

# 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 今野 晃市

柴原 壮大

富山県立大学 情報システム工学科

2024 年 7 月 19 日

## はじめに

多くの土器は、遺跡から碎けた状態で出土するため、復元には時間と労力がかかり専門知識が必要である。従来の手作業では破片の形や模様に基づいて復元するが、破片が多いほど困難である。そこで、コンピュータを使った仮想復元が求められており、特に、土器の三次元モデル生成や 3D プリンタを利用した復元は教育的価値がある。

## 本研究の目的

そこで本論文では、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する。

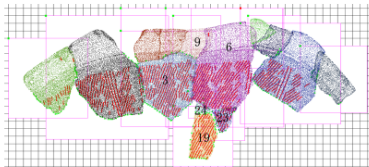
## 背景知識

### 二次元パネルに基づく土器片組み立て支援手法

この手法は、破片断裂面の輪郭と凹凸を利用して、土器片から輪郭線を抽出し、特徴的な箇所では分割線と呼ばれる特徴点で輪郭線を分割する。この分割線ペアは、土器片間の隣接情報を表現し、二次元的な配置上で土器片のマッチングを示す。

そして、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。

これにより、ユーザはディスプレイ上に配置された土器片を選択し、直感的に正確な位置に配置することが可能。



## 概要

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1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。

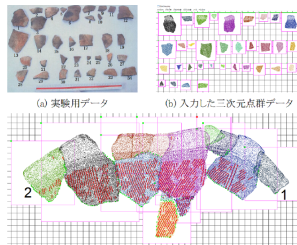


図 1: 二次元パネルに基づく土器片組み立て支援手法

## 二つの土器片の姿勢最適化アルゴリズム

### 二次元パネルに基づく土器片組み立て支援手法

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2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．

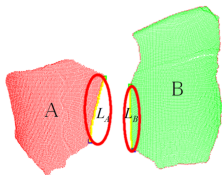


図 2: 二次元パネルに基づく土器片組み立て支援手法

## 二つの土器片の姿勢最適化アルゴリズム

### 二次元パネルに基づく土器片組み立て支援手法

分割線上の各点における法線ベクトルを求めるために、近傍の点を取得し、取得した点群を通る平面を最小二乗法で求めその平面の法線を各点の法線ベクトルとする。ここでは、近傍の点の数  $k$  を 10 とする。また、共有境界線における点ペアを構成し位置合わせを行う。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  $M$  を求める。

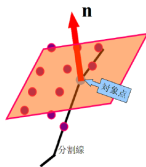


図 3: 対象点の法線ベクトル

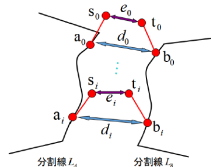


図 4: 土器片間の距離の定義

## 数式

$n$  は点ペアの数である．分割線 LA 上の点  $a_i$  に対して，分割線 LB を構成する点列との最短距離となる点  $b_i$  を求め，それに対して，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  $s_i, t_i$  を生成する． $d_i, e_i$  は分割線上にある各点ペアの距離を表す．座標変換  $M$  を追加し展開した式が (3) である．ただし，座標変換  $M$  は次のスライド に示される行列である．

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

$$d_i = |a_i - b_i|, \quad e_i = |s_i - t_i| \quad (2)$$

$$D = \sum_{i=0}^n (|a_i - Mb_i|^2 + |s_i - Mt_i|^2) \quad (3)$$

## 数式

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と平行移動を、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。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

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



## 誤差

本手法を適用した結果，図5に示すように土器の口縁部周りの土器片を右から左に向かって逐次的にマッチングした．図10の番号7, 8, 9は各隣接土器片間の接合部の分割線ペアを示しており，丸で囲った部分は緑とシアンの土器片の位置が一致しない箇所である．これは8番の分割線ペアをマッチングした際に生じた誤差が原因．このように逐次的なマッチングでは誤差が蓄積し，形状の整合性が維持できなくなることがある．



図 5: 画像 (c)



図 6: 画像 C

## 解決策

本研究では、複数の土器片の空間姿勢を最適化するために式 (1) を拡張し、図 8 に示すように各土器片間の接合部の分割線ペア上の点と法線ベクトルの方向に生成した点ペアの距離の 2 乗和  $D_i$  を最小化す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) のように表され、図 7(a) のように、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 7(c) のように形状の整合性を得ることが可能。

$$D = \sum_{j=1}^n D_j \quad (4)$$

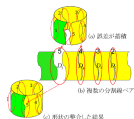


図 7: 複数土器片姿勢最適化

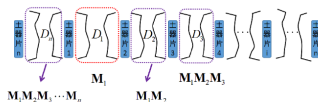


図 8: 各土器の座標変換

## 実験結果

### 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 9 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。また、これら 1~9 の土器片を組み立てて、土器の口縁部が復元する。本手法を適用した結果が図 10 である。

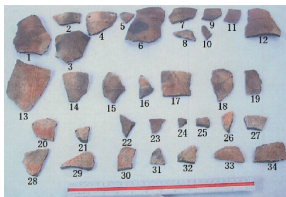


図 9: 実験用土器データ

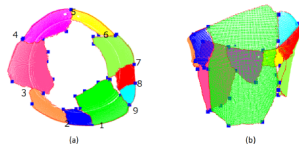


図 10: 空間姿勢最適化の結果

## 実験結果

表 1: 逐次的手法との比較

	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
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

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

## 評価

本研究では、手作業で復元された土器を写真計測して取得した三次元点群データと比較し、本手法の評価を行った。手作業で復元された土器モデルは約 62,871 個の点で構成され、口縁部の最大口径は約 200mm、最小口径は約 190mm、底部の最大口径は約 105mm、最小口径は約 106mm であり、高さは約 240mm である。本手法による復元モデルは約 47,600 個の点で構成され、手作業の復元結果と比較して、一部で赤い丸の位置が多少ずれていることが示された（図 11 と図 12 を参照）。



(a)正面から見た結果



(b)上から見た結果



図 11: 手作業の結果で得られた三次元点群データ

図 12: 本手法による得られた結果

## 評価

本研究では、手作業で復元した正解データと本手法で復元した点群モデルを比較し、位置合わせを行った。赤い点群モデルは本手法による結果であり、緑の点群モデルは手作業による正解データを示している。評価では、40,119 個の対応点の平均距離が 2.69mm であり、これは土器の口縁部の最小口径である 190mm と比較して約 1.4 %，底部の最小口径である 105mm と比較して約 9.5 % の誤差があることが示された。これにより、本手法が土器の復元において十分な品質であることが確認された。

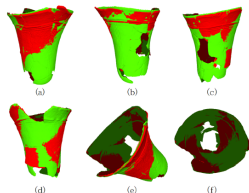


図 13: 比較 1: 手作業結果と本手法の結果

## 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。