

画像特徴に基づく土器展開図の製作に関する検討

正 司 哲 朗*・臼 杵 勲**

Production of Pottery Development Diagram based on Image Features

Tetsuo SHOJI, Isao USUKI

要 旨

先史時代を特徴づける遺物には土器や石器などがあり、先史時代における人類の活動を理解するためには、土器の型式分類や分布調査、土器の生産技術の解明が必要不可欠である。本研究の目的は、土器の生産技術について、文様の割り付け手法を可視化するために、土器展開図を簡易に製作することである。従来手法では、画像計測やレーザ計測を用いて3次元形状モデルを生成し、展開図を製作していたが、それでは時間的コストがかかり、土器の表面は平面でないため、展開図を製作した場合には歪みが生じる恐れがあった。そこで、本研究では、まず、回転テーブルに載せた土器を回転させながら撮影し、得られた画像から特徴点を抽出した。次に、画像上の特徴点をもとに画像マッチングを行い、自動的に合成することで土器の展開図を製作した。最後に、3次元形状モデルを利用して製作した展開図と画像情報のみで製作した展開図を比較した。その結果、土器の形状にもよるが、本実験においては、画像情報のみで製作したほうが、歪みの少ない展開図を製作することができた。

キーワード：先史時代、土器生産技術、土器展開図

I はじめに

先史時代を特徴づける遺物には、土器や石器などがあり、土器から先史時代における人類の活動を理解するためには、土器の形式分類や分布調査、土器生産技術の解明が必要不可欠である。本研究では、土器の生産技術に関して、文様装飾の工程に着目する。文様の装飾過程は、生産時期毎に区画数、割付タイプが多数存在し、系譜や編年を論じる研究（小林 2000）や、土器文様の構造分析から空間と時間概念の成立過程を探る研究（内田 2013）が行われてきており、文様構造の検討には土器の展開図が必要不可欠である。

土器の展開図は、地球（球面）を平面展開した地図の製作過程と同様に、いかに歪みを無くすかという問題に帰着される。地球を平面地図に投影する方法は、舟形多円錐図法、正距円筒図法、メルカトル図法など様々なものがあり、球面を平面展開するときには、距離や形状、面線などの

歪みが生じている（佐藤 2015）。このため、UTM（Universal Transverse Mercator）では、世界を経度幅 6 度毎に帯状の範囲に分割することで、歪みの影響を少なくしている。UTM は測量で利用されており、日本国内では、平面直角座標系である日本測地系 2011（JGD2011）が一般的に使われており、日本全国を 19 の地域に分割して、分画した平面に座標原点を設定し、座標原点から東西 130km が各座標の適用範囲となっている。筆者らは、モンゴル国で測量調査を実施するときには、WGS84（World Geodetic System 84）準拠楕円体と UTM 座標を用いて、測量結果をもとにオルソ画像を生成し、図面化を行っている。準拠楕円体は、回転楕円体によって地球を近似しており、楕円を Z 軸中心に回転させたものである。本研究で扱う土器に関しては、地球のように楕円で表現できるものではなく、複雑な形状をしている場合があるため、地図の投影法を直接使うことはできないので、非平面である対象を平面展開するときには、どのような観点で歪みを少なくさせるかを考える必要がある。

II 関連研究

土器の展開図を製作する場合には、まず、地図の投影法と同じく、土器の形状を知る必要がある。そのため、3 次元計測して得られた 3 次元形状モデルを用いて、土器の展開図を製作する方法があるが、そこで、使われている 3 次元計測には大まかに 2 つの手法がある。1 つは、カメラのみを用いた計測方法であり、もう 1 つはレーザ光を用いた計測方法である。カメラを用いた画像計測は、多視点から撮影された画像をもとに、画像中から対応する点を求め、三角測量の原理に基づき、カメラ位置と計測対象上の任意の点までの距離を求める方法であり、一般的には SfM（Shape from Motion）/ MVS（Multi-View Stereo）が利用されている。カメラ間の距離は基線長と呼ばれ、基線長が不明な場合はスケールが未知となるため、絶対スケールを求めるには、あらかじめスケールが既知であるものを一緒に撮影するか、座標系をあらかじめ設定した標定と一緒に撮影する必要がある。

一方で、レーザ計測方法には様々な手法があり、代表的なものは LiDAR（Light Detection and Ranging）と呼ばれ、2 種類の方法がある。1 つは、計測対象に光を照射し、反射して戻ってくるまでの時間をもとに距離を計算する方法で、ダイレクト ToF（Time of Flight）と呼ばれている。もう 1 つは、センサーと計測対象までの距離に応じて、位相がずれることを利用して距離を計算する方法でインダイレクト ToF と呼ばれている。

上記に述べた LiDAR 以外にもレーザ計測方法があり、その 1 つに、パターン投影法と呼ばれるものがある。パターンをもった赤外線もしくは可視光を計測対象に照射し、それを赤外線カメラもしくは可視光カメラで撮影するものであり、計測原理は三角測量の原理に基づいている。投影されるパターンは、複数のライン光やモアレ縞を用いるものがある。計測対象にパターン光を投影するため、画像計測とは違い、計測対象に特徴がないものに対しても計測することができる。

このような 3 次元計測で得られた 3 次元形状モデルを用いて展開図を製作するには、いくつかのセグメントに分割した錐台や円錐、円柱モデルを当てはめ、画像投影面を定義し、3 次元形状モデルを画像投影面に投影し、歪みを最小になるように展開図を製作する方法（Bechtold et al.

2010) が一般的である。しかしながら、土器の形状が複雑な場合には、近似するモデルも複数の形状を組み合わせる必要がある。また、モデルを当てはめずに、3次元形状モデルを回転させながら、テクスチャマッピングされた3次元形状モデルからスリット画像を作成し、それらをつなぎ合わせることで展開図を製作する方法もある。

一方で、3次元形状モデルを利用せずに、対象を1度未満の回転角で回転させながら、対象の中央縦方向の細長いスリット部分を撮影した画像を合成する方法(桐山ら 2014)がある。また、蒔絵万年筆を対象に回転角度を制御する装置と仮想の円筒スクリーンに投影することで、合成時の歪みを減少させる方法(鈴木 2017)もあるが、万年筆の形状はシンプルなものであり、土器を対象にした場合には単純な円筒モデルでは扱うことができない。

そこで、本研究では、3次元形状モデルを用いた土器展開図の製作方法と、装置と撮影の簡易さ、処理コストを考慮し、3次元形状モデルを利用せず、回転テーブルを用いてスリット撮影で得られた画像を自動合成する方法の2つを検討する。とくに、展開図を製作するには、対象の中心軸と回転テーブルの中心軸を一致させることが重要であるが、土器の場合には中心軸を正確に定義することができないため、中心軸を求める必要があり、その方法についても述べる。

III 土器展開図の製作に関する検討

1. 土器展開図の製作のためのカメラキャリブレーションと撮影方法

本研究では、土器の展開図を製作するために、3次元形状モデルを利用する方法と、土器を撮影した2次元画像を直接利用する方法を検討するが、3次元形状モデルを得るには画像計測を利用するため、どちらの方法においても撮影方法は共通している。

まず、撮影に利用するカメラのレンズ歪みを校正するために焦点距離を固定し、カメラキャリブレーションを行う。次に、撮影ではカメラ位置を固定し、カメラキャリブレーション時で設定した焦点距離にする。回転テーブルに対象を載せ、テーブルを回転させながら全周の画像を撮影し、カメラキャリブレーションで得られたレンズ歪みパラメータをもとに、撮影画像からレンズ歪みを補正する。その後、撮影された画像に対して、上記で述べた2種類の方法を用いて土器展開図を製作する。以下に、カメラキャリブレーション方法について述べる。

一般的なカメラのレンズ(魚眼レンズなどの特殊レンズを除く)には、歪曲収差(distortion)があり、代表的なものに、像の端ほど縮む「たる型歪み」(図1(a))と像の端ほど伸びる「糸巻き型歪み」(図1(b))がある。これらは、レンズ特有のものであるため、撮影された画像から補正する必要がある。本研究では、この歪みを補正するために、以下のようなカメラキャリブレーションを行う。

まず、カメラ位置を固定し、焦点距離を一定にして、図2(a)に示すような格子パターン(格子の交点数が縦9、縦6、格子サイズが16mm)をもとに高さ情報を0とした座標系($X, Y, 0$)を設定し、格子パターンの傾きや位置を変えながら15枚画像を撮影した。撮影された画像の格子上の座標値(u, v)と格子パターンの座標系(X, Y, Z)の投影関係を求め、焦点距離(f_x, f_y)(単位はピクセル)、画像センサーの中心座標(c_x, c_y)、歪みパラメータ(半径方向の歪み係数 $[k_1, k_2]$

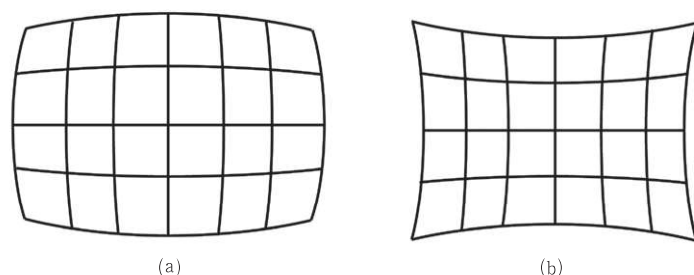


図1 歪曲収差

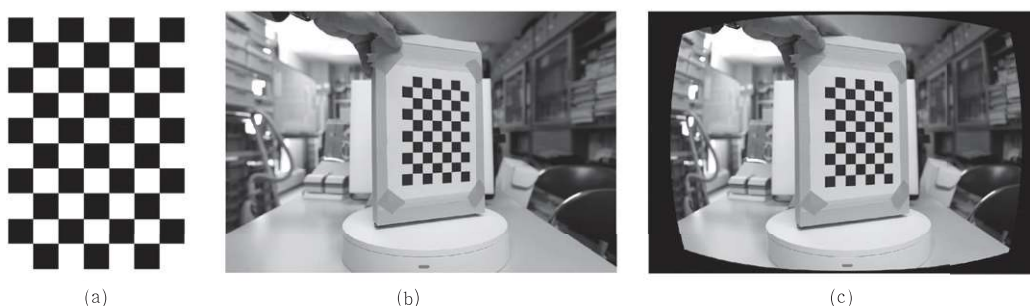


図2 キャリブレーション処理と結果

k_3]、円周方向の歪み係数 $[p1, p2]$ を求める。このカメラキャリブレーション処理には、OpenCV ライブラリで実装されているカメラキャリブレーション手法を用いた。図2 (b) のように撮影した画像 15 枚からカメラキャリブレーションで求めたパラメータを用いて、歪み補正をした結果を図2 (c) に示す。

本研究では、土器展開図の製作にあたり、使用した土器は縄文土器のレプリカであり、回転テーブルは、全周撮影用回転テーブル foldio360 を用いた。この回転テーブルは赤外線リモコンが対応したカメラと連動することができ、回転するごとに自動的にシャッターを切ることができる。撮影に用いたカメラは、フルサイズミラーレスカメラ Canon R6 であり、レンズは RF24-105mm F4-7.1 IS STM で撮影した。撮影は、カメラキャリブレーションを行ったときと同じ環境(図3(a))で行い、マニュアルフォーカスで焦点距離を 27mm に固定し、F 値を 4、ISO を 400、シャッタースピードを 1/50 に設定し、回転テーブルを 7.5 度ずつ回転させ、48 枚の画像を撮影した(図3(b))。撮影した画像に対して、カメラキャリブレーションで求めたパラメータを用いて、画像の歪み補正を行い、背景差分法（あらかじめ、撮影対象を置かずに撮影した画像（背景画像）を用意しておき、対象を撮影した画像から画素値の差分を求めることで背景を除去する方法）を用いて、対象物体のみを抽出する。ただし、完全に対象物体のみを抽出することができない場合には、手動で修正を行うことにする。

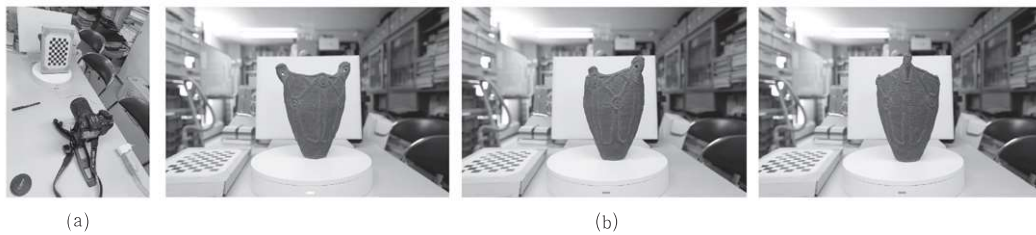


図3 撮影環境と撮影画像

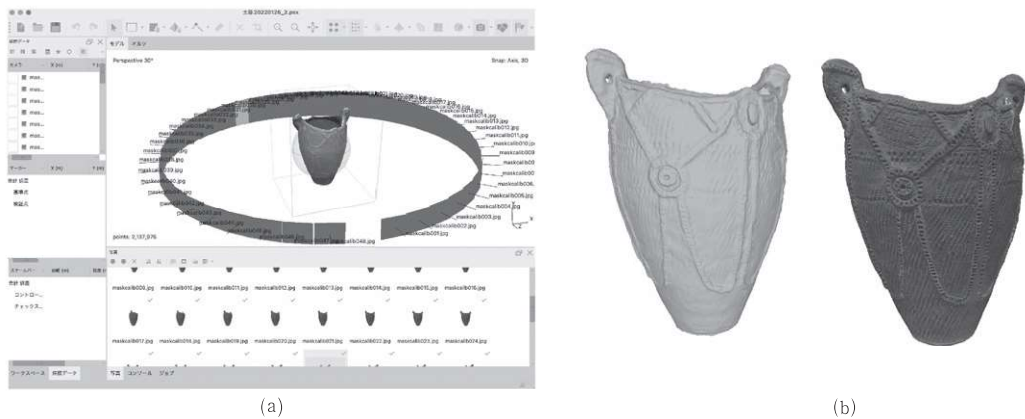


図4 画像計測に基づく3次元形状モデルの生成結果

2. 3次元計測を利用した展開図の製作

もっとも一般的な土器展開図の製作は、土器を3次元計測して得られた3次元形状モデルに対して、円筒モデルを当てはめる方法である。あらかじめ3次元計測することで、奥行の歪みを考慮した展開図を製作することが可能である。土器を3次元計測する方法には、先に述べたように何種類かの方法があるが、ここでは、画像計測の1つである SfM/MVS アルゴリズムに基づいた Agisoft Metashape Professional 1.8.3 (図4(a)) ソフトウェアを用いて、48枚の画像から計測した3次元形状モデルを図4(b)に示す。ただし、今回の計測では、座標を入力していないため、相対的なスケールになっている。次に、土器展開図の製作には、オープンソースである GigaMesh* を利用する(図5(a))。GigaMesh は、画像計測やレーザ計測などで得られた3次元形状モデルを可視化できるソフトウェアで、可視化機能の1つに対象表面を展開する機能があり、次のようにして展開図を製作することができる。

[STEP1] 対象の中心軸を設定

[STEP2] 展開図の上端と下端の位置を3次元形状モデル上で指定

[STEP3] 展開図の開始場所を指定

* GigaMesh, <https://gigamesh.eu/>

ただし、[STEP1]においては、対象によっては中心軸が正確に定まらない場合があるが、3次元形状モデルを用いることで、図5(b)に示すような展開図を製作することができる。

3. 2次元画像から展開図の製作

先に述べた3次元形状モデルを用いる方法では、形状を正確に反映した展開図の製作が可能になる反面、画像計測やレーザ計測を用いて3次元形状モデルを生成する必要がある。1点の土器を計測するには時間もかかるため、膨大な土器がある場合には非常に時間とコストがかかるため、簡易な展開図の製作が望まれる。

本研究では、2次元画像から直接展開図を製作する方法を検討するが、3次元情報（奥行情報）を利用しないため、原理的には奥行の歪みが発生する。実測を考慮に入れた展開図を製作するためには、3次元形状モデルを使うことは望ましいが、土器の模様を視覚的に捉えて比較するための資料として利用可能である。

2次元画像のみを利用する場合においても、3次元形状モデルで中心軸を設定したときと同様に、まず、対象の中心軸を設定する必要がある。しかしながら、撮影時には回転テーブルの中心に対象を置いているが、必ずしも対象と回転テーブルの中心が一致するとは限らない。例えば、図6(a)のような入力画像48枚をすべて統合すると回転軸がずれているため、左右に大きなズ

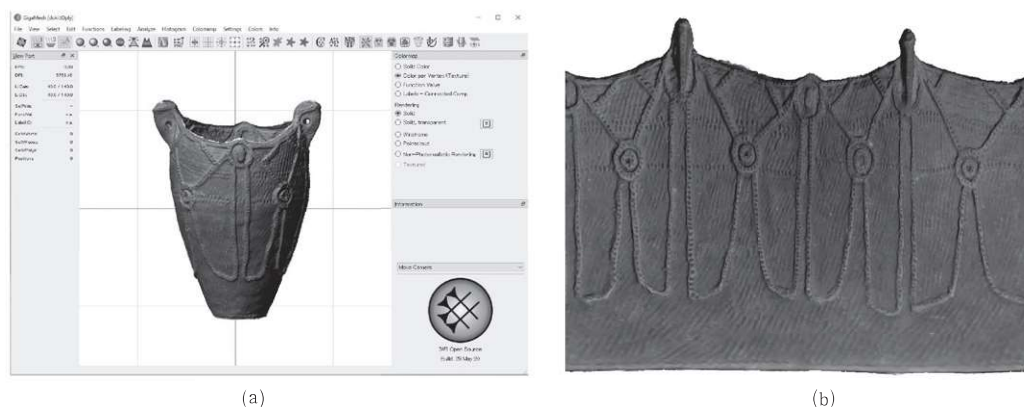


図5 GigaMeshを用いた土器の展開図の製作



図6 回転テーブルによる中心軸のずれ

レがあることがわかる（図 6（b））。このため、以下のようにして中心軸のずれを補正した後、展開図を製作する。なお、事前に背景除去処理が終了しているものとする。

- ① 各画像に対して、中心軸を検出するための基準となる水平ラインを設定する。このときの水平ラインは、すべての画像において、あまり変化がない位置が望ましい。例えば、図 7（a）のような場合、取手部分が回転角度によって形状が異なるため、このような対象の場合は、図 7（a）の白ラインのような中央部分が望ましい。次に、水平ライン上で、対象の両端を決定する。あらかじめ、背景除去した画像であるため、背景と対象の輝度変化をもとに閾値処理により、左右の両端（図 7（a）の黒ライン）を検出する。その後、両端の中央位置を画像上の中心軸とする（図 7（a）の黒点線部分）。すべての画像に対して中心軸を推定し、画像中心に合わせたものを合成すると図 7（b）のようになり、図 6（b）と比べると左右のずれが補正されていることがわかる。
- ② 中心軸を補正したすべての画像に対して、中心軸からある幅をもった矩形を抽出する（図 7（c））。この矩形領域は、画像中心付近であるため、もっとも歪みが少ない部分である。対象を撮影した各画像の解像度は 5472×3648 であり、各画像から補正した中心軸から ± 100 ピクセルの幅をもった矩形（横 200 × 縦 2300）を抽出した（図 7（d））。この矩形領域のサイズは対象によって調整する必要がある。
- ③ 展開図を製作するためには、隣り合う矩形画像間（図 8（a）の画像 i と画像 $i+1$ ）で対応付

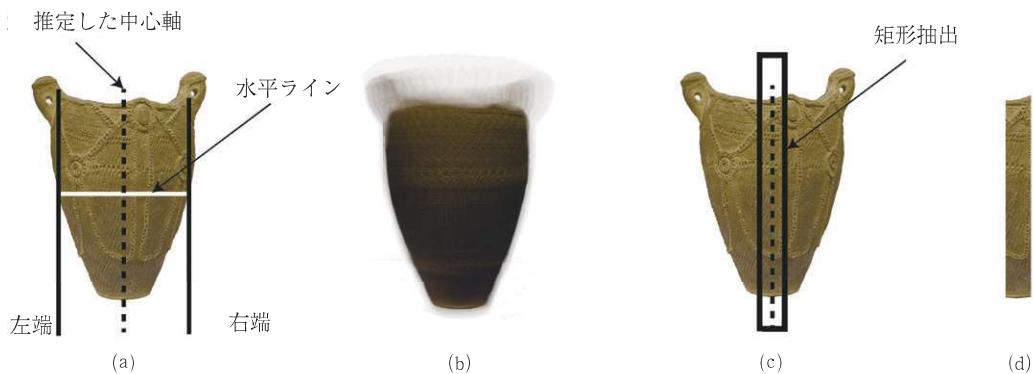


図 7 中心軸の補正

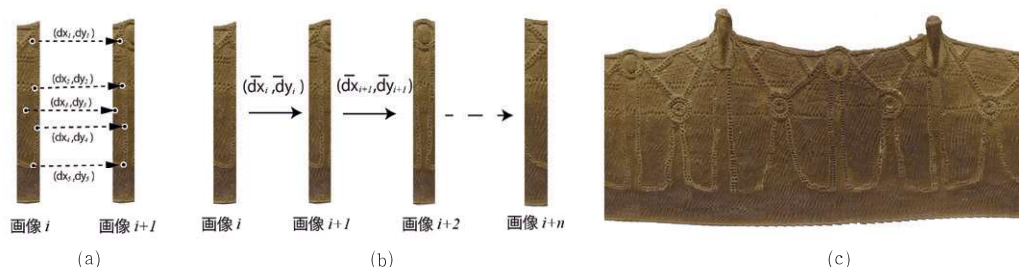


図 8 特徴点検出と特徴量マッチングによる展開図の製作

けを行い、矩形画像間での横方向、縦方向の移動量を計算する必要がある。このため、まず、画像中から特徴点の検出と特徴量記述が行える ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) アルゴリズム (Rublee et al. 2011) を用いる。次に得られた特徴量記述をもとにマッチング処理を行い、特徴量間の距離が小さい順に幾つかの点を検出する。これらの点が矩形画像間で最も類似している特徴点になる。この対象では5点の特徴点を検出したが、対象によっては、5点以下になる場合もある。各特徴点において、それぞれ画像 i と画像 $i+1$ 間の移動量 (図 8 (a)) を求め、それらの移動量の平均値を画像間の平均移動量 (\bar{dx}_i, \bar{dy}_i) とする (図 8 (b))。これらをすべて隣り合う矩形画像間で平均移動量を求める。

- ④ 求めた平均移動量をもとに、すべての矩形画像を合成することで展開図を製作する (図 8(c))。

なお、上記の展開図製作に関しては、macOS Monterey (12.5.1)、CPU Intel Core i9、メモリ 32GB、python3.9.13、opencv-python 4.6.0.66 を用いて実装を行った。

4. 製作した展開図の比較

ここでは、図 9 (a) の土器レプリカを対象に、画像計測で得られた3次元形状モデルを利用して製作した展開図 (図 9 (b)) と2次元画像から製作した展開図 (図 9 (c)) との比較を行う。図 9 (b) と図 9 (c) を比較すると縦横比が両者において大きく異なっていることがわかるため、次のようにして検証する。まず、3次元形状モデルの上部から見た視点 (図 10 (a))、側面からみた視点 (図 10 (b)) のオルソ画像を生成する。次に、上部からみた視点のオルソ画像上で取手部分を除いた輪郭線と、側面からみた視点のオルソ画像上では取手部分を除いた縦方向の線分の長さの比率を求める。ここで利用する3次元形状モデルは、絶対スケールではなく相対スケールであるが、比率を求める場合には相対スケールでも問題ない。

3次元形状モデル上での輪郭線は 900.348mm、縦方向の線分の長さ 388.143mm であり、輪郭線と縦方向の長さの比率は 2.32 であった。3次元形状モデルから製作した展開図の横方向の長さは 974.155mm、縦方向の長さは 608.269mm、横縦の比率は 1.60 であった (図 10 (c))。2次元画像から製作した展開図の横方向の長さは 1440.699mm、縦方向の長さは 608.269mm、横縦の比率は 2.37 であった (図 10 (d))。求めた比率から考えると2次元画像から製作した展開図のほうが、3次元形状モデルから製作した展開図よりも、近い比率で展開されていることがわかる。この原因は展開図の製作方法に起因する。3次元形状モデルから製作した展開図は、地図の図法と同じように、曲面形状を平面に展開しているため、歪みを補正して平面的に展開しているのが原因である。一方で、2次元画像から製作した展開図は、対象の中心をもとに平面領域を抽出して展開図を製作しているため、曲面形状による歪みの影響は限定的である。

IV おわりに

本研究では、3次元形状モデルを用いずに土器の展開図を製作する方法について検討を行った。製作された展開図は、3次元形状モデルを使うよりも歪みが少なく、比較的少ない撮影枚数でも製作できることがわかった。しかしながら、本研究で製作した展開図は、3次元形状モデルを使っ



図9 製作した展開図の比較

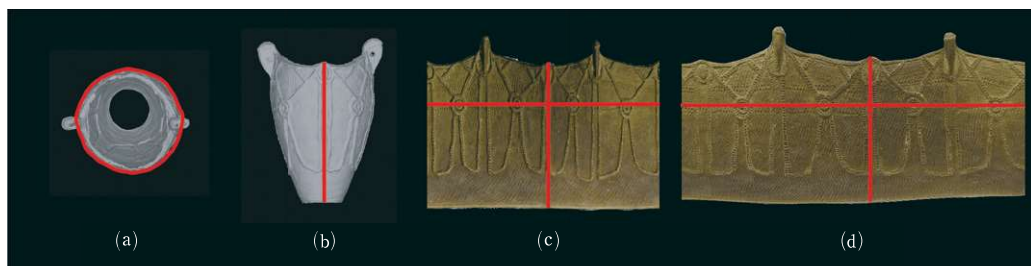


図10 比率による展開図の比較

ていないため、奥行の歪みが発生している。このため、正確な図面としての利用は今のところ難しいが、区画数、割付タイプなどの分析には利用できるものである。また、対象の形状（火焰型土器のように頸部、胴部、底部の径が極端に異なるもの）によっては平面的な展開が難しく、模様の凹凸差が大きい場合や対象の表面に明確な模様が無い場合には、展開図の製作ができない場合がある。特に、土器の表面に文様などの特徴が無い場合には、特徴量に基づくマッチングができず、展開図を自動的に製作することができない。同様に、そのような土器は画像計測でも失敗する可能性が高い。

上記で述べたように、展開図製作は土器の形状に依存するため、専門的に扱っている業者に業務委託する場合もあるが、大量の土器を全て業務委託するには多大なコストがかかる。さらに、一時的に委託業者に預けた土器が返却されるまでに時間を要し、その間、観察者は手元に土器がないため、観察する時間が十分取れず、報告書の作成などのスケジュールにも影響を与えることになる。本研究で検討した手法の基本原理は、スリット撮影したものを繋ぎ合わせる従来の手法と変わらないが、中心軸の補正、および繋ぎ合わせを自動化したことにより、作業コストの軽減が期待できる。また、本研究の実装環境は、OS に依存せず、Windows、macOS、Linux（ubuntu、Red Hat、Raspberry Pi OS など）などでも動作するため、極めて汎用性が高く、処理コストも低い。このため、Raspberry P4 4 ModelB / 8GB のような小型 PC でも動作が可能であるため、低コストでシステムを構築することも可能である。

今後は、大量に縄文土器を抱える地方自治体に対して、より簡易に展開図が製作でき、安定かつ低コストで導入できるように手法のさらなる改良、プログラムやマニュアルの公開を検討する。また、製作した展開図から区割り、構造パターンの分類や分析を行い、先史時代における土器製作技術が地域や時代によって、どのように変遷していったかを検討する。

謝辞

本研究は、奈良大学の国内研修制度を利用して、札幌学院大学人文学部の客員研究員として実施したものであり、札幌学院大学、および奈良大学の関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 桐山孝司、木村稔、千葉毅（2014）、パーソナルファブリケーションを活用した縄文土器の展示、画像電子学会第12回画像ミュージアム研究会、pp.11-16
- 小林謙一（2000）、縄紋中期土器の文様割付の研究、日本考古学、7巻、10号、pp.1-24
- 佐藤崇徳（2015）、コンピューターを利用した地図投影法学習教材の作成および公開、地学雑誌、124巻、1号、pp.137-146
- 鈴木卓治（2017）、蒔絵万円筆資料のマルチアングル画像撮影ならびに展開図作成のための技術開発、国立歴史民俗博物館研究報告、第206集、pp.39-58
- 内田祐治（2013）、中期縄文土器の文様構造－清瀬市域出土土器の文様解説－、清瀬市郷土博物館ホームページ研究報告－、<http://museum-kiyose.jp/imkenkyu.html>
- Bechtold, S., Krömker, S., Mara, H., Kratzmüller, B. (2010). Rollouts of fine ware pottery using high resolution 3D

meshes, Proceedings of the 11th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, pp.79-86.

Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G. (2011). ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF, IEEE International Conference on Computer Vision, pp.2564-2571.

Abstract

The artifacts that characterize the prehistoric period include pottery and stone tools. In order to understand human activities in the prehistoric period, it is essential to classify pottery types, survey their distribution, and elucidate pottery production techniques. The purpose of our study is to produce simple pottery development diagrams in order to visualize the pattern allocation method for pottery production techniques. In the conventional method, a 3D shape model was generated using image or laser measurement, and then a development diagram was produced. However, this method was time-consuming and costly, and because the surface of pottery is not flat, there was a risk of distortion when the development diagrams were produced. Therefore, in our study, we first took images of pottery placed on a rotary table while rotating them, and extracted feature points from these images. Next, we produced a development diagram of the pottery using image matching based on these feature points. Finally, we compared the development diagram produced by our method with that produced by the image measurement method. As a result, we confirmed that our method produced a development diagram with less distortion.

Keywords: the prehistoric period, pottery production techniques, pottery development diagram