

3D Shape Measurement System by Integration of Partial Shapes and Automatic Defects Detection

Tokushima University Hiroyuki UKIDA

**キーワード** デジタルアーカイブ, 3次元形状復元, 3D スキャナ, 全周形状, 部分形状の統合, 欠損部

1. はじめに

「デジタルアーカイブ」<sup>1)</sup>とは、物体の形状や色、光沢等、物体に関する情報を計測し、それをデジタルデータとして半永久的に保存することである。そして、国宝や重要文化財、古い文献等について、デジタルアーカイブを行う研究が進められている。

物体の形状を計測する方法には様々なものがあり、特に非接触で計測する方法としては、

- ・カメラによって物体を撮影した画像を用いる（ステレオカメラ等）
- ・プロジェクタによって特定のパターンを物体に照射し、それを撮影した画像を用いる（パターン投影等）
- ・レーザで物体までの距離を求める（Time of flight 等）

などが挙げられる。しかしながら、これらの方法は、基本的に計測装置に向いている側の物体形状しか求められないため、物体全体の形状を求めるためには、物体あるいは計測装置を動かす、または、物体の周囲に多数の計測装置を配置する、ということが必要である。そして、それぞれの位置で得られる部分形状を統合し、全周形状を得る必要がある。

最近では、3D プリンタによって手軽に物体モデルを造形することができるようになり、その形状データを得るための安価な3D スキャナのシステムが開発・販売されている。そして、多くの場合、1台の計測装置を用いて、装置あるいは物体を手動で動かし、その部分形状を統合して全周形状を得られるようになっている。

しかしながら、単純に3D スキャナを物体周囲で動かしても、正確な形状計測は難しい。特に、物体形状の凹凸や光の反射具合によっては、うまく計測できず、形状データが欠損する場合がある。人間が計測装置を動かし、計測結果をインタラクティブに確認できるシステムであれば、人間によって欠損部を確認でき、再度の計測も可能であるが、このような方法では手間や時間がかかるという問題がある。また、このようなシステムでは、機器の特徴等を理解し、正確に計測するための技術を身に付ける必要があるが、これは、操作者によって計測結果が異なることを意味し、安定に形状を求められないことになる。

そこで、全周形状計測の自動化が必要であると考えられる。つまり、自動的に部分形状を取得して統合した後、その結果から欠損部を検出する。そして、欠損部があれば、再度、今度は確実に計測できるように装置の方向等を変えて再計測するようなシステムが必要であると考えられる。

本研究では、動きのない物体を対象とし、その全周形状を、

できるだけ正確に計測することを目的とする。ここでは、ICP アルゴリズム<sup>2)</sup>を基に、部分形状の正確な位置合わせと再計測に向けた欠損部の検出方法を示す。

2. ICP アルゴリズムによる部分形状の位置合わせ

2.1 2組の部分形状の位置合わせ

本研究では、物体形状を計測する3D スキャナ等の装置は1台とし、固定した対象物体の周囲で計測装置を動かして、順次、部分形状を取得するものとする。後の章の実験でも示すように、計測装置はアームロボットで動かすため、その移動位置は求めることができるが、本手法においては、計測装置の移動位置は直接的には用いない。なお、計測装置を固定し、対象物体を動かす状況であっても、位置合わせの手法は同様となる。

本節では、まず、計測装置の移動前後で得られた2組の部分形状の位置合わせについて示す。ここで、2組の部分形状の中で、位置合わせの基準になる形状データを「モデル形状」、移動させる形状データを「データ形状」とし、モデル形状を $Q$ 、データ形状を $P$ とする。いずれも、多数の3次元座標点の集合であり、ある座標点について、それぞれ $p_i, q_i$ とする。 $p_i, q_i$ は、3次元座標 $(x, y, z)$ を要素に持つベクトルである。また、 $P, Q$ の座標点数を、それぞれ $N, M$ とし、 $N \leq M$ とする。

以下に、ICP アルゴリズムによって $P$ を $Q$ の位置に合わせる手順を示す。ここで、 $P$ と $Q$ は、同一の3次元座標系内に存在するとする。

Step 1.  $P$ 中の $n$ 個の座標点 $p_i^{(k)}$ について、 $Q$ の中で各 $p_i^{(k)}$ の最近傍点を対応点 $q_i$ とする。ここで、 $k$ は、本手順Step 1～Step 6の繰り返し回数である。また、基本的には $n = N$ であるが、 $N$ が大きすぎて実際の処理が不可能な場合は、 $n < N$ として、 $p_i$ をランダムに選択するものとする。なお、 $Q$ 中のある1つの点 $q_i$ が、 $P$ 中の複数の点と対応することも可とする。

Step 2.  $n$ 組の $p_i^{(k)}$ と $q_i$ の距離の総和が、あるしきい値よりも小さい場合、位置合わせのための移動が完了したとして、Step 7に進む。

Step 3.  $p_i^{(k)}$ と $q_i$ の重心座標を求め、そこを中心とした座標に変換し、 $p_i'^{(k)}, q_i'$ とする。

$$\bar{p} = \sum_{i=1}^n p_i/n, \bar{q} = \sum_{i=1}^n q_i/n \dots\dots\dots (1)$$

$$p_i'^{(k)} = p_i^{(k)} - \bar{p}, q_i' = q_i - \bar{q} \dots\dots\dots (2)$$

Step 4.  $p_i^{(k)}$ ,  $q_i'$  から行列  $W$  を求めて、特異値分解し、行列  $U$ ,  $V$  を求める。

$$W = \sum_{i=1}^n p_i^{(k)} \cdot q_i' \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$W = U \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} V^T \quad \dots\dots\dots (4)$$

Step 5. 特異値分解の結果から、回転行列  $R$ , 並進ベクトル  $T$  を求める<sup>3)</sup>。

$$R = V \cdot U^T, T = \bar{p} - R \cdot \bar{q} \quad \dots\dots\dots (5)$$

Step 6.  $R$ ,  $T$  を用いて、 $P$  中の座標点を移動させ、Step 1 から繰り返す。

$$p_i^{(k+1)} = R \cdot p_i^{(k)} + T \quad \dots\dots\dots (6)$$

Step 7.  $p_i^{(1)}$  から  $p_i^{(k)}$  へ移動するための回転行列  $R$ , 並進ベクトル  $T$  を同様に求め、結果とする。

### 2.2 複数の部分形状の位置合わせ

ICP アルゴリズムを用いた位置合わせでは、2 組の形状データ  $P$ ,  $Q$  の位置ずれが微小であれば、精度良く位置合わせを行うことができるが、大きくずれている場合は、正しく位置合わせを行う、つまり、回転行列  $R$ , 並進ベクトル  $T$  を正しく求めることが困難であるという問題がある。また、物体のある方向から得た形状データと、反対側に計測装置を配置して得た形状データでは、元々、対応する座標点がないことから、位置合わせを行うことはできない。

一方で、計測装置の位置の変化が微小であれば、複数の部分形状間で対応点が存在する可能性がある。例えば、計測装置が物体の周囲を水平方向に回転しながら、順番に部分形状を得る場合、 $P_i$  と  $P_{i+1}$  の間に対応点は多く存在する。また、 $P_i$  と  $P_{i+2}$  の間にも、位置合わせの推定に有効な対応点が存在する場合もある。

本研究では、この点を考慮した、複数の部分形状の位置合わせ方法について示す。まず、複数の部分形状の中で、位置合わせの基準になるモデル形状を  $Q$  とし、 $Q$  に近い部分形状であるデータ形状を、 $P_1, P_2, \dots, P_N$  とする (図 1)。ここで、「 $Q$  に近い」とは、基本的には、計測装置を  $Q$  から離れるように動かした時の順番である。そして、2.1 節の方法で、例えば、 $P_1$  を  $Q$  に位置合わせし、 $P_1$  の 3 次元座標点を  $Q$  に移動し、

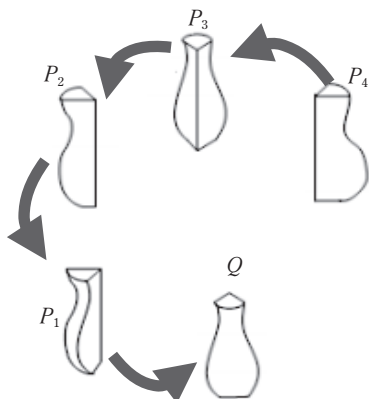


図 1 モデル形状  $Q$  とデータ形状  $P_i$

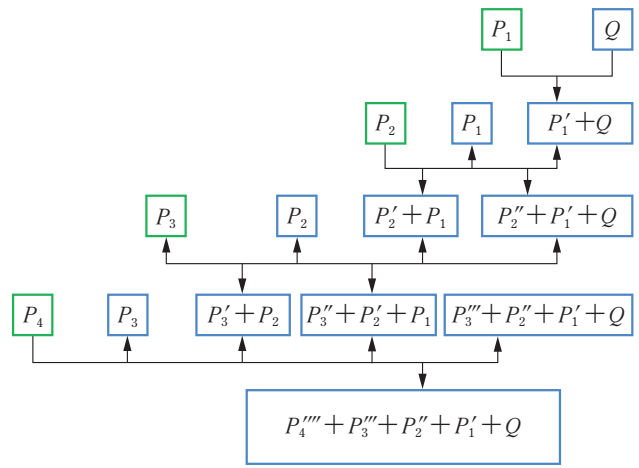


図 2 複数の部分形状を用いた位置合わせ

$P_1$  と  $Q$  の両方を合わせた 3 次元座標点の集合を、 $P_1' + Q$  と表す。ダッシュが座標変換を、+ が座標点の和集合を意味する。

そして、 $N = 4$  の場合の部分形状の位置合わせ方法を、図 2 および、以下に示す。 $N$  の数が増えた場合も、同様の処理となる。

Step 1.  $P_1$  を  $Q$  に位置合わせし、 $P_1'$  および部分統合形状  $P_1' + Q$  を求める。

Step 2.  $P_2$  を  $P_1$  に位置合わせし、 $P_2'$  および  $P_2' + P_1$  を求める。  
次に、 $P_2'$  を  $P_1' + Q$  に位置合わせし、 $P_2''$  と  $P_2'' + P_1' + Q$  を求める。

Step 3.  $P_3$  を  $P_2$  に位置合わせし、 $P_3'$  および  $P_3' + P_2$  を求める。  
次に、 $P_3'$  を  $P_2' + P_1$  に位置合わせし、 $P_3''$  と  $P_3'' + P_2' + P_1$  を求める。  
次に、 $P_3''$  を  $P_2'' + P_1' + Q$  に位置合わせし、 $P_3''' + P_2'' + P_1' + Q$  を求める。

Step 4.  $P_4$  を  $P_3$  に位置合わせし、 $P_4'$  および  $P_4' + P_3$  を求める。  
次に、 $P_4'$  を  $P_3' + P_2$  に位置合わせし、 $P_4''$  と  $P_4'' + P_3' + P_2$  を求める。  
次に、 $P_4''$  を  $P_3'' + P_2' + P_1$  に位置合わせし、 $P_4'''$  と  $P_4''' + P_3'' + P_2' + P_1$  を求める。  
次に、 $P_4'''$  を  $P_3''' + P_2'' + P_1' + Q$  に位置合わせし、 $P_4'''' + P_3''' + P_2'' + P_1' + Q$  を求める。

この場合、 $P_4'''' + P_3'''' + P_2'' + P_1' + Q$  が最終的な全周形状となる。この方法の場合、データ形状が、 $N$  個の場合、途中で、部分統合形状を、 $N \cdot (N - 1) / 2$  個生成し、また、 $N \cdot (N + 1) / 2$  回の位置合わせ処理を行うことになる。しかしながら、単純に隣り合う形状のみの位置合わせを適用するような場合と比べ、位置合わせの精度は向上すると考えられる。

## 3. 欠損部の検出

### 3.1 形状データの前処理とメッシュ化

全周形状が得られた後、欠損部の検出を行う。2 章までの方法で得られた形状データは、3 次元座標点の集合である。欠損部の検出は形状データを三角メッシュに変換して行うが、ここまでの全周形状は、多数の部分形状データ (座標点) の集合であるため、座標点のデータを間引く等の前処理が必要となる<sup>4)</sup>。本節では、メッシュ化とその前処理について、順番に示す。なお、実際の処理プログラムの一部に PCL<sup>5)</sup> を用

いている。

### 1. Voxel grid filter による点群の削減

まず、多数の座標点を削減する。全周形状の3次元座標点上に、既定の大きさのボクセルを配置する。1つのボクセル内に、1つ以上の3次元座標が含まれる場合、そのボクセルの重心座標1つに置き換える(図3(a))。これによって、点群の個数を削減する。

### 2. 平滑化

点群の座標値に含まれるノイズの削除を行う。点群中の各点を、順番に注目点  $x$  とし、その近傍点群  $P$  を既定の範囲で設定する(図3(b))。近傍点群  $P$  を用いて近似平面  $H$  を求め、その平面に対する高さの分布を求める。次に、その高さの分布から2次曲面を算出する。注目点  $x$  を近似平面  $H$  に下した時(q)に、2次曲面上を通る3次元座標を、平滑化後の座標とする。

### 3. 法線推定

メッシュ化の処理に用いるための、各点における法線ベクトルを求める。2と同様に、点群中の各点を、順番に注目点とし、その近傍を既定の範囲で設定する。近似平面を求め、その法線ベクトルを注目点の法線ベクトルとする(図3(c))。

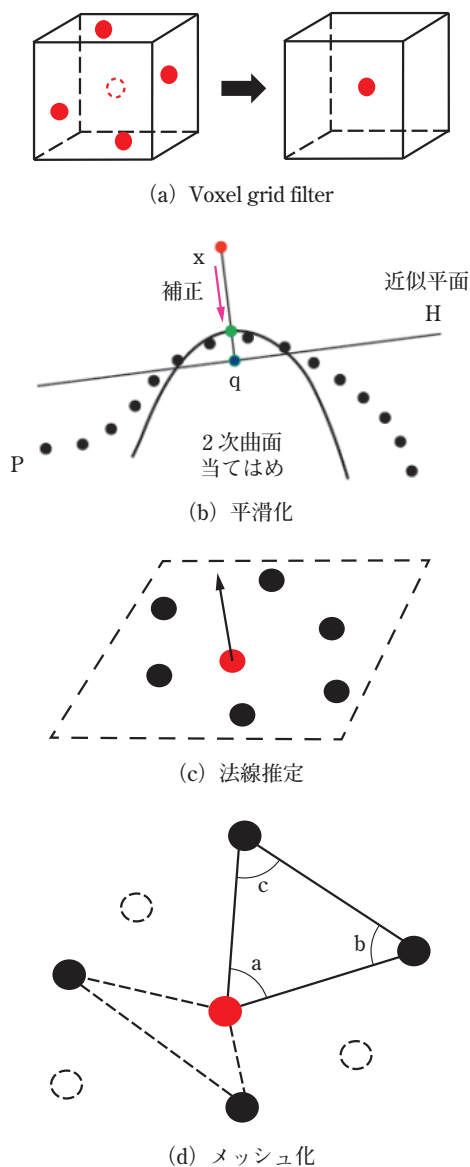


図3 形状データの前処理

### 4. メッシュ化

欠損部を検出するため、多数の三角形で形状を表す三角メッシュモデルを用いる。ここでは、ある注目点に対し、以下の条件を満たす2点を探索することで、三角メッシュを求める(図3(d))。

- 注目点の周囲の近傍点の距離と個数を指定し、その範囲内の近傍点を候補とする。
- 3で求めた各点の法線ベクトルについて、注目点の法線ベクトルとなす角度が既定の角度以内の近傍点を候補とする(図3(d)の黒点)。
- a), b)を満たす近傍点の中で、注目点と他2点で構成される三角形の3つの内角(a, b, c)が、すべて既定の範囲内である場合、三角メッシュを構成する。

### 3.2 三角メッシュ情報を用いた欠損部の検出

本研究において、形状データの欠損部としては、三角メッシュが存在しない場所を指す。三角メッシュが敷き詰められている場合、三角形の1つの辺を2つのメッシュが共有していることになる。もし、メッシュが存在しない穴(欠損部)があれば、その辺は1つの三角メッシュにのみ存在することになる(図4)。従って、三角メッシュの辺の共有の状態を調べることで、欠損部を求めることができる。なお、本研究において、形状データは、物体の表面形状のみを扱うことから、1つの辺は、2つの三角メッシュにのみ共有されている、つまり、3つ以上のメッシュには共有されていないとする。欠損部の検出は、以下の手順になる。

Step 1. すべての三角メッシュについて、それを構成する辺を、頂点の番号を用いてリストアップする(図4におけるA-B, B-C, C-A, C-D, D-B, B-C, D-E, E-B, B-D等)。この時、既に同じ名前の辺があった場合(B-C, B-D等)、その辺を消去する。

Step 2. 残った辺について、共通する頂点をつないだリストを作り、グループ化する(図4における赤線A-B → B-F → F-G → G-A)。なお、ある頂点から出発し、その頂点へ戻るリストが複数存在する場合は、構成する辺の総数が多い方を採用する。その場合、構成したリストの辺を除いて、再度、リストを作り、グループ化する。また、始点の頂点に戻れないリストは削除する。

Step 3. グループ化された辺の各リストについて、それを構成する頂点の3次元座標から、重心座標と近似平面を求める。頂点を近似平面に投影し、内部の面積を求め、それが既定の面積より大きければ、欠損部とする。

そして、Step 3で求められた重心座標と近似平面の法線ベクトルから、再計測するための計測装置の位置を求めることができる。

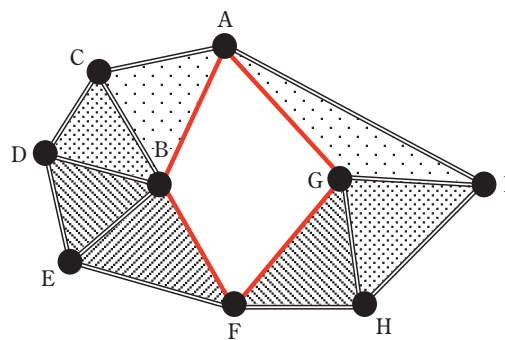


図4 三角メッシュにおける欠損部

## 4. 実験

### 4.1 実験方法

本研究では、対象物体の形状計測に、3D Systems 社の 3D スキャナ Geomagic Capture を用いる。また、この 3D スキャナは、6 軸の垂直多関節ロボットに搭載し、物体に対して、様々な方向から計測できるようにしている。使用した装置の外観を、図 5 に示す。また、対象物体としては、図 6 のような、高さ約 65mm の白い石膏像を用いた。

対象物体を計測するための 3D スキャナの配置を図 7 に示す。使用している 3D スキャナは、装置の前面中央から、約



図 5 3次元形状計測装置

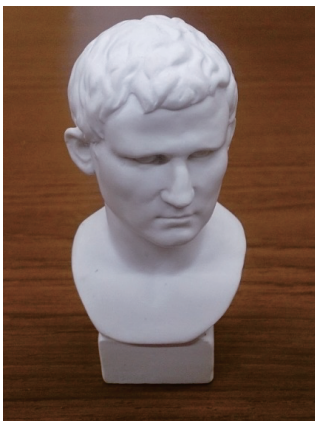


図 6 実験用の物体

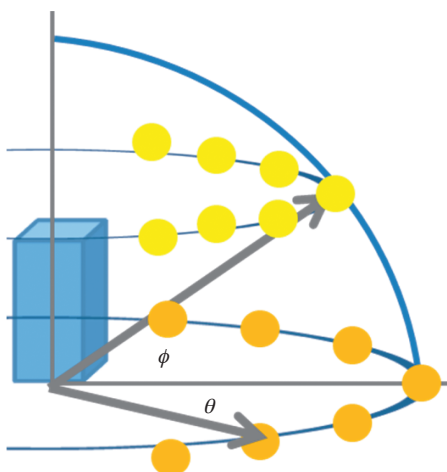


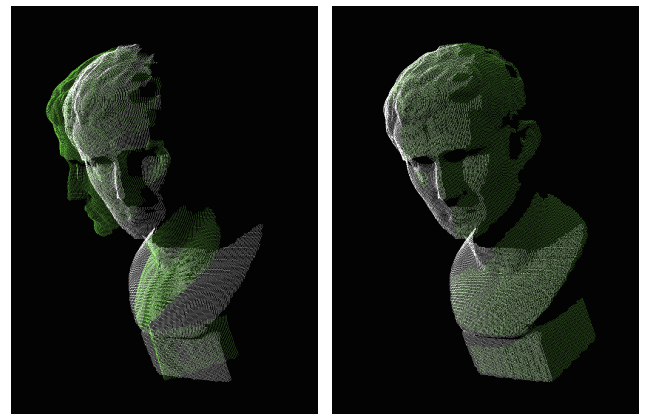
図 7 形状計測位置

400mm ± 100mm の範囲が計測可能であることから、物体から約 400mm 離して計測する。しかし、アームロボットの動作範囲の制限から、この距離では、対象物体の裏側に 3D スキャナを配置することはできないため、今回は、図 7 のように、物体に対して、仰角  $\phi = 0, 30$  度と、水平角  $\theta = 0, \pm 15, \pm 30, \pm 45$  度の 14 ヶ所に配置する。そして、 $\phi = 30$  度、 $\theta = 0$  度の位置で計測された部分形状を、位置合わせの基準であるモデル形状とする。

### 4.2 実験結果および考察

まず、位置合わせを行った結果を、図 8 に示す。白色が基準とするモデル形状であり、緑色が、 $\theta = 45$  度、 $\phi = 30$  度の場合のデータ形状である。(a) が位置合わせ前の配置であり、(b) が位置合わせ後である。ここでは、2 章で示したように、計測したすべての形状を利用することで、ほぼ正確な位置合わせの結果が得られている。なお、隣り合う 2 つの形状のみで位置合わせを行った場合は、大きく配置がずれた結果になったことを確認している。

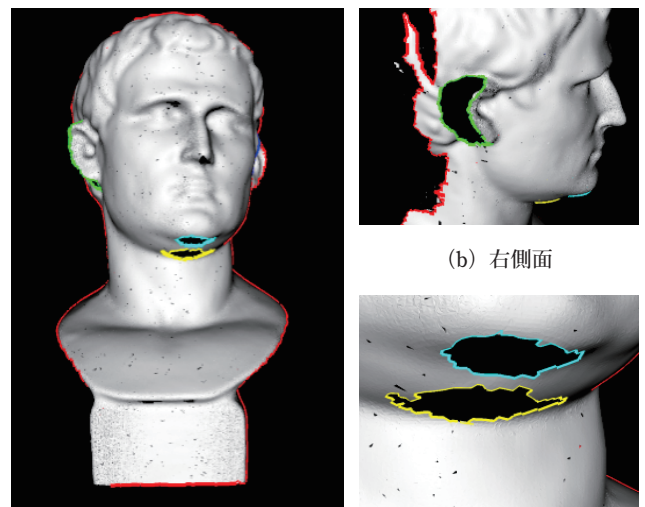
次に、統合した形状に対して、欠損部を求めた結果を図 9 に示す。ここでは、面積の大きい欠損部の上位 5 つについて、辺に色を付けて示している。一方、面積が 6 位以下の面積が小さい欠損部の辺には色を付けていない。今回は、対象物体



(a) 位置合わせ前

(b) 位置合わせ後

図 8 形状の位置合わせの結果



(a) 前方

(b) 右側面

(c) 顔の下

図 9 欠損部の検出結果

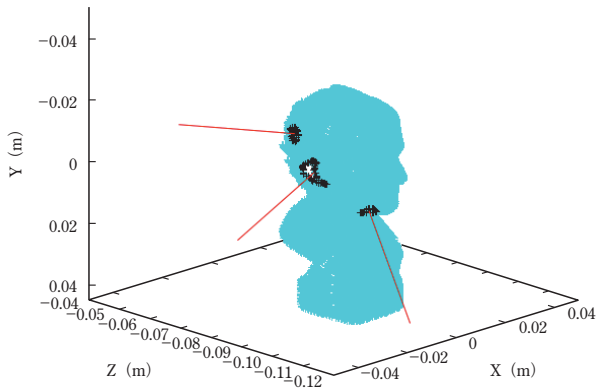


図 10 欠損部の法線方向

の前面しか計測できていないため、後部が大きな欠損部として検出されていることが分かる。

また、右側面から下方にかけて存在する3ヵ所の欠損部について、その法線方向を求めた結果を図10に示す。今後の研究において、この方向を基に再計測位置の算出や再計測した形状の統合を行う予定である。

今回の実験結果では、目視にて、面積の大小にかかわらず、ほぼ正しく欠損部を検出することができていることを確認したが、検出を行う際に設定するしきい値等の値によっては失敗する場合もあり、今後は、このようなしきい値等をどのように設定するかという点も検討する必要がある。

## 5. おわりに

本稿では、物体のデジタルアーカイブを行うための、自動的な全周形状計測システムの実現を目指し、部分形状の統合

および欠損部の検出方法について示した。部分形状の統合方法として、ICPアルゴリズムを基にした提案アルゴリズムでは、多数の部分形状を用いても誤差の蓄積が少ないことから精度良く統合できるが、途中で生成する形状データが非常に多くなることから、今後は、より効率的な手法の検討が必要である。また、欠損部についても、ほぼ正しく検出することは可能であったが、設定するパラメータの値が試行錯誤的に求めたものであるため、これらの値を自動的に算出する方法も検討する必要がある。

今後は、物体側もターンテーブルに載せる等して、計測装置の配置の自由度を上げ、欠損部の再計測を可能にするとともに、使用している3Dスキャナが形状のみ計測できるものであるため、カメラによって物体表面の色も取得できるように拡張する予定である。

## 参考文献

- 1) 池内克史, 大石岳史 編著: 3次元デジタルアーカイブ, 東京大学出版会, (2010)
- 2) 増田 健: ICPアルゴリズム, 情処研報, 2009-CVIM-168(23), pp.1-8, (2009)
- 3) 玉木 徹: 姿勢推定と回転行列, 信学技法, SIP2009-48, SIS2009-23, pp.59-64, (2009)
- 4) Z. C. Marthon, R. B. Rusu and M. Beetz: On Fast Surface Reconstruction Methods for Large and Noisy Point Clouds, ICRA, '09. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3218-3223, (2009)
- 5) Point Cloud Library (PCL): <http://pointclouds.org/>



浮田 浩行 徳島大学 (770-8506 徳島市南常三島町 2-1) 大学院 社会産業理工学研究部 講師

1992年3月岡山大学工学部情報工学科卒業。  
1994年3月同大学大学院工学研究科情報工学専攻修了。1995年徳島大学工学部助手。  
2004年同講師。博士(情報学)。主に、画像処理・コンピュータビジョンに関する研究に従事

<http://www-cv.me.tokushima-u.ac.jp/>

## Abstract

We discuss a 3D shape reconstruction method to obtain a whole shape of an object for the digital archive. We propose an integration method of partial shapes measured from different viewpoints. But, the integrated shape often includes defects such as holes or chips. So, we also propose defect detection and re-measurement method. From experiments, we can show the effectiveness of our proposed method.



Key Words

Digital archives, 3D shape measurement, 3D scanner, Defects