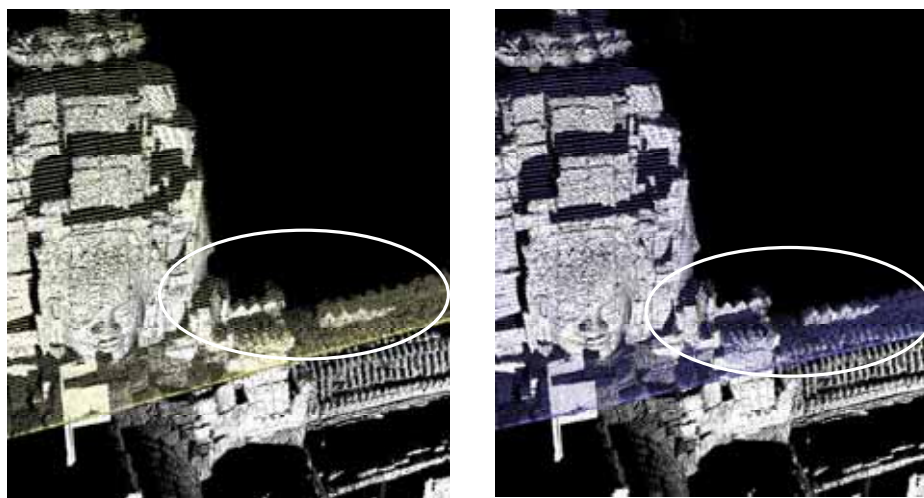


図 2 9 位置合わせ結果  
(左：回転・平行移動，右：回転・平行移動＋歪み)

### 【3】統合

まず部分形状データの計測誤差を除去し高精度化する手法を開発した。そして多数の部分形状データを統合することが可能な適応的統合手法、並列統合手法を開発した。また統合処理の多機能化を図り、未計測部分などを補う穴埋め手法の開発も行った。

#### 大規模距離データの高精度化

レーザレンジセンサによって得られた距離データの計測誤差を補正する手法を開発した。レーザレンジセンサの発達により、実物体の表面形状を非常に高い精度で計測する事が可能となってきた。近距離では光切断法を用いて、**0.1mm**以下の精度で計測が可能である。しかし対象が大規模な場合は、**Time-of-Flight**型のセンサを用いても**50m**の距離で**1cm**程度の誤差は避けられないのが現状である。そのため得られたデータの高精度化は欠かす事ができない。

距離画像の統合処理においてデータの平均化は行われるが、この処理では十分に誤差の軽減は行われない。**Curless**ら[10]は、統合の際に視線方向に重み付き平均を求める事によって、誤差を軽減する処理を行っている。また**Wheeler**らは法線方向を用いて、最も正しい点の推定を行っている。これらの手法ではいずれも対応点の探索を行うが、各距離画像に含まれる頂点は異方向の誤差を持つため、正確な対応点を求める事はできない。つまり推定には少なからず異方向性誤差の影響が含まれてしまう。

そこで我々は反復計算によって計測誤差を補正する手法を開発した。この手法ではレーザレンジセンサによって得られる距離データの誤差が光線方向にのみ分布していると仮定し、この方向に誤差補正をすることによってその精度向上を図る。基準となる距離画像と重なり合う全ての距離画像間の対応点を探索し、それらの対応点間距離が小さくなるように各頂点を光線方向に移動させる。 $i$ 番目の距離画像上の $k$ 番目の頂点 $\mathbf{x}_{ik}$ は、その対応点 $\mathbf{y}_{jk}$ との重み付き平均位置に移動される。

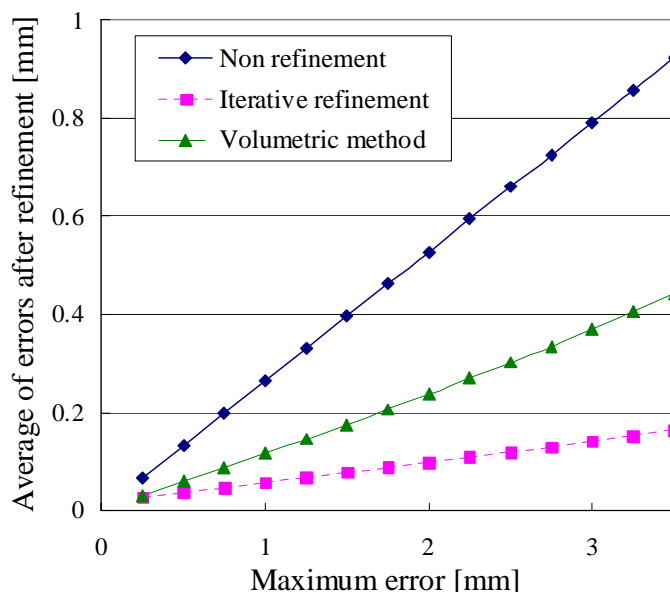


図 3 0 誤差補正結果



図 3 1 Cyrax2400 によって計測した距離画像の誤差補正結果  
(左：補正なし、右：補正あり)

$$\mathbf{x}'_{ik} = (1-w) \cdot \mathbf{x}_{ik} + w \cdot \frac{1}{n_{ik}} \sum_{i \neq j} \mathbf{y}_{jk} \quad (4)$$

$n_{ik}$  はモデル画像上の頂点に対して得られた対応点数である。 $w$  は重みであり実験では0.5とした。反復計算により徐々に誤差を減少させることによって、各頂点のより正確な位置を推定する事が可能である。

実験では、人工的に距離画像を生成し、Curless らの手法と比較して誤差が十分補正できる事を示した (図 3 0)。また実際に Time-of-Flight 型レーザレンジセンサ Cyrax2400 によって計測した距離画像に、本手法を適用する事によって、誤差が十分に軽減できる事が分かった (図 3 1)。

#### 大規模位置合わせデータの統合処理ソフトウェアの開発

多数の位置合わせされた距離画像から一元化されたメッシュモデルを生成する統合処理ソフトウェアの開発を行った。大規模なデータを統合する場合は、計算時間やメモリ使用量の増加が大きな問題となる。そこで我々は適応的アルゴリズムと、PCクラスタを用いた並列統合手法を開発した。

基本となる統合手法にはボリユメトリックな手法を用いた[11]。ある空間を複数のボクセルに分割し、各ボクセル中心からの符号付距離場 (Signed Distance Field: SDF) によって全ての距離画像を一元的な陰関数によって表現する。この際、法線方向を用いて合致を取る事により、エッジ付近での不整合を減少させる事ができる。SDFによって表された物体の表面形状は、マーチングキューブアルゴリズム[12]によって再びメッシュデータに変換され、一元化されたメッシュデータを得る事ができる。

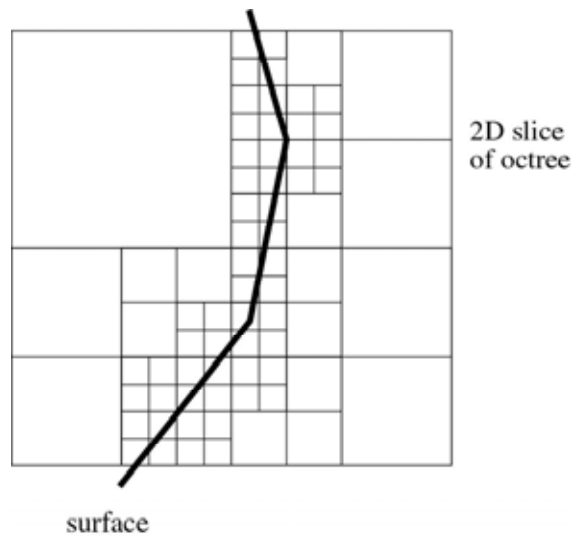


図 3 2 ボクセルの適応的分割

SDFの計算では全ての領域で同じ大きさのボクセルを用いずに、表面の存在領域や表面の幾何学的・光学的特性によって適応的に分割を行う。表面が存在する付近のみ細かく分割するためにOctreeを用いてボクセルを再帰的に分割する。各ボクセルでの符号付距離の大きさを調べるにより、陰関数が0付近のボクセルのみ最も細かい解像度まで分割する。また表面の曲率や模様の複雑さに応じて、適応的にサンプリングする事によって計算量及びメモリ使用量を削減する事が可能である(図32)。

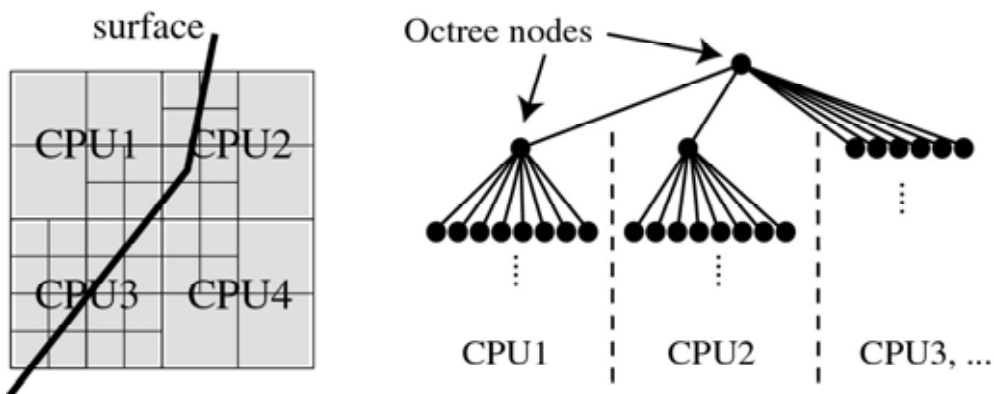


図 3 3 統合処理の並列化

更に計算時間及びメモリ使用量を削減するために、統合処理の並列化を図った。符号付距離の計算やボクセルの再分割などの処理は、同レベルに分割されたボクセルで独立に計算する事ができる。そこで分割されたボクセルにおける処理を、それぞれ異なるPCに割り当てる事によって並列処理を行った(図33)。この処理では他のPCと同期を取る必要がなく、PCの台数が多くなるほど短い計算時間で処理を行う事が可能である。

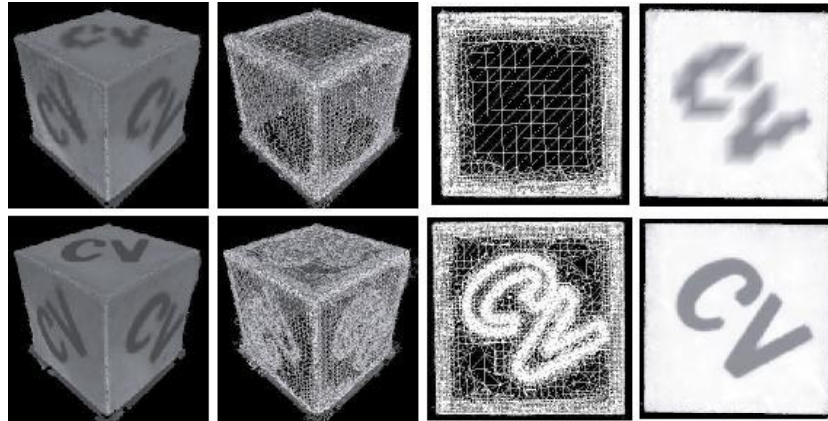


図 3 4 適応的ボクセル分割

物体の表面特性に応じて、適応的にボクセル分割を行った例を図 3 4 に示す。上の列は曲率に応じて分割を行った場合で、平面では粗く、エッジ付近では細かくボクセルが分割されている。また下の列は表面の模様に応じてボクセルを分割した場合で、各頂点に色を載せた場合に、模様がはっきりと見て取れる。



図 3 5 大規模距離画像の統合結果（奈良大仏）

実際に大規模な距離画像を統合した結果を図 3 5 に示す。使用した距離画像枚数は 114 枚であり、総頂点数は 36,299,982 点、総ポリゴン数は 69,162,112 である。このような大規模なデータに対しても、本手法を用いて統合処理を行う事が可能となった。

#### ■ 統合処理ソフトウェアの多機能化

統合手法を拡張して不完全な形状モデルを補完する手法の開発を行った。レンジセンサを用いて現実の物体を計測する際には、観測対象の全ての表面形状が観測できずに、しばしば隠蔽された部分が残ってしまう。またボリューメトリックな統合手法では、形状の曲率が高いエッジ部分のモデル化は困難であり、このような部分は最終モ

デルの欠落部分となってしまいます。そこで統合処理においてこのような欠落部分を補間する手法を開発した。

統合によって得られたSDFの整合性を取る事によって未計測部分などの補間を行う。SDF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、不完全な形状部分やエッジ部分で整合性が取られていない。そこでボクセルが物体の内側か外側かをロバストに決定し、大局的に符号を決定する事によってSDFの整合性を向上させる。整合化したSDFを用いる事によって、補完されたメッシュモデルを生成することができる。

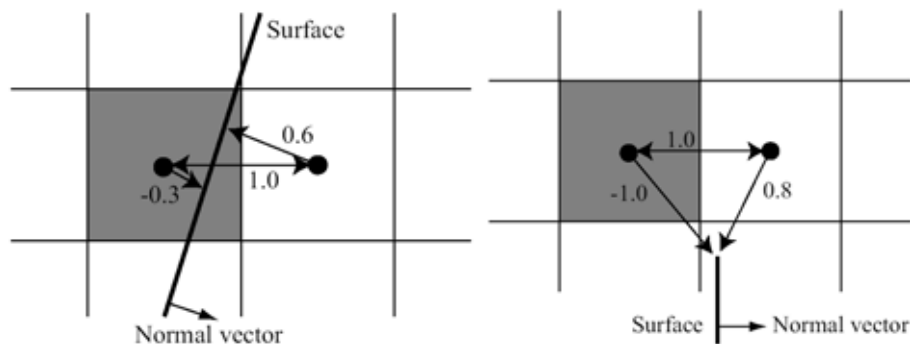


図 3 6 符号付距離場の整合性

整合性を向上させるためには、符号付距離から周囲のボクセルとの整合性を評価し、符号を繰り返し反転させていく。図 3 6 左では隣接するボクセルの符号は異なっており、2つのボクセルの間に0等値面が存在する。つまり、これらのボクセルは整合性をもつ。図 3 6 右 は同様に隣接するボクセルの符号が異なっているが、2つのボクセル間に表面は存在しないため整合性を持たない状態である。二つのボクセル間の整合性は、ボクセル中心間の距離 $D$ と各ボクセルの符号付距離( $d, d'$ )によって評価する事ができる。

$$|d - d'| \geq \alpha D \quad (5)$$

$\alpha$  はユーザ定義のパラメータである。この式が満たされる場合、2つのボクセルは整合性を持たない。周囲のボクセルとの整合性は、以下のような隣接ボクセルの数によって評価する。

$$\left. \begin{array}{l} N_1 : |d - d'| \leq \alpha D \\ N_2 : |d - d'| > \alpha D \end{array} \right\} \text{sgn}(d) \neq \text{sgn}(d') \quad (6)$$

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

これらのボクセル数が以下の条件を満たす場合、そのボクセルは周囲のボクセルと整合性を持たない。

$$N_2 + N_3 > \beta(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \quad (7)$$

整合性を持たないボクセルの符号を繰り返し反転する事によって、整合性が取れたSDFを得る事が可能である。

図37に符号付場の整合性の改善前(上)と改善後(下)の状態と、これらのSDFから生成したメッシュモデルを示す。この図に示されるように、本手法を適用する事によって未計測部分の補間やエッジ部分の詳細なモデル化が可能となった。

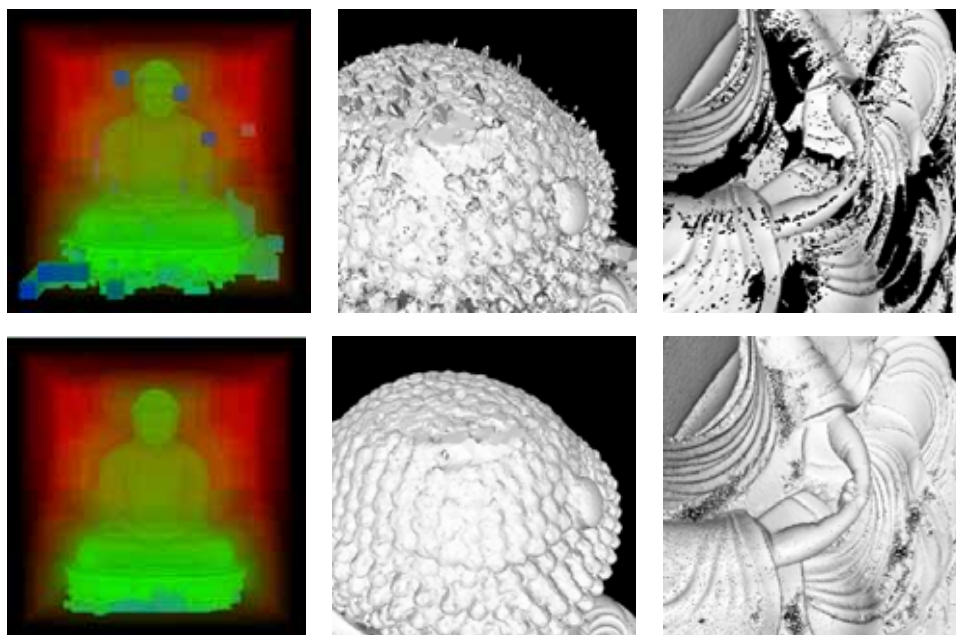


図37 改善されたSDFとメッシュモデル

#### 【4】大規模3次元データの表示

大規模データデバッグ表示のための既存表示環境の整備

平成16年度に大規模データの3次元表示が可能であるVRドームのアップグレードを行った。プロジェクタにはバルコ社製BarcoReality SIM4を採用し、これを3台使い、3面の曲面スクリーンに投影することで臨場感の高い3次元映像環境を作り出すことができる。SIM4は最大解像度1280×1024のプロジェクタであり、主な特徴は次のようなものである：

1. 独自のバイオキュービック補間アルゴリズムを使ったジオメトリ補正技術(Warp6)の採用により曲面スクリーンに対しても精度の高い投射が可能。
2. マルチスクリーン構成においてできる画像の継ぎ目部分を、光フィルタを用いて重複領域の黒レベルを落とすことにより、継ぎ目が滑らかな画像の表示を実現するオプティカル・ソフトエッジ・マッチングを採用。
3. DynaColor (TM) 電子色空間変換によって色彩をマッチさせ、チャンネルによる色の違いをなくすことが可能。
4. 暗いシーンの表示において起こるコントラストの低下を光出力の均一化によって改善し、画像のダイナミックレンジを確保する拡張コントラスト比を用いて



いる。



図 3 8 既存表示環境 (3 面円筒スクリーンと制御機)

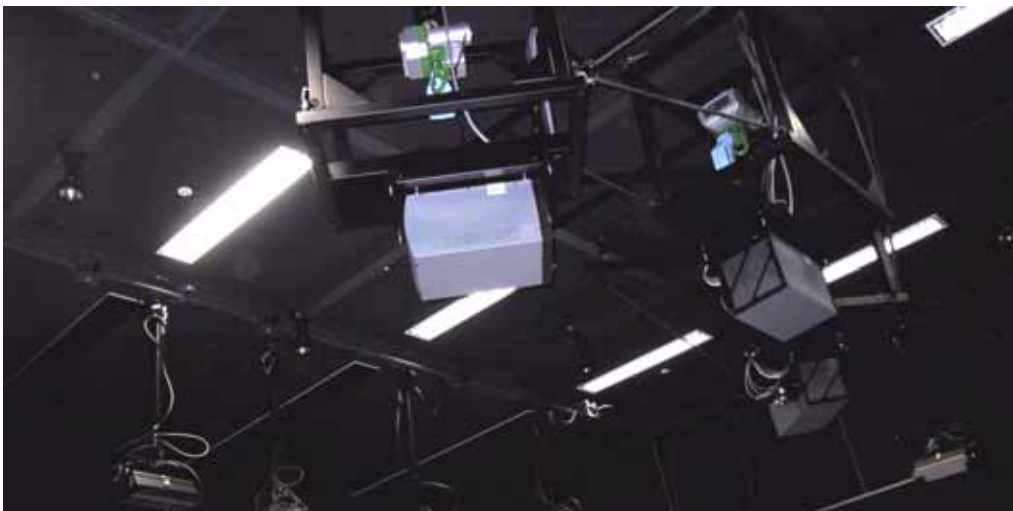


図 3 9 今回整備した SIM4 プロジェクタ (3 台)

以上のような機能を持つプロジェクタの採用により非常に高精細な表示が可能となった。特に、既存の表示系と比べて、曲面スクリーン投影による若干の歪み、複数プロジェクタ間の継ぎ目、プロジェクタの差異による色彩の違い、が低減され、さらに、より大きなダイナミックレンジによる見やすい画面が得られた。その結果、大規模3Dデータの可視化、およびそれを用いた3Dソフトウェアのシミュレーションやそのデバッグに非常に適した環境を手に入れることができた。

図 3 8 及び図 3 9 に既存表示環境と今回整備した表示システムの図を示す。

#### ■大規模データのための3次元データ提示システムの開発

大規模データを効率的に表示するために、描画要素としてポイントを用いた高速な描画手法を開発した。従来のポリゴンを用いたレンダリング手法では、大規模モデルの実時間表示が困難となっている。そこで描画コストが低いポイントを用いて、グラ

フィックスプロセッサ（GPU）上で3次元データを高速に描画する手法を開発した。

描画の際のデータ構造は多重解像度で表現し、視点から対象までの距離に応じて効率的な描画を行う。QSplat[13]は元のデータの点群を葉とする階層構造を生成し、描画の際にはそれを適当に探索することで動的に解像度を決定する多重解像度を実現している。GPUの逐次処理の優位性を生かすためには、Sequential point trees法（SPT）[14]のように点群の階層構造を1次元リストに変換して、距離閾値を基に逐次アクセスするだけで必要な点群のみを高速に描画可能である。ただし、SPTは対象の形状によって枝狩りが非効率的になる点が問題である。

そこでSPTに幾何的な位置によるクラスタリングを加えることによって枝狩り処理を高効率化する手法を開発した（Sequential Point Clusters）。通常はモデル全体に対して階層構造リストを作成するが、本手法では、図40に示すようにクラスタリングした部分モデルごとにリストを作成する。そして各部分モデルごとに視点からの閾値を決める事によって効率的な枝狩りを行う。

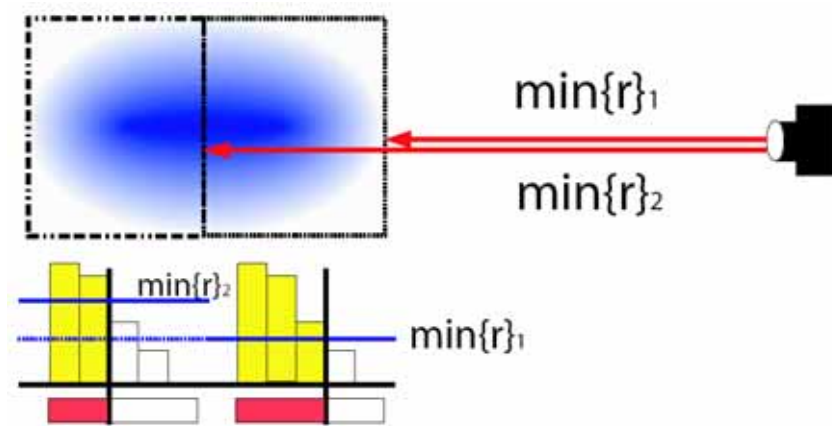


図40 Sequential Point Clusters

図41はクラスタサイズとそれに対する描画コストを表している。最適なクラスタリングレベルでは、SPT法に比べて20%程度の速度向上が見られる。またポリゴン数が多くなるにつれて本手法による効果が大きくなることが分かる。

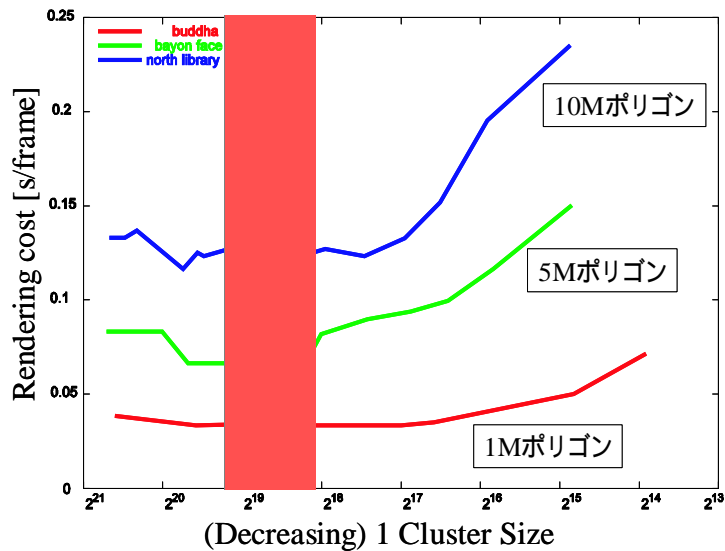


図 4.1 クラスタサイズと描画コスト

### 【5】色彩画像張り合わせ

#### ■大規模3次元幾何モデルへの色彩画像貼り付けアルゴリズムの開発

生成した3次元幾何モデルへ、デジタルカメラによって撮影した色彩画像を貼り付ける手法を開発した。3次元モデルに色彩画像を貼り付ける際には、幾何学的、光学的の二つの問題がある。幾何学的問題は、色彩画像撮影時のカメラと3次元幾何モデルの相対的な位置関係を決定する問題である。一方、光学的問題は、入力色彩画像間の色調の整合性を保つ問題である。

幾何モデルとカメラの相対位置は、幾何モデルから得られる反射率画像と、色彩画像のエッジ間距離が最小となるよう求める[15]。反射率画像と色彩画像にそれぞれCannyフィルタを適用し、得られたエッジから対応点を求める。この対応点から3次元誤差 $z$ を計算し、誤差の総和が最小となるように相対位置を求める。これらの計算を繰り返し行う事によって最適な相対位置が求められる。

複数の色彩画像間の色合わせは、色度不変性に基づいて行う。本手法では、光源は無遠点光源、物体の反射特性はランバーシアン、物体上で同じ色度を持つ点と同じalbedoを持つものと仮定する。色度 $I_c$ が同じ領域では、光源色 $L(c)$ とalbedo $S(c)$ を掛けた擬似albedoは以下のように表される ( $c=\{r, g, b\}$ )。

$$L(c)S(c) = I_c \sum_c L(c)S(c) = I_c T \quad (8)$$

$T$ は色度- $T$ マップと呼び、ピクセル $x$ に対して不変である。そのため  $T_x = \sum_c I_x(c) \cos \theta_x$  のヒストグラムを作成して $T$ を求めることができる。ここで $\theta$ はピクセル $x$ での物体の法線方向と光源方向のなす角度である。

図4.2に入力画像(左)と擬似albedoの推定結果(右)を示す。求めた各擬似albedoを3次元幾何モデルに貼り付けることによって、テクスチャ間につなが目のない現実感の高い3次元モデルを得ることが可能である。



図 4 2 擬似albedo推定結果（左：入力画像、右：擬似albedo）

### （c）まとめ

東京大学池内研究室では大型有形文化財の高精度な3次元形状・色彩モデルを自動的に取得するソフトウェアの開発を行っている。

本稿では平成16年度及び17年度に開発したデータ取得のためのハードウェア、及び形状・色彩デジタル化ソフトウェアの概要を述べた。本プロジェクトで開発した項目をまとめると以下のようなになる。

#### ■ハードウェア

- ・50mレンジ空中移動型レンジセンサ
- ・狭隘部計測用はしごセンサ

#### ■ソフトウェア

- ・GPUを用いた大規模距離画像の高速同時位置合わせ
- ・PCクラスタによる大規模距離画像の並列同時位置合わせ
- ・移動型レンジセンサによって得られた距離画像のパラメータつき位置合わせ
- ・大規模距離画像の高精度化
- ・大規模距離画像の適応的統合
- ・PCクラスタによる大規模距離画像の並列統合
- ・大規模3次元データの効率的表示
- ・大規模3次元幾何モデルへの色彩画像貼り付け

平成17年3月にはこれらの課題に関する研究が3名の博士学位論文[16-18]としてまとめられ、平成18年3月にはさらに3名の博士学位論文[19-21]としてまとめられる予定であり、人材育成の面でも大きな成果が得られた。なお位置合わせソフトウェアに関しては、複数の企業からライセンスの可能性に対しての打診があり、産業界への貢献も期待できる。またこれらの技術を用いて福岡県桂川町の王塚古墳をモデル化し、製作した映像コンテンツが九州国立博物館で常設展示されており、社会への貢献度も高いと考えられる。

平成17年12月には、これらの評価を行うためにカンボジア・アンコール遺跡群のバイヨン寺院にて屋外実験を行った。現在は取得したデータの処理及びシステムの性能評価を行っている。

平成18年度は光学色彩情報のデジタル化を中心として以下の項目の開発を進めていく予定である。

#### 【光学色彩】

- ・大規模色彩データ計測システムの開発
- ・大規模色彩データからの光源（物体）色推定手法の開発
- ・大規模形状データと色彩データの統合ソフトウェアの開発
- ・大規模色彩データの効率的蓄積ソフトウェアの開発
- ・光学特性を考慮した大規模3次元データ表示システムの開発

#### 【幾何形状】

- ・特殊材質物体の形状取得アルゴリズムの開発
- ・大規模形状データ解析ソフトウェアの開発
- ・大規模形状データへの付加情報タグ付け並びに検索ソフトウェアの開発

また最終的には幾何形状、光学色彩デジタル化ソフトウェアをまとめ、一連の処理を統合したシステムを開発していく予定である。

## 参考文献

- [1] T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai, and S. Nobuhara: "Real-Time 3D Shape Reconstruction, Dynamic 3D Mesh Deformation, and High Fidelity Visualization for 3D Video", *International Journal on Computer Vision and Image Understanding*, Vol.96, No.3 pp.393-434 ,Dec.2004.
- [2] 剣持雪子, 小谷一孔, 井宮淳: “点の連結性を考慮したマーチング・キューブ法”, 電子情報通信学会技術報告, PRMU98-218, pp. 197-204, 1999
- [3] 和田俊和, 浮田宗伯, 松山 隆司: “視点固定型パン・チルト・ズームカメラとその応用”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J81-D-II, No. 6, pp. 1182-1193, 1998
- [4] 松山 隆司, 浮田 宗伯: “能動視覚エージェント群による協調追跡”, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 4, pp. 25-31, 2001
- [5] T. Takai, K. Niinuma, A. Maki, and T. Matsuyama : "Difference Sphere: An Approach to Near Light Source Estimation", *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.I98-I105 ,2004
- [6] H. Habe, Y. Katsura, and T. Matsuyama: "Skin-off: Representation and Compression Scheme for 3D Video", *Proc. Picture Coding Symposium (PCS) 2004*, San Francisco , Dec.2004
- [7] 件小軍: “Parallel Pipeline Volume Intersection for Real-Time 3D Shape Reconstruction on a PC Cluster”, 京都大学大学院情報学研究科, 博士学位論文, 2005
- [8] 高井勇志, “High Fidelity and Versatile Visualization of 3D Video”, 京都大学大学院情報学研究科, 博士学位論文, 2005
- [9] 延原章平, “Deformable Mesh Model for 3D Shape and Motion Estimation from Multi-Viewpoint Video”, 京都大学大学院情報学研究科, 博士学位論文, 2005
- [10] B. Curless and M. Levoy, “A volumetric method for building complex models from range images,” In *Proc. SIGGRAPH'96*, pages 303–312. ACM, 1996.
- [11] M. D. Wheeler, Y. Sato and K. Ikeuchi, “Consensus surfaces for modeling 3D objects from multiple range images,” In *Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop '97*, pp. 911-920, May 1997.
- [12] W. Lorensen and H. Cline, “Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm,” In *Proc. SIGGRAPH' 87*, pages 163–170. ACM, 1987.
- [13] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, “Qsplat: a multiresolution point rendering system for large meshes,” In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pages 343–352, 2000.
- [14] C. Dachsbacher, C. Vogelgsang and M. Stamminger, “Sequential point trees,” In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2003, Computer Graphics Proceedings*, pages 657–662, 2003.

- [15] R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang and K. Ikeuchi, “Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute,” Fifth Asian Conference on Computer Vision (ACCV), vol.1, pp.99-106, 2002.
- [16] 運天弘樹, “実物体の仮想化のための3次元幾何モデルのテクスチャリング手法”, 東京大学大学院情報理工学系研究科, 博士学位論文, 2005.
- [17] 大石岳史, “大規模距離画像の位置合わせと誤差補正ならびに文化遺産への適用”, 東京大学大学院学際情報学府, 博士学位論文, 2005.
- [18] 宮崎大輔, “Shape Estimation of Transparent Objects by using Polarization Analyses”, 東京大学大学院情報理工学系研究科, 博士学位論文, 2005.
- [19] 小野晋太郎, “移動体センサから得られる幾何・画像データの時空間解析とその応用”, 東京大学大学院情報理工学系研究科, 博士学位論文, 2006.
- [20] 阪野貴彦, “Acquisition and Rectification of Shape Data Obtained by a Moving Range Sensor”, 東京大学大学院情報理工学研究科, 博士学位論文, 2006.
- [21] 増田智仁, “Registration and Deformation of 3D Shape Data through Parameterized Formulation”, 東京大学大学院情報理工学研究科, 博士学位論文, 2006.