

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

大石 岳 史[†] 池内 克 史^{††}

本論文では複数方向から測定された大規模距離画像の同時位置合わせ手法及び誤差補正手法を提案する．同時位置合わせ手法には，視線方向探索を用い，点と面の距離を評価関数とした手法を用いた．対応点探索の際にインデックス画像を用いる事で，正確なセンサパラメータを必要とせずに高速な計算が可能である．また，計算時間とメモリ使用量を考慮した並列同時位置合わせ手法を開発した．距離画像間の関係を組合せグラフとして定義し，グラフ分割の手法を用いる事によって最適な負荷，データ分散を実現している．誤差補正手法では，測定誤差が視線方向に主に分布している事を利用して，視線方向探索によって得られた対応点から正しい位置を推定する．異方向性誤差による誤対応問題を避けるために，反復計算によって誤差の補正を行う．最後に本手法を用いて文化遺産をモデル化した例を示し，提案する手法の有効性を確認する．また，生成したモデルを文化財のデジタル復元に応用した結果も示す．

Alignment and Refinement of a Large Number of Range images, and its Application to Cultural Heritages

TAKESHI OISHI[†] and KATSUSHI IKEUCHI^{††}

This paper describes the methods of simultaneous alignment and refinement of a large number of range images. The alignment method uses projection-based point matching algorithm and point-to-plane error metric. By using "Index Images", the point matching process is accelerated without the precise parameters of sensor calibration. We developed a parallel simultaneous alignment method, which reduce both the computation time and memory requirements. We defined the "pair-node hypergraph". Optimal load balance and data distribution is achieved by partitioning the graph following certain conditions. Our refinement method assumes that the measurement error is distributed parallel to the ray direction. The corresponding points are searched in the ray direction. The error is iteratively corrected by minimizing the distance between corresponding points. The results of modeling cultural assets show the effectiveness of our methods. We also show the results of the digital restoration of the cultural heritages using the models created from real objects.

1. はじめに

近年，コンピュータビジョンやコンピュータグラフィックス（CG）の分野では，現実物体からモデルを自動的に生成する（Modeling from Reality）研究が盛んに行われている^{1),2)}．生成されるモデルは主に（１）幾何モデル（２）光学モデル（３）環境モデルに分類され，それぞれの分野に関して研究が行われている．

本論文では，これらの分野の中でもレンジセンサを用いた幾何モデルの自動生成に関して扱う．特に，モデル化する対象を大規模文化遺産として，モデル生成過程で生じる幾つかの問題点を解決する手法を提案する．

1.1 レンジセンサを用いた幾何モデルの生成

実物体の形状モデルの生成手順は，おおまかに（１）距

離画像の取得，（２）位置合わせ，（３）統合という３つの処理からなる．まず，レンジセンサを用いて物体の表面形状を測定する．物体全体をモデル化するためには，異なる位置・姿勢から複数回の測定を行う必要がある．この複数の位置・姿勢から取得した距離画像はそれぞれ異なった座標系で記述されている．そこで，次に座標系を統一する位置合わせ処理が行われる．そして，最後に統合処理を行い複数枚の距離画像から単一の３次元形状モデルが得られる．

1.2 研究課題

大規模文化遺産を対象とする場合は，多量のデータの扱いが最も大きな問題となる．レンジセンサは，物体表面の形状を離散的に測定する．そのため，形状を十分に表現可能なモデルを得るためには，物体表面をある程度高い密度で測定する必要がある．対象が大きくなれば，必要となる距離画像枚数も増加する．多量のデータを扱う際に問題となるのは，主に計算時間の増加である．また，それと同時にメモリ使用量の増加についても考慮する必要がある．統合処理においては，処理の並列化によって

[†] 東京大学 生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

^{††} 東京大学大学院 情報学環

Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

問題を解決する手法も提案されている³⁾。しかし、位置合わせ処理においては未だ問題の解決には至っていない。

レーザレンジセンサによって得られる距離画像の誤差も大きな問題となる。文化遺産の記録という点から考えた場合、生成した形状モデルには高い精度が要求される。生成されたモデルに含まれる誤差の要因を考えてみると、(1) 測定誤差、(2) 位置合わせ誤差、(3) 統合作業での量子化誤差や平均化による誤差などが挙げられる。このうち最も大きな要因は距離画像そのものに含まれる測定誤差である。レーザレンジセンサの発達により、小型の対象物に対しては0.1mm以下の高精度な測定が可能になってきた。しかし、10mを超えるような大型の対象物に対しては、高精度なTime-of-flight方式のレーザレンジセンサを用いても数mm程度の測定誤差は避けられないのが現状である。そこで、得られた距離画像から精度を向上させる手法を開発する必要があると考えられる。

1.3 関連研究

(1) 位置合わせ手法の高速化とメモリ使用量削減

距離画像の位置合わせ問題に対しては、これまでに多くの手法が提案されている。特によく知られている手法はBeslが提案したICP (Iterative Closest Point) 法⁴⁾やChenの手法⁵⁾である。ICPでは2つの距離画像中の最近傍点を対応点として、この対応点間距離を最小化するような各距離画像の変換行列を求め、繰返し計算によって相対位置を求めていく。一方、Chenの手法では面の法線を計算し、点と面の距離を最小化するように相対姿勢を求めていく。この他にも視線方向に点を投影して他方の距離画像との対応点を求める方法などもある⁶⁾。またICPは誤対応やノイズによる影響を受け易いため、ランダムサンプリングとLMedS (Least Median Squares Estimation) 法によってロバスト性を高める手法も提案されている⁷⁾。

提案されている多くの位置合わせ手法は2枚の距離画像の相対位置姿勢を求めるものであるが、距離画像枚数が多い場合はこれを順次繰返ししていくと誤差の蓄積が問題となる。これを避けるためには、全ての距離画像間の相対位置姿勢を同時に推定する同時位置合わせ手法が有効である。Neugebauerは視線方向に対応点を探索し、全ての距離画像の組合せにおける点と面の距離の二乗和を誤差として、最小二乗問題を線形化して解くことによって全体位置合わせを行う手法を提案している⁸⁾。Benjemaa⁹⁾は法線方向による頂点の分割とz-bufferを使ってペアワイズな位置合わせを高速化するとともに、Bergevinの手法¹⁰⁾を拡張して重なり合う距離画像間で複数枚の同時位置合わせする手法を提案している。またNishinoはM推定を用いたロバストな同時位置合わせ手法を提案している¹¹⁾。

このように、これまでに様々な位置合わせ手法が提案されているが、いずれの手法でも問題となるのが対応点探索の計算量である。基本的なICPでは最近傍点を全て

の頂点に対して計算するため、対応する2枚の距離画像の頂点数を等しく n とした場合、対応点探索の計算量は $O(n^2)$ である。得られたデータから少数のデータを抽出して処理する事も考えられるが、精度の問題からなるべく多くのデータを用いるべきである¹²⁾。そこで、最近傍探索を高速化する手法としては探索木(kd-tree)を使う手法も提案されている¹³⁾。kd-treeによる探索の計算量は $O(n \log(n))$ である。一方、複数距離画像の同時位置合わせは、全ての組合せに対して対応点探索を行う必要があるため、画像枚数が増えると計算量は急激に増加する。対象となる距離画像枚数を m とすると、全組合せ数は $m \times (m - 1)$ であるため、計算量のオーダーは $O(m^2 n^2)$ または $O(m^2 n \log(n))$ となる。

また、大規模距離画像を位置合わせする際のもう一つの大きな問題点はメモリ使用量である。通常の同時位置合わせ手法では、全ての組合せに対して繰返し計算を行うために、全距離画像をメモリ中に読み込む必要がある。14)のような並列化ICPでも各プロセッサは全ての距離画像をメモリ中に保持しなければならない。

(2) 距離画像の誤差補正

通常、位置合わせ誤差や測定誤差の補正は、統合処理の際に各距離画像間の整合性を取る事によって行われる。Turkらの手法¹⁵⁾では、重なり領域において頂点の法線方向に対応点を探索し、信頼度による重み付き平均位置に頂点を移動させている。また、Wheelerらの手法¹⁶⁾では、各ボクセル中心からの距離を計算する際に、周囲の対応パッチの法線方向を考慮して、整合性が取れているパッチへの対応点のみを用いる事で測定誤差などの影響を軽減させている。しかし、距離画像の測定誤差に比べて測定密度が高い場合には、距離画像から作られるメッシュモデルは凹凸が激しくなるため法線方向の信頼性は低くなるのが問題である。Curlessらの手法では、誤差は視線方向に主に分布していると仮定して、視線方向探索によって得られる対応点から求めた重み付き平均位置を各ボクセルからの符号付距離としている¹⁷⁾。しかし、この手法の場合、異なる方向から測定された距離画像間の対応点は全て誤対応となるのが問題である。

単一メッシュモデルにフィルタを適用し、特徴的な形状を保持したままノイズを除去する手法もこれまでに多く提案されている^{18)~20)}。しかし、これらの手法は統合された単一モデルに対する手法であるため、前述の距離画像の重なりから誤差を補正する手法に比べて推定の信頼度が低いものと言える。

1.4 本論文の構成

上記の問題点を考慮して、本論文では以下の手法を提案する。

- (1) インデックス画像を用いた高速同時位置合わせ手法
 - (2) メモリ分散システムにおける並列同時位置合わせ手法
 - (3) 誤差分布方向を考慮した反復計算による精度向上手法
- また、これらの手法を利用した文化遺産の記録・保存の

例と、生成された幾何モデルから文化財の失われた過去の様子を再現した例を示す。

本論文の構成は以下になる．まず第2章でインデックス画像を用いた高速同時位置合わせ手法及びメモリ分散システムにおける並列同時位置合わせ手法について説明する．また、誤差分布方向を考慮した反復計算による精度向上手法を第3章で説明する．そして、第4章では文化遺産の記録と保存の例と、文化遺産の現存のモデルを用いて、過去の様子を仮想的に再現した試みを紹介する．第5章はまとめである．

2. 大規模距離画像の同時位置合わせ手法

そこで、本論文で我々は計算の高速化及びデータ分散によるメモリ削減を実現する並列同時位置合わせ手法を提案する．また、本手法を分散メモリ型のPCクラスタ上で実装し、大規模距離画像群の同時位置合わせ実験によりその有用性を示す．

2.1 高速同時位置合わせ手法

まず基本となる同時位置合わせ手法について説明する．前提条件として各距離画像は予めおおまかに位置合わせされているものとする．位置合わせ手順はICPとほぼ等しいが、全ての距離画像に対して誤差関数が一つ定義され、全ての距離画像の位置が同時に推定される点が異なる．手順の概略を以下に示す．

- (1) 全ての距離画像間で以下の計算を行う
 - (a) 全頂点の対応点を探索する
 - (b) 全対応点間の誤差を計算する
 - (2) 計算された全ての誤差を最小化するように各距離画像の変換行列を求める
 - (3) 終了条件を満たすまで(1)(2)を繰り返す
- 以下、これらの手順についてそれぞれ説明する．

2.1.1 対応点探索

まず、全距離画像から2つの画像を選択しそれぞれ基準画像、対象画像と呼ぶことにする．基準画像上の頂点とそれに対応する対象画像の三角パッチ上の点が対応付けられる．図1に示す●で示されたデータが基準画像であり、▲で表現されたデータが対象画像である．対応点は基準画像上の頂点から対象画像取得時のレンジセンサの視線方向に直線を延ばし、得られた対象画像の三角パッチとの交点である．このとき基準画像の視線方向に対して、対応する対象画像の三角パッチが裏面方向になる場合や、対応点間距離が、与えられた閾値 l_{th} 以上の場合は誤対応として除去する．この対応点探索を基準画像上の全ての頂点に対して行う．

この対応点探索の際には、図2に示すような参照テーブル（インデックス画像）を用いる事によって高速な処理が可能である．インデックス画像とは、距離画像の各パッチに異なる色を割当て、2次元画像面に描画したカラー画像である．

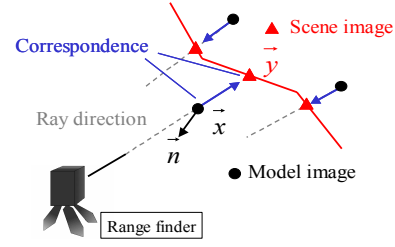


図1 対応点探索

Fig. 1 Search correspondences

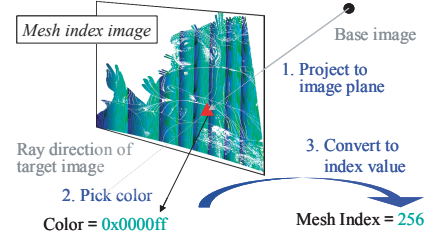


図2 インデックス画像による探索

2.1.2 誤差評価

対応する2点間の距離には点と面の距離を用いる．基準画像上の頂点 $\vec{x}$ とそれに対応する対象画像三角パッチ上の点 $\vec{y}$ とし、 $\vec{n}$ を基準画像上の頂点 $\vec{x}$ の法線とすると（図1）、誤差評価式は以下ようになる．

$$\mathbf{R}_M \vec{n} \cdot \{(\mathbf{R}_S \vec{y} + \vec{t}_S) - (\mathbf{R}_M \vec{x} + \vec{t}_M)\} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{R}_M$, $\vec{t}_M$ は基準画像の回転、平行移動行列であり $\mathbf{R}_S$, $\vec{t}_S$ は対象画像の回転、平行移動行列である．これを全ての距離画像の組合せが含む全頂点 (i, j) に対して計算し二乗誤差 ε^2 が最小となるような変換行列を求める．この式は以下ようになる．

$$\varepsilon^2 = \min_{\mathbf{R}, \vec{t}} \sum_{i \neq j, k} \left(\mathbf{R}_M \vec{n} \cdot \{(\mathbf{R}_S \vec{y} + \vec{t}_S) - (\mathbf{R}_M \vec{x} + \vec{t}_M)\} \right)^2 \quad (2)$$

2.1.3 移動行列の計算

式(2)に示した誤差評価式はこのままでは非線形であり最小化計算が難しいため、これを線形化する．求める変換の回転角を微小角と仮定すると、回転行列 $\mathbf{R}$ は以下のように書くことができる．

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 1 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

平行移動行列を、

$$\vec{t} = \begin{pmatrix} t_x & t_y & t_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

とすると式(2)は以下のように変形する事ができる⁸⁾．

$$\varepsilon^2 = \min_{\vec{\delta}} \sum_{i \neq j, k} \|\mathbf{A}_{ijk} \vec{\delta} - \mathbf{s}_{ijk}\|^2 \quad (5)$$

$$\mathbf{s}_{ijk} = \vec{n}_{ik} \cdot (\vec{x}_{ik} - \vec{y}_{ijk}) \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_{ijk} = \begin{pmatrix} \underbrace{0 \dots 0}_{6i \times 1} \underbrace{\mathbf{C}_{ijk}}_{6 \times 1} \underbrace{0 \dots 0}_{6(l-i-1) \times 1} \\ \underbrace{0 \dots 0}_{6j \times 1} \underbrace{-\mathbf{C}_{ijk}}_{6 \times 1} \underbrace{0 \dots 0}_{6(l-j-1) \times 1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underbrace{0 \dots 0}_{6i \times 1} \underbrace{\mathbf{C}_{ijk}}_{6 \times 1} \underbrace{0 \dots 0}_{6(l-i-1) \times 1} \\ \underbrace{0 \dots 0}_{6j \times 1} \underbrace{-\mathbf{C}_{ijk}}_{6 \times 1} \underbrace{0 \dots 0}_{6(l-j-1) \times 1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_{ijk} = \begin{pmatrix} \vec{n}_{ik} \times \vec{y}_{ijk} \\ -\vec{n}_{ik} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\vec{\delta} = (\vec{m}_0 \dots \vec{m}_{n-1}) \quad (9)$$

$$\vec{m}_i = \begin{pmatrix} c_{1i} & c_{2i} & c_{3i} & t_{xi} & t_{yi} & t_{zi} \end{pmatrix} \quad (10)$$

ただし全ての距離画像枚数は n である．式 (5) より以下のように $\vec{\delta}$ が求められ，最適な $\mathbf{R}$ と $\vec{t}$ が得られる．

$$\left(\sum_{i \neq j, k} \mathbf{A}_{ijk}^T \mathbf{A}_{ijk} \right) \vec{\delta} = \sum_{i \neq j, k} \mathbf{A}_{ijk}^T \mathbf{s}_{ijk} \quad (11)$$

基準距離画像から任意の距離画像に到達する経路が存在するとき，式 11 の係数行列は正値対称行列である．また，距離画像枚数が多い場合には大規模疎行列となる．そこで，計算には反復解法である ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient) 法を適用する．

2.2 同時位置合わせの並列化

本章では 1 台のサーバと複数台のクライアントからなる分散メモリシステムにおいて，前章で示した同時位置合わせ手法を並列に実現する手法を提案する．

前章で説明した対応点探索及び誤差計算は各距離画像間で独立に計算することができるため，これらの計算を距離画像の組合せ毎にクライアントに割当てる．各距離画像の変換行列の計算は，対応点探索などに比べて計算時間が短い上にメモリ空間を必要としないため，サーバプログラムで行う．また，各クライアントが計算する組合せも同様にサーバプログラムが求める．計算手順を簡略化して示すと以下の様になる．

Algorithm Procedure Code of Parallel Alignment

```
// Server process
AssignPairs():
while(error > threshold){
  for(i = 0; i < nImage; ++i)
    for(j = 0; j < nImage; ++j)
      if(List[i][j]){
        // Client process
        SearchCorrespondingPoints(i, j);
        CalculateErrorMatrix(i, j);
      }
  // Server process
  CalculateTransformationMatrices(all);
}
```

対応点探索及び誤差計算を距離画像の全ての組合せに対して行う場合，並列化によるデータ分散はほとんど期待できない．そこで予め不要，冗長な組合せを除去する

事により，計算を高速化するとともにデータの分散効率を高める事を考える．また，負荷分散とデータ分散を同時に満たすためには，各プロセッサへの組合せの割当ては慎重に計画しなければならない．本章ではこれら 2 つの方法についてそれぞれ説明する．

2.2.1 組合せの除去

距離画像間の重なりが全く無い場合や重なる領域が小さい場合は，これらの距離画像間で位置合わせ計算を行う必要が無い．また逆に距離画像の重なり枚数が十分多い場合は，これらの距離画像間の計算は冗長とみなす事ができる．そこで本節では大域的，局所的，相対的な観点からこれらの組合せを除去する方法を説明する．

(1) 大域的な接続関係

前提条件として各距離画像はおおまかに位置合わせされているものとする．まず以下の条件を満たさない組合せを除去する．

- (a) 2 枚の距離画像の「バウンディングボックス」が重なっている
- (b) 2 枚の距離画像の「視線方向」がなす角度 θ が閾値以内である

(a) は，二つの距離画像間に十分な重なりがあり，初期位置がある程度正確に推定されていれば得られる条件である．(b) は対応点探索が視線方向探索であるため，誤対応を減らすためにも有効な方法である．ただし，対象物の同じ部分を全く異なる方向から測定する場合も十分考えられることから，この条件は裏面除去 ($\theta = 120^\circ$) のために使用するのが望ましい．

(2) 局所的重なり領域

次に，各距離画像間の局所的な重なり領域の大きさを計算する．重なり領域の大きさは各距離画像の頂点数 v とそれに対する距離画像との対応点数の比 v_c で表される (図 3)．ただし，対応点探索の計算は多くの計算時間を必要とするため，ランダムに選択された少数の頂点に対して対応点を求める．距離画像 i のランダムに選択された頂点数を v'_i とし，これに対する距離画像 j との対応点数を $v'_{ci,j}$ とすると，距離画像 i からみた距離画像 j との重なり領域の大きさの推定値 $S_{i,j}$ は以下のように表される．

$$S_{i,j} = v'_{ci,j} / v'_i \quad (12)$$

この $S_{i,j}$ と $S_{j,i}$ の大きい方の値が閾値以下の場合，接続関係が弱いとみなして組合せを除去する．実験では閾値を 0.03 ~ 0.05 としている．また，重なり領域の計算は距離画像毎に独立に行う事ができるため，並列化も容易である．この計算は位置合わせ計算の前処理として一度だけ行われるため，順次計算する事が可能であり，メモリ使用量も問題にならない．

(3) 相対画像間距離

最後に各距離画像間の距離が相対的に大きい組合せを除去する．ただし各画像の中心はバウンディングボックスの視線方向側面の表面中心とし，各距離画像間の距離

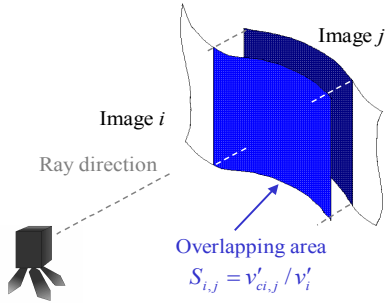


図 3 局所的重な領域
Fig. 3 Local overlapping area

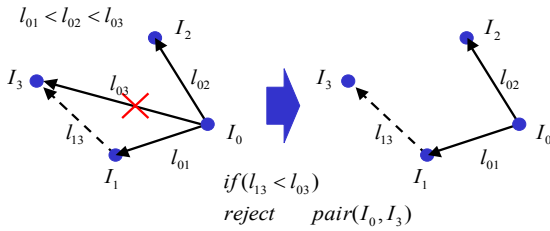


図 4 相対的な距離による組合せの除去
Fig. 4 Rejection pairs by relative distances

はその表面中心間のユークリッド距離と定義する．図 4 に示すように各距離画像間の距離を計算し，この距離が隣接する距離画像からの距離より大きい場合は対応関係を除去する．この処理を順次繰り返す事によって，誤差の伝播をより均等な方向に分散する事ができる．

2.2.2 組合せの割当て

以上の手法によって得られた距離画像の組合せを各プロセッサに割当てる．計算時間のみを考慮して並列化する場合は，距離画像の各組合せを順次各プロセッサに割当てていけばよい．しかしメモリ使用量を最小化する場合，問題は NP-困難であるため最適解を得る事は難しい⁽²¹⁾．そこで我々はこの問題をグラフ分割問題に帰着し，経験的解法を適用する事によって各プロセッサに割当てる組合せを決定する手法を提案する．

(1) 組合せグラフ

まず，分割すべき組合せグラフを定義する．図 5 の左図は距離画像 I_i とそれらの接続関係を示している．この接続グラフから，それぞれの組合せ $P_{i,j}$ をノードとし，各距離画像をネットとしたグラフを作成する（図 5 右）．この場合，各ネットは 2 つ以上のノードに接続されたハイパーグラフとなる．ここで，グラフに含まれるノード重みの和が計算時間を表し，ネット重みの和がメモリ使用量を表すことにする．計算時間は計算すべき総頂点数に比例することから，各ノード重み $W_{i,j}^{node}$ を計算すべき総頂点数，すなわち対応する距離画像 i 及び j の頂点数 v_i と v_j の和とする．またメモリ使用量は各距離画像 i に含まれる頂点数に比例する事から，ネット重み W_i^{net} として頂点数 v_i で表す．

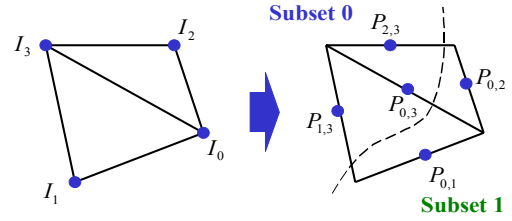


図 5 組合せハイパーグラフ
Fig. 5 Correspondence pair node hyper-graph

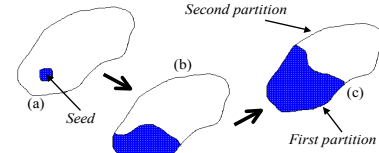


図 6 ランダムシードを用いた幅優先探索
Fig. 6 Random seeded breath-first search

$$W_{i,j}^{node} = v_i + v_j \quad (13)$$

$$W_i^{net} = v_i \quad (14)$$

このハイパーグラフを，分割されたグラフに含まれるノード重みの和が均等でネット重みの和が最小となるように分割する．図 5 右の場合，部分グラフ 0 はペア $(P_{0,3}, P_{1,3}, P_{2,3})$ と距離画像 (I_1, I_2, I_3) を含み，部分グラフ 1 は同様に $(P_{0,1}, P_{0,2})$ と (I_0, I_1, I_2) を含んでいる．最適な分割を求めるために，本論文では

- (a) ノード重みの和が均等になる初期分割を求める
- (b) ネット重みの和が最小になるよう分割を改良するという手法を採用する．

(2) 初期分割

作成された組合せハイパーグラフは，まずノード重みの和が均等になるように初期分割される．切断されるエッジ数が最小になるように 2 分割する手法には，固有ベクトルを用いたスペクトル分割手法⁽²²⁾があるが，これを本問題に適用する事は難しい．また，適用しやすいグラフ成長型分割手法の手法としては，KL (Kernighan and Lin) アルゴリズム⁽²³⁾を拡張した手法⁽²⁴⁾もあるが，この手法は局所極小解に陥りやすいという欠点もある⁽²⁵⁾．そこで我々は図 6 に示すように，ランダムに選択されたノードから，ノード重みの和が均等になるまで幅優先探索によってグラフを成長させていく手法を用いた^{(25),(26)}．

分割されたグラフは最初を選択されたノードによって変化するため，ランダムに選択された複数個のノードを用いて分割を行い，部分グラフに含まれるネット重みの和が最小になる分割を採用する．また k 個のグラフに分割するためには再帰的に 2 分割を繰り返す．この手法は単純であるが， $\log k$ 回の 2 分割により比較的良好な k 分

割されたグラフを得ることができる²⁶⁾。

(3) グラフ改良

最後に、各グラフに含まれるネット重みの和が最小になるようグラフの改良を行う。2分割されたグラフを改良する手法としてはKL アルゴリズムや、これを拡張したFM (Fiduccia and Mattheyses) アルゴリズム²⁷⁾がある。本手法ではこれらのアルゴリズムを拡張して初期分割されたグラフを改良する。KL アルゴリズムでは、片方の部分グラフから他方にノードを移動させた場合のエッジカットの変化量をゲインとして定義する。そして、このゲインが最大となるノードを移動させ、反復計算によって最適な解を探索する。通常は一つのノードを移動させるが、本手法では、あるネットに接続された全てのノードを一回の計算で移動させる。また、 k 個に分割されたグラフを改良するために、各部分グラフに含まれるネット重みの和が最大のものと、残された全ての部分グラフと1対1で改良を行い、それ以上改良が進まなくなるまでこの処理を繰り返す。

以下に1対1でのグラフ改良方法を示す。まず部分グラフ G_i と G_j の境界にあるネット $N_{(i,j),k}$ に着目し、このネットに接続された全てのノードがそれぞれの部分グラフに移動した場合のネット重みの変化量を求める。 $N_{(i,j),k}$ が G_i 側に移動した場合の G_i のネット重みの和の変化量を $D_{i,j,k}^{int}$ とし、 G_j の変化量を $D_{i,j,k}^{ext}$ とすると、ゲインは以下のように表される。

$$g_{i,j,k} = D_{i,j,k}^{int} - D_{i,j,k}^{ext} \quad (15)$$

逆に G_j 側に移動した場合のゲイン $g_{j,i,k}$ は内部変化量 $D_{j,i,k}^{int}$ と外部変化量 $D_{j,i,k}^{ext}$ から以下のように表される。

$$g_{j,i,k} = D_{j,i,k}^{int} - D_{j,i,k}^{ext} \quad (16)$$

境界に属する全てのネットに対してこれら2つのゲインを計算し、 G_i 側に移動した場合と G_j 側に移動した場合の2つのリストを作成する。そして、これらのリストをそれぞれゲインが小さい順に並び替えてネットを移動させていく。移動させる側のリストは、内包するノード重みの和が大きい方を選択する。一つのネットを移動させる度に、それに関係するネットの情報を更新し、移動させたネットは固定する。また、ネットを移動させた際に最大となるネット重みの和と移動させたネットを記録しておき、一回の反復が終了したときにその最小値が開始時に比べて小さく且つバランスが取れている(誤差1%以内)場合は、開始時からその時点まで移動を進める。またその最小値が開始時より大きい場合は、移動させるネットは無いものとして状態を開始時に戻す。一回の反復は動かすネットが無くなるか、定めた回数に達したら終了する。一回の反復で、最大となるネット重みの和が改良された場合は再度リストを作成して改良を繰り返す。それ以外の場合は改良を終了する。

2.3 位置合わせ実験

本章では、まず単一の幾何モデルから人為的に合成された距離画像群を用いて、我々の手法の収束性能と精度、

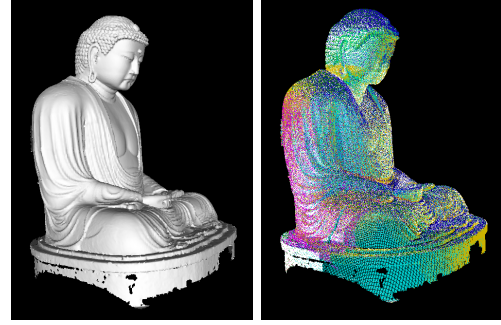


図7 評価に用いた距離画像(左:単一幾何モデル, 右:生成された距離画像)

Fig. 7 Range images used for evaluations (left: original model, right: range images)

計算時間、メモリ使用量を評価した。実験には2つのArhlonMP2400+プロセッサと4GBのメモリを搭載した、8台PCからなるPCクラスタを使用した。また各PC間は100Base-TXで接続されている。

使用したデータはCyrax2400によって測定した高さ約13mの鎌倉大仏の完全な3次元モデル(図7左)から、人工的に作成した50枚の距離画像群(図7右)である。各距離画像の頂点数は最大122029点、最小12197点、平均83,288点、また平均パッチ数は158,376である。

2.3.1 収束と精度

まず、組合せの除去によって、収束性能と精度にどのような影響を与えるかを検証した。使用した距離画像数は50枚であるため全組合せ数は2450通りであるが、組合せ選択により160通りとなった。ある姿勢における距離画像の位置合わせ精度は、正確に位置合わせされた距離画像と同一頂点間距離の平均を誤差として評価する。作成した各距離画像には実測の距離画像に近づけるために、Cyraxで測定した距離画像同様に視線方向に最大1cmの誤差を与えた。また初期位置はx, y, z方向にそれぞれ最大距離10cmでランダムに移動させ、x軸, y軸, z軸に対してそれぞれ最大角度0.05ラジアンでランダムに回転させてある。これらの距離画像を対応点探索時の距離閾値 l_{th} をいくつか変えて位置合わせした場合の、全ての組合せを使用した場合と組合せを除去した場合の収束結果を図8と図9にそれぞれ示す。

これらの図に示されるように、組合せの除去を行った場合は、しない場合に比べてより正しい位置に収束している事が分かる。これは不要、冗長な組合せを除去することによって、誤対応をより効果的に削減する事ができるためであると考えられる。

2.3.2 計算時間

次に本手法の計算時間を評価する。ただし計算時間は1回の反復計算に要する時間で評価し、複数回の反復計算を行った場合の平均時間を計算時間とした。プロセッサ数に対する計算時間の変化を図10に示す。図中でプロセッサ数 n における計算時間 T_n は、1プロセッサの計算時間 T_1 に対する比で表されている。この図から、並列化

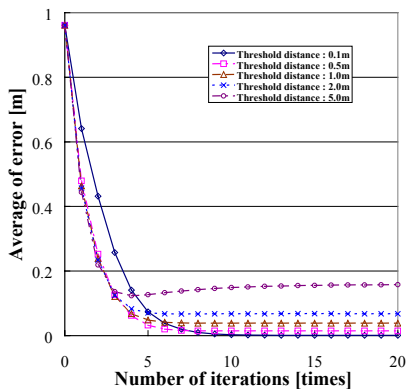


図 8 収束結果 (全ての組合せ)
Fig. 8 Convergence with general method

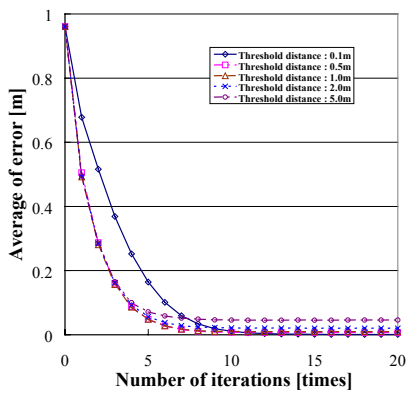


図 9 収束結果 (組合せ除去)
Fig. 9 Convergence with our method

数の増加とともに計算時間がほぼ線形に改善されている事が分かる。また組み合わせグラフを用いなくて順次割当てを行った場合より常に高い効率が得られている。図 7 のモデルに対する本手法の実際の計算時間は 1 プロセッサの場合に 20560ms, 16 プロセッサの場合が 1784ms であり, 約 11.5 倍の時間短縮が可能となっている。

2.3.3 メモリ使用量

最後にメモリ使用量についての評価を行う。1~16 並列で計算を行った場合の, 各プロセッサに割当てられる最大メモリ使用量を図 11 に示す。ただし各値は 1 プロセッサ時の最大メモリ使用量との比で表されている。比較のために距離画像を測定した順に割当てた場合のメモリ使用量も表す。距離画像枚数に対して十分な並列化数を得られる場合は順次割当てと本手法の差は小さいが, 相対的に並列化数が少ないほど本手法の効果が大きくなる事が分かる。この場合, 2 並列のときに順次割当てが 1.2 倍の効率しか得られないのに対して, 本手法は 1.7 倍という高い効果が得られている。図 7 のモデルに対する実際のメモリ使用量は 1 プロセッサの場合に 269Mbyte であるのに対して, 16 プロセッサの場合は 48Mbyte となっており, 1 プロセッサ時に比べて 17%までメモリ使用量を減少させる事が可能となった。

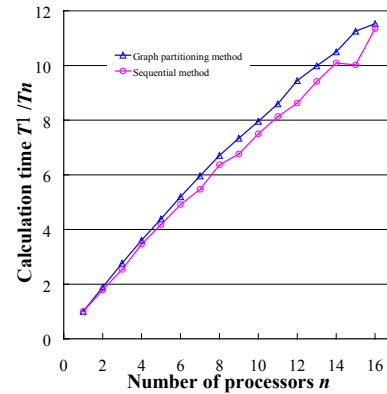


図 10 計算時間の変化
Fig. 10 Computational Efficiency

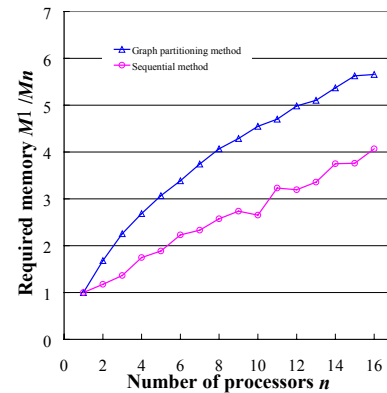


図 11 メモリ使用量の変化
Fig. 11 Required memory

表 1 実験結果 (バイヨン寺院)
Table 1 Experimental results (Bayon Temple)

nProc	Time[s]	Max Mem.[MB]	Min Mem.[MB]
16	209.7	1297	1170

2.3.4 大規模距離画像の同時位置合わせ

最後に, 大規模距離画像を本手法によって同時位置合わせした結果を示す。実験に用いたデータはカンボジアのバイヨン遺跡を Cyrax2500 及び IMAGER5003 によって測定した 501 枚の距離画像群である。この距離画像群が含む総頂点数は 219,149,558 点 (平均 437,424 点), 総パッチ数は 395,774,710 (平均 789,969) である。因みに, このデータセットはメモリ空間の制約により 1 プロセッサで計算することはできなかった。

表 1 に 16 プロセッサで処理を行った場合の平均計算時間及びメモリ使用量 (最大値, 最小値) を示す。20 回の反復計算によって図 12 の様に位置合わせされた結果が得られた。前処理を除いた同時位置合わせの総計算時間は 4194 秒であった。

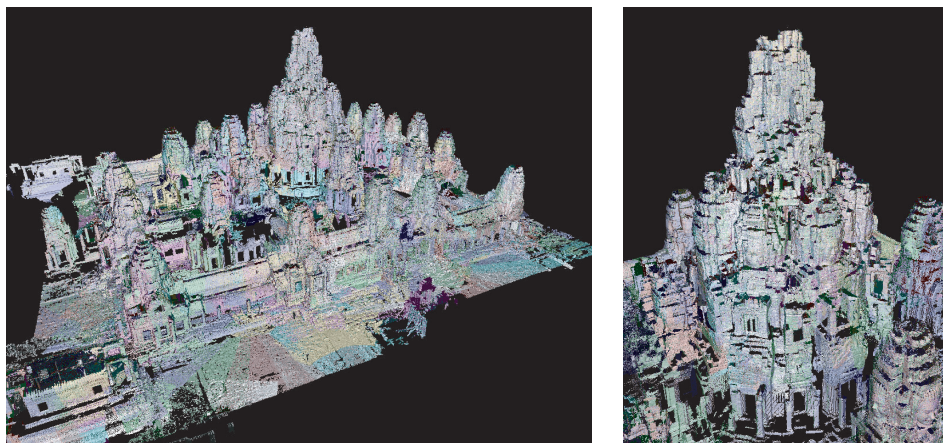


図 12 位置合わせ結果 (カンボジア・バイヨン寺院)
Fig. 12 Alignment result (Bayon Temple, Cambodia)

3. 誤差分布方向を考慮した反復計算による精度向上手法

本章では複数方向から測定された距離画像間の対応関係を利用して、各距離データの精度を向上させる手法を提案する。この手法ではレーザレンジセンサなど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他の全ての距離画像において対応点を探索し、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。このとき対応点間誤差の頂点移動による非線形性を考慮して、反復計算により徐々に誤差を減少させていく。実験では人工データ及び実測データ（バイヨン尊顔）に対して本手法を適用し、その有効性を確認する。また他の手法と比較して、本手法では誤差を軽減すると同時に形状情報を十分に保存できることを示す。

3.1 反復改良法

本手法では ICP⁴⁾ と同様に繰り返し計算によって、距離画像の測定誤差を補正していく。いま注目している距離画像を基準画像とし、それと重なり領域を持つ距離画像を対象画像とする。まず基準画像に含まれる全ての頂点に対して、全ての対象画像上の対応点を探索する。そして、これらの対応点間の距離を誤差として、この誤差が小さくするような位置を推定する。この対応点探索と位置推定は全ての距離画像を基準画像として行う。そして、全ての距離画像に含まれる頂点の位置を推定した後に、各頂点を推定した位置に移動させる。ここで誤差が十分小さくなれば処理を終了し、そうでなければこれらの処理を再度繰り返す。

3.1.1 距離計測誤差モデル

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は、レーザの光線方向にのみ分布していると仮定する（図 13）レーザレンジセンサの精度は、概して光線方向に垂直な成分より奥行き成分の方が精度は低い。なぜな

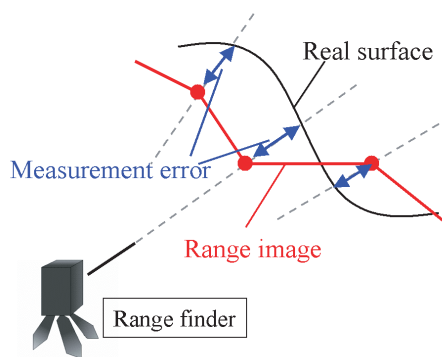


図 13 Measurement error

ら、垂直成分を表す光線方向というのは光切断法の場合は画素の中心であり、Time-of-Flight 型のレーザレンジセンサではスキャニング機構（ミラーの回転）からレーザの発振方向が計算されるため、いずれも正確な値を求める事ができるからである。そこで、本論文では測定誤差が光線方向にのみ分布していると仮定する。

3.1.2 対応点探索

誤差がレーザの光線方向にのみ分布すると仮定して、対応点は基準画像の光線方向に探索する。このとき、前提条件として各距離画像は正確に位置合わせされているものとする。基準画像に含まれる頂点に対して、この頂点を通り光線方向に平行な直線と対象画像上のパッチとの交点を求めて対応点とする。つまり、センサの中心から基準画像上の頂点までのベクトルを $\vec{x}$ とし対象画像上の対応点までのベクトルを $\vec{y}$ とすると、 $\vec{x}$ と $\vec{y}$ は、原点を通る同一直線上にある。このとき明らかな誤対応を除去するために対応点間の距離が閾値以上の点を外れ値として計算に用いない事とする。この閾値には使用したレンジセンサの最大測定誤差を用いる。そして各距離画像の全ての組合せに対して対応点を探索する。このとき、2章で説明したインデックス画像を用いる事によって、高速に対応点探索を行う事ができる。

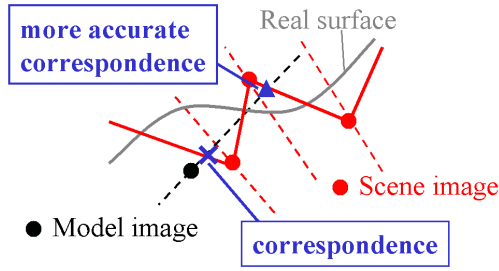


図 14 Local occlusion

3.1.3 誤差補正

モデル画像上の頂点を対応点から推定される位置に移動することによって誤差補正を行う。対応する対象画像上のメッシュはモデル画像と異なる方向の測定誤差を有しているため、探索された全ての対応点は正しい対応点ではない。図 14 に示すように、測定誤差によって局所的なオクルージョンが発生し、明らかな誤対応となる場合も考えられる。つまり、これらの対応点から導き出される推定点は測定誤差が大きいほど不正確となる。また距離画像間の重なりが少ない場合は、サンプル数が少ないために正確な推定点を得ることは更に難しくなる。そこで、これらの理由を考慮して穏やかに収束させるために、各頂点は全ての対応点との重み付き平均の位置に移動させる事にする。いま i 番目の距離画像上の k 番目の頂点 $\vec{x}_{ik}$ は、その対応点 $\vec{y}_{jk}$ との重み付き平均位置に移動される。

$$\vec{x}'_{ik} = (1 - w) \cdot \vec{x}_{ik} + w \cdot \frac{1}{n_{ik} - 1} \sum_{j \neq i} \vec{y}_{jk} \quad (17)$$

ここで 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、今回の実験においては $w = 0.5$ としている。この処理は各距離画像の全ての点に対して行われる。そして、対応点探索及び誤差補正による頂点の移動を一つの処理として、誤差が十分小さくなるまで反復して計算を行う。

3.1.4 対応点間誤差の考察

対応点間の誤差は測定誤差と表面形状と測定解像度に依存する離散サンプリングによる誤差の 2 つから生じる。対応点間誤差 ϵ は測定誤差 $\epsilon_{Measure}$ と離散サンプリングによる誤差 $\epsilon_{Geometry}$ の和によって表される。

$$\epsilon = \epsilon_{Measure} + \epsilon_{Geometry} \quad (18)$$

$\epsilon_{Measure}$ は反復計算によって補正できるが、離散サンプリングによる誤差 $\epsilon_{Geometry}$ はメッシュ上の点が線形補間されることに起因するもので、その大きさは距離データの精度に関係なく物体表面の曲率や距離画像の空間解像度に依存している。図 15 では各距離画像の頂点が物体表面上に存在する（すなわち $\epsilon_{Measure} = 0$ ）にも関わらず対応点 $\vec{x}$ と $\vec{y}$ の間には誤差が生じている。つまり、この対応点間誤差 ϵ は、対象物体が平面でない限り 0 にはならない。

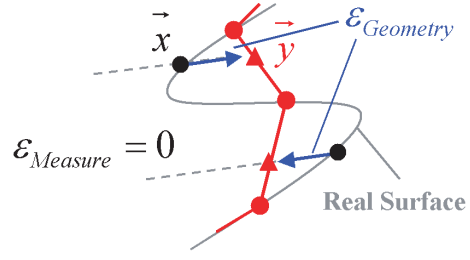


図 15 Error by resolution and geometry

$$\epsilon \begin{cases} = 0 & \text{planar area} \\ > 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

補正のために頂点を移動させる際には各距離画像の相互関係を利用するため、間接的にはあるが、移動させる頂点にその頂点を含む距離画像上の他の頂点位置に関する情報が伝播してしまう。そのため、反復計算をすることによってガウシアンフィルタなどのように平滑化が起こってしまう。しかし、ガウシアンフィルタと異なるのは、周囲の頂点との関係を直接用いない点であり、一回の処理によって起こる平滑化は非常に小さい。これに対して測定誤差の補正は、より直接的に行われる。つまり離散サンプリングに起因する誤差の収束度は測定誤差のそれに比べて十分小さいと考えられる。この理由から、我々の手法では形状をほとんど平滑化することなく誤差を補正することが可能である。ただし、誤差が補正されていく一方で、繰り返し計算をすることによって $\epsilon_{Geometry}$ に影響される平滑化は常に起こっている。そこで、測定誤差が十分補正された時点で繰り返し処理を終了しなければならない。ただし、終了条件を見つける事は難しいため、本手法では表面形状を人間が目で見えて判断を行っている。

3.2 三次元形状の補正実験

3.2.1 人工データの補正実験

真値が既知である人工データを用いて、他の手法と比較して本手法が効果的に誤差を補正できる事を示す。比較対象とするのは、Curless らのボリューメトリックな統合手法¹⁷⁾である。この手法では、各ボクセルから視線方向に直線を伸ばし、距離画像表面との交点を対応点として求めている。そして、この対応点探索を全ての距離画像に対して行い、対応点までの距離に重みを付けて、その重み付き平均を物体表面までの距離としている（図 16）。

$$D(\mathbf{x}) = \frac{\sum w_i(\mathbf{x}) d_i(\mathbf{x})}{\sum w_i(\mathbf{x})} \quad (20)$$

$$W(\mathbf{x}) = \sum w_i(\mathbf{x}) \quad (21)$$

重みは視線方向の単位ベクトルと、対応点の法線方向との内積である。

$$w(\mathbf{x}) = \mathbf{v}_x \cdot \mathbf{n} \quad (22)$$

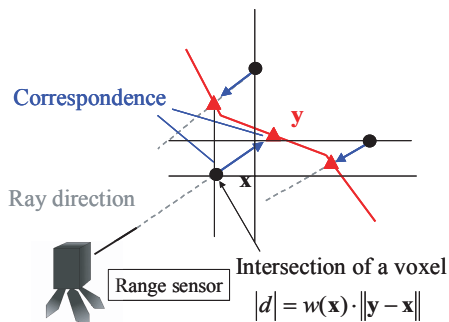


図 16 ボクセル交点から距離画像表面までの距離の計算

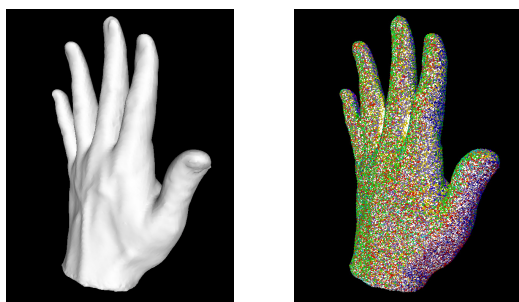


図 17 人工距離画像の生成（左：完全 3 次元モデル，右：生成した距離画像）

ここでは、基準となる距離画像の各頂点をボクセル交点とみなして、同様に重み付き平均位置に頂点を移動させる事にする。また、我々の反復改良法は終了判断が難しいため、反復回数を規定回数（5 回）として補正を行った。

実験では、人工的に生成した距離画像に誤差を付加して補正を行った。用いた距離画像は、手の石膏から取得した 3 次元モデル（図 17 左）から、人工的に生成した 20 枚の距離画像である（図 17 右）。各距離画像が含む頂点数は最大 47,197 点、最小 18,497 点、また最大パッチ数 92,176、最小パッチ数は 34,061 である。これらの距離画像に対して視線方向に正規分布する誤差を付加した。この誤差は最大誤差 ϵ に対して標準偏差が $\epsilon/3$ である。最大誤差をいくつか変えて距離画像を生成し、これらの距離画像に対して補正実験を行った。

精度は、全頂点に対して、誤差を付加する前の位置と、付加を加えて補正した後の位置との距離を求めて、これらの平均値によって評価した。図 18 に実験の結果を示す。横軸が与えた誤差の最大値、縦軸が平均誤差を表している。この結果から、我々の手法の方が Curless らの手法に比べて常に良い結果が得られている事が分かる。また、最大誤差 3.25mm のときの補正後の距離画像を図 19 に示す。Curless らの手法では、見た目にも誤差が残っている事が見て取れる。一方、我々の手法では、十分に誤差が補正されている事が分かる。

3.2.2 実測データの補正実験

本手法の有効性を示すために、実際にレーザレンジセンサを用いて測定したデータを補正する実験を行った。使用したレーザレンジセンサは Cyrax2500 である。測定

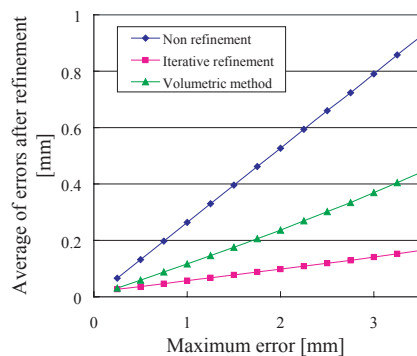


図 18 補正実験結果（平均誤差）

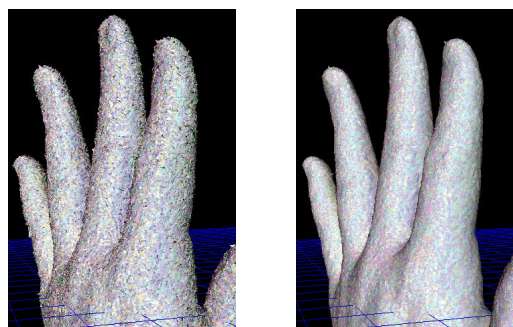


図 19 補正結果（左：Curless らの手法，右：本手法）

表 2 バイヨン尊顔計測データ

Sensor	Cyrax2500
Images	9
Vertices	Max:155434, Min:11231, Ave:81107
Patches	Max:300920, Min:18927, Ave:148281



図 20 カンボジアバイヨン寺院尊顔

対象はとカンボジアバイヨン遺跡の尊顔の一つ（図 20）である。バイヨン寺院の尊顔は積み上げられた砂岩に彫りこまれており、尊顔部分の高さは約 4m である。表 2 に、これらのモデルに含まれる頂点数などを示す。

これらの距離画像を 3 章で示した手法で同時位置合わせした結果を図 21 左に示す。対象物体が比較的小さい事と測定距離が短いため、取得した距離画像には測定誤差が顕著に表れている。

図 21 右は、バイヨン尊顔の距離画像データを誤差補正した結果である。この場合、完全に影になっている部分を除いては、ほぼ全体に距離画像が重なっているため、



図 21 尊顔データの補正結果（左：補正前，右：補正後）

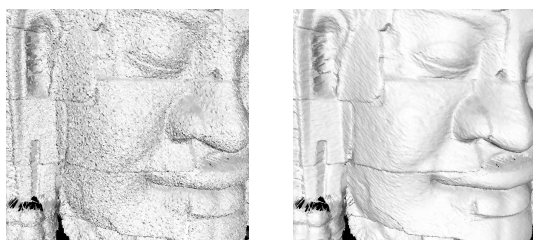


図 22 補正結果の拡大図（左：補正前，右：補正後）

モデル全体に渡って良い結果が得られている．図 22 には，これらを拡大した図を示す．補正前には見えにくかった石目も，補正後にははっきりと現れているのが見て取れる．

4. 文化遺産への適用

本章では，これまでに提案してきた手法を利用した文化遺産の記録・保存の例と，生成された幾何モデルから文化遺産の失われた過去の様子を再現した例を示す．

4.1 文化遺産の記録・保存

提案した手法を用いて取得した，大規模文化遺産の 3 次元形状モデルを示す．これまでに我々は多くの文化遺産の記録を行っているが，その中でも代表的なものを数点選んで紹介することにする．まず，国内の有名な文化遺産として飛鳥大仏，鎌倉大仏を記録した例を示す．そして，海外の事例として，タイのワット・シー・チュム寺院のアチャナ仏を記録した結果を示す．これらのモデルを生成する際には，2 章で提案した高速同時位置合わせ手法と，3 章で提案した誤差補正手法を適用した．統合処理には Sagawa らの並列統合手法を使用した³⁾．初期位置合わせは我々が作成したユーザインタフェースを用いて手動で行った．

4.1.1 飛鳥大仏

飛鳥大仏は奈良県明日香村・飛鳥寺の本尊，釈迦如来坐像である（図 23 左）．7 世紀作の銅像で日本最古の仏像といわれ，国宝に指定されている．ただし，鎌倉時代に火災による被害を受けており，作成当初から残されている部分はわずかであるとされている．像高は約 2.7m である．



図 23 飛鳥大仏（左：写真，右：形状モデル）



図 24 鎌倉大仏（左：写真，右：形状モデル）

測定には Cyrax2400 を用いて，9 枚の距離画像を取得した．得られた距離画像の総頂点数は 1,584,857 点，総パッチ数は 2,946,338 である．生成したモデルを図 23 右に示す．測定環境の問題から背面などが欠けているため，今後これらの部分の測定をする必要がある．

4.1.2 鎌倉大仏

鎌倉大仏は神奈川県鎌倉市・高德院の本尊，阿弥陀如来坐像である（図 24 左）．鎌倉時代 13 世紀に作成された銅像で，高さは約 13m，国宝に指定されている．創建当時は大仏殿の中に安置されていたとされるが，室町時代の天津波によって建物が倒壊し，それ以来「露座の大仏」となっている．測定には Cyrax2400 を用いて，異なる位置，方向から 24 枚の距離画像を取得した．この鎌倉大仏の測定時には，上部から測定するために高さ約 15m の足場を組んで高所から計測を行った．得られた距離画像群の総頂点数は 4,992,418 点，総パッチ数は 9,758,878 である．生成したモデルを図 24 右に示す．

4.1.3 タイ・アチャナ仏

アチャナ仏はタイのスコータイ地方，ワット・シー・チュム寺院に安置されている．ワット・シー・チュム寺院はスコータイ遺跡公園の一角にあり，遺跡公園は世界遺産に登録されている．また寺院の建立はスコータイ王朝時代で 14 世紀と言われている．寺院内に安置されているアチャナ仏は，図 25 左に示すように四方を壁で囲まれている．高さは約 15m の漆喰の坐仏像である．

測定には 2 台の Cyrax2500 と全周囲測定可能な K2T センサを用いた．外壁の上部からは主に Cyrax2500 を



図 25 アチャナ仏 (左: 写真, 右: 形状モデル)

用い、内部の狭い部分では K2T センサを使用した。また外壁の周囲からは K2T を用いて周囲の環境ごと測定を行った。取得したアチャナ仏の 3 次元モデルを図 25 右に示す。

4.2 文化財のデジタル復元

現在の奈良東大寺大仏 (奈良大仏: 図 26 左) 及び大仏殿は、創建当時とは姿かたちが異なっているとされる。東大寺は 8 世紀に建立されたが、度重なる地震や戦火の被害に遭い、再建や修造が繰返されてきた。その結果、大仏及び大仏殿の姿は、現在と創建期で異なっていると考えられている。

そこで、創建期の大仏及び大仏殿の 3 次元モデルを作成し、当時の様子を再現する事にする。通常、CG による文化財の再現では、CAD によってモデルの生成を行う^{(28), (29)}。しかし、一般に 3 次元 CAD の扱いは難しく、専門の技術者でも長い時間を掛けてモデルを作成しているのが現状である。また、CAD によって作成されたモデルは写実性に欠けるという問題もある。特に、仏像などの複雑な表面形状を持つ物体を、CAD によって正確にモデル化する事は難しい。

そこで、本論文では実物体から得られたモデルを変形或いは組み合わせる事によって、失われた創建期奈良大仏及び大仏殿を復元する事にする。実物体から得られたモデルを利用する事によって、容易に写実的なモデル生成を行う事ができると考えられる。

以下では、創建期奈良大仏及び大仏殿の復元について説明する。そして、生成したモデルを用いて創建期奈良大仏及び大仏殿の様子を CG によって再現した様子を示す。また、生成したモデルを用いて創建期の大仏に施された鍍金量について考察を行う。

4.2.1 創建期奈良大仏の復元

奈良大仏は奈良県奈良市・東大寺金堂の本尊、盧遮那仏坐像である。開眼供養は 8 世紀であるが、地震や戦火によって度々破壊されているため、度重なる修造が行われている。高さは約 15m の銅像で国宝に指定されている。

現在の奈良大仏から取得したモデルを変形する事によって、創建当時の奈良大仏の 3 次元モデルの復元を行った。前述のように、度重なる修造によって現在の大仏は創建



図 26 奈良大仏 (左: 写真, 右: 形状モデル)

表 3 奈良大仏の創建期及び現在の寸法 (部位別抜粋)

部位名	現在 [m]	創建期 [m]
結跏趺坐高	14.98	15.85
御目長	1.02	1.16
御面径	3.20	2.82
御耳長	2.54	2.52
掌長	1.48	1.66
足心長	3.74	3.56
膝厚	2.23	2.07
面長	5.33	4.74
鼻高	0.50	0.47
口長	1.33	1.10

当時と姿かたちが異なっている。創建期の大仏の絵画資料はほとんど残されていないが、寸法を記した文献は多く存在する。そこで、これらの文献値を基にして現大仏のモデルを変形させ、創建期奈良大仏モデルの作成した。

(1) 現存奈良大仏のモデル化

奈良大仏の測定には、Time-of-Flight 方式の長距離用センサである Cyrax2400⁽³⁰⁾ を用いた。測定は 114 の異なる方向から行った。レーザレンジセンサから得られる点群データは、予めメッシュモデルに変換し、不要なデータは予め除去してある。前処理後の全距離画像に含まれる頂点数は 36,299,982 点、パッチ数は 69,162,112 であった。生成したモデルを図 26 右に示す。

(2) 建期及び現在の大仏の寸法比較

創建期大仏の寸法は、複数の文献に記されている値の中から選択して用いた。創建期大仏の寸法は数多くの文献中に記されている。しかし、値は文献によって異なっている場合がある。そこで、いくつかの文献の値を比較し、正しいと思われるものを選んで用いる事にした。「延暦寺僧録文」と「大仏殿碑文」に記されている値を参考にして、創建期の大仏の図面を推定復元した研究が報告されている⁽³¹⁾。そこで、本研究でもこれら二つの文献に記述された値を用いる事にした。ただし、この二つの文献中でも異なった値が記されている場合がある。そこで、「七大寺日記」や「護国寺本緒寺録起集」なども参考にし、最も記述が多い値を用いた。

現大仏の 3 次元モデルを変形するに当たって、創建期と現在の大仏の寸法を比較する。表 3 に、選択した創建



図 27 現在の大仏の 3 次元モデル



図 28 創建期大仏の 3 次元モデル

期大仏の寸法と現在の大仏の寸法の一部を示す。文献に残されている創建期の寸法の単位は尺で記述されているため、これを天平尺であるとみなしてメートル法に換算してある（1 尺 = 0.2964 メートル）。また、現在の寸法とは公称されている測定値である。この表から、像高などが少なからず異なっている事が見て取れる。

(3) 創建期奈良大仏のモデル作成

モデルの変形は（1）全体（2）細部の 2 段階で処理を行った。まず、結跏趺坐高や御面長などの全体的な寸法を変化させた。これらの部位は単純に拡大縮小を行った。そして次に、目長や鼻の高さなど細かな部分を変形させていった。このとき、文献に記された寸法と各部位の対応付けは 31) で作成された復元図を参考にした。ただし、眉長など寸法に明らかな矛盾がある部分には訂正を加えつつ造作を変えていった。

このようにして作成した創建期奈良大仏の 3 次元モデルを図 28 右に示す。また、比較のために現在の奈良大仏のモデルも示す（図 28 左）。見た目にも、創建期と現在の大仏の形状が大きく異なっている事が分かる。創建期大仏の方が、現在の大仏より像高が高く細面である。

4.2.2 大仏殿の復元

次に、創建期東大寺大仏殿の 3 次元モデルを復元する。2 度の戦火によって焼失した大仏殿は、12 世紀と 18 世紀に再建されている。創建期の建築様式は天平様式であったが、12 世紀の再建時には、宋から伝えられた天竺様が用いられた。また、18 世紀の再建時にも 12 世紀と同様に天竺様が用いられている。つまり、現在の大仏殿は創建当時と異なった様式で造られている。そこで、天平時



図 29 推定模型

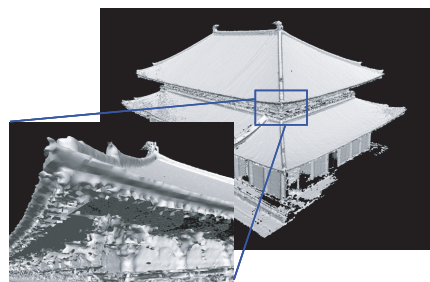


図 30 推定模型の 3 次元モデル

代の様式による創建期の大仏殿を復元する事にする。復元モデル作成には、東京大学大学院工学系研究科、藤井恵助教授の助言を頂いて以下のような方針で行った。

基本となるモデルには、推定復元模型から生成した 3 次元モデルを用いた。この模型は、天沼俊一博士の指導のもとで博覧会のために造られた、創建期大仏殿の推定復元模型である。現在、この復元模型は東大寺大仏殿内部に安置されている（図 29）。そこで、この模型の 3 次元モデルを取得し、全体の図面代わりに用いる事にした。

また、細部のモデルに関しては、唐招提寺金堂の部分モデルを用いることにした。唐招提寺金堂は東大寺と同時代に建立され、当時の建築様式をほぼそのまま現在に伝えている。そこで、唐招提寺金堂の部分モデルを組み合わせる事によって、創建期東大寺大仏殿を復元することができる。

(1) 復元模型の 3 次元モデルの取得

まず、推定復元模型の 3 次元モデルを取得した。測定には、パルステック社製のステレオ式レーザレンジセンサ TDS-130L を使用した。計測では、異なる方向から 12 枚の距離画像を取得した。これらの距離画像から得られた 3 次元モデルを図 30 に示す。また、同図にこのモデルの軒下部分を拡大した画像を示す。この図から明らかに、模型の細部の形状はほとんどモデル化できていない。しかし、柱や組物の位置を知るための図面として使用するには十分である。この模型は実寸の 50 分の 1 の大きさに造られている。そこで、得られたモデルを 50 倍に拡大して使用した。

(2) 唐招提寺金堂の部分モデル取得

次に、細部の復元に必要となる唐招提寺金堂の部位モ



図 31 唐招提寺金堂の測定部位

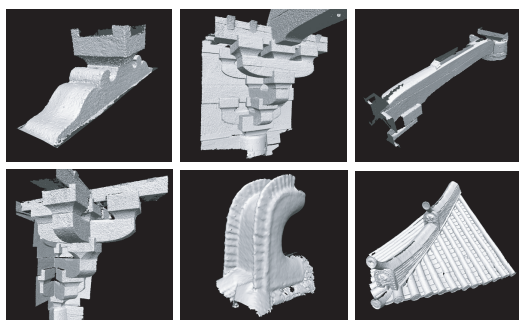


図 32 唐招提寺金堂の部分モデル

デルを取得した。まず、建物全体をいくつかの部位に分けて、主要な部位を選択して 20 箇所の測定を行った。図 31 に測定対象とした主要部位の一部を示す。測定に用いたレンジセンサは Cyrax2400 及びパルステック社製の TDS-1500 と TDS-3100 である。屋根や柱、扉などの大きな部位は Cyrax2400 を用いて測定を行った。また、組物や軒先、風鐸など近距離でしか測定できないものは TDS-1500 と TDS-3100 を用いた。この測定によって計 780 枚の距離画像を取得した。図 32 に、これらの距離画像から得られた 3 次元モデルの一部を示す。

(3) 創建期大仏殿の復元

最後に、得られた部位モデルを組み合わせる事によって創建期大仏殿モデルの復元を行った。各部位モデルは、予め編集しやすいようにパッチ数を減少させてある³²⁾。また、唐招提寺金堂と東大寺大仏殿は規模が異なるため、取得した各部位モデルを拡大する必要があった。模型モデルと部位モデルの寸法を比較すると、ほぼ全ての部位は 2.3 倍にすれば良いことが分かった。正確には、組物の肘木の大きさは軒の深さによって寸法を変える必要があり、斗の大きさも柱の太さや屋根の重さによって異ってくる。しかし、本研究は見えの生成が主な目的であるため、各部位を単純拡大するだけに留めた。ただし、扉などは高さや幅の縮尺が異なるため、必要に応じて調整を行った。また、壁や一部の柱などの単純な部位は、直方体や円筒のモデルを組み合わせた。このとき、柱の太さは七代寺巡禮私記の本口三尺八寸、末口三尺という値を用いた³³⁾。図 33 に、完成した創建期大仏殿の 3 次元モデルを示す。

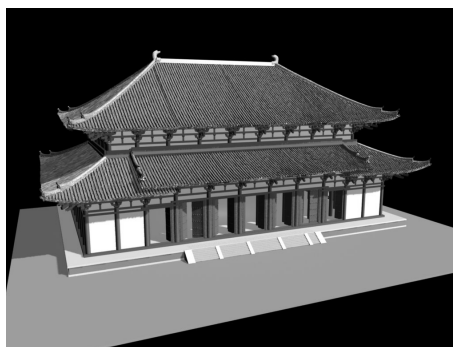


図 33 創建期大仏殿の 3 次元モデル



図 34 創建期大仏殿の再現 CG

4.2.3 創建期東大寺の再現及び鍍金に関する考察

本章では、復元したモデルを組合せて、創建期奈良大仏及び大仏殿の様子を CG によって再現する。また、復元モデルの表面積から、大仏に施された鍍金について考察する。

(1) 創建期奈良大仏及び大仏殿の再現

復元した奈良大仏及び大仏殿を用いて、CG による創建当時の様子の再現を行った。柱や扉などの色は丹土色とした。また、鳴尾と大仏本尊の表面には鍍金が施されていたものとして、金色を用いた。壁や屋根などの色は適度に調整した。

図 34 は大仏殿を遠景から眺めたものである。創建期の大仏殿は現在と比べると間口が大きく重厚な構えであった事が分かる。また、柱の太さは唐招提寺金堂に対して約 1.5 倍であり、建物の規模に比べるとかなり細い事が分かった。

大仏殿内に安置された創建期奈良大仏の様子を図 35 に示す。この図からは、鍍金を施された当時の大仏の荘厳さを窺い知る事ができる。また、大仏の表面全体に鍍金を施すために、非常に多くの金を用いられた事は想像に難くない。

(2) 大仏に施された鍍金に関して

ここで、実際に奈良大仏の表面に施された鍍金について考察してみる。大佛殿碑文によれば、鍍金に用いられた金の量は 10446 両とされている。また、延暦僧録文によれば大仏本体に用いられた金の量は 4187 両である。ただし、これらの記述では単位が大両であるか、小両であるかは明らかにされていない。この問題に対しては、延

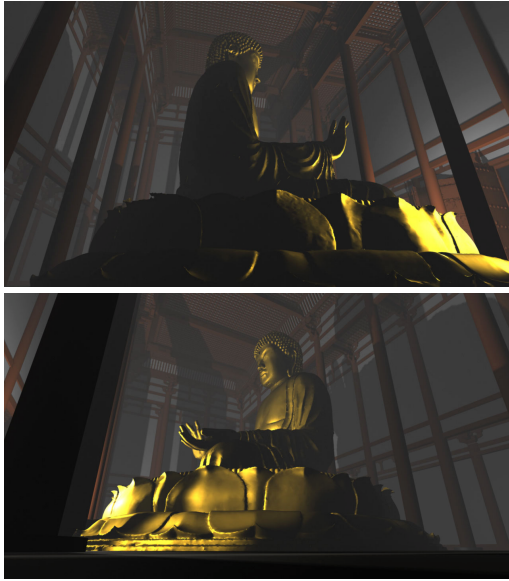


図 35 創建期奈良大仏の再現 CG

暦僧録文に記述された表面積と鍍金の厚さから，小両換算すべきであるという結果が得られている³⁴⁾．

しかし，延暦僧録文に記述された大仏の表面積には疑問が残る．この値をメートル法に換算すると $506m^2$ であり，本研究で生成したモデルから求めた表面積は $597m^2$ である．これらの値には誤差と言えない程の大きな差異がある．また，このような複雑な物体の表面積を求める事は困難であったと考えられる．そこで，復元モデルから求めた表面積を用いて鍍金の厚さを求め再検証してみる．

鍍金の厚さに関しては大仏本体のみについて考える．取得したモデルから計算した蓮華座の表面積は $556m^2$ であり，大仏本体の表面積に対する比は 0.931 である．鍍金の厚さは大仏本体も蓮華座も同じものとする，大佛殿碑文から得られる大仏本体に用いられた鍍金の量は 5412 両である．

大仏本体の表面積と用いられた金の量から鍍金の厚さを求める．ここで，大 1 両 = $41.94g$ ，小 1 両 = $13.98g$ とした．また，金の密度は $19300kg/m^3$ とした．表 4 に鍍金厚さを計算した結果を示す．大仏の鍍金に用いられたアマルガム法では，鍍金の厚さは $1\mu m \sim 10\mu m$ とされている³⁴⁾．これを考慮すると，大佛殿碑文及び延暦僧録文に記された鍍金の量は，やはり小両換算である事が分かる．

また，延暦僧録文に記述された大仏の表面積を用いた場合，鍍金の厚さは $6.0\mu m$ と少し厚いが³⁴⁾，復元モデルから求めた表面積を用いた場合は $5.0\mu m$ という，より尤もらしい値になる．つまり，復元モデルから得られた表面積は，延暦僧録文に記述された表面積より正しいと考える事ができる．

5. おわりに

本論文では複数距離画像を高速且つ低メモリ使用量の

表 4 鍍金の量と厚さ（大仏本体）

文献名	鍍金の量 [kg]	鍍金の厚さ [μm]
大佛殿碑文	227.0 (大両)	19.69
	75.67 (小両)	6.563
延暦僧録文	175.6 (大両)	15.23
	58.54 (小両)	5.077

並列同時位置合わせ手法を提案した．予め不要，冗長な組み合わせを除去する事によって，計算時間の短縮と効率的なデータ分散を図った．また，計算時間とメモリ使用量を同時に最適化するために，組合せグラフを定義し，グラフ分割アルゴリズムを適用した．本手法を PC クラスタ上で実装し，収束性能と精度，計算時間，メモリ使用量についての評価を行った．そして，実際に大規模な距離画像を同時位置合わせすることによって本手法の有効性を示した．なお本並列化手法は他の多くの同時位置合わせ手法に適用する事が可能である．

複数の位置合わせされた距離画像から，距離画像に含まれる測定誤差を補正する手法を提案した．レーザレンジセンサの誤差は，光線方向に最も大きく分布している．そこで，基準画像に含まれる全頂点に対して，重なり合う全ての距離画像中の対応点を視線方向に探索し，対応点間誤差が小さくなるよう頂点を移動させた．このとき，誤対応による誤差を考慮して，重み付き平均位置に頂点を移動させ，反復計算によって補正を行った．実験では，人工データと実測データに対して本手法を適用し，誤差を効果的に補正できる事を示した．

本論文で提案した手法を大規模文化遺産に適用した事例を紹介した．我々がこれまでにモデル化したいくつかの文化遺産（飛鳥大仏，鎌倉大仏，タイ・アチャナ仏）を示し，手法の有効性を再確認した．

最後に，生成したモデルを利用して，創建期東大寺大仏及び大仏殿のデジタル復元を行った．現在とは異なっているとされる，創建期東大寺大仏及び大仏殿を CG によってデジタル的に復元した．創建期大仏のモデルは，現在の大仏から生成したモデルを文献の値を基に変形させる事によって生成した．また，大仏殿に関しては，推定復元模型と唐招提寺金堂から得たモデルを用いて復元を行った．生成した二つのモデルを組み合わせる事によって，東大寺の創建当時の様子を仮想的に再現する事が可能となった．

参考文献

- 1) M.Levoy: The Digital Michelangelo Project, *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp. 131–144 (2000).
- 2) K.Ikeuchi and Y.Sato: *Modeling from Reality*, Kluwer Academic Press (2001).
- 3) R.Sagawa, K.Nishino, M.D.Wheeler and K.Ikeuchi: Parallel Processing of Range Data Merging, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 577–583 (2001).

- 4) P.J.Besl and N.D.McKay: A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 14, No. 2, pp.239–256 (1992).
- 5) Y.Chen and G.Medioni: Object modelling by registration of multiple range images, *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 145–155 (1992).
- 6) G.Blais and M.Levine: Registering Multiview Range Data to Create 3D Computer Objects, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 8 (1995).
- 7) T.Masuda, K.Sakaue and N.Yokoya: Registration and Integration of Multiple Range Images for 3-D Model Construction, *Proc. Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (1996).
- 8) P.J.Neugebauer: Geometrical Cloning of 3D Objects via Simultaneous Registration of Multiple Range Image, *Proc. of the 1997 Int. Conf. on Shape Modeling and Application (SMA'97)*, pp. 130–139 (1997).
- 9) R.Benjema and F.Schmitt: Fast global registration of 3d sampled surfaces using a multi-z-buffer technique, *Proc. Int. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 113–120 (1997).
- 10) R.Bergevin, M.Soucy, H.Gagnon and D.Laurendeau: To-wards a general multi-view registration technique, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 5, pp. 540–547 (1996).
- 11) K.Nishino and K.Ikeuchi: Robust Simultaneous Registration of Multiple Range Images, *Proc. of Fifth Asian Conference on Computer Vision ACCV '02*, pp. 454–461 (2002).
- 12) D.Brujic and M.Ristic: Analysis of free-form surface registration, *Proc. International Conference on Image Processing*, pp. 393–396 (1996).
- 13) Z.Zhang: Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 13, No. 2, pp. 119–152 (1994).
- 14) C.Langis, M.Greenspan and G.Godin: The parallel iterative closest point algorithm, *Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM)* (2001).
- 15) G.Turk and M.Levoy: Zippered polygon meshes from range images, *SIGGRAPH 94*, pp. 311–318 (1994).
- 16) M.Wheeler, Y.Sato and K.Ikeuchi: Consensus surfaces for modeling 3D objects from multiple range images, *Proc. International Conference on Computer Vision* (1998).
- 17) B.Curless and M.Levoy: A volumetric method for building complex models from range images, *Proc. SIGGRAPH'96*, ACM, pp. 303–312 (1996).
- 18) G.Taubin: A Signal Processing Approach to Fair Surface Design, *Computer Graphics*, Vol. 29, pp. 351–358 (1995).
- 19) Kobbelt, L., Campagna, S., Vorsatz, J. and Seidel, H.: Interactive Multi-Resolution Modeling on Arbitrary Meshes, *Proc. SIGGRAPH'98*, pp.105–114 (1998).
- 20) M.Desbrun, M.Meyer, P.Schroder and A.Barr: Implicit Fairing of Irregular Meshes using Diffusion and Curvature Flow, *Proc. SIGGRAPH'99*, pp. 317–324 (1999).
- 21) M.R.Garey and D.S.Johnson: *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman & Cie (1979).
- 22) A.Pothen, H.D.Simon and K.-P.Liou: Partitioning sparse matrices with eigenvectors of graphs, *SIAM Journal of Matrix Analysis and Applications*, Vol. 11, No. 3, pp. 430–452 (1990).
- 23) B.W.Kernighan and S.Lin: An Efficient Heuristic Procedure for Partitioning of Electrical Circuits, *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 49, No. 2, pp. 291–307 (1970).
- 24) G.Karypis and V.Kumar: A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs, *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 20, No. 1, pp. 359–392 (1998).
- 25) S.Hauck and G.Borriello: An Evaluation of Bipartitioning Techniques, *IEEE Transactions on ComputerAided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol. 16, No. 8, pp. 849–866 (1997).
- 26) A.George and J.W.-H.Liu: *Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall (1981).
- 27) C.M.Fiduccia and R.M.Mattheyses: A Linear-Time Heuristic for Improved Network Partitions, *Proc. Design Automation Conference*, pp.241–247 (1982).
- 28) 安藤真, 吉田和弘, 谷川智洋, 王燕康, 山下淳, 葛岡英明, 廣瀬通孝: スケーラブル VR システムを用いた教育用コンテンツの試作-マヤ文明コパン遺跡における歴史教育-, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 1, pp. 65–74 (2003).
- 29) R.Tenmoku, Y.Nakazato, A.Anabuki, M.Kanbara and N.Yokoya: Nara palace site navigator: Device-independent human navigation using a networked shared database, *Proc. 10th Int. Conf. on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004)*, pp. 1234–1242 (2004).
- 30) : <http://www.cyra.com>.
- 31) 長谷川誠: 美術工芸研究室関係調査研究:創建期東大寺大仏の比例的復原, 奈良国立文化財研究所年報 (1971).
- 32) M.Garland and P.Heckbert: Surface Simplification Using Quadric Error Metrics, *Proc. SIGGRAPH'87*, ACM, pp. 209–216 (1997).
- 33) 福山敏男: 東大寺大佛殿の第一期形態, 佛教藝術 15, 佛教藝術学会 (編), pp.14–34, 毎日新聞社, 東京 (1953).
- 34) 小西正彦: 創建時東大寺大佛の鍍金に使われた金と水銀の量について, 日本計量史学会誌計量史研究, Vol. 24, No. 2 (2002).