芸術科学会論文誌 Vol. 17, No. 5, pp. 115 – 125 (2018)

土器復元のための二次元パネルを用いた土器片の空間姿勢最適化アルゴリズム

李 春元 (正会員)　　今野 晃市 (正会員)
岩手大学大学院工学研究科

Spatial Posture Optimization Algorithm by Using 2D Panel Interface for Reassemble Earthenware

Chunyuan Li　　Kouichi Konno
Graduate School of Engineering, Iwate University.

概要
遺物である土器は，多くの場合が砕けた状態で遺跡から出土する．土器の復元は，出土した破片の色や模様，形を手がかりとして，試行錯誤を伴う手作業で行われているため，破片が多いほど多くの時間と労力がかかり，専門的な知識が必要とされる．しかし，土器復元結果を解析することで，当時の人間の活動についての推測が可能であるため，実物の復元が困難である場合，コンピュータ上で仮想的に復元する手法が必要がある．また，仮想展示向けの三次元モデル生成や 3D プリンタを利用して作られた土器は，歴史博物館や学校での展示資料としての教育的価値がある．そこで近年，土器を含む様々な遺物に対応するために，コンピュータによる組み立て方法が開発されてきた．しかし，従来手法では，破片の輪郭と断裂面の断面形状により隣接する破片を決定できるが，表面が湾曲しかつ器厚の薄い土器片に関しては，湾曲を考慮した三次元空間姿勢を算出することは難しい．そこで本論文では，縄文時代の円筒土器を対象とし，三次元計測点群に基づき，すべての隣接情報を同時に満足できるような土器片の空間姿勢最適化アルゴリズムを提案する．本手法は，いくつかの土器片に適用して，有効性を確認した．

Abstract
Earthenware is a kind of relic. By analyzing the earthenware, it is possible to conjecture about human activities at the time. Unfortunately, most of them have been damaged when excavated from the ruins. The traditional restoration method for earthenware is typically by manual work. It takes time-consuming and requires special knowledge in archaeology. Since there is always a mass of fragments mixed together color, pattern, and shape of fragments would be mainly used as clues. If entities are difficult to be restored, virtual objects restoration on the computer offers another possibility. In addition, virtual earthenware exhibits made by 3D models and replica earthenware exhibits made by 3D printers have educational values in historical museums and schools. In the present, in order to repair various of relics including earthenware, methods that assembly of earthenware pieces using computer-assisted have been well developed. According to the conventional method, adjacent fragments can be defined by the contour of the fragments and the cross-sectional shape of the rupture plane. Unfortunately, earthenware fragments are much different from other kinds of relic. Its curved surface and thin body make it difficult to calculate a 3D spatial posture. In our study, we proposed a spatial posture optimization algorithm for cylindrical pottery in the Jomon period which based on 3D measurement point cloud. This algorithm can meet all the adjacent fragments information, simultaneously. We have used this algorithm to repair several earthenware fragments successfully and effectively. It turns out to be an approach that deserves widespread use.

1　はじめに

遺物の一種である土器は多くの場合砕けた状態で遺跡から出土する．土器の破片は土器片と呼ばれ，土器片は接合することによって元の器の形へと復元される．一般的に発掘された土器は，発掘現場で出土した地点や日付などを記録して調査室に持ち帰り，洗浄した後に破片をつなぎ合わせながら元の形に復元する．このとき，土器片が欠落している部分は石膏などで穴埋めする．図 1 は，手作業で復元された縄文時代の円筒土器を示す．左下の白い部分が石膏で穴埋めした部分である．

図 1　縄文時代の円筒土器

また，図 2 に示すように，土器片の復元は出土した破片の色や模様，形を手がかりとして，試行錯誤を伴う手作業で行われているため，破片が多いほど多くの時間と労力がかかり，専門的な知識が必要とされる．さらに，手作業には土器を破損するリスクが伴うため，出土した土器片は歴史的，文化的に価値が高いものであると判明した場合は，破損を回避するため，土器片の復元作業を行わずに保存されることもある．しかし，土器復元結果を解析することで，当時の人間の活動についての推測が可能であるため，実物の復元が困難である場合，コンピュータ上で仮想的に復元する手法が必要である．また，仮想展示向けの復元や 3D プリンタなどで出力した触れる土器は，歴史博物館や学校での展示資料としての教育的価値がある．そこで近年，土器を含む様々な遺物に対応するために，コンピュータによる組み立て方法が開発されてきた [1–11]．これらの従来研究は，すべてのマッチング工程の自動化を目指す研究と，ユーザとのインタラクティブな組み立て作業の支援を目指す研究とに大別できる．

三次元的な復元を支援する従来手法 [10] では，剥離面のマッチングにより，接合される．面形状の幾何学的な一致により，石器の三次元的な位置関係と姿勢を決定することができる．しかし，土器片の割れ口（断面）は厚みが薄く，凹凸が激しいので，石器剥離面と比較して断面形状を用いて土器片の三次元的な位置関係と姿勢を決定することが難しい．土器片の断面と比較して，表面は領域が広く，特徴量の抽出が容易なため，土器表面の形状特徴を利用してマッチングする手法が有効である．

インタラクティブな土器復元支援技術の一つに，土器片を計測して得られた点群データやポリゴンデータ，画像データから，ジグソーパズルのピースに相当する素材を生成し，ユーザがパズル感覚でデータを操作する手法がある [1]．文献 [1] は，素材となる土器片の情報を二次元パネルで表現して，隣接ピースを組み立てる情報を構築する手法である．しかし，二次元平面上で隣接土器片を探索することのみでは，仮想空間での三次元モデル生成には不十分である．また，土器片表面情報を逐次的に組み立てる手法も考えられるが，著者らの予備実験の結果，逐次的なアルゴリズムでは組み立てによる誤差が蓄積し，途中で形状の整合性が取れなくなる．よって，土器片の隣接関係が整合するような，姿勢最適化アルゴリズムが必要である．

図 2　人手での復元作業 (出典：IPA「教育用画像素材集サイト」 http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/)

そこで本論文では，図 1 に示すような縄文時代の円筒土器を対象とし，土器片を組み立てたときに，形状の不整合が起こらないようにするための，隣接土器片の空間姿勢最適化アルゴリズムを提案する．本手法は，まず，前処理として，文献 [1] の手法で複数の土器片の隣接関係を取得する．次に，二つの隣接する土器片の空間姿勢

を一致させるアルゴリズムを複数の接合箇所に同時に適用し，誤差の総和を最小にする空間姿勢を求める．本手法を実装し，一つの円筒土器を構成するいくつかの土器片に適用し，元の円筒土器の形に近い三次元空間姿勢結果を得ることができた．

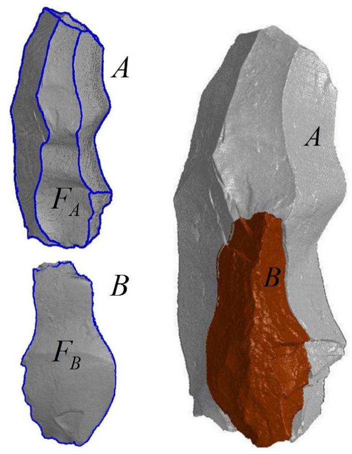
2 関連研究

2.1 断面情報を用いたフレスコ破片の復元

テラ島の壁画など，表面がほぼ平面形状であるような破片を復元する手法 [6] が提案されている．文献 [6] では，大量に出土する破片を，計測専門家でない考古学者が，容易にかつ短時間で計測するシステムを開発し，そのシステム上で動作する，破片のモデリングとマッチング手法について説明している．文献 [6] の手法は，文献 [5] の手法に基づいて，計測した点群から，破片断裂面の断面線を複数想定し，破片間の断面線の一致度によって，隣接する破片を検出する．また，文献 [6] の手法は，フレスコ壁の破片のように，表面がほぼ平面であることを想定しているため，二次元のジグソーパズルと同様に，破片の輪郭と断裂面の断面形状により位置を決定できる．しかし，本研究で対象とする土器片のように，表面が湾曲しかつ器厚の薄い土器片に関して，湾曲を考慮した三次元空間姿勢を算出することは難しい．

2.2 接合資料が混在する状態での剥離面マッチング手法

石器の接合資料とは，同一の石核から製作された石器同士が接合され，隣接する石器間の位置や姿勢を復元した資料のことである．文献 [10] は，石器剥離面をマッチングすることによって，複数の接合資料が混在する場合に，石器の接合資料を作成する手法を提案している．文献 [10] の手法では，まず石器の計測点群から剥離面を抽出する．次に，計算効率化のために点群データを軽量化する．その後，適切な隣接剥離面を検索することで石核から石器の接合資料を作成する．文献 [10] の手法は，図 3 に示すように，接合する面などの一致で石器の三次元的な位置関係と姿勢を決定することができる．しかし，文献 [10] は面形状が滑らかな場合に適用可能であるが，皿や蓋，縄文土器などの器厚の薄い形状モデルでは，割れ口（断面）の厚みが薄く凹凸が激しいので，石器剥離面と比較して断面形状を認識するのが難しい．そのため，文献 [10] の手法で表面が湾曲しかつ器厚の薄い土器片に三次元的な位置関係と姿勢を決定することは困難である．

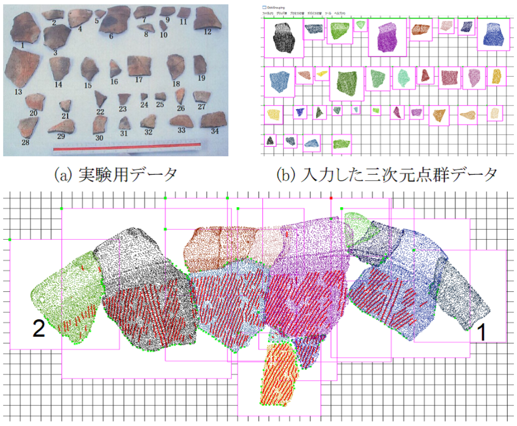


(a) (b)

図 3 剥離面によるマッチング手法

2.3 二次元パネルに基づく土器片組み立て支援手法

インタラクティブな土器復元支援技術の一つに，土器片を計測して得られた点群データやポリゴンデータ，画像データから，ジグソーパズルのピースに相当する素材を生成し，ユーザがパズル感覚でデータを操作する手法がある [1]．文献 [1] の手法は，破片断裂面の輪郭と凹凸を用いて，土器片の輪郭線の形状解析を行い，得られた特徴的な箇所を端点として輪郭線を分割する．特徴点で分割された輪郭線は，分割線と呼ばれている [8]．分割線ペアは分割線形状が最も類似しているもので，隣接情報となる．図 4 に示すように，文献 [1] の手法は土器片同士のマッチング情報を，土器片の二次元的な配置で表現するものである．具体的には，次に示すような流れで，インタラクティブに土器の組み立てを行うことができる．まず土器片の計測情報を，ディスプレイ上に二次元的に配置する．次に，文様や口縁部などの特徴量を提示しながら，ユーザがパズル感覚で思考できるようなマッチング機能をいくつか提供する．ユーザは定められた手順に従って操作することによって，直感的にマッチングする土器片ペアを決定することができる．本論文では，図 4 の (c) に示すように，文献 [1] で得られた隣接情報を土器片の並び順の決定に利用する．



(a) 実験用データ　(b) 入力した三次元点群データ

(c) 二次元上の復元した結果

図 4　二次元パネルに基づく土器片組み立て支援手法

3　提案手法

3.1　概要

2.3 節で述べた手法で土器片の隣接情報を表した結果を図 4 の (c) に示す．この図から確認できるように，二次元平面上で隣接した状態では，それぞれの分割線ペアは分割線形状が最も類似しているものであるが，土器片同士の空間姿勢が整合するかどうかは不明である．例えば図 4 の (c) では，右端の 1 と左端の 2 は隣接するが，三次元上の組み立てにより，1 と 2 が接合できる必要がある．そこで本論文では，隣接情報を利用し，土器片の三次元点群データに基づく，土器片同士を三次元空間でマッチングする手法を提案する．本手法では，土器片が回転形状と仮定し，図 4 の (c) の 1 と 2 が隣接する場合にも，土器片の空間姿勢が決定できるような手法であることが特徴である．

3.2　二つの土器片の姿勢最適化アルゴリズム

本節では二つの隣接する土器片のマッチングについて説明する．マッチングした二つの土器片の分割線を共有境界線とみなして，境界線上の点における接平面が，隣接する土器片でお互いに一致すれば，空間姿勢が合うと考えられる．そこで，本手法では分割線上に定義された接平面が一致するような座標変換を導出し，一方の土器片に適用することで，隣接する土器片の空間姿勢を決定する．図 5 に示すように，隣接土器片 A と B の接合部の分割線ペアをそれぞれ分割線 L_A と L_B とする．以下に，二つ土器片 A と B の空間姿勢最適化手法の手順を示す．

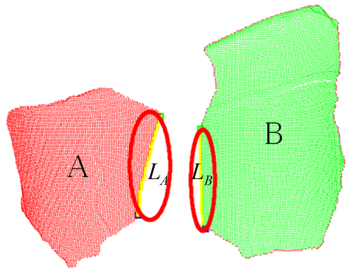


図 5　分割線ペア

1. 分割線上の各点における法線ベクトルを求める．法線ベクトルは分割線上の各点に対して近傍の点を KD-Tree を使用し k 個取得する．そして，取得した k 個の点群を通るような平面を最小二乗法を用いて求める．その後，点群から求められる平面の法線を分割線上の点の法線ベクトルとする．図 6 に分割線上の対象点における法線ベクトル $\mathbf{n}$ を示す．ここでは，$k = 10$ とする．

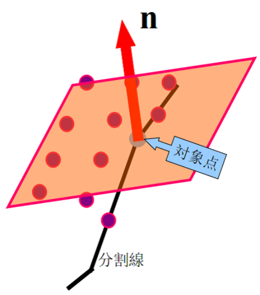


図 6　対象点の法線ベクトル

2. 共有境界線における点ペアを構成する．図 7 に示すように，分割線 L_A 上の点 $\mathbf{a}_i$ に対して，分割線 L_B を構成する点列との最短距離となる点 $\mathbf{b}_i$ を求め，$(\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i)(i = 0, \cdots, n)$，を点ペアとして構成する．$n$ は点ペアの数である．さらに，求められた点ペア $(\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i)$ に対して，それぞれの点における法線ベクトルの方向で，大きさが 1 のところに新しい点ペア $(\mathbf{s}_i, \mathbf{t}_i)(i = 0, \cdots, n)$ を生成する．
3. 位置合わせを行う．二つの土器片の分割線上の点および法線ベクトルの方向に生成した点ペアの距離の 2 乗和 D が最小となる座標変換 $\mathbf{M}$ を求める．

$$D = \sum_{i=0}^{n} (d_i^2 + e_i^2) \tag{1}$$

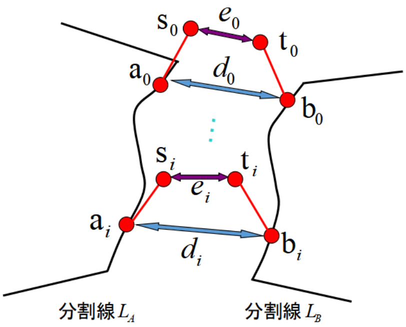


図 7　土器片間の距離の定義

ただし，式 (2) に示すように，n は点ペアの数である，d_i，e_i は分割線上にある各点ペアの距離を表す．

$$d_i = |\mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i|, e_i = |\mathbf{s}_i - \mathbf{t}_i| \tag{2}$$

座標変換 $\mathbf{M}$ を追加し展開した式が (3) である．

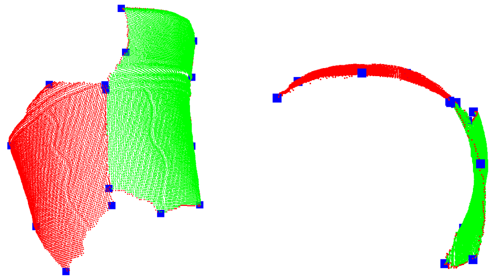
$$D = \sum_{i=0}^{n} (|\mathbf{a}_i - \mathbf{M}\mathbf{b}_i|^2 + |\mathbf{s}_i - \mathbf{M}\mathbf{t}_i|^2) \tag{3}$$

ただし，座標変換 $\mathbf{M}$ は式 (4) に示される行列である．r の定義は付録に示す．

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

4. 回転角 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$，平行移動 T_x, T_y, T_z を未知数として式 (3) の D を最小にする回転角，平行移動を，最小二乗法により導出する．本手法では，ヤコビ行列を用いて非線型方程式を解くこととする．導出の過程は付録に示す．

二つの土器片モデルの分割線上の点および法線ベクトルの方向に生成した点が一致すれば，D の値は小さくなり，逆に一致しなければ大きくなる．そこで，式 (1) の距離の 2 乗和が最小となる座標変換を求める．そして土器片 A のすべての点に，算出された座標変換を適用し，D が最小となる適当な位置に土器片 A と土器片 B を配置することで，三次元的な姿勢を最適化する．結果を図 8 に示す．図 8 の (a) は横方向からの視点，図 8 の (b) は上方向からの視点でレンダリングを行ったものである．



(a)　　(b)

図 8　二つ土器片の空間姿勢最適化結果

本節の手法を適用し，図 9 に示すような土器の口縁部周りの土器片を右側から左側に向かって逐次的にマッチングした結果を，図 10 に示す．図 10 に示している番号 7, 8, 9 は各隣接土器片間の接合部の分割線ペアである．また，丸で囲ってある部分は，9 番の分割線ペアが緑の土器片とシアンの土器片で一致していない箇所である．これは，8 番の分割線ペアをマッチングし，赤色の土器片にシアンの土器片を接合した結果，シアンと緑の土器片の位置が合わなくなったことを示している．このように，逐次的なマッチングでは，マッチング誤差が蓄積し，形状の整合性が維持できないことがある．次節は逐次的にマッチング誤差が蓄積する問題を解決するため，複数の土器片を同時に処理する土器片の空間姿勢最適化アルゴリズムについて述べる．

図 9　土器口縁部の土器片

図 10　誤差の蓄積による形状不一致例

3.3 空間姿勢最適化

各土器片の空間姿勢を維持しながら，マッチング誤差が蓄積する問題を解決するため，各接合部の誤差の総和を最小にする空間姿勢を算出する．具体的なアルゴルズムでは，二つ土器片の空間姿勢最適化の式を複数の土器片の空間姿勢を最適化できるように拡張し，すべての土器片の空間姿勢を最適化することで実現する．各接合部の誤差の総和を算出するために，各接合部の分割線ペアを取得する必要がある．ここで，文献 [1] の分割線ペアを取り出す手法を利用した．図 11 の (b) に示している番号 2, 3, 4, 5 の赤い丸で囲まれている部分は，各隣接土器片間の接合部の分割線ペアである，D_i は分割線間距離である．

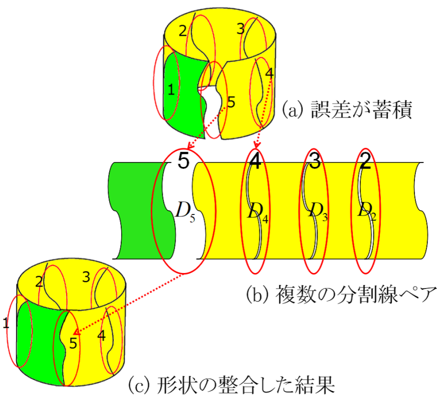


図 11 複数土器片姿勢最適化

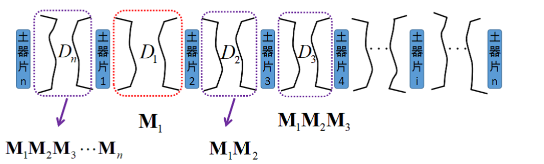


図 12 土器片間の分割線間距離の最小化に基づく各土器の座標変換

本研究では，2 つ土器片の空間姿勢最適化の式 (1) を複数の土器片の空間姿勢を最適化できるように拡張し，すべての土器片の空間姿勢を最適化することで実現する．図 12 に示すように，各土器片間の接合部の分割線ペア上の点および法線ベクトルの方向に生成した点ペアの距離の 2 乗和 D_i が最小となる座標変換を求める．式 (1) を複数の土器片に拡張すると式 (5) のようになる．ここで，$\mathbf{M_i}$ は座標変換，n は分割線ペアの数である．各土器片同士の分割線ペアの距離 $D_1, \cdots, D_n$ の総和 D が最小となる座標変換が求める．ここで，D を評価値と定義する．評価値 D が最小となるときは，誤差が最小となる．図 11 の (a) 示すように，回転形状の端の部分が閉じる場合，本手法を適用することで，図 11 の (c) に示すような，形状の整合した結果を得ることができる．

$$D = \sum_{j=1}^{n} D_j \tag{5}$$

図 12 に示すように，土器片に対して適用する座標変換は固定した端から順番に，$\mathbf{M_1}, \mathbf{M_1M_2}, \cdots, \mathbf{M_1 \cdots M_n}$ となる．

4 実験結果

3 章で述べた手法を，一つの円筒土器を構成するいくつかの土器片に適用したときの結果を示す．なお，本実験に使用する機器は，OS は Windows 10 Pro，CPU は Intel Core i7 3.40GHz，メモリは 8.00GB である．

4.1 遺跡の学び館からの遺物の事例

本実験に用いた土器片データ 1 は図 13 に示す盛岡市遺跡の学び館から借用したものである．これら 34 個の土器片を組み立てることで，ひとつの土器を形成できる．文献 [12] の手法により，土器片を 0.8mm 間隔で計測したデータの各点数が 1,000～13,000 個である．本実験は，図 4 の (c) に示す文献 [1] のシステムで得られた隣接情報を入力とし，図 1 に示している円筒土器の形に近い，三次元空間姿勢結果が得られるかどうかを検証する．

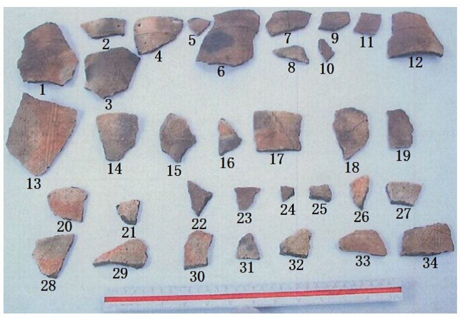


図 13 実験用土器片データ (土器片の提供は遺跡の学び館より [13])

図 14 は，土器の口縁部を含む土器片である．これらの土器片を組み立てると，土器の口縁部が復元できる．本手法を適用した結果が図 15 である．図 15 の (a) は下

から見た結果である．図 15 の (b) は正面から見た結果である．図 15 に示すように，口縁部は円形状にできた．

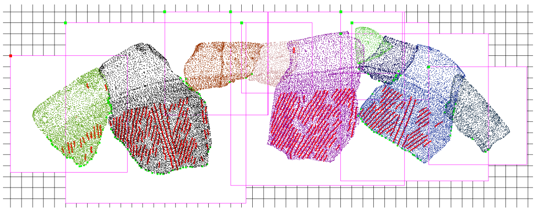


図 14　土器口縁部の土器片

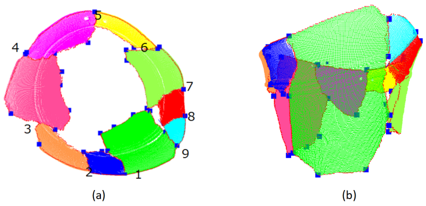


図 15　空間姿勢最適化の結果

表 1 は，逐次的な手法と本手法を適用したときの，各土器片の空間姿勢の評価値 D の変化を表し，接合部の誤差 D_i の減少を青，増加を赤で示している．D_5 を除き評価値 D は減少し空間姿勢の最適化が行われている．特に，9 番の減少量が 20648.9 となっていることで土器片の分割線ペアの距離の 2 乗和 D_9 の値が小さくなることが確認できる．また，D_5 の増加量は小さいため本手法で効果的に空間姿勢の最適化ができたといえる．表 2 は図 15 のように，姿勢最適化を行った際の計算時間を表している．本実験で利用した土器片に関して，手作業での組み立てに要する時間は 21 時間程度である．よって，本提案手法は効率的に空間姿勢の最適化を行うことができたといえる．図 16 は，文献 [1] の手法で二次元的に復元した結果である．この結果に基づき，本手法によって，複数の土器片データを三次元上で空間姿勢姿勢最適復元した結果を図 17 に示す．図 17 に示すように，21 個の土器片を三次元空間姿勢上に復元できた．

4.2　万福寺遺跡群から出土した遺物の事例

図 18 に示すように，出土した土器片を二次元平面上で復元した記録が発掘調査報告書 [14] に記載されている．発掘調査報告書 [14] により，口縁部を含めて 43 点の土器片が出土し，このうち 22 点に接合関係が認められた．これらの土器片を文献 [12] の手法により，0.4mm 間隔で計測し，文献 [1] の手法を適用して得られた隣接情報を図 19 に示す．図 19 の 1 番から 5 番までと 7 番は口縁部を含む土器片であり，本手法を適用することで三次元モデルを復元できるかどうかを検証する．ただし，6 番と 8 番から 12 番までは，データが不足しているため組み込んでいない．空間姿勢最適化の結果が，図 20 である．図 20 の (a) は側面から見た結果である．図 20 の (b) は正面から見た結果である．▲ は，5 番の土器片を

表 1　評価式 D の変化

	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
逐次	240.18	475.45	437.35	237.1	67.04
本手法	174.76	372.78	50.26	176.95	70.62
差分	65.41	102.68	387.09	60.15	3.58
	D_6	D_7	D_8	D_9	D
逐次	153.94	214.07	367.65	20906.7	23099.49
本手法	150	170.13	252.17	257.8	1675.47
差分	3.94	43.94	115.49	20648.9	21424.02

表 2　空間姿勢最適化の計算時間

土器片数	空間姿勢最適化の計算時間
9	57.07s

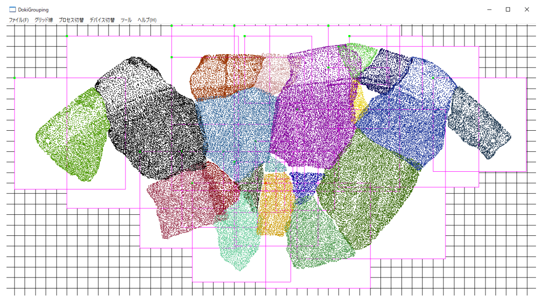


図 16　二次元上復元した結果

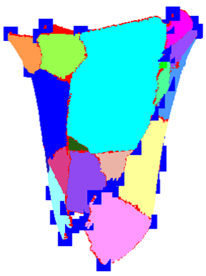


図 17　三次元空間姿勢最適化の結果

示している．図 20 の (b) に示すように，口縁部は半円のような形状にとなった．

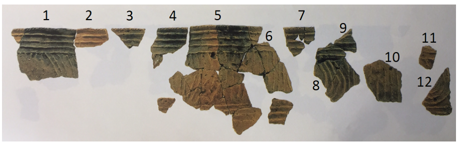


図 18　実物の土器を復元した記録

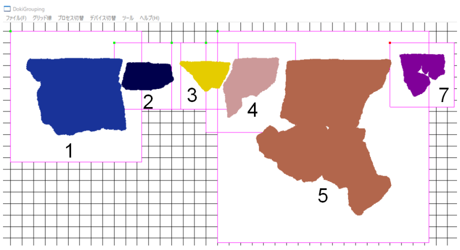


図 19　土器口縁部の土器片


(a)側面から見た結果　(b)上から見た結果

図 20　三次元空間姿勢最適化の結果

4.3　評価

本手法を評価するために，本実験で復元した土器データを正解データの点群と比較する．ここでは，まず，遺跡の学び館からの遺物の事例について評価する．図 13 に示すように，手作業で復元した土器を，写真計測して取得した三次元点群データを正解データとする．図 21 は，正面と上の二方向から見た手作業の復元結果を示している．図 21 は，土器片の数は 34 個であり，出土したすべての土器片を使用している．手作業で復元した土器モデルの点数は約 62,871 個である，土器の口縁部の最大の口径は約 200mm，最小は約 190mm である．土器の底部の最大の口径は約 105mm，最小は約 106mm である．土器の高さは約 240mm である．図 22 は，本手法により復元した三次元モデルである．モデルの点数は 47,600 個である．正面と上方向の二方向から見たときの復元した結果を示している．図 21 と比べると，赤い丸の部分が多少ずれている．

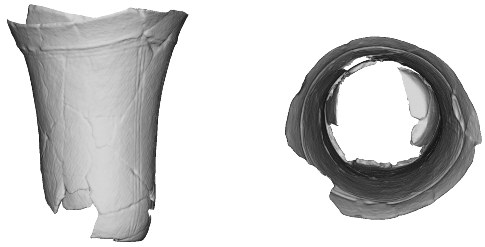

(a)正面から見た結果　(b)上から見た結果

図 21　手作業の結果で得られた三次元点群データ

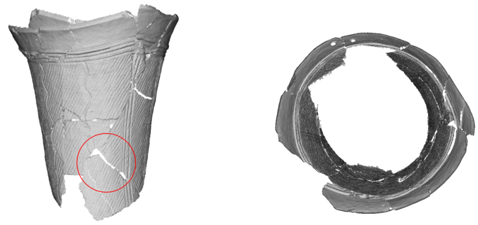

(a)正面から見た結果　(b)上から見た結果

図 22　本手法による得られた結果

本手法で復元した結果が妥当かどうかを評価するために，文献 [15] の手法により，二つの点群モデルの位置合わせを行い．その後，文献 [16] の評価手法により，手作業の結果と本手法の結果を重ね合わせて比較する．図 23 に示すように，赤い点群モデルは本手法による得られた結果であり，緑の点群モデルは正解データである．図 23 の (a) から (f) は，多方向から見た結果を示している．ここで，文献 [16] の手法により，二つの点群モデルの頂点間の離れ距離 d を求めることで，近似度を評価する．離れ距離とは，一方の点群の各点から，もう一方の点群の最近傍点とのペアを作成し，ペア間の距離を表したものである．手作業の結果と本手法の結果は復元された土器片の数が異なるため，文献 [15] の手法を利用するとき，対応する土器片が存在しない箇所では，点ペアの距離が大きくなる．適切な評価を行なうため，誤差の大きい点ペアを削除する．削除されなかった残りの 40,119 個の対応付けられた点の平均離れ距離は 2.69mm となる．平均離れ距離を土器の口縁部における最小口径である 190mm を比較すると 1.4% 程度のずれである．また，最大離れ距離 10mm を土器の底部における最小口径で

ある 105mm を比較すると 9.5% 程度のずれである．これらの値から，二つのモデルの差分は，10% 未満であり，二つのモデルはほぼ一致していることが確認できた．土器の復元という観点では十分な品質である．

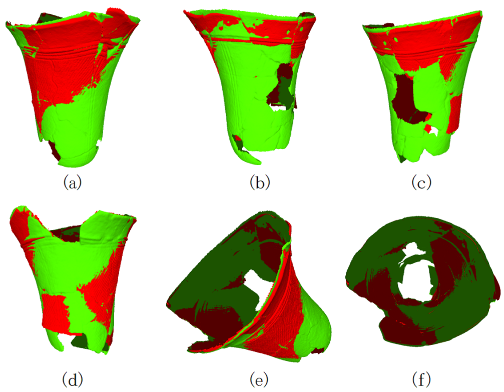


図 23　比較 1:手作業結果と本手法の結果

次に，万福寺遺跡群から出土した土器片の組み立て結果を評価する．万福寺遺跡群から出土した遺物は非常に貴重な遺物のため，手作業で復元せずに保存された．図 24 は，図 18 に示した土器片の実測図である．図 24 の下図に示すように，口縁部を含む土器片は一部分だけが出土している．ここでは，① から ④ までの四つのグループに分かれた土器片グループのうち ① 番と ③ 番のグループの形状が実測図とどの程度一致しているかを評価する．土器片の形状からは，四つのグループは隣接していると見なして，組み立てを実施したが，実測図上は離れているので，個別に評価する．

図 25 に示すように，実測図と本手法の部分的な結果を重ね合わせて比較する．発掘調査報告書 [14] に記載されている推定した口縁部の口径は 21cm であることにより，本手法で得られた口縁部の口径と比較する．① 番と ③ 番のグループの形状により，本手法で得られた土器の口縁部の口径を算出する．表 3 に示すように，口径は 20.1cm と 19.7cm である．口径の離れ距離 0.9cm と 1.3cm を土器の推定した口縁部の口径である 21cm を比較すると 4.2% と 6.2% 程度のずれである．これらの値から，差分は 10% 未満であり，ほぼ一致をしいていることが確認できた．土器の復元という観点では十分な品質である．② と ④ は単一の土器片なので，評価は行っていない．

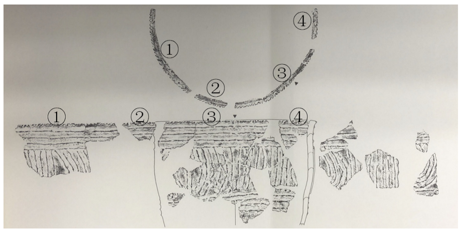


図 24　実測図

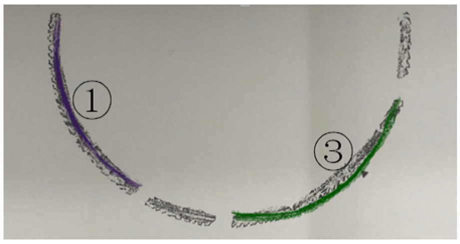


図 25　比較 2:実測図と本手法の結果

表 3　口径の値

グループ番号	口径の値 (cm)
①	20.1
③	19.7

5　まとめ

本論文では，縄文時代の円筒土器を対象とし，土器片を組み立てたときに，形状の不整合が起こらないようにするための，隣接土器片の空間姿勢最適化アルゴリズムを提案した．本手法を実装し，一つの円筒土器を構成するいくつかの土器片に適用し，元の円筒土器の形に近い三次元空間姿勢結果を得ることができた．今後の課題としては，二次元上で配置が困難な土器片の位置を決定するアルゴリズムを開発する必要がある．

6　謝辞

土器のデータをいただいた盛岡市遺跡の学び館に感謝する．本研究の一部を実施していただいた，修了生の及川聡氏と修士 2 年生の古川勝氏，および有益な助言をいただいた査読者に感謝する．

参考文献

[1] 李春元，松山克胤，今野晃市: “2 次元パネルに基づく土器片組み立て支援システム”， 芸術科学会論文

誌，Vol.16，No.3，pp.29-39，2017.

[2] O.Satoshi, K.Matsuyama, K.Konno, Y.Tokuyama, “An Examination of Earthenware Restoration System with the Direct Contact to Measured Points” , IWAIT 2012, CD-ROM 2012.

[3] 黄海浪，今野晃市，今野哲士，千葉史: “3 次元座標点群を用いた土器片マッチングと姿勢最適化アルゴリズム”， 第 24 回 NICOGRAPH 論文コンテスト (NICOGRAPH 秋季大会)，2008.

[4] 坂本麻衣，安原彰吾，加納政芳，加藤昌平，伊藤英則: “輪郭形状の階層表現に基づく接合箇所検出土器復元への応用”，画像電子学会誌，第 34 巻，第 3 号，pp.228-235，2005.

[5] QX.Huang, S.Flory, N.Gelfand, M.Hofer and H.Pottmann: “Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching”, ACM SIGGRAPH2006, pp.569-578, 2006.

[6] B.Brown, C.Toler-Franklin, D.Nehab, M.Burns, D.Dobkin, A.Vlachopoulos, C.Doumas, S.Rusinkiewicz and T.Weyrich: “A System for High-Volume Acquisition and Matching of Fresco Fragments: Reassembling Theran Wall Paintings”, ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), August 2008, Vol.27, No.3, 2008.

[7] 大村晃宏，西尾孝治，小堀研一: “3 次元輪郭曲線を用いた遺物の復元”，情報処理学会第 67 回全国大会，pp.191-192，2005.

[8] K.Shoji, K.Konno, T.Konno and F.Chiba, “An Algorithm of Fracture Matching Based on Measured Point Set of Fragment Surface”, IWAIT2011, CD-ROM, 2011.

[9] S.Oikawa, C.Li, K.Matsuyama and K.Konno: “An Examination of Matching Algorithm Considering Pattern Flow of Cord-Wrappe Stick Pattern for Earthenware Restiration”, IWAIT2013, 2013.

[10] X.Yang, K.Matsuyama, K.Konno, “A New Method of Retting Mixture Lithic Materials by Geometric Matching of Flake Surfaces”, The Journal of the Society for Art and Science, Vol. 15, No. 4, pp. 167 176, 2016.

[11] C.Li, K.Matsuyama, K.Konno, “A Study of Assembly Navigation Operation with 2-D Panel for Restoring Fractured Objects”, NICOGRAPH International 2017, 2-3 June 2017.

[12] E.Altantsetseg, Y.Muraki, F.Chiba and K.Konno: “3D Surface Reconstruction of Stone Tools by Using Four-Directional Measurement Machine”, The International Journal of Virtual Reality, Vol.10, No.1, pp.37-43, 2011.

[13] “盛岡市遺跡の学び館”, http://www.city.morioka.iwate.jp/14kyoiku/iseki/manabikan

[14] 北原　實，今泉　克巳: “神奈川県川崎市万福寺遺跡群”，有明文化財研究所，万福寺遺跡発掘調査団，2005.

[15] M. Furukawa, K. Konno, K. Matsuyama, E. Altantsetseg: “A study of 3D model construction method with photogrammetry and laser scanning”, IWAIT2018, 7-9 Jan.2018.

[16] T. Kinoshita, K. Matsuyama, and K. Konno: “An Estimation of Earthenware’ s Surface Shape Using Quadric Surfaces”, The Journal of Art and Science, Vol. 13, No. 1, pp. 21-33, 2014.

付録

r の定義は以下に示す．

$$
\begin{aligned}
r1 &= \cos(\theta_y) * \cos(\theta_z) \\
r2 &= -\cos(\theta_y) * \sin(\theta_z) \\
r3 &= \sin(\theta_y) \\
r4 &= \cos(\theta_x) * \sin(\theta_z) + \sin(\theta_x) * \sin(\theta_y) * \cos(\theta_z) \\
r5 &= \cos(\theta_x) * \cos(\theta_z) - \sin(\theta_x) * \sin(\theta_y) * \sin(\theta_z) \\
r6 &= -\sin(\theta_x) * \cos(\theta_y) \\
r7 &= \sin(\theta_x) * \sin(\theta_z) - \cos(\theta_x) * \sin(\theta_y) * \cos(\theta_z) \\
r8 &= \cos(\theta_x) * \sin(\theta_y) * \sin(\theta_z) + \sin(\theta_x) * \cos(\theta_z) \\
r9 &= \cos(\theta_x) * \cos(\theta_y)
\end{aligned}
\tag{6}
$$

以下にヤコビ行列を用いた非線型方程式の解法を具体的に示す．まず，式 (4) を $\theta_x, \theta_y, \theta_z, T_{mx}, T_{my}, T_{mz}$ で偏微分して以下の式を求める．ここで，各変数で偏微分

した D を D_x, D_y, D_z, D_{mx}, D_{my}, D_{mz} とする．

$$\begin{aligned} D_x = \frac{\partial D}{\partial \theta_x}, D_y = \frac{\partial D}{\partial \theta_y}, D_z = \frac{\partial D}{\partial \theta_z} \\ D_{mx} = \frac{\partial D}{\partial T_{mx}}, D_{my} = \frac{\partial D}{\partial T_{my}}, D_{mz} = \frac{\partial D}{\partial T_{my}} \end{aligned} \tag{7}$$

各変数で偏微分した D をさらに θ_x, θ_y, θ_z, T_{mx}, T_{my}, T_{mz} で偏微分することによりヤコビ行列 J を導出できる．

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_x}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_x}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_x}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_x}{\partial T_{mx}} & \frac{\partial D_x}{\partial T_{my}} & \frac{\partial D_x}{\partial T_{mz}} \\ \frac{\partial D_y}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_y}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_y}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_y}{\partial T_{mx}} & \frac{\partial D_y}{\partial T_{my}} & \frac{\partial D_y}{\partial T_{mz}} \\ \frac{\partial D_z}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_z}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_z}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_z}{\partial T_{mx}} & \frac{\partial D_z}{\partial T_{my}} & \frac{\partial D_z}{\partial T_{mz}} \\ \frac{\partial D_{mx}}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_{mx}}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_{mx}}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_{mx}}{\partial T_{mx}} & \frac{\partial D_{mx}}{\partial T_{my}} & \frac{\partial D_{mx}}{\partial T_{mz}} \\ \frac{\partial D_{my}}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_{my}}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_{my}}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_{my}}{\partial T_{mx}} & \frac{\partial D_{my}}{\partial T_{my}} & \frac{\partial D_{my}}{\partial T_{mz}} \\ \frac{\partial D_{mz}}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_{mz}}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_{mz}}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_{mz}}{\partial T_{mx}} & \frac{\partial D_{mz}}{\partial T_{my}} & \frac{\partial D_{mz}}{\partial T_{mz}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式 (7), (8) より，方程式 (9) を得ることができる．式 (9) を解き，i 回目の反復計算により，よりよい近似解を得るための差分値 $\Delta\theta_x$, $\Delta\theta_y$, $\Delta\theta_z$, ΔT_{mx}, ΔT_{my}, ΔT_{mz} を求める．

$$J \begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \\ \Delta T_{mx} \\ \Delta T_{my} \\ \Delta T_{mz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_x \\ -D_y \\ -D_z \\ -D_{mx} \\ -D_{my} \\ -D_{mz} \end{bmatrix} \tag{9}$$

差分値から，$i+1$ 回目の反復計算のための，よりよい近似解 $\theta_{x,i+1}$, $\theta_{x,i+1}$, $\theta_{x,i+1}$, $T_{mx,i+1}$, $T_{my,i+1}$, $T_{mz,i+1}$ は，式 (10) のようになる．

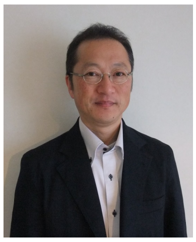
$$\begin{aligned} \theta_{x,i+1} &= \theta_{x,i} + \Delta\theta_x \\ \theta_{y,i+1} &= \theta_{y,i} + \Delta\theta_y \\ \theta_{z,i+1} &= \theta_{z,i} + \Delta\theta_z \\ T_{mx,i+1} &= T_{mx,i} + \Delta T_{mx} \\ T_{my,i+1} &= T_{my,i} + \Delta T_{my} \\ T_{mz,i+1} &= T_{mz,i} + \Delta T_{mz} \end{aligned} \tag{10}$$

式 (9)，式 (10) の手順を繰り返し，$\Delta\theta_x$，$\Delta\theta_y$，$\Delta\theta_z$，ΔT_{mx}，ΔT_{my}，ΔT_{mz} が十分小さくなったときの解 $\theta_{x,i+1}$, $\theta_{x,i+1}$, $\theta_{x,i+1}$, $T_{mx,i+1}$, $T_{my,i+1}$, $T_{mz,i+1}$ が求める回転，移動量となる．

李　春元

2005 年，東北電力大学理学情報計算科学卒業．2009 年，岩手大学に留学．2017 年，岩手大学大学院工学研究科博士後期課程修了．現在，岩手大学理工学部特任研究員．CG，情報可視化，インタラクティブシステムなどの研究に従事．博士（工学）．

今野 晃市



1985 年，筑波大学第三学群情報学類卒業．(株) リコーソフトウエア研究所，ラティス・テクノロジー (株) を経て．現在，岩手大学工学部教授．CG, CAD, VR, 遺物計測などの研究に従事．著書に「3 次元形状処理入門」がある．博士 (工学)．芸術科学会，映像情報メディア学会，日本情報考古学会，情報処理学会，IEEE の会員．