

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

木下勉¹⁾ 李春元²⁾ 吉川和杜³⁾ 今野晃市⁴⁾

1) 東北学院大学 2) 北華大学 3) 日立ハイテクファインシステムズ 4) 岩手大学大学院

A Study on a Method for Estimating the Vertical Direction and Height Position of Earthenware Pieces Based on 3D Measurement Point Clouds

Tsutomu Kinoshita¹⁾ Chunyuan Li²⁾ Kazuto Yoshikawa³⁾
Kouichi Konno⁴⁾

1) Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University

2) Faculty of Engineering, Bei Hua University

3) Hitachi High-Tech Fine Systems Corporation

4) Graduate School of Arts and Sciences, Iwate University

概要

遺物である土器は多くの場合バラバラの状態出土し、人手により復元される。しかし、土器の復元には専門的な知識や経験が必要であり、土器片の汚損や破損といったリスクもある。そこで、コンピュータを用いた土器の復元を支援する研究として、土器片の隣接情報を用いて復元を行う研究がある。しかし、土器片の初期配置を手で行うため、復元を行うユーザーの負担が大きい。そこで本研究では、土器片の3次元計測点群を元に、上下方向と高さ位置を推定する手法を提案する。本手法では、3次元計測点群で表現される土器片を複数の平面で切断後、各断面を円で近似し、複数の円の中心点や半径に基づいて土器片の上下方向や高さ位置を推定する。本手法を完形土器点群の一部を切り出した土器片点群と、土器片から復元が行われた土器片点群に適用し、手法の有効性と課題を確認した。大きな土器片点群であれば、精度よく上下方向と高さ位置の推定を行うことができた。

Abstract

In most cases, earthenware is broken when it is excavated from ruins, earthenware is restored manually. However, the restoration requires technical knowledge and experience. In addition, restoration work of a relic is a risk for damaging earthenware pieces. Therefore, as a research to support the restoration of earthenware using a computer, a study to restore the earthenware using the adjacent information of the earthenware pieces is presented. However, in previous method the initial placement of the earthenware pieces is done manually and the burden on the user is heavy. In this paper, we propose a method to estimate the vertical direction and height position based on the 3D measurement point cloud of the earthenware piece. After cutting the 3D point cloud on multiple planes, each cross section is approximated by a circle, and the vertical direction and height position of the earthenware piece are estimated based on the center points and radius of the circles. This method was applied to two earthenwares, and it was possible to estimate accurately with a large piece of earthenware.

1 はじめに

遺物である土器は、多くの場合バラバラに碎けた状態で遺跡から出土する。出土した土器片は、元の土器全体を把握するために形状の復元が行われる。土器の復元は基本的に手作業で行われるが、土器の復元には専門的な知識や経験が必要であり、手作業での土器の復元作業には、土器片の汚損や破損などのリスクがある。そこで近年、3次元計測機器で土器片を計測し、コンピュータ上で土器の復元を支援する研究が行われている。

土器復元に関する研究の一つに、2次元パネルを用いた土器復元システムの研究 [1][2] がある。文献 [1] の研究では、土器片の3次元計測点群を、ユーザーが移動や回転を行ってパネル上に配置し、隣接する土器片同士の隣接線や、土器片の文様の流れなどの情報から土器片の姿勢を最適化するシステムを開発している。この研究によって、ユーザーが試行錯誤しながら土器片の復元を試みることができるが、土器片の上下方向は、すでに分かっていることが前提のシステムである。上下方向が決定できると、土器片同士の組み合わせを決定できるシステムとなっている。このシステムを効率的に利用するためには、土器片の上下方向を推定する手法と、初期位置としてある程度の空間位置の推定が必要である。

そこで本研究では、土器片復元の支援のために、土器片の3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手法を提案する。

2 関連研究

土器復元に関する関連研究として、2次元パネルに基づく土器片組み立て支援システム [1] と、土器復元のための2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 [2] がある。

文献 [1] の研究では、隣接する土器片の組み立てのために、土器片の文様や輪郭を、文様点、分割点、文様流れ、輪郭線といった土器片の特徴量を抽出して組み立てに用いる。まず、土器片の点群データを2次元パネル上に展開し、口縁部と考えられる土器片点群データにラベルを付ける。口縁部とは土器などの開口部の縁の部分を示す。口縁部である土器片点群と、口縁部でない土器片点群を分類し、口縁部である土器片点群から土器片を組み合わせていく。土器片の輪郭線の類似に基づいて、隣

接する土器片のグループを作り、土器片の特徴量を用いて土器片の3次元マッチングを行う。土器片のグループ化とマッチングを繰り返して土器片を組み合わせていくことで、2次元パネル上での土器片の組み立てを行うことができる。

文献 [2] の研究では、文献 [1] で得られた土器片の隣接情報から、3次元空間上で土器片を組み立てるために、空間姿勢の最適化を行う。図1は、土器片組み立てを始めた状態の土器片点群データであり、ユーザーが試行錯誤することで、図2のように2次元パネル上で組み立てが可能である。これらの研究では、ユーザーが手動で土器片点群を口縁部とそれ以外で分類し、さらに土器片の移動や回転を行いながら、隣接関係を作成する必要があるため、土器片の分類や当てはめに試行錯誤を伴う。そこで、本研究の手法で土器片の上下方向と高さ位置を推定することで、効率的な土器片の組み立てが可能になる。



図1 土器片点群データの初期状態

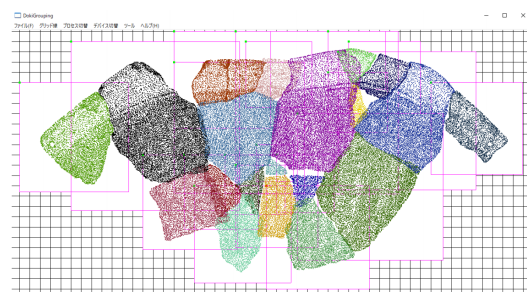


図2 2次元パネルに基づく土器片組み立て支援システム

3 提案手法

3.1 概要

本研究では、土器片の3次元計測点群を用いた上下方向と高さ位置推定手法について提案する。

土器の復元形状を回転面と仮定すると、断面は円になる。よって、土器片が正しい上下方向を示す姿勢であれば、断面を表す円の中心点は中心軸上にあり、中心点のぶれは少ない。一方、土器片の上下方向が正しくない姿勢であれば、断面を表す円の中心点は、中心軸から離れ複数断面の中心点のぶれは大きくなる。本手法では、こ

のことに着目し、正しい上下方向を示す姿勢を推定する。また、復元形状の概形(円錐台など)を想定し、断面となる円の半径長の分布により、土器片の高さ位置を推定する。

具体的には、土器片点群を表面の法線方向を回転軸として回転しながら、一定間隔で平行な断面で切り出し、抽出した断面の点群を円で近似する。近似した複数円の中心点のずれを評価し、最もずれの少ない姿勢を土器片の正しい上下方向と推定する。

次に、正しい上下方向と推定された土器片について、近似した複数円の半径長の分布(上部は半径が短く、下部に行くほど長くなるなど)により、土器片の大まかな高さ位置を推定する。そのため、本手法で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変化するものと仮定する。ゆえに、土器の一部が激しくくびれているような形状では、正しく推定ができない。

また、本手法は、ある程度組みあがった土器の点群データがすでにある場合には、ある程度組みあがった土器を参照土器として、参照土器点群との相対的な高さ位置を推定することができる。以下に詳細を述べる。

3.2 断面の抽出

上下方向の推定では、土器を2次元的に捉えて回転することで最適な姿勢を推定するため、回転軸を指定する必要がある。本手法においては、点群の平均法線、つまり主成分分析の第3主成分を回転軸として土器片を回転し、上下方向を推定する。図3は土器片を平面的にとらえるイメージとして疑似的な平面を示す矩形とともに、主成分分析の結果を示したものである。図中の青ベクトルが第1主成分、赤ベクトルが第2主成分、緑ベクトルが第3主成分である。

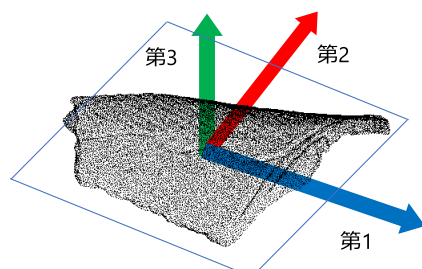


図3 主成分分析

また、土器片を切断する複数平面上の点は、土器片の重心を通り初期状態(回転していない状態)の第1主成分

分上の直線を、等分するように定義する。ただし、点と点の間隔はすべての姿勢(回転)で一定になるように設定する。なお、複数平面の法線はすべて共通で、主成分分析の第1主成分とする。つまり、土器片は回転して評価を行うが、断面の法線は固定であり、主成分分析の第1主成分方向の土器片の長さに依存して、断面の枚数が変化する。図4の左図は、初期姿勢の土器片、右図は回転後の土器片の姿勢と、断面の関係を示している。図4において、黄色の点は重心点を示し、オレンジの矩形は、断面を表している。土器片の回転に関わらず、断面の法線は第1主成分であり、断面の枚数が第1主成分の方向の長さにより変化している。

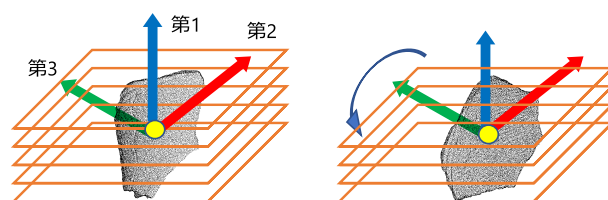


図4 主成分分析の各軸と断面定義

なお、土器片の3次元計測点群において、ある点とまったく同じ平面上にあるという点はほとんど存在しない。そのため、ある位置から法線ベクトル方向に $\pm\epsilon$ の範囲の点群を、土器点群の断面を表す点群と定義する。断面間の距離を 2ϵ とし、 ϵ を決定することで、それぞれの断面を表す点群として抽出する。

3.3 点群の円近似

3.2節で抽出した断面を表す点群を円で近似する。円の近似手法には様々な手法[3]があるが、本手法ではTaubinの円近似手法[4]を利用する。Taubinの円近似手法は、円の方程式の最小二乗法を代数的に解く手法の一つである。円近似の代数的な手法には、古典的な手法であるKasaの手法[5]があるが、Kasaの手法は、データが中心角の小さな円弧状の場合には、半径が小さく近似される[6]ため、本手法には適さない。

3.4 土器片の上下方向推定

土器片の上下方向を推定するために、第1主成分を法線とする平面に乗る、土器片点群を求め、断面を表す点群を3.3節の手法で円の方程式に近似し、それぞれの断面を表す点群を近似した円の中心点のずれを評価する。直感的には、点群の重心を通り方向ベクトルを第3主成分

分とする直線を回転軸として土器片を回転しながら、第 1 主成分を法線ベクトルとする平面で点群を切断した断面を抽出する。そして、断面を示す円の中心点のずれを評価し、一番ずれの少ない円を生成する姿勢を、上下方向を示す姿勢と推定する。以下に具体的な処理を示す。

1. 点群の重心を原点とし、 y 軸が第 3 主成分の向き、 z 軸が第 1 主成分の向きとなるように土器片点群を初期配置する。
2. z 軸を法線とする複数平面で点群を切断して、3.2 節の複数断面を表す点群を抽出し、それぞれの点群を円で近似する。ここで、各断面を $S_i (i = 0, \dots, n)$ とする。
3. 平面から $\pm\epsilon$ 内の距離に、原点座標を含む断面を S_g とする。
4. 断面 S_g を近似した円の中心点を $C_g(x_g, y_g, z_g)$ 、断面 $S_i (i = 0, \dots, n)$ を近似した円の中心点を $C_i(x_i, y_i, z_i)$ とし、 C_g と C_i の xy 平面上の距離 d_i を式 (1) で定義する。ただし、 $i \neq g$ とする。

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_g)^2 + (y_i - y_g)^2} \quad (1)$$

5. d_i の平均 $\overline{d_j} (j = 0, \dots, 359)$ を式 (2) で定義する。ここで、 j は y 軸を軸として点群を回転する角度である。

$$\overline{d_j} = \frac{\sum_i d_i}{n} \quad (2)$$

6. y 軸を回転軸とし、土器片点群を 1° 回転させる。

上記の手順 2. から手順 6. の処理を、土器片点群が y 軸の周りを 1 回転するまで繰り返し、手順 5 で得られる $\overline{d_j}$ が最小となるとき土器片点群の姿勢を、土器片の上下方向と推定する。

図 5 のように、土器片の上下方向の向きが正しい向きとなる土器片点群断面の近似円は、中心点の位置のずれが小さく、土器片点群の向きが本来の向きと異なるほど、近似円の中心点の位置は大きくぶれるようになる。

3.4.1 上下方向推定の上下の向き

上下方向推定の処理において、土器片点群のある回転角度における $\overline{d_j}$ と、 180° 上下反転させた回転角度における $\overline{d_{j+180}}$ は一致する。よって、本手法では、正しい上下方向と、正しい上下方向から上下反転した方向のどちらも、最適な上下方向として推定される。

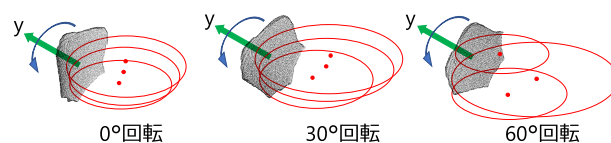


図 5 相対高さ位置推定

3.5 土器片の高さ位置推定

3.4 節で述べた手法で、上下方向を推定した土器片点群を用いて、土器片の高さ位置を推定する。2 次元パネル [1] での組み立てを想定し、本手法では、土器片点群の断面を近似した円の平均半径の大きさから、土器片を上位置、中位置、下位置に分類することで、土器片の高さ位置を推定する。また、高さ位置推定が困難な小さな土器片を小土器片として分類する。

まず、高さ位置推定手法を適用する土器片を選出する。土器片点群の大きさを調べて、一定の大きさ以上の土器片を選出する。また、一定の大きさに満たない土器片点群を、位置推定できない小さな土器片として小土器片に分類する。これは、土器片断面の点群が一定の大きさよりも小さい場合、近似円の半径が精度よく算出されないためである。土器の大きさは、器形や年代から考古学的に推定できる。よって、考古学的に推定した土器の円周の長さを A 、上下方向推定後の土器片点群において、断面点群の端点同士の最大距離を L とし、許容できる最小の断面点群の周長の割合を ϕ とすると、式 (3) を満たすものを小土器片と分類する。

$$L < A\phi \quad (3)$$

$A\phi$ が閾値となっており、断面点群の端点同士の最大距離が $A\phi$ 未満なら小土器片とする。

予備実験により、円周にどの程度の範囲の点群があれば問題なく円の近似が行えるか検証した結果、土器片断面の点群が元の円の $1/6$ 以上の範囲があれば、小さい誤差で円の近似が行えることが分かった [7] ため、本研究では $\phi = \frac{1}{6}$ とする。

小土器片を除いた後、残った土器片に対して、高さ位置を推定する。利用する土器片データは、3.4 節の手法により、上下方向が推定された土器点群を利用するため、 y 軸が土器片の第 3 主成分方向、 z 軸が正しい上下方向、原点が重心となる座標系が定義されているものとする。まず、 z 軸を法線とする平面で切断した複数断面を抽出

した後、断面点群を円で近似し、近似円の平均半径を求める。次に、推定する全ての土器片点群について、複数断面の近似円の平均半径を求め、最大平均半径から最小平均半径までの範囲を3等分し、平均半径の大きい順に上位置、中位置、下位置とする。最後に、それぞれの土器片点群を平均半径の大きさに応じて、上位置、中位置、下位置に分類し、高さ位置を推定する。この分類は、底面の半径よりも上面の半径が大きい、円錐台のような形状を想定している。

文献 [1] の研究にあるように、口縁部を含む土器片は目視により容易に判別可能であるため、口縁部を含むと判断した土器片点群は、高さ推定なしに、上位置に分類可能である。

3.6 土器片の相対高さ位置の推定

ある程度の土器復元が行われている場合には、復元された土器点群を参照土器点群として、他のどの土器片とも隣接しない土器片や、追加で復元したい土器片の相対的な高さ位置を推定できる。

3.4 節の手法により、上下方向が推定された土器点群と参照土器点群に対して、まず、土器片点群と参照土器点群の複数断面を円で近似する。次に、参照土器点群の下底の断面と、土器片点群の下底の断面の高さを合わせる。最後に、図6に示すように、以下の処理を行うことで、土器片点群の相対高さ位置を推定する。

1. 土器片点群の断面 $S_i (i = 0, \dots, n)$ の近似円を a_i とする。また、参照土器点群の断面 $T_j (j = 0, \dots, m)$ の近似円を b_j とする。ここで、 a_i と b_j の類似度 s_{ij} を式 (4) で表す。

$$s_{ij} = \frac{r_1}{r_2} \quad (r_1 < r_2) \quad (4)$$

ただし、 r_1 と r_2 は円 a_i と円 b_j の半径で、小さい半径を r_1 、大きい半径を r_2 とする。ここで、 $k = 0, \dots, (m - n)$ について、式 (5) のように類似度の平均を求める。ただし、 $m \geq n$ である。

$$\bar{s}_k = \frac{\sum_{i=k}^{k+n} s_{i-k,i}}{n+1} \times 100 \quad (5)$$

2. $\bar{s}_k$ は、土器片点群の断面 S_i と参照土器点群の断面 T_j が、 S_0 と T_k を基点として、どの程度類似してい

るのかを示している。そこで、 $\bar{s}_k$ が最大となる断面の位置が土器片点群の高さと推定する。

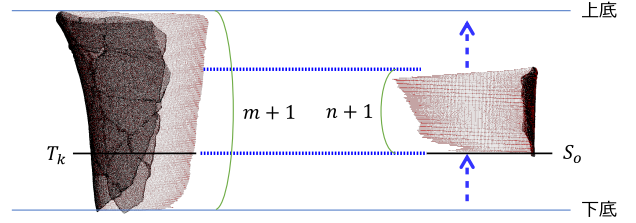


図6 相対高さ位置推定

3.6.1 相対高さ位置推定による上下決定

3.4 節で述べた手法では、正しい上下方向と上下反転した方向のいずれも最適な上下方向として推定される。これら2つの姿勢の両方に対し3.6 節で述べた手法を適用し、類似度の平均の最大がより大きい方を、上下方向の向き及び高さ位置の推定結果とする。

4 実験

4.1 概要

本章では、提案手法の有効性を検証する。実験に使用する土器は、図7に示す、壊れていない状態で発掘されたの完形土器点群と、土器片から復元が行われた図8の土器点群を使用する。図8の土器点群は盛岡市遺跡の学び館 [8] に保管されている土器であり、実験のために、文献 [9] の2次曲面当てはめによる主軸推定の手法で主軸を推定し、 z 軸が主軸になるように座標変換した土器点群である。提案手法のアルゴリズムが正しいことを検証するために完形土器を使用し、実際の土器片への有効性を検証するために遺跡の学び館の土器を使用する。

完形土器点群は、図7が示す様に、円周 $1/6$ 範囲、高さ40ごとで切り出した6つの点群を土器片点群とした。図8の遺跡の学び館の土器点群は、組み立て前の土器片に分割した土器片点群を使用する。それぞれの土器片点群に番号を振り、これらの土器片点群に対して3.4 節、3.5 節、3.6 節で述べた手法を適用する。

図7の完形土器点群の高さは236mmである。また、図8の遺跡の学び館土器点群の高さは221mmであり、例として、図8の1番の土器片点群の高さは40mm、図8の7番の土器片点群の高さは80mmである。断面の抽出は $\epsilon = 0.5$ として、 ± 0.5 の範囲を断面として抽出

し、高さ1ごとに断面をとる。実験環境は、CPUがIntel Core i5-5200U 2.20GHz, RAMが12.00GBである。

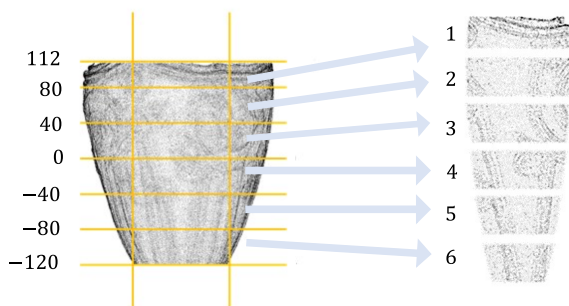


図7 完形土器点群と切り出した土器片点群

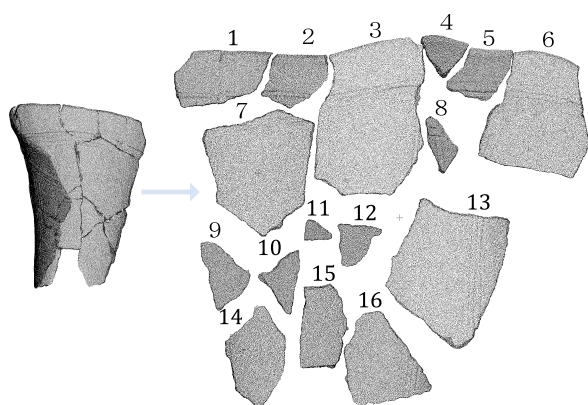


図8 遺跡の学び館土器片点群

4.2 土器片の上下方向推定

図7, 図8に示す土器片点群に対して、3.4節で述べた手法を適用した。

完形土器点群の土器片点群について、上下方向推定結果は表1であり、遺跡の学び館の土器片点群の上下方向推定結果は表2である。各表の番号は土器片点群番号、角度は人手により決定された上下方向と、本手法による上下推定の差を角度で示しており、平均距離は近似円の中心点の平均距離である式(2)の値を示す。

3.4節で述べた手法では、正しい上下方向と、正しい上下方向から上下反転した方向のどちらも、最適な上下方向として推定されるため、表の角度が0°, または180°前後の角度であれば正しい推定となる。表においては角度に()付きで、0°または180°との差の小さいほうを誤差として示す。まず、完形土器の土器片点群上下方向推定は、表1が示す通り、全ての土器片点群の角度が0°ま

たは180°の±3°以内であるため、正しく推定できている。つぎに、遺跡の学び館の土器片点群の上下方向推定は1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 14, 15, 16番の土器片点群が0°または180°の±10°以内で推定でき、4, 8, 9, 12, 13番の土器片点群は±30°以内で推定できたが、11番の土器片点群は89°であり、推定に失敗した。

以上の結果から、土器片点群の大きさが大きいほど安定して、上下方向が推定できることが分かる。推定方向が大きくずれた結果となった、遺跡の学び館土器の11番の土器片は、特に小さな土器片である。

表1 完形土器の土器片点群上下方向推定

番号	角度(度)	平均距離(mm)
1	0(0)	11.918
2	179(1)	2.705
3	180(0)	4.745
4	2(2)	8.100
5	359(1)	8.308
6	357(3)	5.450

表2 遺跡の学び館土器の土器片点群上下方向推定

番号	角度(度)	平均距離(mm)
1	184(4)	10.671
2	182(2)	23.433
3	0(0)	10.639
4	199(19)	23.080
5	175(5)	21.379
6	186(6)	7.674
7	357(3)	11.453
8	150(30)	10.501
9	197(17)	9.479
10	354(6)	13.868
11	89(89)	13.596
12	194(14)	8.556
13	193(13)	13.819
14	10(10)	11.690
15	0(0)	6.902
16	354(6)	7.707

4.3 土器片の高さ位置推定

4.2節の実験で上下方向を推定した土器片点群に対して、3.5節で述べた高さ推定手法を適用した。図7に示す完形土器点群の土器片点群は円周1/6範囲、すなわち $\phi = \frac{1}{6}$ を切り出したため、小土器片に分類されることは

ない．一方，遺跡の学び館土器の土器片点群は小土器片判定の閾値を $A = 240$, $\phi = \frac{1}{6}$ として，小土器片分類の判定をする．

完形土器点群の土器片点群の結果は表 3 であり，遺跡の学び館の土器片点群の結果は表 4 である．それぞれの表は，平均半径の大きさ順にソートしている．表の番号は土器片点群番号，平均半径は全断面の近似円の半径の平均，口縁部は口縁部であると判断した土器片を示す．最大断面距離は土器片点群の全断面で最も長い端点同士の間距離であり，式 (3) の L にあたる値を示し，小土器片は最大断面距離が閾値よりも小さい土器片点群を示す．表 3，表 4 は分類 (上位置，中位置，下位置) ごとに区切って示している．また，表 4 の一番下のグループは小土器片に分類された土器片点群であり，土器片点群の分類の対象とならない．

結果の表から，小土器片を除き，大まかな高さ位置の推定ができた．実験において，口縁部の情報を位置の分類に使用していないが，ほとんどの口縁部の土器片は上位置として推定された．

表 3 完形土器の土器片点群高さ位置推定

番号	平均半径 (mm)	口縁部	最大断面距離 (mm)	分類
1	112.512	○	110.611	上位置
2	110.917		110.616	上位置
3	107.989		108.448	上位置
4	94.337		101.784	中位置
5	85.891		89.201	下位置
6	65.225		74.798	下位置

4.4 土器片の相対高さ位置推定

4.2 節で述べた実験で上下方向を推定した土器片点群に対して，3.6 節で述べた相対高さ推定手法を適用した．参照土器点群として，完形土器点群は，完形土器点群から土器片点群を切り出した場所の反対側の 1/6 範囲の点群を使用する．遺跡の学び館の土器片点群は，人手により組み立てられた土器点群を参照土器点群とする．

完形土器点群から切り出した土器片点群の相対高さ位置推定結果は表 5 であり，遺跡の学び館土器片点群の相対高さ位置推定結果は表 6 である．表の番号は土器片点群の番号，元の位置は土器片点群の元の高さ位置，推定

表 4 遺跡の学び館土器の土器片点群高さ位置推定

番号	平均半径 (mm)	口縁部	最大断面距離 (mm)	分類
5	86.081	○	41.613	上位置
1	78.929	○	68.503	上位置
2	73.309	○	43.892	上位置
6	72.450	○	82.634	上位置
13	59.076		80.680	中位置
7	56.033		80.563	中位置
3	55.614	○	81.057	中位置
16	48.271		62.319	下位置
14	38.099		47.325	下位置
15	44.230		35.401	(小土器片)
12	41.219		31.477	(小土器片)
4	39.083	○	33.612	(小土器片)
9	33.170		31.142	(小土器片)
11	31.992		15.266	(小土器片)
10	19.479		29.703	(小土器片)
8	16.001		18.438	(小土器片)

位置は相対高さ位置手法で推定された高さ位置を示しており，元の位置と推定位置は，土器片点群の下底の断面の高さ位置を基準としている．類似度は推定された高さ位置での式 (5) の結果，ずれは元の位置と推定位置とのずれを示しており，ずれの割合は，式 (6) で表す p の値で表される．

$$p = \frac{h}{H} \times 100 \quad (6)$$

ただし，ずれを h ，参照土器点群の高さを H とする．

上下方向は，土器片点群を相対高さ位置推定し，もとの姿勢を正しく評価できているものを正，逆方向のほう

が，類似度が高いと判断されたものを逆と表現している．結果の表から，完形土器の土器片点群はすべて小さなずれで高さ位置が推定され，正しい上下方向が推定できた．遺跡の学び館の土器片点群は 1, 2, 3, 5, 6, 7, 14, 16 番の土器片点群が小さいずれで高さ位置を推定できた．これらの土器片点群は，4.3 節で述べた手法で小土器片に分類されず，高さ位置推定を行えた土器片点群と一致しており，ある程度の大きさの土器片点群であれば，相対高さ位置も推定できることが分かる．他の小さな土器片点群は，どれも推定位置が大幅にずれており，高さ位置を推定できなかった．例外として 13 番は，土

器片点群が大きな土器片であるにも関わらず、推定位置が 29% 程度ずれた。13 番の土器は断面の半径にほぼ差がない、円柱に近い土器片であり、アルゴリズム上対応できない形状であることが原因である。また、上下方向については、正しく高さ位置を推定できた土器片点群の中で、2, 16 番の 2 つは上下逆向きの方が類似度が高く、上下逆向きで推定された。

4.5 土器組み立てシステムの作業時間に関する考察

2 次元パネルを用いた土器復元システムの研究 [1] の初期姿勢構築までにかかる時間を、本手法の結果を使った場合に、どのように変化するかを考察した。具体的な実験は、遺跡の学び館土器片点群の 16 個の土器片を示す点群データに対して、次のような 3 つのデータセットを用意して行った。

- (A) 各土器片の重心を通り、第 3 主成分を方向ベクトルとする直線回りにランダムに回転したもの
- (B) 本手法の結果に基づき、上下方向を推定した姿勢に回転したもの
- (C) 人手により、正しい上下方向を示す姿勢に回転したもの

データ (A) は、ランダムな回転をしているため、全く上下方向が推定されていない出土した土器を想定したデータである。次にデータ (B) は、上下方向を推定した本手法の適用結果となるデータである。図 8 の 11 番のデータを除き、 ± 30 度以内で推定されているが、正しい方向と 180 度回転しているものが含まれる。最後にデータ (C) は、人手により、すべて正しい上下方向を示す姿勢となっているデータである。

さらに追加情報として以下も利用して実験を行った。

- (I) 本手法の結果である高さ位置推定の情報
 - (II) 人手により振り分けた、土器片高さ位置を示す情報
- 追加情報 (I) は、小土器片については推定できないため、9 個のデータについての情報であり、一部間違った情報も含まれる。また、(II) は、人手により、すべて正しい位置情報を示している。

これらを用いて、ソフトウェアに関する知識を有するものの、土器に関する知識を持たない 40 代の大学教員を対象に、2 次元パネルを用いた土器復元システムの研究 [1] の初期姿勢構築までにかかる時間を、「(A) のみ」、「本手法の適用結果である (B) および (I) を用いる」、「人手による調整結果である (C) および (II)」の 3 つで計

測したところ、順に 20 分、10 分、6 分であった。全くランダムな状況の (A) と比較して、本手法により上下方向、ならびに高さ方向を推定した結果、作業時間を 2 倍程度高速化できている。また、人手により上下方向を揃え、正しい高さ位置を示す情報を利用すると、(A) と比較して 3.3 倍程度高速化が可能であった。ただし、実験の被験者が 1 名のため、被験者の数を増やして実験を行い、作業時間軽減についてさらに検証を行う必要があると考えている。

5 まとめ

本研究では、土器片の 3 次元計測点群を用いた上下方向と高さ位置の推定手法について提案した。提案手法それぞれについて実験を行った結果、ある程度以上の大きさの土器片点群に対しては良好な結果が得られた。小さな土器片点群に対しては、上下方向推定は精度が低くなり、高さ位置推定はできなかった。2 次元パネルを用いた土器復元システムの研究 [1] の初期姿勢構築までにかかる時間に関する実験では、良好な結果を得ることができた。

今後の課題として、まず、高さ位置推定の細分化がある。現段階の高さ位置推定は、土器片点群単体では上位置、中位置、下位置といった大まかな分類による位置推定しかできないため、より細かな位置推定の手法を検討する。次に、上方向・下方向の判定機能を検討し、より精度を高めた上下推定方法を開発する。

なお、本論文は NICOGRAPH2021 で発表した論文 [10] 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。

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.22-39, 2017.
- [2] 李春元, 今野晃市. 土器復元のための 2 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.
- [3] N. Chernov, C. Lesort. Least squares fitting of circles. Journal of Mathematical Imaging and Vision, Vol.23, pp.239-251, 2005.

表 5 完形土器の土器片点群相対高さ位置推定

番号	元の位置 (mm)	推定位置 (mm)	類似度 (%)	ずれ (mm)	ずれの割合 (%)	上下方向
1	80	74	91.220	-6	2.542	正
2	40	24	98.413	-16	6.779	正
3	0	6	97.608	6	2.542	正
4	-40	-54	94.937	-14	5.932	正
5	-80	-89	94.984	-9	3.813	正
6	-120	-120	94.105	0	0	正

表 6 遺跡の学び館土器の土器片点群相対高さ位置推定

番号	元の位置 (mm)	推定位置 (mm)	類似度 (%)	ずれ (mm)	ずれの割合 (%)	上下方向	小土器片
1	121	135	85.280	14	6.334	正	
2	123	140	81.626	17	7.692	逆	
3	56	60	91.141	4	1.809	正	
4	147	-41	70.035	-188	85.067	正	○
5	134	135	75.420	1	0.452	正	
6	80	86	90.886	6	2.714	正	
7	37	51	85.635	14	6.334	正	
8	101	-41	45.596	-142	64.253	正	○
9	6	-40	77.689	-46	20.184	正	○
10	11	-40	49.349	-51	23.076	逆	○
11	56	-40	72.240	-96	43.438	270° 回転	○
12	26	-38	86.781	-64	28.959	正	○
13	-9	55	86.680	64	28.959	正	
14	-39	-40	80.406	-1	0.452	正	
15	-1	-36	87.055	-35	15.837	正	○
16	-29	-36	90.072	-7	3.16	逆	

- [4] Gabriel 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, 1115-1138, 1991.
- [5] I. Kasa. A curve fitting procedure and its error analysis. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.25, pp8-14, 1976.
- [6] Walter Gander, Gene H. Golub and Rolf Streb. Least squares fitting of circles and ellipses. BIT Numerical Mathematics, Vol 34, pp.558-578, 1994.
- [7] 吉川和杜. 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研究. 岩手大学大学院修士論文, 2021.
- [8] 盛岡市遺跡の学び館. <http://www.city.morioka.iwate.jp/shisei/moriokagaido/rekishi/1009437/>. 参照: 2021-7-16.
- [9] Tsutomu Kinoshita, Katsutsugu Matsuyama, Kouichi 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.
- [10] 吉川和杜, 木下勉, 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. NICOGRAPH2021, pp.F-10:1-F-10:8, 2021.

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」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。

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, 中国の北華大学講師。CG, VR, インタラクティブシステムなどの研究に従事。博士 (工学)。

吉川 和杜



2019 年岩手大学理工学部卒業。2021 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。現在, 株式会社日立ハイテクファインシステムズ勤務。修士 (工学)。