芸術科学会論文誌 Vol. 16, No. 3, pp. 29 – 39 (2017)

2 次元パネルに基づく土器片組み立て支援システム

李春元 (学生会員)　松山克胤 (正会員)　今野晃市 (正会員)

岩手大学大学院工学研究科

A Support System of Fracture Matching by Using 2D Panel

Chunyuan Li　Katsutsugu Matsuyama　Kouichi Konno

Graduate School of Engineering, Iwate University.

概要

出土した土器片の組み立ては，手作業により行われる．また，組み立てには試行錯誤が伴うため，土器片の汚損や破損のリスクが高まる．そこで，本研究では，出土した土器片の組み立て情報をコンピュータ上で可視化してユーザに提示するシステムを開発する．本システムは，土器片配置インタフェース部分と 3 次元マッチングを行う部分で構成される．土器片のデータは，3 次元計測器で測定した点群データを用いる．本手法では，まず土器片の計測情報を，ディスプレイ上に 2 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．最後に，分割線ペアと文様に基づいて，2 つの土器片のマッチングと空間姿勢最適化を行う．上記システムを実装し，動作確認および有用性を確認した．

Abstract

Earthenware fragments are manually assembled. However, there is risk that the earthenware fragments are damaged during the manual work. According to this situation, a system which can help a user to assemble the fragments with the visual information in a computer is developed. Our system are combined with the interface which is used by placing the fragments and matching function in 3D. The data of the earthenware fragments used in this paper is measured by the 3D measurement device. In our method, the measured point clouds are displayed in 2D plane at first. Then, the user can match the fragments with the features of patterns and rim parts. Based on a fixed order which can help the user to assemble the fragments, the earthenware fragments are assembled. Experiments have shown that our method works well and is of great benefit to assembling the earthenware fragments.

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．一般に出土した土器の分類，組み立て，復元の工程は手作業で行われている．また，組み立てには試行錯誤が伴うため，土器片の汚損や破損のリスクが高まる．そのため，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，土器片は復元作業を行わずに保存されることもある．しかし，可視化による仮説形成や文化財の保存と公開のために遺物の復元が必要な場合もある．近年，計算機を使用した土器片の組み立てを支援する技術の開発が期待されている．計算機を用いた土器片の組み立てに関する従来研究 [1–9] は，すべてのマッチング工程の自動化を目指す研究，および，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．本研究は後者の立場で，出土した土器片の組み立て情報をコンピュータ上で可視化してユーザに提示するシステムの開発を行う．

土器の組み立てに類似する作業としてジグソーパズルがある．土器復元やジグソーパズルは，ばらばらになっているピースをつなぎ合わせ，一つの物体を組み立てるという点で共通している．また，組み立ての思考手順も類似しており，ジグソーパズルを組み立てるセオリーを土器復元に応用することができると考えられる．本論文は，専門知識を持つ人が，効率的に土器復元することを目的として，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土器復元インタフェースを提案する．本システムを実装し，いくつかの土器片を組み立て，有効性を確認した．

2 関連研究

2.1 4 方向レーザーを用いた土器片計測

本研究の目的を達成するためには，土器片の 3 次元形状モデルを得る必要がある．文献 [10] は，ガラスボードの上に土器片を並べて 4 個のレーザーセンサを装着したロボットアームで計測する手法を提案している．文献 [10] での計測の様子を図 1 の (a) に示し，生成したモデルを図 1 の (b) に示す．まず，ガラスボードの上に計測対象の土器片を並べる．そして計測範囲を設定して計測を開始すると，全て自動で計測が行われる．図 1 の (a) の計測装置では，図 1 の (b) のような計測対象物の 3 次元ポリゴンモデルを生成する．

(a)4方向レーザー計測　　(b)土器片データ

図 1　土器片の計測装置と土器片データ

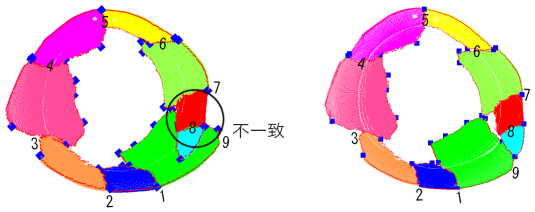
2.2 土器片計測モデルを用いた仮想組み立て

3 次元データを用いた遺物復元手法の 1 つに，分割線と文様情報を利用して破片の接合箇所を検出し，復元する手法 [6] がある．文献 [6] の手法では，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 [6]．得られた分割線と文様情報を利用して破片の接合箇所を検出しマッチングを行う．文献 [6] の手法では，3 次元的なマッチングが可能であるが，逐次的に土器片マッチングを行った場合，マッチング誤差が蓄積する問題がある．図 2 の (a) は，文献 [6] の手法によって，土器の口縁部周りの土器片を逐次的にマッチングした結果である．丸で囲ってある部分が，誤差の蓄積により不一致となった部分である．

2.3 空間姿勢最適化手法

文献 [8] は，文献 [6] のマッチング誤差の蓄積により生じたマッチングの不一致を修正する手法である．文献 [8] は，各土器片の良好な姿勢をできるだけ維持しながら，誤差を修正するため各接合部の誤差の総和を最小にする座標変換を行う手法が述べられている．図 2 の (a) に，図 2 の (b) と同じ土器片で，空間姿勢を最適化した結果を示す．

この結果から，仮想的土器復元においては，逐次的に土器片をマッチングしていくよりも，複数の土器片を姿勢最適化してマッチングしたほうが良い結果が得られる．しかし，姿勢最適化を行うためには，マッチングする分割線のペアを複数定める必要がある．現在分割線の



(a)逐次的なマッチング　　(b)空間姿勢最適化

図 2　従来手法の結果

図 3　土器片の配置と姿勢

ペアの定義は，ほとんど手動で行われており，時間がかかる．

本研究は，文献 [8] の問題であった，姿勢最適化のための分割線ペア決定時間を短縮することを視野に入れている．土器片同士がどの分割線でマッチングするかの情報を，復元情報とすると，土器片の復元情報は 2 次元的な配置でも表現が可能である．図 3 の画像は，土器片をテーブルの上に配置している様子の写真であるが，土器片の配置関係によって復元情報を見て取ることができる．もし，ディスプレイ上に土器片データを 2 次元的に配置し，移動回転などの編集ができるとすれば，土器片同士の配置関係によって復元情報を表現できる．

よって，本研究の最終的な目標は，入力した土器片データで復元情報を生成することである．そして，本システムで仮想的に組み立てた後，ユーザは復元情報を利用して実物を組み立てることができる．よって，仮想組み立てによる復元情報と，隣接する土器片が配置されているかどうかが，最終的な良し悪しの判断基準となる．すなわち，本研究で生成した復元情報を用いて，土器が組み立て可能であることを示すことを目標する．

3　土器片配置インタフェース

3.1 システム概要

本研究の土器復元支援インタフェースのシステム構成を説明する．本研究で扱ってる土器片データは，文献 [10] の 3 次元計測手法によって得られた 3 次元座標点群である．本システムでは，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，すべての土器片データを本システムに入力すると，土器片の入力順に，2 次元的に配置される．次に，ユーザは口縁部と思われる土器片データに手動でラベルを貼り付ける．システムは，貼り付けられたラベルを参照して，口縁部を含む土器片データをディスプレイ上部に並べ替える．そして，土器片の表面を表す計測点群を解析して，輪郭線情報と表面の文様の抽出を行う．抽出した輪郭線情報と文様を土器復元インタフェースでユーザに提示する．ユーザは，提示された情報に基づき，隣接すると判断したピースを平行・回転移動を行い，隣接させる．隣接情報に基づきシステムは，隣接された土器片の輪郭線同士を分割線ペアとして登録し，グループ化する．以上の手順を踏むことで，パズルの組み立てセオリーに基づいて土器片データを配置することができる．最後に，ユーザが取り出した隣接土器片を用いて分割線ペアと文様に基づいて，2 つの土器片のマッチングと空間姿勢最適化を行う．

本システムは，パネルの配置を容易に変更できるので，バックトラックによる試行錯誤を容易に行うことが可能である．本研究はこのような試行錯誤を含んだ組み立てを支援するシステムを目指す．

3.2 グリッド線による土器片の配置

本システムでは，まず，インタフェースの初期状態として，2 次元のグリッド線を用意する．本インタフェースは，グリッド線上で土器片データの配置関係を編集することで，土器片の接合関係を表現し，よりジグソーパズルに近い操作を再現する．グリッド線の目盛は土器片データを 2 次元的に移動させる時の移動量の目安として用いる．ユーザは選択した土器片データをグリッド線の縦横方向に 1 目盛ずつ移動させることができる．

グリッド線の線密度の違いを図 4 に示す．図 4 には 3 種類の線密度が示されており，それぞれ縦 n 本横 m 本を表示する状態 $high$，縦 $n/2$ 本，横 $m/2$ 本表示する状態 $middle$，縦 $n/4$ 本横 $m/4$ 本を表示する状態 low となっている．ユーザは表示するグリッド線の密度を変化

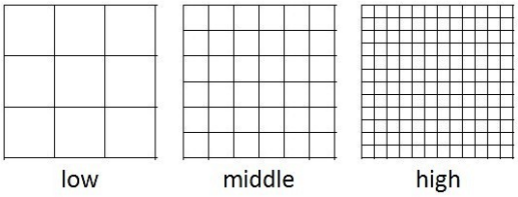


図 4　グリッド線の種類

させ，グリッド線の 1 目盛の大きさを変化させることにより，土器片データ操作時の移動量を自由に変化させることができる．

本システムは，土器片データのサイズを参照し，土器片が収まるサイズの長方形パネルを自動的に生成する．入力した土器片データは，生成したパネルの上に乗せるように表示する．図 5 に生成したパネルと土器片データの配置関係を示す．本インタフェースでは，土器片データとパネルは対になっており，土器片データに対応したパネルを操作することで，間接的に土器片データを操作している．パネルのサイズは，グリッドのマスを最小単位として，土器片データが収まる大きさとする．

パネルを生成する理由は，パネル同士の配置関係によって復元情報を定義するためである．パネルを利用した復元情報の例を図 6 に示す．パネルが隣接する土器片同士を，接合可能な土器片の組み合わせとし，隣接するパネルの線分に最も近い土器片の輪郭を接合可能な輪郭と判断する．例えば，図 6 のようにパネルを配置した場合は，隣接している土器片 C と土器片 B が，緑色の輪郭線で接合可能であると判断する．同様に，隣接している土器片 A と土器片 C が，赤い輪郭線で接合可能であると判断する．また，隣接している土器片 A と土器片 B が，青い輪郭線部分も接合可能であると判断する．

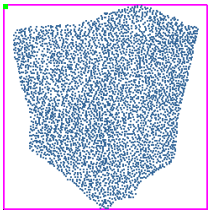


図 5　パネルと土器片データ (点群) の表示

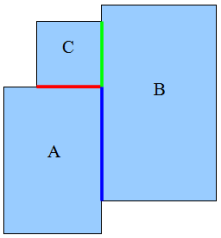


図 6　復元情報の生成方法

3.3 土器片の分類と簡易的姿勢変換

口縁部を含む土器片とそれ以外の土器片を分類する．口縁部は土器の縁である．土器片が口縁部を含むかどうかは，ユーザがディスプレイに表示された土器片データから視覚的に判断する．図 1 の (b) は，口縁部を含む土器片の例である．これは上部が滑らかであることから口縁部と判断できる．口縁部と判断した場合は，手動でラベルを貼り付ける．システムは，判定結果に従って，口縁部となる土器片を上方に，それ以外を下方に並べ替える．実際に土器復元を行う場合，接合する可能性のある土器片を取り出して接合を試みる作業の繰り返しとなる．このような試行作業は，土器復元に限らず，ジグソーパズルの組み立てにおいても同様である．ジグソーパズルは外枠から組み立てていくことで，比較的容易に組み立てが可能である．よって土器復元も，まず器の縁に当たる口縁部を含む土器片を分類し，口縁部から組み立てていくのが有効な手順と考えられる．

口縁部ラベルが貼られた土器片データを図 7 に示す．図 7 では，緑色の辺に近い輪郭線に口縁部が存在する．口縁部ラベルは方向性を持っており，土器片のどの部分が口縁部であるかを示すことができる．

また，口縁部を含まない土器片データの上下方向を定義するために，姿勢方向ラベルを用意する．姿勢方向ラベルが貼られた土器片データを図 8 に示す．図 8 の土器片データは，黄色の辺が上を向く姿勢が正しい姿勢とする．ただ，隣接情報を表現するために，パネルの辺と，土器片の姿勢ができるだけ合うように，適当に土器片を回転する必要もある．本システムは，パネルを変更せずに土器片を 2 次元的に自由に回転できる．土器片データ

図 7　口縁部ラベル

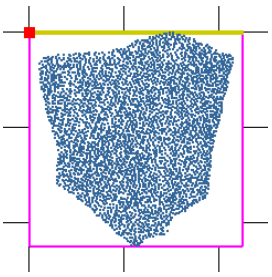


図 8　姿勢方向ラベル

をラベルで分類した後は，自動並べ替えを行い，口縁部の土器片はディスプレイ上部に並べられ，他の土器片は下部に並べられる．図 9 は分類した土器片を並べ替えた

様子である．口縁部の土器片は互いにマッチングしやすく，なおかつマッチング姿勢が判断しやすい利点がある．図 9 ではディスプレイ上部に口縁部を集めることで，互いにマッチングしやすい土器片が集められており，また口縁部が全て上を向いているので土器片の姿勢を補正している．故に，ユーザが口縁部を復元しやすい配置と姿勢で土器片データが配置されていることが分かる．

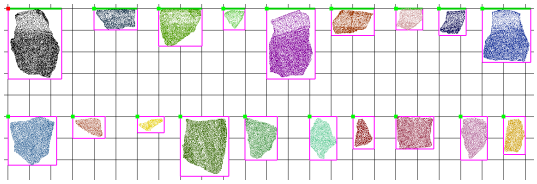


図 9　口縁部の分類

3.4 土器片の特徴量の可視化

図 3 に示すように，土器表面には文様が施されている．本論文では，土器片表面に現れる凹凸の傾向を可視化した情報を文様流れと呼ぶ．また，輪郭線と文様流れの交差点を文様点と呼ぶ．更に，輪郭線が急激に変化するような，大域的に見て鋭角となっている箇所を分割点と呼ぶ．文様流れ，文様点，輪郭線，分割点を本研究では特徴量と呼ぶ．図 5 は，土器片データの特徴量を表示していない．ゆえに，土器片の隣接情報を取り出すことが難しい場合がある．土器片の隣接情報を取り出すためには，表面の文様流れや，輪郭線の形状が重要である．ユーザは，システムが提示する文様流れや輪郭線を手がかりに，土器片の隣接関係を判断する．ゆえに，土器片データの特徴量を可視化する必要がある．特徴量を可視化するために，それぞれの特徴量を抽出する必要がある．まず，文献 [6] の輪郭を抽出する手法を利用して，土器片の輪郭線を抽出する．次に，文献 [8] の文様抽出手法を利用して，土器片データの文様流れと輪郭線上に文様点を抽出する．抽出したデータを用いて，本インタフェースに特徴量を描画する機能を追加する．図 10 は特徴量の可視化例である．

3.5 分割線ペアの登録

土器片の表面を表す計測点群を解析することで，輪郭線の特徴的な箇所を検出する．得られた特徴的な箇所を端点として輪郭線を分割し，分割線を得る．図 11 に示すように赤い分割点の間の線を分割線と呼ぶ．パネルが隣接する土器片同士を，接合する土器片の組み合わせと

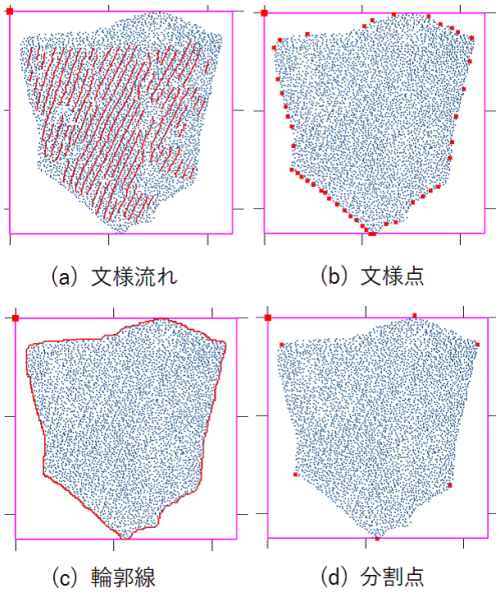


図 10　特徴量の描画

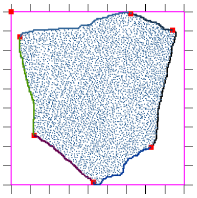


図 11　分割線

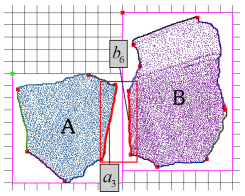


図 12　分割線ペア

し，パネルの隣接する線分に最も近い土器片の輪郭線を分割線ペアとして登録する．図 12 では，分割線 a_3 と分割線 b_6 は分割線ペアであると判断する．

3.6 土器片データのグループ化

復元情報を生成した 2 つの土器片をグループ化し，1 つのパネルに収める．パネル同士を隣接させることでも復元情報を生成できるが，より正確な情報を作成するため，ここでは 2 つの土器片をグループ化し，1 つのパネルの中で復元情報を表現する．土器片のグループ化を行うことによって，ユーザは復元情報を生成しやすくなる．すなわち，土器片データの 3 次元マッチングを行い，土器片データ情報を書き出すため．輪郭線の情報がより正確となる．図 13，図 14 に例を示す．図 13 では，土 CE が離れているために，土器片 A とマッチする輪郭が判断しにくくなっている．図 14 では，土器片 CE をグループ化して輪郭が結合されているため，土器片 A とマッチする輪郭を判断しやすい．

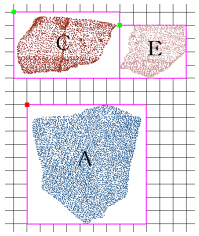


図 13　グループ化前

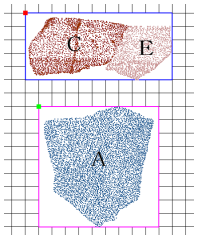


図 14　グループ化後

4　土器片 3 次元マッチング

土器片の 3 次元マッチングでは，2 次元パネル上で隣接する 2 つの土器片をグループ化した後，グループ内の土器片に対して，自動的に空間姿勢を決定する．具体的なマッチングは次のように行う．図 15 に示すように，まず，3.6 節で述べた手法で，2 つの土器片をグループ化した土器片 A と土器片 B を取得する．次に，ユーザが選択した土器片 A と土器片 B のマッチング [8] を行う．その後，文様流れを用いてマッチング結果を判定し，結果の可否によっては空間最適化を行い土器片を結合する．文様流れを用いたマッチングの方法を以下に示す．

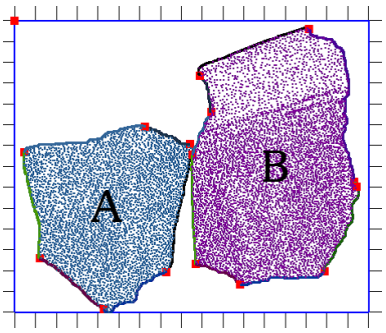


図 15　土器片ペア情報

1. 文献 [8] の手法を用いて，それぞれの土器片の分割線同士でペアを作る．本手法では，分割線の点群のリスト $P_A(a_0, a_1, \cdots, a_n)$, $P_B(b_0, b_1, \cdots, b_m)$ を用いてマッチング処理を行う．ここでは，端点 a_0 と a_n，b_0 と b_m 間のベクトルを u，v とする．その後，方向ベクトル u と v が平行となる回転行列を，分割線 P_A に適用する．次に，分割線 P_A の始点 a_0 が分割線 P_B の終点と b_m と一致するような平行移動を分割線 P_A に適用する．つまり，1 組の分割線のどちらか一方の端点を一致させる．P_A，P_B のうち点の数の少ない方を基準とし，点群リストの全ての点で，もう一方のリストの点との距離が最小となっている点を見つけペアとする．求めた距離の総和を分割線の評価値とし，分割線の評価値が小さい順に並び替える．
2. 文献 [6] の手法を用いて，分割線の評価値が最も小さい分割点ペアで，空間姿勢最適化を行う．
3. 空間姿勢を決定したペアの分割線の文様点をそれぞれ $P1{=}P1_i : i = 0, \cdots, n$, $P2{=}P2_j : j = 0, \cdots, m$ とする．図 16 に示されるように，$P1$ の各点に対して，$P2$ の点列との最短距離となる点を求める．その後，文様同士の距離 P_d と，赤色のベクトルで示される文様流れを表す 2 つの単位ベクトルの角度 θ を求め，距離と角度が閾値以下なら文様流れが一致しているとする．
4. 文様流れの一致している割合が閾値以上なら，結果が正しいとして処理を終了する．割合が閾値以下なら次に分割線の評価値が小さい分割線ペアでステップ 2，3 を行い，閾値以上になるまで繰り返す．
5. 全ての分割線ペアで文様点が存在しない場合，または文様流れが一致しなかった場合，分割線の評価値が最も小さい分割線ペアを一致するとみなす．

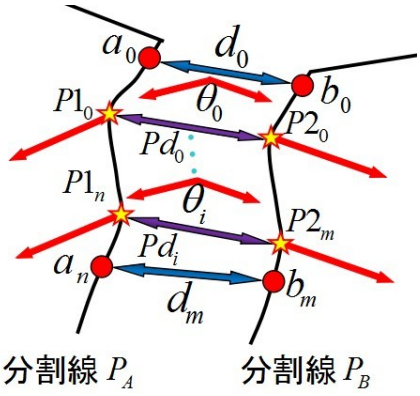


図 16　文様間の距離と角度の定義

5　インタフェースによる土器復元の操作手順

ここで，土器復元支援インタフェースの操作手順について説明する．

5.1 土器片データの展開

画面上に土器片の点群データを表示する．土器片データは横一列に配置される．展開した様子を図 17 に示す．

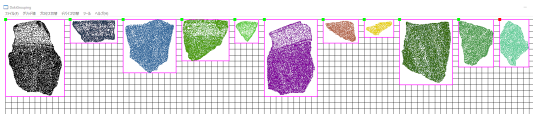


図 17　土器片の展開

5.2 土器片データの分類

画面上に表示した土器片データを閲覧し，ユーザは口縁部と思われる土器片データにラベルを貼り付ける．ラベルを貼り付けたら自動並べ替え機能を使用し，口縁部の土器片データをディスプレイ上部に並べる．分類した様子を図 18 に示す．

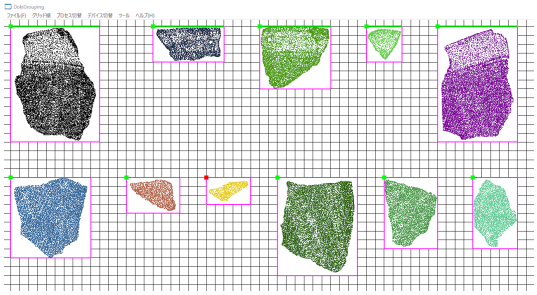


図 18　土器片の分類

5.3 特徴量の可視化

3.4 節で述べたように，土器片の特徴量は文様点，分割点，文様流れ，輪郭線である．ユーザが特徴量を描画したいとき，インタフェース上の特徴量表示ボタンを選択し，描画したい特徴量のみ描画することができる．土器片の特徴量を描画する様子を図 19 に示す．図 19 では，土器片の文様流れ，文様点，分割線，分割点を表示している．

5.4 土器片の隣接

2 つの土器片データを更に近づけて土器片の輪郭を隣接させるように，ユーザが選択された土器片データを移動させる．ユーザがグリッド線の線密度を $high$ に変更し，土器片の位置を，接合する輪郭が重なるように調整する．なお，土器片データを近づける際に互いのパネルが重なることになるが，次のプロセスでグループ化するので，重なりは許すものとする，2 つの土器片データを

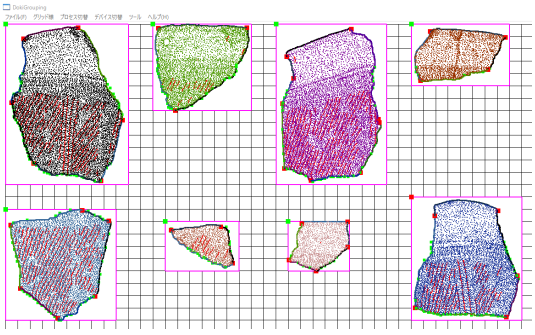


図 19　特徴量の描画

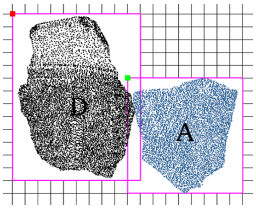


図 20　土器片の隣接

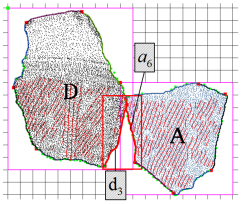


図 21　分割線ペア

隣接させた様子を図 20 に示す．

5.5　分割線ペアの登録

パネルが隣接する土器片同士を，接合する土器片の組み合わせとし，パネルの隣接する線分に最も近い土器片の輪郭線を分割線ペアとして登録する．図 21 に示すように，分割線 a_6 と分割線 d_3 は分割線ペアとして登録して，分割線ペア登録のボタンを選択して，自動的にファイルに書き出す．

5.6 グループ化

2 つの土器片データを隣接させて，2 つのうちの 1 つを選択した後，グループ化のボタンを選択してグループ化し，土器片同士の位置関係を固定する．2 つの土器片データをグループ化した様子を図 22 に示す．

5.7 3 次元マッチング

図 22 に示した隣接している 2 つの土器片データと分割線ペア情報を用いて，3 次元マッチング [8] を行った結果を本インタフェースに表示する．3 次元マッチングの結果を図 23 に示す．

以上のプロセスを繰り返すことで，ばらばらに扱われていた土器片データの間に復元情報を生成することができる．

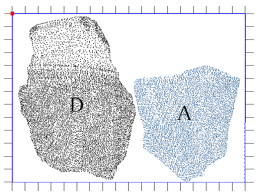


図 22　土器片データのグループ化

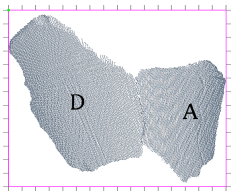


図 23　3 次元マッチング結果

6　実験結果

これまで述べた手法に基づき，土器片組み立て支援システムを用いて土器復元実験を行う．実験に用いた PC は，CPU3.60GHz，メモリ 8GB である．

6.1　遺跡の学び館からの遺物の事例

図 24 に実験に利用する土器片 [11] を示す．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．図 25 に，計測点群を入力した直後の展開された土器片データを示す．各土器片の点数は 1,000〜13,000 個である．本実験は図 25 の土器片データを，ユーザの判断で復元が可能であるかを検証する．

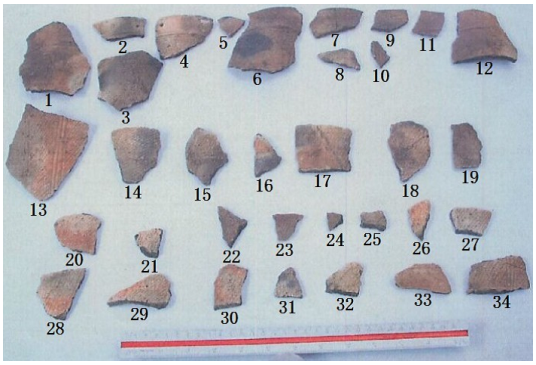


図 24　実験用土器片データ（土器片の提供は遺跡の学び館より [11]）

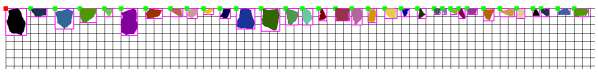


図 25　実験用計測データ

まず，土器復元のプロセスを決定する．3.3 節で述べたように，土器復元において，口縁部を含む土器片は，口縁部を含まない土器片よりも，多くの情報を持っている．よって，まず，口縁部の土器片を分類し，口縁部の土器片から復元を行い，口縁部の土器片全てで復元情報が生成できてから，ほかの土器片がマッチするかを調べていく．図 25 に示す土器片に対して，口縁部を含む土器片を抽出し，口縁部ラベルを貼り付ける．口縁部を含む土器片を分類した後，ラベルによって土器片データを自動再配置する．図 26 は土器片データを再配置した結果である．

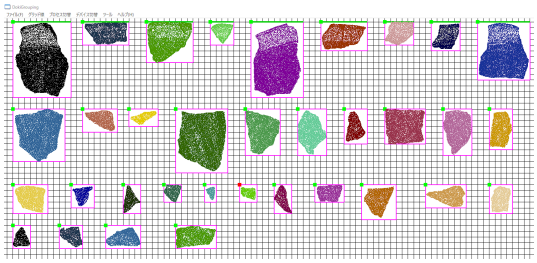


図 26　土器片の再配置結果

次に，図 26 の上部に配置されている口縁部を含む土器片で復元情報を生成する．図 27 に示すように土器片の特徴量を可視化することで，ユーザは特徴量を手がかりに隣接土器片を探すことができる．例えば，図 28 は，復元プロセスの途中経過を示している．この図では，土器片 6 の赤い丸で囲まれた部分に隣接する土器片を見つけるために，他の土器片の分割線と形状が一致するかどうかを調べる様子を示している．土器片 1，9，2 の緑の丸で囲まれた部分が候補となる分割線である．また，この土器の表面は，口縁部付近に深い凹凸がある．それも参照することで，土器片 9 が隣接する土器片と判断できる．土器片 6 を回転し，土器片 9 のグループに隣接するように移動する．移動した結果を図 29 に示す．このような操作を繰り返して，口縁部を含む土器片の復元情報を生成した結果を図 30 に示す．輪郭線のペアは比較的容易に判断できた．輪郭線ペアの判断を容易にした要因は 3 つある．1 つは，口縁部を含む土器片のみを利用したので，土器片の組み合わせの数が少なかったことである．2 つ目は，口縁部が上を向くように配置しているため，土器片の姿勢が全て揃っていたことである．3 つ目は，口縁部が繋がるように接合しなければならないので，口縁部を含む土器片同士はグリッドにおける左右方向に繋がりやすいという傾向があったためである．

その後，口縁部で復元情報を生成した後，更にほかの土器片を繋げていく実験を行う．図 30 の口縁部の復元

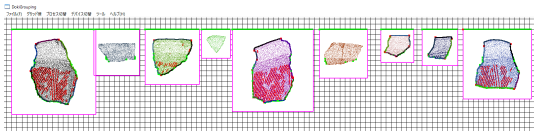


図 27　特徴量の可視化

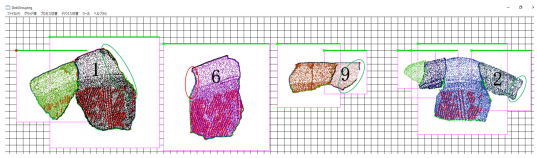


図 28　隣接土器片を探索途中経過

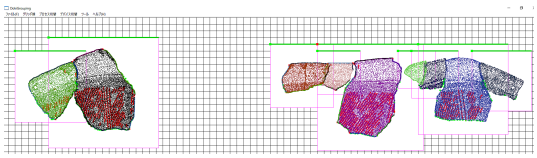


図 29　回転と隣接

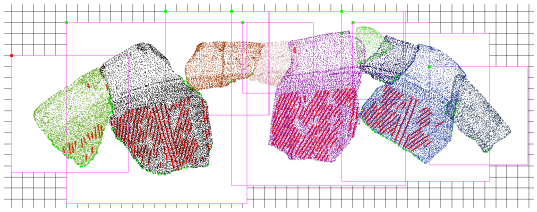


図 30　口縁部の復元結果

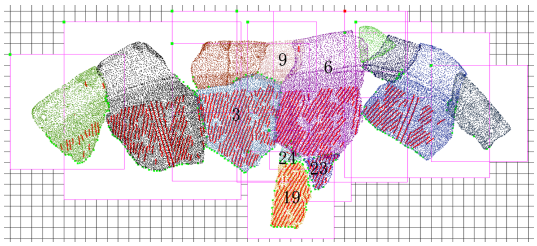


図 31　2 次元の復元結果

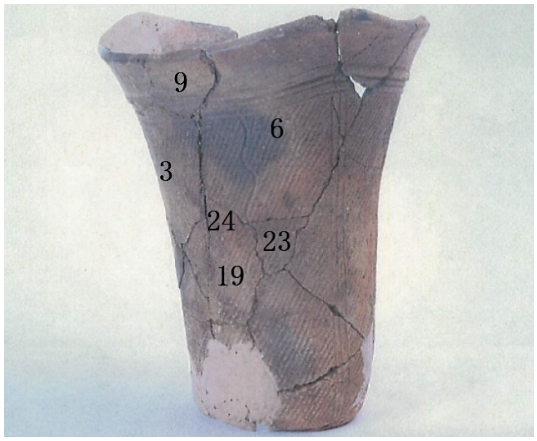


図 32　手作業結果

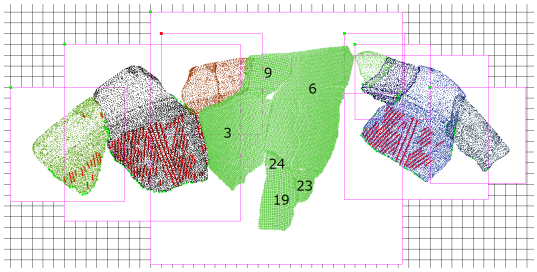


図 33　3 次元の復元結果

情報に，口縁部を含まない土器片がいくつか追加した結果を図 31 に示す．本研究で扱ってる実物の土器の一部分を 2 次元上に復元した様子は図 3 に示す，図 31 に示した 2 次元の復元結果と一致した．本システムでは，土器片同士の隣接部分を，接続するように配置するために，実際の 3 次元的な形状は展開図上ではそのまま表現されない．図 32 では実物の土器片を復元した結果，図 33 の緑色の 6 つの土器片は 3 次元マッチングを行った土器片を実物に近い位置で表示した結果である．図より実物と近い形状に復元されていることがわかる．

6.2　万福寺遺跡群から出土した遺物の事例

図 34 に示すように，実物の土器を復元した記録が発掘調査報告書 [12] に記載されている．もし，資料や写真などの画像の土器片配置を，本システムで再現できれば，資料や写真などの画像情報がない場合にも，再現情報により実物の復元を支援できる．このことを検証するために，図 34 をユーザが参照せずに，図 35 に示した土器片の 3 次元計測点群データのみを用いて，本システムによる復元実験を行った．

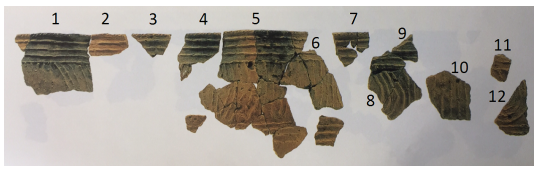


図 34　実物の土器を復元した記録

復元した結果を図 36 に示す．この図からわかるように，口縁部を含む土器片をユーザはすべて発見した．ま

た，実物の土器を復元した記録図 34 と同じように口縁部を含む土器片 1 と土器片 2，土器片 4 と土器片 5 を配置した．しかし，口縁部を含む土器片 3 と土器片 7 の配置した場所は図 36 とは異なった結果であった．ユーザは土器片 2 と土器片 7，土器片 3 と土器片 4 それぞれの分割線の形状が類似していると判断したため，隣接して配置したと考えられる．また，土器片 6，土器片 8 から 12 までは復元することができなかった．口縁部を含まない土器片を配置するためには，分割線の類似箇所を自動的に検出して提示するなどの，更なる拡張が必要と考えられる．

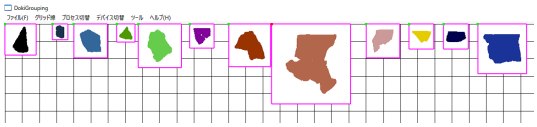


図 35　土器片の配置

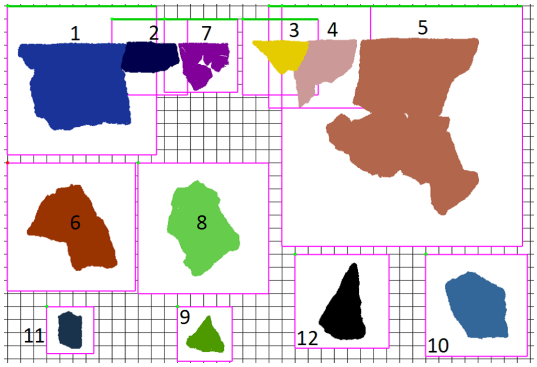


図 36　復元結果

7　まとめ

本論文では，2 次元パネルを用いた土器復元支援システムを提案した．土器片データを 2 次元的に配置し，ユーザは定められた手順に従って，2 次元的に復元情報を表現することができた．また，画像などの土器片配置情報がない場合でも，口縁部を含む土器片の配置について部分的に再現することができた．さらに，隣接している土器片の分割線ペアを用いて，3 次元マッチングを行い，輪郭線の形状をより正確に表現した．本研究の今後の課題としては，本インタフェースに，多くの土器片に対して，復元情報をより容易に生成するための更なる機能の追加が挙げられる．本論文は，NICOGRAPH 2016 にて発表した手法 [13] を拡張した手法となっている．

謝辞

本研究の一部は，JSPS 科研費 JP15H02945 の助成を受けたものである．また，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加賀俊介氏，および NICOGRAPH2016 に投稿した論文の査読により，有益な助言をいただいた査読者に感謝する．

参考文献

[1] 堀謙太，今井正和，小笠原司: “土器復元における接合部分検出のための輪郭の階層型表現”，電子情報通信学会論文誌，Vol.J83-D-II，No.5，pp.1392-1394，2000.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[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] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 金谷一郎，陳謙，千原國宏: “VR 技術を応用した遺物復元システム”，テレビジョン学会技術報告，Vol.20No.50，pp.7-12，1996.

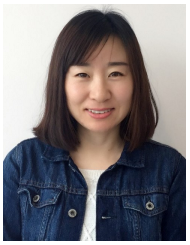
[10] E.Altantsetseg, Y.Muraki, F.Chiba and K.Konno: “3D Surface Reconstruction of Stone Tools by Using Four-Directional Measurement Machine”, The International Journal of Virtual Reality, Vol.10, No.1, pp.37-43, 2011.

[11] “盛 岡 市 遺 跡 の 学 び 館”, http://www.city.morioka.iwate.jp/14kyoiku/iseki/manabikan

[12] 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.

[13] 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のための簡易インタフェースの検討”，NICOGRAPH2016，pp.40-48，2016.

李 春元

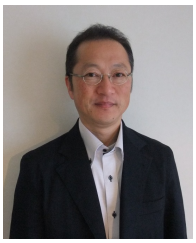


2005 年，東北電力大学理学情報計算科学卒業．2009 年，岩手大学に留学．2012 年，岩手大学大学院工学研究科博士前期課程修了．現在，岩手大学大学院工学研究科博士後期課程在学．3 次元形状研究に興味を持つ．修士（工学）．

松山 克胤

1999 年，岩手大学工学部情報工学科卒業．2001 年，同大大学院工学研究科博士前期課程修了．2005 年，同大大学院工学研究科博士後期課程修了．公立はこだて未来大学を経て，現在，岩手大学工学部助教．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．