

土器片の空間配置推定手法に基づく土器片組立システム

川島大心¹⁾(非会員) 游梦博²⁾(正会員) 木下勉³⁾(正会員) 今野晃市²⁾(正会員)

1) 東京エレクトロン株式会社 2) 岩手大学 3) 東北学院大学

Study on Earthenware Fragment Assembly System Based on Estimating Spatial Arrangement of Earthenware Fragments

Taishin Kawashima¹⁾ Mengbo You²⁾ Tsutomu Kinoshita³⁾
Kouichi Konno²⁾

1) Tokyo Electron Ltd. 2) Iwate University 3) Tohoku Gakuin University

概要

土器片からの土器の復元は考古学の重要な役割の一つである。遺跡から出土した土器片は手作業で復元されるが、土器片の汚損や破損の恐れがある。従来、コンピュータを用いた復元手法が提案されている。例えば、土器片を二次元パネルに配置し、ユーザーがパズル感覚で組み立てるシステムがある。効率的な組立には、土器片の上下を明確化することが有効である。そのため、土器片を机に置いた姿勢を想定し、点群から上下方向を推定する手法が提案されている。しかし、この手法では上下が反転した姿勢が推定される可能性がある。そこで、本論文では、三次元点群を用いて、線形回帰により土器片の上下方向を正確に推定する手法を提案する。さらに、土器片の上下方向と土器片の各断面から近似した円の半径を基に二次元パネルに初期配置し、インタラクティブに土器片を操作することで、三次元空間上で仮想的に土器を組み立てるシステムの開発を行った。

キーワード：土器片，上下方向，三次元計測点群，線形回帰

Abstract

Restoration of earthenware fragments is an important task in archaeology. Earthenware fragments excavated from archaeological sites are restored by hand, but there is a risk of defacement or damage to the fragments. Computer-aided restoration methods have been proposed. For example, there is a system in which fragments are arranged on a two-dimensional panel and assembled by the user as if they were a puzzle. For efficient assembly, it is important to clarify the vertical direction of each fragment. For this purpose, a method has been proposed to estimate the vertical direction from a point cloud, assuming that a fragment is placed on a desk. However, this method may result in estimating an inverted posture. Therefore, this paper proposes a method for accurately estimating the vertical direction of a fragment by linear regression using a three-dimensional point cloud. In addition, the fragments were initially placed in a two-dimensional panel based on the vertical direction of the fragment and the radius of the circle approximated from each cross-section of the fragment. Subsequently, the system was developed to virtually assemble the fragments in three-dimensional space by interactively manipulating the fragments on the two-dimensional panel.

Keyword: Earthenware fragment, Vertical direction, 3D point cloud, Linear regression

1 はじめに

遺物である土器は、破片の状態で遺跡から発掘されることが多い。発掘された破片は土器片と呼ばれ、元の形を復元するために手作業で組み立てられる。しかしながら、手作業による土器の復元作業には、土器の汚損や破損のリスクを伴う。ゆえに、出土した土器片が歴史的、文化的に非常に価値の高い場合は、汚損や破損のリスクを避けるために修復せずに保存されることがある。しかし、可視化による仮説形成や文化財の保存・公開のために、土器の復元が必要である。そこで、近年、コンピュータを用いた土器片の組立支援技術がいくつか提案されている。例えば、土器片の組立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がある [1]。このシステムでは、三次元計測器で計測した点群データを用いて、土器片の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提供している。しかしながら、文献 [1] のシステムは二次元の復元情報を表現しているが、三次元での復元情報を提示することはできない。また、土器片の上下方向と高さを推定していないため、復元に手間がかかる。文献 [2] では、土器片の上下方向と高さを推定しているが、土器片の上下方向が 180 度反転した場合にも、アルゴリズム上の制約から上下方向が正しいと判定される。したがって、文献 [2] の手法で推定した土器片の姿勢を、文献 [1] の入力として用いることができない。

三次元での復元情報を提示する手法として、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が提案されている [7]。文献 [7] では、文献 [1] の手法で複数の土器片の隣接関係を取得した後、二つの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応用して、誤差の総和を最小にする空間姿勢を求めている。この研究ではマッチング処理を自動化しているが、手法が複雑であり実装に手間がかかる。また、三次元的に組み立てた土器と、二次元パネル上の土器片の並びの両方を同時に見ることはできない。しかし、二次元パネル上の土器片の並びを三次元的に確認できると、土器片の並びを確認しやすくなる。

文献 [8] では、二次曲面を利用して土器形状の評価方法を提案した。輪積みによって制作される土器は、正確な回転面として扱えず、主軸を法線とする断面が楕円と

なるような二次曲面として定義されている [8]。このことから、先行研究 [2] では、土器片を机に置いた状態を想定し、土器片を複数の平面で切断したときの各断面を近似して得られる、各円の中心点間距離の総和が最小となる姿勢が、正しい姿勢として推定している。しかしながら、前述したように文献 [2] の手法では、土器片の上下方向が 180 度反転した場合にも、アルゴリズム上の制約から上下方向が正しいと判定される。したがって、文献 [2] の手法は、正しい上下方向の判断に人の力を必要としている。

そこで本論文では、先行研究 [2] の手法で、から得られた土器片の上下方向から、各断面を近似して得られた半径と高さを用いて、回帰分析することで、正しい上下方向を推定する手法を提案する。対象とする土器の形状は、土器の径が高さに対して単調に増加するものと仮定する。また、正しい上下方向を求めた土器片を二次元パネルに配置し、二次元パネルと三次元空間の両方で組み立てを可視化しながら、土器片を組み立てられるシステムを提案する。具体的には、二次元パネル上に配置された土器片をインタラクティブに操作し、土器片の位置情報を用いて三次元上で土器を組み立てることが可能となる。

2 関連研究

2.1 従来の三次元破片自動組立手法

従来の三次元破片の自動組立手法では、断裂面の検出および破片同士の対応付けの最適化に、人手による幾何学的特徴量が用いられてきた [3]。近年では、大規模な三次元破片データセットの登場により、学習ベースの手法が三次元を用いた組立タスクに応用されるようになってきている。セマンティック情報を利用する手法では、あらかじめ意味的にセグメント化された部品から組み立てを行い、破片同士のマッチングの際にセマンティックラベルを手がかりとして活用する [4]。一方、幾何形状やテクスチャの連続性に着目した手法では、断裂面の形状そのものを基に対応付けを行う [5]。しかし、復元を目的とした破片組立においては、個々の破片が意味を持つとは限らない。また、テクスチャ情報がそもそも存在しない、あるいは摩耗して判別できない場合もある。近年の研究では、30 %程度の重なりをもつ三次元モデルの位置合わせタスクにおいて、データ駆動型手法の有効性が示され

ていたが、破片組立は、破片間の重なりが4%未満となることから、さらに困難な問題となっている [6]。土器片から土器を復元するタスクは、重なりが少ない三次元モデルの位置合わせタスクの課題の一例である。本研究では、こうした破片の自動組立に加え、土器の復元作業を支援する可視化・インタラクティブシステムについて検討する。土器片から土器を復元する場合には、人手により隣接する土器片を探索してテーブルに並べた後、これらを組み立てる方法がとられているが、土器片の汚損や破損のリスクがある。また、土器復元を自動化する手法では隣接土器片を形状マッチングにより推定して組み立てる。このとき誤マッチングが起こる余地があるが、自動復元手法では誤マッチングを完全になくすことは困難である。本提案では、手動による復元手法をコンピュータで模倣することにより、汚損や破損のリスクを減らし、自動復元で発生した誤マッチングを編集可能であることから、土器復元が効率化される。

2.2 二次元パネルに基づく土器片組み立て支援システム

二次元パネルに基づく土器片組み立て支援システム [1] では、二次元パネル上に土器片を並べ、土器片を囲む長方形を単位として土器片を移動させたり、回転させたりすることで隣接する土器片の位置と姿勢を推定し、組立情報を構築する。また、土器片間の隣接情報の探索を支援するため、土器表面の文様の流れを表す特徴量の可視化や、輪郭線の表示をしている。文献 [1] では、土器片を二次元的に組み立てているが、本論文では二次元パネルに基づいた三次元的な土器片の組み立てを行うインタラクティブな手法を提案する。

2.3 土器片の空間姿勢最適化アルゴリズム

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 [7] では、土器片の三次元計測点群を用いて、全ての土器片の隣接情報を同時に満足できるような空間姿勢最適化アルゴリズムを提案している。具体的には、二つの土器片の分割線を境界線とし、境界線上の点における接平面が、隣接する土器片で互いに一致するように、土器片同士の空間姿勢を導出している。しかし、空間姿勢を決定するときに、逐次的なマッチングの場合には、マッチング誤差が生じるため、形状の整合性が維持できない。そこで、文献 [7] では、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ような空間姿勢を算出している。文献 [7] の手法はマッチング処理の自動化を目指したものであり、本稿ではインタラクティブに土器片を操作し、土器の組み立てを行う手法を提案する。

2.4 土器片の上下方向推定手法

土器復元の関連研究の1つとして、三次元計測点群から土器片の上下方向と高さ位置を推定する方法が提案されている [2]。文献 [2] では、回転形状として定義された土器に対して、土器片の上下方向を推定する。具体的には、中心軸に直交して切断された土器は断面が円形である。土器片の上下方向が正しいければ、断面を表す円の中心点は回転形状の中心軸上にある。土器片の中心軸 C 上の任意の点 P と各断面を近似した円の中心点を $P_i (i = 0, \dots, n)$ とする。また、ベクトル $\mathbf{v}_i (i = 0, \dots, n)$ を式 (1) で定義し、中心軸 c の方向を表す単位ベクトルを $\mathbf{m}$ とする。 $P_i (i = 0, \dots, n)$ を中心軸 C に射影した点から $P_i (i = 0, \dots, n)$ までのベクトル $\mathbf{w}_i (i = 0, \dots, n)$ を式 (2) で示す。 $P_i (i = 0, \dots, n)$ と中心軸 C に射影した点までの距離 d_i が式 (3) で求まる。土器片が正しい上下方向であれば、 d_i は小さくなる。

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{P}_i - \mathbf{P}, (i = 0, \dots, n) \quad (1)$$

$$\mathbf{w}_i = \mathbf{P}_i - (\mathbf{P} + (\mathbf{m} \cdot \mathbf{v}_i)\mathbf{m}), (i = 0, \dots, n) \quad (2)$$

$$d_i = \sqrt{\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{w}_i}, (i = 0, \dots, n) \quad (3)$$

土器片の各断面から推定した円、各断面から円を近似して得られた中心点 P_1, P_2, P_3 、土器の中心軸 C を図 1 に示す。図 1(a) に示すように、土器片の上下方向が正しい場合、各断面を近似した円の中心点 P_i と、 P_i の中心軸 C への投影点との間の d_i が小さくなる。一方、図 1(b) に示すように、土器片の上下方向が正しくない場合、各断面を近似した円の中心点 P_i と、 P_i の中心軸 C への投影点との間の d_i は大きくなる。したがって、文献 [2] の手法では、式 (4) が最も小さい値となる姿勢が正しい上下方向と推定している。ここで、 j は平面におかれた土器片が平面の法線を回転軸として回転した角度である。

$$D_j = \sum_{i=0}^n d_i / (n+1), (j = 0, \dots, 359) \quad (4)$$

しかし、推定された土器片の正しい上下方向 D_j と 180 度反転した上下方向 D_{j+180} の平均距離は同一の値すなわち $D_j = D_{j+180}$ となるため、正しい上下方向は決定できない。

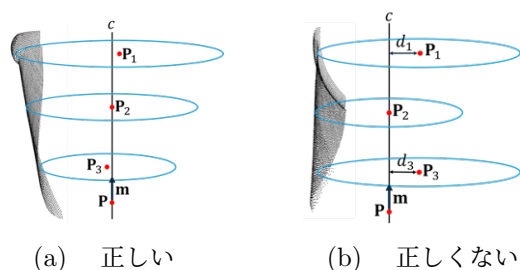


図 1 正しい姿勢と正しくない姿勢から近似された円の中心点

3 土器片の上下方向推定手法

3.1 概要

本研究では、三次元計測点群を用いて、土器片の上下方向を推定する手法を提案する。対象とする土器の形状は、土器の径が高さに対して単調に増加するものと仮定する。推定した結果は、提案する二次元パネルと三次元空間での組立の初期位置として利用する。また、2.4 節で述べた先行研究の課題を解決するため、文献 [2] で得られた円の半径と土器片の高さを用いて、正しい上下方向を推定する。具体的には、土器片の高さを説明変数、各断面から求めた半径を被説明変数として回帰分析を行う。

3.2 土器片の半径分布の抽出

文献 [2] の手法で求めた土器片の上下方向から、土器片の高さと土器片の各断面を近似して得られる円の半径を抽出する。図 2 は土器片と、土器片の高さ、土器片の各断面を近似して得られた円と半径を示している。

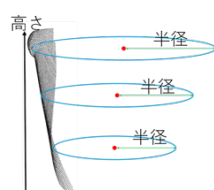


図 2 半径と高さの抽出

3.3 回帰直線を用いた上下方向の推定

3.2 節で述べた手法により、抽出した半径分布を上下方向の推定に利用する。半径分布の高さを説明変数、半径を被説明変数として線形回帰を行う。得られた回帰式の傾きと、文献 [2] から得られた上下方向を比較して、正しい上下方向を推定する。図 3 では、縦軸に土器片の高さ、横軸に円の半径を表し、半径分布から求めた回帰直線を重ねている。例えば、文献 [2] の手法で推定した土器片の姿勢が図 4 のとき、図 3 の (a) のように高さが高くなるにつれて半径が大きくなる場合には、図 4 の高さ方向が正しいと推定できる。一方、図 3 の (b) のように高さが高くなるにつれて半径が小さくなる場合には、図 4 の高さ方向を 180 度反転させた上下方向が正しいと推定できる。

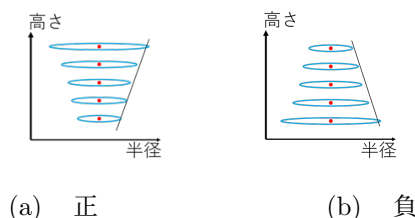


図 3 回帰直線の傾き

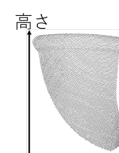
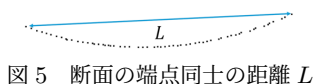


図 4 土器片の正しい上下方向

3.4 外れ値の存在と対策

提案手法では、Taubin の円近似手法 [9] を用いて、土器片の各断面を円で近似している。図 5 に土器片の断面上の点群と、直線で断面点群の端点同士の最大距離 L を示す。距離 L が短い場合、Taubin の円近似手法で推定される半径は、土器の本来の半径よりも小さくなる。また、土器片の形状によっては、近似円の半径の精度が低下する、この精度低下による外れ値の影響を軽減するために、ロバスト統計 [10] より外れ値に頑強な線形回帰手法を用いる。外れ値に強い回帰手法として、M 推定の Bisquare 型を用いる。M 推定では、式 (5) の推定方程式を解くことで回帰パラメータを求める。式 (6) は関数 ψ として式 (5) に用いる。

図5 断面の端点同士の距離 L

$$\sum_{i=0}^{n-1} \psi(y_i - \beta^T x_i) x_i = 0 \quad (5)$$

ただし、 n はデータの総数、 x_i と y_i はデータの値、 i はデータの番号、 β は回帰パラメータである傾きと切片、 T は転置記号である。

$$\psi(x'_i) = \begin{cases} (x'_i)\{1 - (x'_i/c)^2\}^2 & |x'_i| \leq c \\ 0 & |x'_i| > c \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 $x'_i = x_i - \mu$ 、 μ は平均、 c は閾値とする。本稿では、 $c = 4.685$ を用いることで、最小二乗法を用いて上下方向を推定した結果よりも、より多くの土器片に対して正しい上下方向を推定した。

4 土器組み立てシステム

4.1 概要

本研究の土器組み立てシステムの構成を説明する。本研究では土器片の三次元計測点群を使用する。本システムでは、次に示す流れでインタラクティブに土器を組み立てることができる。まず、全ての土器片データに対して、3章で述べた手法で土器片の姿勢を推定する。推定した土器片が正しい上下方向から180度反転していると判定された場合は、その土器片はシステムの入力前に180度反転させる。また、3章で述べた手法により、土器片の各断面から近似した円の半径の中央値にしたがって、高さ方向の分類を行う。本システムでは口縁部を含む土器片と、口縁部を含まない土器片の配置位置を分ける。さらに、図6に示す口縁部を含まない土器片は高さ方向に4分割位置に配置する。その後、土器片を平行移動、回転し、隣接する土器片を探索しながら、位置合わせをする。すなわち、ジグソーパズルのように、形状の一致する箇所に基づいて隣接する土器片データを配置することができる。最後に二次元パネル上の土器片の位置情報を用いて、三次元空間上に土器を組み立てる。

4.2 土器片の初期配置

本システムでは、二次元パネル上に配置された土器片の組み立てを補助するために、3章で推定した上下方向

である土器片の姿勢と、土器片から抽出した半径の中央値を用いて初期配置を行う。具体的には、2.4節で導出した土器片の姿勢が、180度反転していると判定したとき、その土器片は、組み立てシステムへ入力する前に180度反転させる。その後、口縁部を含む土器片を、二次元パネルを表す図6の最上部に配置し、それ以外の土器片を文献[11]の箱ひげ図を用いて分類し配置する。そのために、まず四分位数を導出する。各土器片から抽出した半径を昇順に並べ、25%点を第一四分位数 Q_1 、50%点を第二四分位数 Q_2 、75%点を第三四分位数 Q_3 とする。また、土器片から算出される半径の中央値が、その土器片の適切な半径を表していない場合を考慮し、外れ値を検出するために四分位範囲 I を利用する。四分位範囲 I は式(7)で導出する。その後、半径 r が式(8)を満たすとき、図6における2の区画に配置する。式(9)を満たすとき、図6における3の区画に配置する。式(10)を満たすとき、その半径 r を外れ値とみなす。外れ値と判断された土器片は、図6における4の部分に配置する。

$$I = Q_3 - Q_1 \quad (7)$$

$$r \in [Q_1 - I \times 1.5, Q_2] \quad (8)$$

$$r \in [Q_2, Q_3 + I \times 1.5] \quad (9)$$

$$r \notin [Q_1 - I \times 1.5, Q_3 + I \times 1.5] \quad (10)$$

4.3 土器片の組み立て

土器片が二次元パネルに配置された後、ユーザは土器片を選択し、回転、移動させることで、実際の土器片を机の上に並べた状態と同様の状態で仮想的な組み立てを行うことができる。図7(a)は土器片を移動、回転をさせる操作前、(b)が操作後である。図7の二つの土器片は同様の隣接形状をしていると判断し、1の土器片を土器片表面の平均法線を軸に時計回りに回転後、矢印の方向に移動させている。

4.4 境界部の一致度の推定

二次元パネル上の土器片の隣接情報の確からしさをユーザに示すためには、境界部の一致度の推定が必要である。したがって、土器片の境界線上の点群を抽出し、点同士の距離が閾値以下である最近点ペアを抽出して、

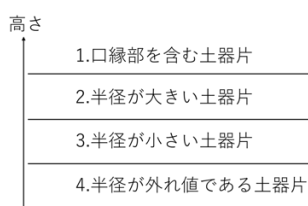
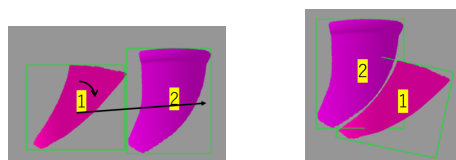


図6 土器片の初期配置



(a) 操作前

(b) 操作後

図7 土器片の移動、回転

その平均距離を算出する。その平均距離をユーザへ提示することで、境界部の一致度を評価する。

具体的な手順を次に示す。まず、二次元パネル上に配置された点群のうち、任意の1点を基準点とする。基準点から二次元パネルに直交する軸を中心に、周囲を45度ずつ、8区画に分割する。その後、各区画に基準点以外の点が含まれているかを算出する。図8は、基準点を中心に周囲を8等分したことを示している。7つ未満の区画に基準点以外の点が含まれていた場合、その点を境界線上の点とする。これを土器片の全ての点に対して行う。図9(a)は境界部を抽出する前の土器片の点群、図9(b)は境界部を抽出した点群を示している。

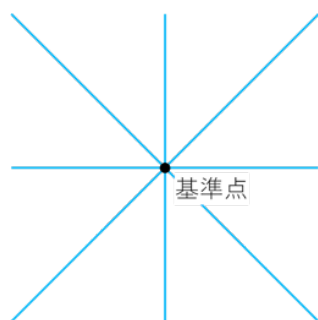
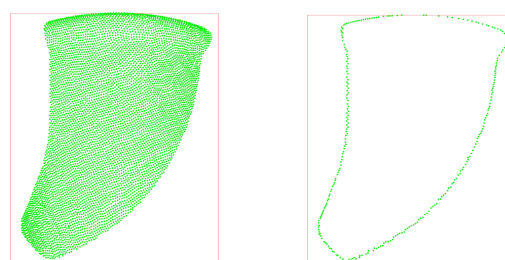


図8 基準点を中心に8分割

次に、二次元パネルで選択した土器片の境界曲線上の点列を $\mathbf{A}_i (i = 0, \dots, n)$ 、一致度を推定する土器片の境界曲線上の点列を $\mathbf{B}_j (j = 0, \dots, m)$ とする。このとき、2点間の距離 $S_i (i = 0, \dots, n)$ は式(11)で計算される。また、2点間の距離が閾値以下であったとき、その2点



(a) 抽出前

(b) 抽出後

図9 土器片の境界線上の点を抽出

を最近点ペアとする。その後、最近点ペアの距離を合計し、平均距離を計測して境界部の一致度を推定する数値としてユーザへ提示する。小さい土器片を含む一致度の推定では、境界部として意図していない点群が最近点ペアになることがある。盛岡市遺跡の学び館の土器片と自作土器片の境界箱で、最短の辺の長さは12である。よって、境界部の一致度を推定したい点群以外が、平均距離に対する影響を減らすために閾値を5とする。

$$S_i = \min_{j=0}^m (\sqrt{(A_{ix} - B_{jx})^2 + (A_{iy} - B_{jy})^2}) \quad (11)$$

4.5 3次元空間への配置

4.3節で述べた手法により、土器片を組み上げた後、図10(a)に示すように、二次元パネルに乗った土器片の位置情報を用いて、土器片を三次元的に組み立てる。二次元パネルの横方向の長さ w を円柱の円周、縦方向の長さ H を円柱の高さとして、二次元パネル上の土器片の位置情報を用いることで、図10(b)のような円柱の側面に土器片を並べる。その後、下底の半径を縮小させることで、円錐台へ形を変える。そのために、二次元パネルのどこに土器片が位置しているのか位置情報を抽出する必要がある。

具体的な手順を次に示す。まず、組み上げた土器片の境界箱となるように二次元パネルのサイズを手動で調整する。その後、各土器片の二次元パネル上の位置情報を取得するために、二次元パネルの左側の辺から土器片の重心を二次元パネル上に射影した点までの距離を g 、二次元パネルの横方向の長さを w とし、円柱へ貼り付ける際の位置情報となる ϕ を式(12)から求める。各土器片の ϕ と二次元パネルにおける高さ h の値を用いることで、円柱における土器片の位置情報が決まる。

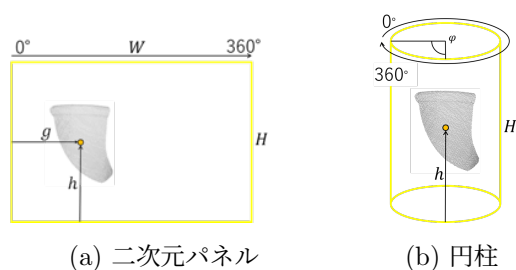


図 10 土器片の位置情報

$$\phi = \frac{g}{w} \times 360 \quad (12)$$

次に、下底の半径を縮小させるとともに、土器片の座標を変換する必要がある。まず、土器片の重心が円柱の側面上に位置している状態から、円錐台の母線上への座標変換を行う。図 11 に円錐台の下底の半径 R_1 、上底の半径 R_2 、円錐台の高さ H 、土器片の重心の高さ h 、中心軸から母線上の土器片の重心までの距離 r を示す。 R_1 と R_2 の初期値は、二次元パネルの横方向の長さ w であり、 R_1 はユーザによって、増減される。土器片の重心の高さが h であるとき、中心軸から母線までの半径 r は式 (13) で求まり、重心の座標は式 (14) となる。また、図 12 は、図 11 の側面に位置する土器片を示している。図 12 に示すように、土器片の重心を基準として、円錐台の接線方向を中心に θ 度回転させることで、円錐台における中心軸に対する母線と同じ角度に傾けることができる。回転角 θ は式 (15) で求める。

$$r = R_1 + \frac{h}{H}(R_2 - R_1) \quad (13)$$

$$(x, y, z) = (r \times \cos(\phi), r \times \sin(\phi), h) \quad (14)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{H}\right) \quad (15)$$

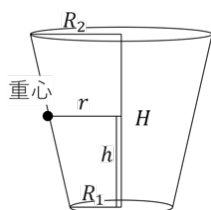


図 11 円錐台

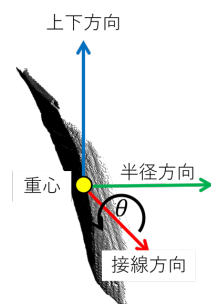


図 12 土器片の回転

5 実験結果

本章では、提案手法の有効性を検証する。実験に使用した CPU は Intel Core i7-1255U, RAM は 16.0GB である。実験には、図 13 に示す盛岡市遺跡の学び館 [12] から借用した土器の土器片 34 点を使用する。盛岡市遺跡の学び館の土器片 34 点を図 15 に示す。また、図 14 に示す市販されている植木鉢を割った自作の土器片 32 点を使用する。自作の土器片 32 点を図 16 に示す。



図 13 盛岡市遺跡の学び館の土器



図 14 植木鉢

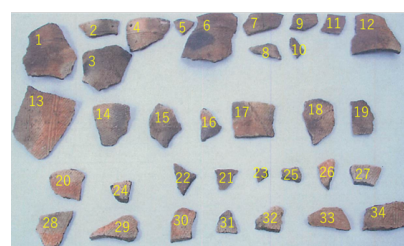


図 15 盛岡市遺跡の学び館の土器片

5.1 土器片の上下方向推定

口縁部を含む土器片は目視で土器片の上下方向を判断できるため、実験対象から除いた。まず、文献 [2] の手法で土器片の上下方向を推定する。盛岡市遺跡の学び館土器片と自作土器片の土器片数と、正しい上下方向を推定した土器片数、正しい上下方向から 180 度反転した上

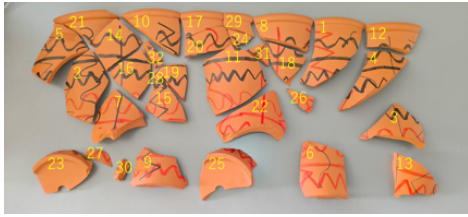


図 16 自作土器片

下方向を推定した土器片数, 推定に失敗した土器片数を表 1 に示す. 文献 [2] の手法で推定に失敗した土器片は, 正しい上下方向もしくは正しい上下方向から 180 度反転した上下方向より 45 度以上差がある場合である.

表 1 土器片の数と割合

	土器片数	正しい	反転	失敗
盛岡	25(100%)	6(24%)	15(60%)	4(16%)
自作	25(100%)	14(56%)	11(44%)	0(0%)

次に, 正しい上下方向の土器片と正しい上下方向から 180 度反転した土器片を対象に, 本手法を適用する. ただし, 文献 [2] の手法で推定に失敗した土器片は, 本手法を適用しても正しい上下方向を推定できないため, 実験対象から除く. 表 2 に盛岡市遺跡の学び館土器片, 自作土器片の結果を示す. 盛岡市遺跡の学び館土器片では, 正答率が先行研究 [2] より 29 ポイント向上し, 自作土器片では, 正答率が先行研究 [2] より 24 ポイント向上した.

表 2 正答率の比較

	土器片数	先行研究 [2]	直線回帰
盛岡	21(100%)	6(28%)	12(57%)
自作	25(100%)	14(56%)	20(80%)

図 17 に盛岡市遺跡の学び館土器片 15 番, 図 18 に半径分布を示す. 図 17 は文献 [2] で推定した姿勢であり, 正しい上下方向である. 図 18 は, 図 17 の姿勢から抽出された半径分布である. 盛岡市遺跡の学び館の土器片 15 番の高い部分と低い部分に, 著しく小さい半径があるために, 外れ値の影響が大きくなり直線回帰によって正しい上下方向を推定できない. 土器片の上部と下部は 3.4 節で述べた距離 L が短くなり, 土器片の断面から精度の低い半径が近似されることが原因である. 本手法で正しい上下方向を推定するには, 図 18 に示すような半

径分布が右肩上がりになっている必要がある. また, 図 19 に自作土器片 23 番, 図 20 に半径分布を示す. 図 19 は文献 [2] で推定した姿勢であり, 正しい上下方向である. 図 20 は, 図 19 の姿勢から抽出された半径分布である. 自作土器片 23 番も, 3.4 節で述べた距離 L が高さにしたがって短くなっているため, 高さが高くなるほど, 半径が小さい円で近似されていることが原因である. また, 文献 [2] では, 土器片の点群を主成分分析し, 第三主成分を回転軸としている. しかし, 自作土器片 23 番は高さ方向が短く, 横方向に長い形状をしている. そのため, 上下方向を推定するために適した回転軸になっていないことも原因である. 回転するべき姿勢から, 高さ方向に直交する軸を中心に回転した姿勢になっている. 本手法で正しい上下方向を推定するには, 図 20 が右肩上がりの半径分布になっている必要がある.

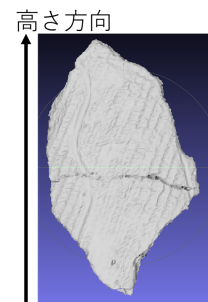


図 17 盛岡市遺跡の学び館土器片 15 番

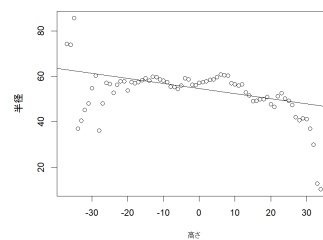


図 18 盛岡市遺跡の学び館土器片 15 番の半径分布

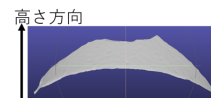


図 19 自作土器片 23 番

5.2 土器組み立てシステム

盛岡市遺跡の学び館から借用した土器片 34 点の二次元パネルでの組み立てと, 二次元パネルで組み立てた土

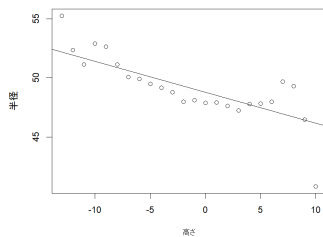
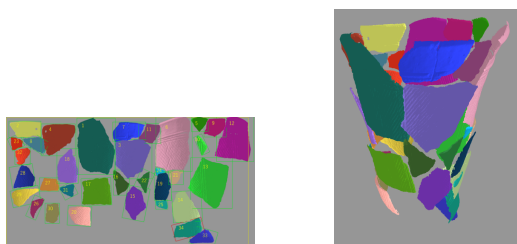


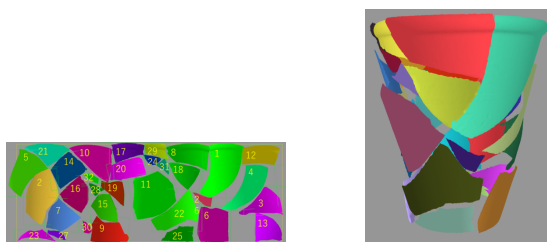
図 20 自作土器片 23 番の半径分布

器片の位置情報を反映させた三次元的組立を図 21 に示す。また、自作土器片 32 点の二次元パネルでの組み立てと、二次元パネルで組み立てた土器片の位置情報を反映させた三次元的組立を図 22 に示す。三次元的組立を円錐台に変形できるため、下部に隙間が少なく、より完全な形状に近い土器の姿を確認できる。



(a) 二次元パネル上の土器片 (b) 三次元的組立

図 21 盛岡市遺跡の学び館土器片 組立後



(a) 二次元パネル上の土器片 (b) 三次元的組立

図 22 自作土器片 組立後

4.2 節で述べた手法で初期配置した土器片と、組み上げた土器片の二次元パネル上の土器片の位置を比較し、初期配置の方法について有効性を検証する。まず、4.2 節で述べた手法によって初期配置された盛岡市遺跡の学び館土器片を図 23 に、自作土器片を図 24 に示す。また、本論文では、土器片の半径を用いた初期配置を評価するために、先行研究 [2] によって上下方向を推定でき

なかった盛岡市遺跡の学び館の土器片 10 番、26 番、32 番、33 番を、4.2 節における箱ひげ図による分類の対象外とする。また、分類の対象外となる土器片 4 点は、半径を外れ値として扱い、図 6 に示した区画番号 4 へ配置する。したがって、4.2 節の箱ひげ図の分類によって、外れ値として分類された 8 番の土器片を加え、区画番号 4 に配置される土器片は 5 点となる。図 25 は、盛岡市遺跡の学び館土器片を組み上げた後の二次元パネル上の土器片とその重心、4.2 節で述べた手法で初期配置された区画の番号を示す。土器片の重心は、図中では赤い点で示しており、土器片の配置位置の基準として用いる。図 26 は、自作土器片を組み上げた後の二次元パネル上の土器片とその重心、4.2 節で述べた手法で初期配置された区画の番号を示す。

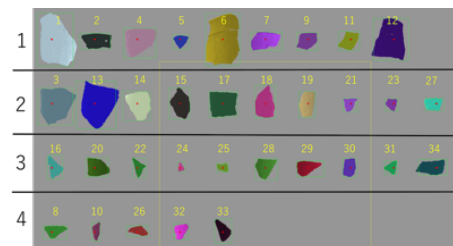


図 23 盛岡市遺跡の学び館土器片初期配置

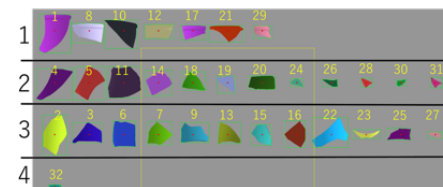


図 24 自作土器片初期配置

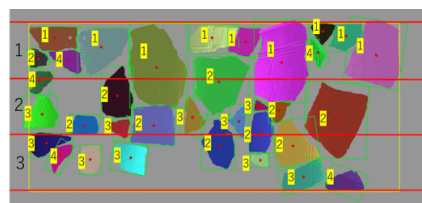


図 25 盛岡市遺跡の学び館土器片初期位置と組立後の比較

表 3、表 4 は、4.2 節の手法で配置された土器片の数と、ある区画に初期配置された土器片が、組み立てた後も同じ区画内に収まっている数を示す。ただし、口縁部を含む土器片は、半径に基づいて配置していないため、

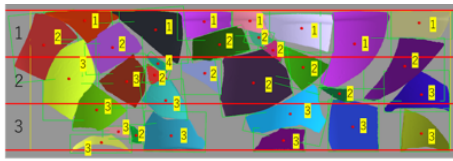


図 26 自作土器片初期位置と組立後の比較

表 3, 表 4 に入っておらず, 本研究では, 評価の対象外とする. 表 3 に示すように, 盛岡市遺跡の学び館の土器片は, 当初区画番号 2 に配置された土器片 10 個のうち, 組み立て後 3 個が別の区画へ移動したことを示している. 区画番号 3 については, 5 個の土器片が移動し, 合計 8 個の土器片が初期配置された区画から別の区画へ移動した. また, 表 4 から自作土器片では, 合計 12 個の土器片が初期配置された区画から別の区画へ移動した. また, 初期配置の各土器片の重心と組み終わった各土器片の重心の直線距離を計測した. 文献 [1] の手法である横一列に土器片を初期配置した場合と比較する. 表 5 に盛岡市遺跡の学び館の土器片, 表 6 に自作土器片の結果を示す.

以上のことから, 土器復元のために初期配置から移動した土器片は, 盛岡市遺跡の学び館の土器片は 40% となり, 自作土器片では 50% となる. したがって, 本手法による土器片の高さ方向の分類の精度は, 盛岡市遺跡の学び館の土器片は 60%, 自作土器片では 50% となり, 組み立てに利用できることが分かった. 土器片の初期配置によって, 隣接土器片の探索範囲に優先順位がつけられるため, 組立の効率が向上できる. さらに, 盛岡市遺跡の学び館の土器片では移動量が 37% に減少し, 自作土器片では移動量が 43% に減少したことで, 組立の効率が向上した.

表 3 土器片の配置位置 (盛岡市遺跡の学び館土器片)

	2. 半径大	3. 半径小
初期配置	10(100%)	10(100%)
組み立て後	7(70%)	5(50%)

表 4 土器片の配置位置 (自作土器片)

	2. 半径大	3. 半径小
初期配置	12(100%)	12(100%)
組み立て後	4(33%)	8(66%)

また, 土器片の境界部の一致度を測る実験について示

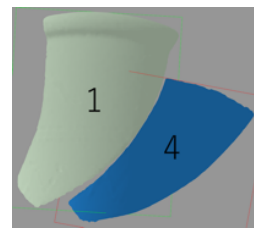
表 5 土器片の移動量 (盛岡市遺跡の学び館土器片)

先行研究 [1]	提案手法
30756.2(100%)	11331(37%)

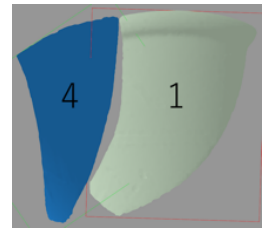
表 6 土器片の移動量 (自作土器片)

先行研究 [1]	提案手法
26750(100%)	11748.1(43%)

す. 自作土器片で隣り合う 1 番と 4 番を実験に用いた. 図 27(a) は正しい配置を示しており, (b) は誤った配置を示している. また, 図 27 のときの最近点ペアの平均距離を表 7 で示す. この平均距離は二次元パネル上に表示され, ユーザへ提示される. 正しい配置である方が, 最近点ペアの平均距離が短く, 組立の検討に使用できることが分かった.



(a) 正しい配置



(b) 誤った配置

図 27 自作土器片 1 番と 4 番

表 7 自作土器片 1 番と 4 番の最近点ペアの平均距離

正しい配置	誤った配置
1.36858	2.22993

6 まとめ

本研究では, 土器片の空間配置推定手法を拡張して, 土器片の上下方向の推定結果を補正する手法を提案した. また, 提案手法に基づいて, 土器片を組み立てるシステムを実装して, 提案手法の有用性を確認した. 今後の課題は, 本手法で初期配置された土器片と, 組み立て後の土器片の回転量を定量的に評価することが挙げられる. また, 本研究の土器組立システムに置いて, インタラクティブに行う土器片配置, 選択, 回転, 移動といった手作業に要する時間の定量的な評価も必要である. さらに, 土器片同士の境界部の一致度に基づく自動位置合わせや支援手法の導入も有望である.

なお、本論文は NICOGRAPH2024 で発表した論文 [13] に加筆したものである。論文査読者からの有益なご指摘に深謝する。また、本研究で利用した土器データを提供していただいた、盛岡市遺跡の学び館に感謝する。本研究の一部は、JSPS 科研費 JP24K04334 の助成を受けた。

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] 木下勉, 李春元, 吉川和杜, 今野晃市. 3 次元計測点群に基づく土器片の上下方向と高さ位置推定手法に関する検討. 芸術科学会論文誌, Vol.21, No.2, pp. 87–96, 2022.
- [3] Q. Huang, S. Flory, N. Gelfand, M. Hofer, and H. Pottmann. Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching. ACM Siggraph 2006 papers, pp. 569–578, 2006.
- [4] K. Willis, P. Jayaraman, H. Chu, Y. Tian, Y. Li, D. Grandi, A. Sanghi, L. Tran, J. Lambourne, and A. Solar-Lezama. Joinable: Learning Bottom-up Assembly of Parametric CAD Joints. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 15849–15860, 2022.
- [5] Y. Chen, H. Li, D. Turpin, A. Jacobson, and A. Garg. Neural Shape Mating: Self-Supervised Object Assembly with Adversarial Shape Priors. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 12724–12733, 2022.
- [6] J. Lu, Y. Sun, and Q. Huang. Jigsaw: Learning to Assemble Multiple Fractured Objects. Advances in Neural Information Processing Systems, Vol.36, pp. 14969–14986, 2023.
- [7] 李春元, 今野晃市. 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. 芸術科学会論文誌, Vol. 17, No. 5, pp. 115-125, 2018.
- [8] T. Kinoshita, K. Katsutsugu, K. Konno. An Estimation of Earthenware’s Surface Shape Using Quadric Surfaces. The Journal of the Society for Art and Science, Vol.13, No.1, pp. 21–33, 2014.
- [9] G. Taubin. Estimation of Planar Curves, Surfaces and Nonplanar Space Curves Defined by Implicit Equations with Applications to Edge and Range Image Segmentation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No.11, pp. 1115–1138, 1991.
- [10] 藤澤洋徳. ロバスト統計. 近代科学社, 2017. ISBN: 9784764905429.
- [11] 日本統計学会. 統計学基礎. 東京図書, 2021. ISBN: 9784489022272.
- [12] 盛岡市遺跡の学び館. <http://www.city.morioka.iwate.jp/shisei/moriokagaido/rekishu/1009437/>. 参照: 2024-7-4.
- [13] 川島大心, 游梦博, 木下勉, 今野晃市. 土器片の空間配置推定手法に基づく土器片組立システムの検討. NICOGRAPH2024, pp.F-2:1-F-2:8, 2024.

川島 大心



2019 年東北学院大学卒業。2025 年岩手大学大学院総合科学研究科理工学専攻修士課程修了。同年東京エレクトロン株式会社に入社。

游 梦博



2012 年中国西北農林科技大学卒業。2015 年に岩手大学工学研究科デザイン・メディア工学専攻博士前期課程修

了, 2018 年同大学博士後期課程修了. 博士 (工学). 同年より西北農林科技大学講師. 現在, 岩手大学准教授. コンピュータビジョンやコンピュータグラフィックスに関する研究に従事. 芸術科学会会員.

木下 勉



1993 年 東京理科大学理学部第一部数学科卒業. トヨタ自動車株 (株), ラティス・テクノロジー (株) を経て, 2015 年 福井工業大学環境情報学部経営情報学科 准教授, 2017 年 東北学院大学工学部情報基盤工学科 准教授. CG, CAD, 遺物の 3 次元解析などの研究に従事. 著書に「R で学ぶ確率統計学 一変量統計編」, 「R で学ぶ確率統計学 多変量統計編」, 「R で学ぶ確率統計学 実データ分析編」がある. 博士 (工学). 芸術科学会, 日本図学会の会員.

今野 晃市



1985 年, 筑波大学第三学群情報学類卒業. (株) リコーソフトウェア研究所, ラティス・テクノロジー (株) を経て, 現在, 岩手大学理工学部教授. 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, EuroGraphics 会員.