3次元計測点群に基づく縄文土器表面装飾セグメンテーション手法

木下勉¹⁾(正会員) 游梦博²⁾(正会員) 今野晃市²⁾(正会員) 林哲正³⁾(非会員)

1) 東北学院大学工学部 2) 岩手大学大学院総合科学研究科 3) 高雄師範大学

Segmentation Method for Jomon Pottery Patterns Based on 3D Measured Point Clouds

Tsutomu Kinoshita¹⁾ Mengbo You²⁾ Kouichi Konno²⁾ Che-Chern $Lin^{3)}$

1) Tohoku Gakuin University 2) Iwate University 3) National Kaohsiung Normal University

概要

考古学の分野では,遺物の表面模様を分かりやすく観察できる手法が求められており,これまでに土器全体を展開する手法などが 提案されている.しかし,これらの手法は縄文土器のように,製作過程で自然に発生する凹凸が大量に含まれるものに適用すると, 表面模様ではない表面の凹凸が強調され,展開された模様のどこが表面模様なのかを,正確に把握することが難しい場合がある. そこで,本研究では縄文土器の表面点群から,表面模様をセグメンテーションする手法を提案する.まず,土器全体を示す点群を 二次曲面にフィッティングし,その主軸を基に複数の断面で土器全体をスライスし,分析の基盤とする.次に,スライスした各断 面に存在する点群を,外れ値除去を伴う楕円当てはめ手法によりフィッティングし,表面の凹凸に影響されない楕円を求める.さ らに,楕円と点群の距離を評価することで表面模様を表す点か否かを判断する.しかし,製造精度の問題から,必ずしも断面が楕 円で近似できるとは限らず,表面模様を正しく判断できない場合がある.そこで,断面上の点群に対し,楕円との距離について凹 凸分析を行い,凸部のみを残すことで,表面模様を精度よく抽出する.ただし,縄文土器は,製造品質の低さから点が滑らかに変 化をしないため,楕円と点の距離から定義されるグラフをガウスカーネルで平滑化し,ノイズと思われる局所的な凹凸を除去した 後に,極値分析を行い,表面模様の認識精度を向上する.

Abstract

In archaeology, methods that facilitate the observation of surface patterns on artifacts are essential. Methods for unfolding the entire surface of pottery have been proposed, However, when applied to artifacts like Jomon pottery with natural manufacturing irregularities, these methods often emphasize the non-pattern surface irregularities, making it difficult to identify the actual decorations accurately. First, the point cloud is fitted to a quadric surface and sliced into crosssections based on the main axis. Each cross-section's point cloud is then fitted with an ellipse, using outlier removal to ensure accuracy. By evaluating the distance between the ellipses and the point cloud, decorative points are identified. However, due to manufacturing inaccuracies, cross-sections may not always fit well to ellipses, and and it may be difficult to judge the patterns accurately. Therefore, contour analysis is performed on the distances between the point cloud and the ellipse in the cross-sections. Since the points on Jomon pottery do not change smoothly, the distance graph between the ellipse and points is smoothed with a Gaussian kernel, and then analyzed to improve pattern recognition.

1 はじめに

3次元スキャン技術の発展と低コスト化で、考古遺物 を3次元計測点群として記録し、さまざまな分析が行わ れている [1].考古遺物の研究の一つに、土器全体の模 様を分析し、模様の配置から土器を分類することがある [2].このような研究の補助として、3次元データを使っ て展開図を自動的に作成する研究がある.物体の表面を 構成する面は、平面展開が可能な可展面(円柱や円錐な ど)と、そうでない非可展面(球や楕円面・双曲面など) に分類されるが、土器の場合は非可展面となる場合が多 く、歪みの少ない展開図を作るためには様々な工夫が必 要である.

考古遺物の3次元データから展開図を作る研究とし て, 文献 [3] がある. 文献 [3] の研究は, 陶器を測定した 後、3次元メッシュデータを構築し、入力データとする. 入力データとなるメッシュを, 円錐に投影することで可 展面に変換し、展開図を作るものである.しかし、文献 [3] の研究はメッシュの色やテクスチャ情報をもとに、展 開図を作成するため、リアルな画像で展開図を作成可能 であるが、形状を円錐に投影することから、形状の母線 が直線でない場合, 歪みを生じる可能性がある. また, 文献 [4] は、展開図の歪みを抑えるために土器全体を複 数の領域に分割後、それぞれの領域を線織面に投影し、 線織面の uv 空間で展開図を作成する手法である. 文献 [4] の手法は、入力データとしてメッシュなどの面を持 つ必要はなく、3次元計測点群を入力とする手法である. 図1は、文献[4]から求めた展開図を示している. 土器 全体を確認できるが、表面模様同士がどのように接続さ れているかなど,詳細を把握し辛い.なお,断面が楕円 で近似可能な、回転形状に近い土器を本研究では対象と する.

また,縄文土器は,土を成形し,その後高温で焼成す ることで作られるため,土器の表面には,焼きむらと呼 ばれる黒ずんだ部分が現れることがある.そのため,土 器の表面を,画像としてそのまま展開図を作成しても, 表面模様を把握することが難しい場合がある.図2は縄 文土器の焼きむらを示す画像であり,表面模様の位置と は無関係に黒ずんでいる様子がわかる.

そこで本研究では,表面模様の視認性を向上すること を目的に,3次元計測点群で表現された縄文土器の表面 模様を自動的に認識し,セグメンテーションする手法を 提案する.これにより,3次元空間もしくは2次元展開 図において,土器の表面模様のみに着色するなど,模様 の視認性の向上が可能となる.





図 2: 縄文土器の焼きむら

2 関連研究

2.1 考古遺物のセグメンテーション手法

考古遺物の3次元データに対するセグメンテーション は、従来の点群やメッシュの3次元データを対象とする 手法が、そのまま適用できない、一般的なセグメンテー ション手法は、建築物や地形データのように、規則的で 明確な境界を持つオブジェクトを対象とすることが多 い、しかし、考古遺物は、形状が不規則であり、製作過 程や保存状態による変形や損傷が見られるため、境界が 明確でないことが多く、一般的なセグメンテーション手 法では適切なセグメンテーションが難しいことが知られ ている.

そこで、考古遺物に対するセグメンテーション手法が いくつか提案 [5, 6] されている、考古遺物等に対して、 セグメンテーションをする場合、手法はリージョング ローイング、モデルフィッティング、クラスタリングに 基づく手法に大きく分類される.

リージョングローイングは、初期点から開始し、隣接 する点が特定の条件を満たす場合に、それを同一リー ジョンとしてグループ化していくアルゴリズムである. この手法は、連続した面や形状の検出に有効である[7] が、ノイズに対する調整が難しく、また初期点の選定が 結果に大きく影響する.縄文土器の表面模様のように、 製造精度が低く意図しない凹凸や風化や損傷など、ノイ ズを大量の含む形状への適用は困難である.

モデルフィッティングは、点群をさまざまな幾何形状 にマッチさせ、幾何形状単位にセグメント化する手法で ある.ノイズを含むような形状に対しては、3Dハフ変 換[8] や RANSAC の手法 [9] が主に用いられる.モデ ルフィッティング手法では、平面、円柱、円錐、球など のプリミティブな幾何学オブジェクトを検出し、フィッ ティングすることでセグメンテーションする.しかし、 縄文土器の表面模様のように、人手による作成物の場合、 プリミティブな幾何学オブジェクトとして検出できる部 位は限定的である.

クラスタリングは, k-mean [10] に代表されるように, 点群をクラスタに分割し,各クラスタ内の点を類似し た特徴を持つ領域としてグループ化する.リージョング ローイングやモデルフィッティングよりも,不規則な幾 何学的オブジェクトに適しており,シンプルな手法であ るが,クラスタ数やクラスタ間の距離など,パラメータ の事前設定が必要である.しかし,土器の表面模様は多 様であり,パラメータを表面模様ごとに調整することが 必要なため,縄文土器一般を対象とすることは難しい.

2.2 模様の幾何学的セグメンテーション

模様のついた陶器から,模様をセグメンテーション し,寸法特性評価する手法がある[11].古代の陶器につ いて,円弧や円が移動する軌跡で得れる形状で表現でき る部位が多いことに着目し,円弧や円の半径に基づきセ グメンテーションし,正確な寸法を評価する手法である. このような形状は,陶器の縁や装飾模様,加工痕などに 見られるもので,従来の手作業では,セグメンテーショ ンできない部位に対応する手法である.しかし,土器の 表面模様は複雑で不規則な形状を持つことが多く,円形 に限定されない場合がほとんどであり,この手法を,縄 文土器の表面模様抽出に適用することは困難である.

2.3 機械学習を用いた模様のセグメンテーション

さらに近年, 畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いたセグメンテーション手法が注目されており,文 献 [12] は,考古遺物の高解像度 3 次元データセットのセ グメンテーションを実施し,その有効性を示している. 一般的に,畳み込みニューラルネットワーク (CNN)や ランダムフォレストなどの機械学習手法は,大量の学習 データを必要とし,その精度はデータセットの規模や多 様性に強く依存する.しかし,縄文土器の 3 次元データ は一般公開されているものが少なく,限られたデータを 用いたモデルの訓練は,表面模様の複雑さや土器ごとの 多様性を捉えることが難しい.

図3は、FCN(Fully Convolutional Networks)[13][14] を用いて、本手法で用いるテストデータに対して、表面 模様抽出を試みたものである.使用したデータセット は、本研究でも検証で利用する盛岡市遺跡の学び館 [18] から提供された、7つの縄文土器データであり、それぞ れの土器を異なる角度から撮影した画像で実験を行って いる.図3(a)は抽出対象の土器の画像であり、図3(b) は二値化した模様の正解画像であり、図3(c)はFCNに よる抽出結果である.図3(c)のように、多くの模様が正 確に認識されておらず、全体的な認識率も高くないこと がわかる.また、4.2節に示すセグメンテーション指標 で、テストデータセット(test data set)の抽出結果を分 析をすると、Precisionが約0.29、Recall が約0.12、F1 Score が約0.15、IoU が約0.09 と低い値に留まり、数値 的な評価でも改良の余地がある.



本研究の提案手法では、これらの先行研究の課題に対 し、形状全体を複数の断面でスライスし、分析対象を断面 ごとの局所的な形状に限定することで、プリミティブ形 状への依存性を低減する.さらに、点群と楕円の距離に 関する凹凸分析を組み合わせることで、ノイズに対する 耐性を高めた柔軟なセグメンテーションが可能となる. また、土器ごとのパラメータ調整をほぼ必要とせず、一 般的な適用性を持つ手法を提案する.これにより、土器 全体の表面模様の視認性を向上することが可能となる.

3 提案手法

3.1 概要

本研究では、土器の3次元計測点群を用いた表面模様 のセグメンテーション手法について提案する.以下に、 表面模様を表す点群のセグメンテーション手法の処理 の流れを示す.以降,表面模様を表す点を表面模様点と 呼ぶ.

- 1. 土器全体を示す3次元点群を,2次曲面に当てはめ, その中で最大の長さを持つ主軸を土器の高さ方向の 主軸とみなし, step.2 で定義する平面の法線とする.
- 2. step.1 で求めた土器全体の主軸を法線とし,主軸を 等間隔に切断する複数の平面を定義する.次に,複 数の平面で土器点群を切断し,交点を示す点群を求 める.
- step.2 で得られた交点を示す点群に対して、反復的 な外れ値除去を伴う楕円当てはめをする.このス テップでは土器点群の表面模様の影響を削減した楕 円当てはめをする.
- 各平面ごとに、step.3 で当てはめられた楕円と、交 点を示す点群の距離により表面模様候補点を算出 する.
- step.4 で求めた表面模様候補点に対して,楕円との 点の距離のグラフを定義し、グラフの凹凸分析を行う.さらに、凹凸分析の結果に基づき表面模様候補 点をいくつかのグループに分ける.
- step.5 のグループは、それぞれが一つだけ極大値を 持つようにグループ化されている.極大点の凸分析 を行い、その凸の度合に基づき、表面模様点候補の 見直しを行う.
- ここまでのステップで得られた表面模様候補点から、楕円と点群の距離に基づき表面模様点を決定する.

3.2 土器点群から2次曲面主軸の算出

本研究の著者らは、3次元計測点群で表現された土器 を、複数の2次曲面として自動的にセグメンテーション する手法 [15] を過去に提案している.この手法のなか で、土器全体を一つの2次曲面に当てはめ、2次曲面の主 軸を求めている.本研究においても、同様な方法で土器 全体を一つの2次曲面に当てはめ主軸を求める.なお、 本研究で用いる実験データは、2軸が主軸に一致するよ うに座標変換したものを利用する.

図4は、テストデータ (H112(Low)) に対して、2次曲 面当てはめをした結果である.図4(a)は、当てはめられ た2次曲面の等高線 (青線)を、土器データに重ねたのも である.図4(b)は、2次曲面の主軸を赤い線で示してい る. このデータの場合,2次曲面は一様双曲面として算 出された.なお,入力データは点群であるが,土器との 関係性を分かりやすくするため,図4はメッシュデータ をレンダリングしたものである.



3.3 平面を用いた土器断面の算出

本手法は, 土器全体を示す3次元計測点群を複数の平 面で切断し, 各平面と土器点群の交点を楕円に当てはめ, 土器点群と楕円の関係を分析することで, 土器から表面 模様をセグメンテーションする手法である. 図5は, 3.2 節で求めた主軸を法線とする複数の平面と, 主軸および 土器を示す点群のイメージ図であり, 赤い線が主軸, オ レンジの線が平面を示す. なお, 図5は, 図の視認性を 上げるため, 点群の数, および平面の数を大幅に削減し ている.

土器と平面の交点計算において、土器の 3 次元計測点 群と、ある平面との交点を計算しても、完全に平面に乗 る点はほぼ存在しない.そのため、 ε を平面間の距離と して、各平面から $\pm 0.5\varepsilon$ の範囲の点群を、平面と土器点 群の交点とする. $\pm 0.5\varepsilon$ を範囲とすることで、すべての 3 次元計測点群は、いずれかの平面の交点となり、複数の 平面の交点に同時にならない.なお、点群の主軸に沿っ た距離 H を土器の器高として、平面は器高 H の 0.25% ごと、つまり 0.0025H の間隔で配置する.0.25% ごとの 配置は、土器の断面分析についての経験的な数値であり、 4.1 節で説明する実験データの低密度データで、平面ご とに平均 600 個、高密度データでは 2700 個程度の点が 各平面の交点数である.また、各断面で表面模様候補点 と認識されるのは、概ね、交点数の 40% 前後である.



図 5: 主軸から定義される複数の平面

3.4 断面点群の外れ値除去を伴う楕円当てはめ

このステップでは,表面模様を取り除いた土器の表面 を仮定して,その断面を楕円で表現することを検討す る.2次曲線の当てはめ手法には様々な手法があるが, 本手法では楕円への当てはめに限定可能な,Fitzgibbon の手法 [16] を利用する.Fitzgibbon の手法の概要は付 録 A に示す.しかし,3.3節で求める交点に,そのまま Fitzgibbon の手法を用いても,表面模様の影響が大き く,表面模様を取り除いた土器の表面を仮定した楕円が 求まらない.そこで,楕円から最も離れた点を,外れ値 として逐次的に除去・再当てはめする手法を用いる.

アルゴリズムの概略を説明する.まず,各平面上のす べての点をデータセットとして, Fitzgibbon の手法に より初期楕円を求める.次に各データポイントと、初期 楕円との距離を計算する. 楕円と最大距離を持つ点が, 設定した閾値よりも大きい場合に,外れ値としてデータ セットから除外する.ただし、外れ値として除去する対 象は、楕円の外側に存在する点のみである. このように することで、与えれた点から定義される最も小さい楕円 を求め,表面模様が存在しない土器の表面を仮定した楕 円を求める.再度,外れ値を除去した新しいデータセッ トに基づいて、再フィッティングを行い、同様に外れ値 を除去したデータセットを準備する. このプロセスを繰 り返し、最終的に表面模様の影響を最小化した最終楕円 を得る.なお、土器の点群は製造精度の問題で、不規則 な形状や突起が、楕円当てはめにおけるノイズとして存 在する.また,表面模様が一部に集中し,楕円当てはめ において,外れ値と考えるべき部位が一様に分布しない. 重み付き最小二乗法で、このような点群に対する重みを 事前に設定することが困難であるため、本手法では、外 れ値を処理しやすい逐次当てはめ法を採用した. 以下に 具体的な処理を示す.

1. 平面に存在するすべての点群 $P_i^0(i=1,2\cdots,n)$ を

データセットとして, Fitzgibbon の手法により初期 楕円 E_0 を求める.

- 2. 各点 P_i^0 と楕円 E_0 の距離 D_i を計算し, この中で 最大距離 D_{max} をもつ点 P_{max} を識別し, D_{max} が楕円 E_0 の長軸の s_1 % より大きければ, P_{max} を $P_i^0(i = 1, 2 \cdots, n)$ から除去して, 新たなデータ セット点 $P_i^1(i = 1, \cdots, n-1)$ を構築する. ここ で, s_1 は閾値である. また, 距離 D_i は符号付き距 離であり, 楕円の内側であれば負の値, 外側にあれ ば正の値をとる. そのため, D_{max} は外側の点から 選択される.
- 3. 点群 $P_i^1(i = 1, \dots, n-1)$ をデータセットとし て、Fitzgibbon の手法により楕円 E_1 を求め、各点 P_i^1 と楕円 E_1 の距離 D_i を計算し、新しい最大距離 D_{max} を求め、 E_1 の長軸の s_1 % より大きい点であれ ば除去し、新たなデータセット $P_i^2(i = 1, \dots, n-2)$ を構築する.
- 4. 終了条件は、点と楕円の最大距離 D_{max} が、当ては められた楕円の長軸 E_i の s_1 % 以下になることで、 このときに得られた楕円を最終楕円 E_f とする. 最 大距離が長軸の s_1 % を超える場合は、step.3 を繰り 返す. ただし、 P_i^k のサイズが $\frac{n}{10}$ より小さい場合、 エラーとして処理を終了する.

本研究においては、外れ値とみなす閾値 $s_1 = 0.05$ と した.つまり、楕円当てはめにおいて、長軸の 0.05% よ り離れた点を外れ値とする.なお、外れ値とみなす閾値 を厳しくすると、最終楕円が求まらないことがある.そ こで、さまざまな s_1 で実験を行い、断面すべてについ て、最終楕円の算出が可能である数値から、最も厳しい 数値である $s_1 = 0.05$ を閾値とした.

図6は、本アルゴリズムにより、テストデータのある 平面上の点を楕円に当てはめた様子である. 青線で表現 された部位が、最終楕円であり、黒線が平面上に存在す る交点である. 凸となる表面模様の影響が少ない楕円が 求まっている.

3.5 表面模様候補点の抽出

3.3 節で,主軸を法線とする平面は土器全体に複数定 義される.3.4 節では,各平面ごとに最終楕円を求める 手法を説明したが,この処理はすべての平面で実施さ れ,平面と同じ数だけの最終楕円が求まる.さらに,本



図 6: 外れ値を逐次的に取り除く楕円当てはめ

節では最終楕円を用いて,各平面で表面模様候補点を抽 出する.表面模様候補点とは,各平面の交点から表面模 様の可能性の高い点に絞った点である.具体的には,各 平面に存在する点群と,それぞれの最終楕円の距離を計 算し,閾値である各最終楕円の長軸の s_2 %を超える点 を表面模様候補点とする. 3.4 節でも,逐次処理におい て,外れ値とする点の距離を示す閾値 s_1 %を楕円の長軸 の 0.05% としたが,本節においても, $s_2 = 0.05$ として, 最終楕円との距離で表面模様候補点を抽出する.なお, $s_2 = 0.05$ としたのは, 3.4 節において,外れ値と認識し た点を,主に表面模様候補点と認識するためであるが, 逐次的に求まる楕円ではなく,最終楕円との距離で再評 価することが目的である.つまり, 3.4 節の逐次処理で, 外れ値として削除された点群も,再度評価を行う.

図 7(a) は、ある断面上の点を示す.赤い点は、人手に より表面模様と判断した点であり、黒い点は、非表面模 様と判断した点である.図 7(b) は、図 7(a) から本手法 により表面模様候補点と認識できた点のみを残し、他の 点を除去した様子である.断面上の点から赤い点のほと んどを面模様候補点と認識し、黒い点をある程度は除外 できていることが確認できる.

3.6 表面模様候補点の凹凸分析とグループ化

3.6.1 表面模様候補点の隣接間距離によるグループ分割

表面模様候補点の凹凸分析の前処理として,連続した 表面模様を識別するため,3.5節で求める表面模様候補 点を,隣接間距離によりグルーピングする.ただし,表 面模様候補点には,順序の概念が存在しないが,土器表 面を仮定する楕円に沿った並びから,順序をもつ点列と してグルーピングする.

まず、楕円に沿った順序を定義するために、最終楕円



図 7: 最終楕円による表面模様候補点の抽出

の中心と各表面模様候補点を結ぶベクトルと,最終楕円 の長軸の方向ベクトルの角度に基づき,表面模様候補点 を反時計回りにソートする.つぎに,ソートされた順序 に基づき,隣接する表面模様候補点のユークリッド距離 が,閾値以下であれば同一のグループに分類する.この プロセスで,連続した表面模様ごとに,表面模様候補点 を有序点列としてグルーピング可能である.以下に具体 的な処理を示す.

- 最終楕円 *E_f* の中心と、平面上の各表面模様候補点
 P_i(*i* = 1, 2..., *n*)を結ぶベクトル *V_i* を求める.
- 2. 最終楕円の長軸の方向ベクトル Vaxis を求める.
- 3. $V_i \geq V_{axis}$ の角度 $Ai \in x$ あめ, A_i に基づいて $P_i \in Y$ ートした有序点列データセット $P'_i(i = 1, 2\cdots, n)$ を求める.
- 4. データポイント $P'_{i} \geq P'_{i+1}$ のユークリッド距離が, 閾値 (最終楕円の長軸の s_3 % を超えないもの) は同 一のグループにグルーピングする.

実験において,表面模様候補点の隣接距離の 95% は, 各楕円の長軸の 1.5% 以下の距離にある.そのため,5% 程度をグループを区切る位置の点と仮定し,同一グルー プとみなす距離の閾値 $s_2 = 1.5$ とした.図8は,図7(b) の表面模様候補点を,グルーピングした結果である.図 中の番号はグループの番号を示し,0~23 までの24 個の グループが生成されている.なお,隣接するグループの 距離が近い場合に,視認性を考慮して色を変えてある.



図 8: 距離によりグルーピングされる表面模様候補点

3.6.2 点と楕円の距離グラフのガウス平滑化

3.6.1 項で距離によりグルーピングした各グループに ついて、3.6.3 項以降,楕円との距離の凹凸分析する.凹 凸分析のために、各グループに属する点と楕円の距離に ついて、その変化の極点を算出する必要がある.しかし、 表面模様候補点と楕円の距離は、滑らかに変化しないた め、ガウス平滑化 [17] を用いて、点と楕円の距離を平滑 化する.本手法においては、付録 B で示した式 (5)、式 (6) において、 $\sigma = 3, N = 11$ で平滑化を行った.また、 一般に N は σ の 3 倍程度が推奨されているため、実験 的に結果が良好な数値である 11 を設定した.

図 9(a) は図 8 の 16 番のグループと,最終楕円の距離 を示すグラフである.大量のノイズが入っており,極点 の算出が困難である.このグラフを,式(6)を用いて平 滑化したものが,図 9(b)である.全体の特徴を損なうこ となく平滑化されており,極点の算出も可能である.

3.6.3 点と楕円の距離グラフの極点検出

ここでは, 3.6.2 項で平滑化された点と楕円の距離のグ ラフについて, 極点を検出する. 極点の検出にはアルゴ リズム 1(Find Extreme Point) を用いる.

Find Extreme Point は、与えられたデータセット data から局所的な極大点と極小点を識別するものであ る.処理の概要は、データセットの各点を中心として、 定義された窓サイズ内の点との大きさを比較し、それぞ れの点がその窓内で最大または最小かどうかを判断す る.処理対象のデータセット data は数値のリストとし て入力され、窓サイズ windowSize は整数で指定され





図 9: 図 8 の 16 番の点と楕円の距離

る. 出力は、局所的な極大点と極小点の位置を示す二つのリスト (*Lmax*, *Lmin*) である. なお、本研究において、*windowSize* は5を設定する.

3.6.4 表面模様の極小点分割と再グルーピング

ガウスの平滑化により,楕円との距離を示すグラフは 滑らかになり,3.6.3 項のように,極大点と極小点の識別で きるようになる.一般に,連続かつ微分可能な関数 f(x)では,その極小点を $x_1, x_2, \dots, x_n(x_1 < x_2 < \dots < x_n)$ とすると,各区間 (x_{i-1}, x_i) 内に極大点が1つだけ存在 する.この特性は,楕円との距離を示すグラフが離散的 データであっても,ガウス平滑化によりグラフが滑らか であれば利用可能である.そのため,3.6.1 項で作成し た,隣接間距離によるグループを極小点で分割すると,各 グループには極大点が一つだけ存在するようにできる. この操作により,楕円との距離で凹凸を含む各グループ は,凸ごとのグループに再分類される.

図 10 は、図 8 の 16 番のグループを極小点で分割し、 それぞれのグループごとに色を変えて表示したものであ Algorithm 1 Find Extreme Point

Require: data, windowSize **Ensure:** *LMax*, *LMin* 1: Initialize LMax and LMin as empty lists 2: $HW \leftarrow windowSize/2$ 3: for i = HW to size of data - HW do $isMax \leftarrow true$ 4: $isMin \leftarrow true$ 5: for j = -HW to -1 do 6: if $data[i] \leq data[i+j]$ then 7: $isMax \leftarrow false$ 8: end if 9: if $data[i] \ge data[i+j]$ then 10: $isMin \leftarrow false$ 11: end if 12:end for 13: for j = 1 to HW do 14:if $data[i] \leq data[i+j]$ then 15: $isMax \leftarrow false$ 16:end if 17:if $data[i] \ge data[i+j]$ then 18: $isMin \leftarrow false$ 19:end if 20:21: end for if *isMax* then 22. LMax.append(i)23:24:end if if *isMin* then 25:LMin.append(i)26:27:end if 28: end for



3.7 表面模の凸分析と表面模様候補点の見直し

3.7.1 極大点ごとの凸分析

3.6 節までの処理で,表面模様候補点は凸ごとの部位 に分類されており,各グループには極大点が一つだけ存 在する.ここでは,極大点が周辺から十分に突出してい るかを評価する.

処理の概要は、まずグループの各点において、最も楕 円に近い点 (極小分割しているので始点もしくは終点) と楕円の距離と、その他の点と楕円の距離の差分を求め る.次に、この差分を求める処理を、極小点により分割 されたグループ数だけ繰り返し、分割前のグループの頂 点数と同じサイズの、差分を示すデータセットを構築す る.最後に、差分を示すデータセットをもとに、極大点 と隣接する極小点との差が、他の点よりも大きいかを zスコアを用いて判断する.なお、図 11 に示されるよう に、極大点 P_{max} に隣接する左側極小点 $P_{min,l}$ と右側 極小点 $P_{min,r}$ は個別に評価される.この処理は、3.7.2 項で、極大点を中心として、左右の表面模様候補点の削 除処理を行うが、そのための前処理である.



図 11: 極大点と隣接する極小点の評価

最も楕円に近い点と、その他の点と楕円の距離の差 分を示すデータセットの構築について、図 12 で説明 する.図 12 は、図 9(b)の平滑化されたグラフを、極 小点で分割した図である.分割区間ごとに区分的関数 を $f_i(x)(i = 1, \dots, 8)$ とし、 $f_i(x)$ はそれぞれの定義

る. 黒い矩形の右下が極小点であり,図 9(b) の点と楕円 の距離グラフの極小点に対応する点である. この極小点 で,グループが分割される. 各矩形で囲まれる点が,新 たに生成される表面模様候補点のグループである. 16 番 のグループは,7 個の極小点により,8 個のグループに分 割される. また,水色の点が極大点を示しているが,各 グループは凸形状をしていて,極大点をそれぞれ1 つだ 域 $(x_{min}^{i}, x_{max}^{i})$ で,極大値 $f_{i}(c_{i})$ を持つとする.距離 の差分を示すデータセットの構築について,関数 f_{6} の 区間で具体的に説明する.まず, $f_{6}(x)$ の各点 $x_{j}(j = 1, \dots, n) \in (x_{min}^{6}, x_{max}^{6})$ について,楕円に一番近い $f_{6}(x_{max}^{6})$ との差分 $f_{6}(x_{j}) - f_{6}(x_{max}^{6})$ をこの区間に含 まれる点の数 n 回計算する.図 12 で緑色で表示された 長さであり,極大点 $f_{6}(c_{6})$ で最長の赤い線になる.この 処理はすべての区間関数 f_{1}, \dots, f_{8} に対して行い,距離 の差分を示すデータセットを構築する.構築した距離の



差分を示すデータセットをもとに,極大点と隣接する極 小点との差が,他の点よりも大きいかは, z スコアを用 いて判断する.具体的には, z スコアが閾値以上の場合, 周辺から突出している極大点と評価する. z スコアにつ いては,付録 C に示す.以下に具体的な処理を示す.

- 1. 3.6.4 項で作成した極小点で m 個に分割された グループ $G_j(j = 1, 2..., m)$ の各点 $P_{j,i}(i = 1, 2..., n)$ について,各データポイントと最終楕 円 E_f との距離 $D_{j,i}$ を求める.
- D_{j,i} から最小となる D_{j,min} を持つ点 P_{j,min} を識 別する.
- 3. 各点 $P_{j,i}$ について $D_{j,i} D_{j,min}$ を計算し, データ セット $Dlist_{j,i}(i = 1, 2 \cdots, n)$ を構築する.
- step.1~step.3 の処理を極小点分割により分割され るグループの数 m 回繰り返し, m 個のデータセッ ト Dlist_{j,i} をマージした Dlist を構築する.
- 5. Dlist の標準偏差,平均値を算出する.
- 6. グループ G_j の極大点 $P_{j,max}$ と楕円の距離 D_{max} と左の極小点と楕円の距離 D_{min_left} の差 $D_{max} D_{min_left}$ について Dlist から z_{score} を求め,次のようにグループ G_j に付加する. ここで zval は閾

値である.

$$G_{j}.left = \begin{cases} true & (z_{score} > zval) \\ false & (otherwise.) \end{cases}$$

7. 極大点と楕円の距離 D_{max} と右の極小点と楕円の 距離 D_{min_right} の差 $D_{max} - D_{min_right}$ について Dlist から z_{score} を求め,次のようにグループ G_j に付加する.

$$G_j.right = \begin{cases} true & (z_{score} > zval) \\ false & (otherwise.) \end{cases}$$

8. step.6, step.7 の処理をグループの数 m 回繰り返す.

表面模様候補点は,最終楕円から一定の距離離れた点で 構成され,距離の差が大きくはない.そのため,変化が 大きい極大点かを判断する閾値を *zval* = 0.1 とし,平均 的な距離より大きいかで判断する.

3.7.2 凸分析による非表面模様点除去

3.7.1 項までの処理で, すべての表面模様候補点グルー プは凸形状に分割され, さらに極大点を中心として, 左 右が表面模様候補点として残すべきかどうかの情報が構 築されている.この情報と隣接するグループ管理情報か ら,表面模様候補点を次のように処理する.

- グループ G_j(j = 1, 2..., m) において,始点 (極小点) から極大点 P_{j,max} までの距離 p_len を算出.
- グループ G_j(j = 1,2···,m) において,始点 (極小 点) から距離が 0.2p_len に最も近い点まで点の数 p をカウントする.
- グループ G_j(j = 1,2...,m) において、極大点 P_{j,max} から終点 (極小点) までの距離 q.len を算出.
- グループ G_j(j = 1,2...,m) において,終点 (極小点) から距離が 0.2q_len に最も近い点までの点の数 q をカウントする.

6. 1, 2, 3, 4, 5 の処理をグループの数 m 回繰り返す.

この処理により, 3.7.1 項で, 変化が大きいと判断された, 極大点の近傍のみを残すことが可能である.

図 13 は、この処理のイメージ図である.極大点 P_{max0}, P_{max1} があり、極大点 P_{max0} の右側および、 P_{max1} の両側が表面模様点として残すように判断された 状況を示す. P_{max1} の近傍は表面模様候補点として残さ れるが、極小点 P_{min0} と P_{min1} の近傍は表面模様候補 点から消える.これにより、表面模様候補点として連続 していた領域から、非表面模様部位を除去可能である.



ただし、左右のいずかれのみを残すと判断される極大 点を持つグループに、左右ともに削除と判断される変化 量の低いグループが接続すると、変化量の低いグループ の領域が消えてしまい、表面模様が大きく消えてしまう. そこで、左右の内、いずかれのみを残すと判断される極 大点を持つグループに囲まれる、小さな極大点グルー プは、すべての頂点を表面模様候補点として残すように する.

図 14 において, *P_{max0}* は左は残し, 右が削除される と判断されるグループの極大点である. *P_{max2}* は左が削 除, 右が残されるグループの極大点であるである. この 2 つのグループに挟まれて極大点 *P_{max1}* が存在するが, 両側ともに変化量が少なく, 前述の処理のままでは, 極 大点 *P_{max0}* から *P_{max2}* の区間のオレンジで囲まれた区 間の表面模様候補点がすべて消えてしまう. そこで, 左 右の内, いずかれのみが残される変化の大きな極大点を 持つグループに囲まれる, 小さな極大点をもつグループ は, すべての頂点を表面模様候補点として残すようにす る. なお, このようなグループに囲まれる小さな極大点 をもつグループは, 一つに限定はされない.

また,グループに属する点の数が微小な場合も,すべ ての頂点を表面模様候補点から削除する.本研究では3 個以下のグループの点は,すべて表面模様候補点から削



図 14: 極大点に囲まれる極小点

除する. 図 15(a) は図 10 で極小点分割したグループに 対して,極大点の凸分析に基づいて不要な表面模様候補 点を除去した様子である. 図 15(b) は,人手で着色した データであり,赤が表面模様点,黒は非表面模様点であ る. 図を比較すると,大部分の黒い部位が表面模様候補 点から除去できている.



図 15: 図 8 の 16 番への適用結果

3.8 表面模様点群の決定

ここまでの処理で,表面模様候補点は楕円の長軸の 0.05% より離れた点から選択され,さらに凸分析により 絞り込まれている.しかし,表面模様候補点が,長軸の 0.05% という閾値は厳しい設定値であり,表面模様点に 加えて,多くの非表面模様点が,表面模様候補点として 選択された状態である.厳しい設定値とする理由は,凸 分析をするにあたり,表面模様だけではなく,その周辺 の形状を得るための設定である.そこで,最終楕円と表 面模様候補点の距離が,長軸の0.05% を1.25 倍した距 離より離れた点を,表面模様点として決定する.1.25 倍 という数値は,今回の実験データに対し,様々な数値で 実験したうち,最も表面模様の抽出が成功した実験的数 値である.

図 16 は、図 7(a) に示されるある平面上の点から、本 手法を適用することで、表面模様点と認識した部位のみ を残したものである. 表面模様を示す赤い部位は残り、 非表面模様点である黒い部位が消えていることが確認で きる. また、図 7(b) の楕円との距離でのみ表面模様を選 択したものでは、断面に存在する黒い点の 59.2% を認識 できているが、図 16 においては、黒い点を 82.9% 除去 できている. また、表面模様を示す赤い点が除去された 割合は、5.8% であり、ほぼ無視できる数値である.



3.9 隣接断面間の表面模様連続性の向上

3.8 節の処理により,断面ごとに連続性を考慮した表 面模様点は決定されるが,上下方向,すなわち主軸方向 において,不連続な部位が残る.そこで,隣接する断面 間の表面模様の連続性を向上させる処理を行う.概要と しては,連続性の補正を行う断面を基準として,上下方 向の隣接断面における同一位置の点が,模様点を表す点 かどうかの多数決を行い,その結果を基に補正を行う断 面上の各点が表面模様点かどうかを判定する.

3.3 節で定義した,土器を切断する複数の断面を底面 から順に S_1, S_2, \dots, S_n とする.また,3.3 節での定義 に従い, S_i は±0.5 ε の範囲に存在する頂点を, S_i に投 影した座標のデータセット $P_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})(j =$ 1,2,…, m_i)を持つ. m_i は断面 S_i に存在する点の数を 示す.さらに、3.8 節の処理から、表面模様点かどうかの 真偽を示すデータセット Stat_{i,j} ($j = 1, 2, \dots, m_i$) も多 数決の処理前に構築するものとする.Stat_{i,j} は点 $P_{i,j}$ のステータスを示し、表面模様点を 1、非表面模様点を 0 で表す.以下に具体的な処理を示す.

- 評価対象の S_i と上方向の隣接断面集合 {S_{i-t} | t = 1,2,...,p_num}, および下方向の隣接断面集 合 {S_{i+t} | t = 1,2,...,p_num} に対して, step.2 以降の評価を行う. ここで, p_num は閾値であり, S_i を中心として,上下に p_num 個の断面を対象に 多数決を行う.
- 2. S_i に属する $P_{i,j}$ の各点と、隣接断面集合の各断 面に属する点 $P_{i-t,k}(t = 1, 2, \cdots, p_num)$ および $P_{i+t,k}(t = 1, 2, \cdots, p_num)$ について、それぞれの 断面における最近点を求める. 具体的な処理は次で ある.
 - 上方向隣接断面 S_{i-t} の点群 P_{i-t,k} の中から, 点 P_{i,j} の最近点 P_{i-t,k*} を以下の式 (1) で求 める.式(1)の距離 d(P_{i,j}, P_{i-t,k}) は点 P_{i,j} と 点 P_{i-t,k} の xy 座標平面上の距離とする.この 処理では,tを1から p_num まで変化させ,最 近点は p_num 個算出される.

$$k^* = \arg\min_{i} d(P_{i,j}, P_{i-t,k}) \tag{1}$$

- 下方向隣接断面 S_{i+t} に対しても、上方向隣接 断面と同様に最近点 P_{i+t,k*} を求める.上方向 隣接断面と上方向隣接断面の処理により、P_{i,j} の一つの点ごとに 2p_num 個の元を持つ最近 点集合 {P_{i±t,k*} | t = 1,2,...,p_num} が得ら れる.
- 3. 点 $P_{i,j}$ に対応するステータス Stat_{all}($P_{i,j}$)を,式 (2) のように定義する.ここで、Stat_{i-t}(P_{i-t,k_{i-t}^*}) および Stat_{i+t}(P_{i+t,k_{i+t}^*})は、それぞれ上方向隣接 断面と下方向隣接断面における最近点が、表面模様 点かどうかの真偽を示し、Stat_{i,j} は点 $P_{i,j}$ が表面 模様点かどうかの真偽を表す.

$$\operatorname{Stat}_{\operatorname{all}}(P_{i,j}) = \sum_{t=1}^{p_num} \left(\operatorname{Stat}_{i-t}(P_{i-t,k_{i-t}^*}) \right) + \sum_{t=1}^{p_num} \left(\operatorname{Stat}_{i+t}(P_{i+t,k_{i+t}^*}) \right) + \operatorname{Stat}_{i,j}$$
(2)

式 (2) により, すべての隣接断面の真偽値と評価対 象の点の真偽値が合計される. この集計結果を基 に, 以下のように多数決を行い, Stat_{i,j} から新たな 真偽を示すデータセット Stat[']_{i,j} を構築する.

$$\operatorname{Stat}_{i,j}^{'} = \begin{cases} 1 & (\operatorname{Stat}_{\operatorname{all}}(P_{i,j}) > \frac{p_num \times 2+1}{2}) \\ 0 & (\text{otherwise.}) \end{cases}$$

-2:11 -

- 4. 上記の処理をすべての断面 S_i $(i = 1, 2, \dots, n)$ に 適用し、Stat $'_{i,j}$ を求める.
- 5. Stat'_{i,j} を用いてすべての断面 S_i (i = 1, 2, ..., n)の模様点かどうかの真偽を示すデータセット $Stat_{i,j}$ を更新する. step.3 にて, $Stat_{i,j}$ を更新せず新たに $Stat'_{i,j}$ を構築するのは,逐次処理ではなくすべての 平面の処理後に,表面模様点かどうかの情報を更新 するためである.

本手法では、多数決をする隣接断面の数 p_num は、経 験的に3とした. つまり、評価対象の断面の上下3枚で 多数決を取る. これは、断面間の距離の6倍6 ϵ = 6.0程 度の区間であり、主軸に沿った距離では全体の1.5%の 距離である.予備実験では1%から2%の間では良好な 結果となったため、この数値を適用する.

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 する土器を,図17~図21に示す.図17~図20のデー タは,盛岡市遺跡の学び館[18]から提供された縄文土 器であり,図21は東京国立博物館[19]から提供された 人形装飾付壺形土器である.盛岡市遺跡の学び館の土器 は,点群の数が少ないもの(Low)と多いもの(High)の 2つを準備した.実験に使うデータは,出土した縄文土 器の3次元計測点群のみであるが,図17~図21は,視 認性を上げるためメッシュデータを示している.

盛岡市遺跡の学び館の土器は、フォトグラメトリー 技術で撮影した. 土器ごとの撮影情報を以下に示す. な お,撮影に際し,画像のオーバーラップは目視により 50%程度重なるようにした. また,物体をテーブルの中 心に配置し,人がカメラを持って,物体の周りを周回し ながら撮影した.

- H112(Low,High 共通) 撮影カメラ: 富士フイルム X-T20 写真数:135 枚 画像解像度:6000, 4000(ピクセル)
- H115(Low,High 共通) 撮影カメラ: カシオ EX-ZR 写真数:58 枚 画像解像度:4000, 3000(ピクセル)

- H139(Low,High 共通) 撮影カメラ: 富士フイルム X-T20 写真数:152 枚 画像解像度:6000, 4000(ピクセル)
- H110(Low,High 共通) 撮影カメラ: 富士フイルム X-T20 写真数:169 枚 画像解像度:6000, 4000(ピクセル)

また、3 次元点群データは、Agisoft 社の Metashape Proffesional で作製した.点群構築のパラメータを以下 に示す.なお、Metashape で書き出された点群について は、欠損がなく点群の密度のばらつきが大きくないこと を、目視で確認済みである.

• Low

写真アラインメント (精度): 高 写真アラインメント (キーポイント制限): なし 写真アラインメント (タイポイント制限): なし 点群構築 (ソース): 深度マップ 点群構築 (品質): 高 モデル構築 (品質): 高

• High

写真アラインメント (精度): 最高 写真アラインメント (キーポイント制限): なし 写真アラインメント (タイポイント制限): なし 点群構築 (ソース): 深度マップ 点群構築 (品質): 最高 モデル構築 (ソース): 深度マップ モデル構築 (品質): 最高

なお,人形装飾付壺形土器の3次元点群データは, Breuckmann GmbH 社の smartSCAN 3D-Duo を使用 して測定した.本スキャナーは,点間分解能が0.05mm である.取得した点群データのノイズ除去,およびア ライメント処理をメーカー純正ソフトウェアを用いて 行った.

表面模様のセグメンテーションの性能評価にあたり, 表面模様部に対して人手で赤色に着色する. 縄文土器の 隆帯文と呼ばれる表面模様は,細長い粘土紐をつくり, それを土器表面に押し当てて接着したのち,へらなどで 撫でつけて,周辺との接着性を上げる.そのため,表面 模様と他の部位の間にくぼみが存在するが,図 17~図 21 データの赤い着色においては,表面模様の最も高い 位置から,くぼみの手前までを着色する.なお,一部の 土器データでは,青い部位があるが,これは縄目と呼ば れる縄を転がしてできる模様であり,本検証では白の部 位と同様に扱う.着色にはAutodesk 社の3次元ソフト MeshMixer を利用した.

なお,表面模様が上部で途切れて見えるが,これは主 軸に直交する平面で切断したときに,断面が閉じた形状 になる領域を実験対象としているためである.また,図 21 は土器の下部には,全く表面模様がないため,表面模 様のある部位に限定している.

図 17~図 20 のデータは、フォトグラメトリー技術 で作成した点群であり、大きさの概念はないが、図に 示された寸法は、実際の土器の寸法から算出した実寸 を示す.実験環境は、CPU が Intel(R) Core(TM) i9-10900K CPU @ 3.70GHz であり、RAM が 32.00GB で ある.





(a) Low: 頂点数 201685
 (b) High: 頂点数 890003
 図 17: H112(高さ 14.5cm, 幅 12cm, 奥行 11.9cm)





(a) Low: 頂点数 201620
 (b) High: 頂点数 928494
 図 18: H115(高さ 9.4cm, 幅 9.8cm, 奥行 9.5cm)

4.2 セグメンテーション評価指標

本研究では、表面模様部分のセグメンテーションの精 度を評価するため、Precision、Recall、F1 Score、IoU を用いる.まず、評価を行うために、セグメンテーショ ン結果を混合行列の要素に分類する.





(a) Low: 頂点数 159499
(b) High: 頂点数 687423
図 19: H139(高さ 10.9cm, 幅 10.1cm, 奥行 10.1cm)





(a) Low: 頂点数 169824
 (b) High: 頂点数 725328
 図 20: H110(高さ 13.2cm, 幅 12cm, 奥行 11.6cm)



図 21: 人形装飾付壺形土器: 頂点数 667795 (高さ 7.5cm, 幅 15.9cm, 奥行 15.5cm)

- 真陽性 (True Positive, TP):
 正しく表面模様として認識された点の数
- ・ 偽陽性 (False Positive, FP):
 表面模様ではないのに表面模様として誤認識された 点の数
- ・ 真陰性 (True Negative, TN) 非表面模様が正しく非表面模様として認識された点 の数
- 偽陰性 (False Negative, FN):
 表面模様であるのに表面模様として認識されなかった点の数

実験データにおいて、上記は次のような意味となる.

- 真陽性 (True Positive, TP):
 表面模様点として認識できた赤い点の数
- ・ 偽陽性 (False Positive, FP):
 表面模様点として誤認識されてしまう白い点の数
- 真陰性 (True Negative, TN)

非表面模様点として正しく認識される白い点の数

偽陰性 (False Negative, FN):
 赤い点のうち認識できなかった点の数

これらを用いて,評価指標を次のように定義し,提案手 法のセグメンテーション性能を総合的に評価する.

 精度 (Precision):
 表面模様と認識された点のうち,実際に表面模様で ある点の割合

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

再現率 (Recall):
 実際に表面模様である点のうち,表面模様として正しく認識された点の割合

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

3. F1 Score:

精度と再現率の調和平均で,セグメンテーションの バランス

$$F1Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

IoU (Intersection over Union):
 真陽性, 偽陽性, 偽陰性の和に対する真陽性の割合

$$IOU = \frac{TP}{TP + FP + FN}$$

4.3 表面模様抽出結果

実験データである,図 17~図 21 の土器に対して,本 手法の表面模様セグメンテーションを適用した分析結果 を,表1に示す.表1は,前節で説明した4つの指標 Precision, Recall, F1 Score, IoUについて,それぞれの 土器データの結果と処理時間を示してる.処理時間は, データを読み直後から,表面模様のセグメンテーション を行い,結果を出力し終わるまでの時間を示す.また, 実験データの表面模様の突出度合を定量化するために, 最終楕円と点の距離について,平均,中央値,最大値を 合わせて表1に示した.算出方法は,まず各断面におい て,最終楕円と平面上の点の距離を,それぞれの楕円の 長軸に対する割合で,平均,中央値,最大値として求め る.このようにして複数求まる平均,中央値,最大値か ら,すべての断面を対象としてそれぞれの中央値を示し ている. また,図 22~図 26 は,実験結果を視覚的に示したも のである.各図は,視点をπ/2 ずつずらし,4方向から の画像である.図中の緑色の部位は,本手法で表面模様 と認識した部位であり,図 17~図 21 の実験データに対 して,表面模様と認識する頂点の色を緑で更新した.そ のため,赤く残っている部分は,表面模様として認識で きない部位 (偽陰性 FN)を示している.ここから,表1 と結果画像である図 22~図 26 の検証を行っていく.

・H112(Low), H112(High), H115(Low), H115(High) 数値的な評価では, H112 と H115 に大きな差はない. また, High および Low でもほぼ差はなく, Precision が 0.8 を超えて高く, 誤認識が少ない. さらに, Recall も 0.8 を超えており, 表面模様部分の多くを正確に認識でき ている.また, F1Score も 0.8 を超えていて, Precision と Recall のバランスも良好である.さらに, IoU が 0.7 以上であり, 認識された表面模様部分が実際の表面模様 部分とよく一致しており, 全体的に高い精度でのセグメ ンテーションが達成されている.図 22, 23 を見ると, 非表面模様部が表面模様と認識されている部位が, 一部 に残っているものの, 表面模様部の認識率は高いことが 確認できる.

なお,表面模様の検出ができていない部分に着目する と,横方向に模様が広がっている部位が多い.原因は楕 円当てはめにおいて,このような部位では,表面模様を 示す領域が楕円のある領域に集中するため,その影響を 楕円が受けることで,実際の土器表面よりも模様表面に 近い位置に,楕円が生成されるためである.

• H139(High), H139(Low)

High については, ほぼ H112 や H115 と同じ傾向であ るが, IoU が 0.67 とやや低めであることから, 認識さ れた表面模様部分と実際の表面模様部分の重なりが, こ れらとの比較では, 若干不足している. Low については は, Precision, Recall, F1Score ともに 0.05 程度, High よりも低い数値であり, H112, H115 ではなかった点群 の数の影響が見られる. これは, H139(Low) は点の数が 他のものに比べて少ないため, 楕円の近似の精度が低い ことが原因と考えらえる. Low の楕円と点の距離につい て, 平均値, 中央値ともに, High と比較して 0.5% 以上 少なく, 最終楕円が Low と High で大きく違っているこ とがわかる. これは他のテストデータには見られない傾



(a) Low



(b) High

図 22: H112 への適用結果



(a) Low



(b) High 図 23: H115 への適用結果



(a) Low



(b) High 図 24: H139 への適用結果

					楕円と点	稍円と点	楕円と点	加和時間
	Precision	Recall	F1score	IoU	距離平均	距離中央値	距離最大値	观理时间
								(秒)
					(%)	(%)	(%)	
H112(Low)	0.87	0.90	0.88	0.79	0.85	0.68	2.89	90.7
H112(High)	0.86	0.87	0.87	0.77	0.86	0.68	2.91	1650.4
H115(Low)	0.88	0.83	0.86	0.75	0.87	0.69	3.12	113.2
H115(High)	0.9	0.83	0.86	0.76	0.87	0.71	3.22	2144.9
H139(Low)	0.8	0.79	0.79	0.66	0.76	0.52	3.05	66.3
H139(High)	0.84	0.81	0.82	0.7	0.81	0.59	3.25	1141.2
H110(Low)	0.8	0.6	0.69	0.52	0.46	0.29	1.65	43.2
H110(High)	0.75	0.63	0.69	0.52	0.47	0.31	1.67	654.6
人形装飾付壺形土器	0.84	0.86	0.86	0.74	1.38	0.74	5.75	1744.7

表1:表面模様認識率と処理時間





(b) High 図 25: H110 への適用結果

向である. 実際に結果画像である図 24 では, Low のほうが, 非表面模様点が表面模様として認識されている部分が目立つ.

また,表面模様の検出ができていない部分に着目する と,H112,H115と同様に横方向に表面模様が広がって いる部位に加え,複数の表面模様が複雑に入り組み密集 している部位が多い.これも,横方向に広がる模様と同 様に,楕円当てはめが密集している模様に影響を受ける ためと考えられる.

• H110(Low), H110(High)

H110 は,表面模様の高さが低く,土器の断面における表面模様と楕円と距離の差をもとに,表面模様をセグ

メンテーションする手法においては,厳しいデータであ る.実際に,楕円と点の距離について,平均値,中央値, 最大値すべてにおいて,他の土器の半分程度であり,表 面模様の高さが他のデータの半分程度である.結果につ いても,Precisionのみ,0.7を超えていて,誤認識はす くないものの,Recallは0.6程度であり,表面模様の検 出が十分でないことがわかる.結果画像である図25で は,非表面模様点が表面模様と認識される部位は少ない ものの,表面模様部が赤いまま残っていて,これは本手 法で表面模様として認識できない部位を示している.

なお,H110 について,3.4 節で述べた楕円当てはめの 外れ値とみなす閾値 *s*₁ や,3.5 節で述べた表面模様候補



図 26: 人形装飾付壺形土器への適用結果

点とみなす閾値 s₂ を厳しく設定しても,良好な結果は 得られなかった.これは,H110の土器の断面が楕円と して近似することが困難な形状であることに加え,表面 模様の高さが不足していたことが原因である.今回の実 験データにおいては,表面模様抽出のために,模様の高 さの最大値が,断面となる楕円の長軸の3%程度必要で ある.

·人形装飾付壺形土器

人形装飾付壺形土器は,ほぼ H112 や H115 と同じ傾 向であり,良好な結果である.円と点の距離について, 最大値が他のデータと比較しかなり大きく,装飾パーツ の高さが大きいデータである.結果画像である図 26 を みても,一部,非表面模様部が表面模様と認識されてし まう大きな部位があるものの,その他は良好な結果で ある.

また,横方向に模様が広がっている部位が多い領域で は,表面模様の検出ができていない部位があることも, H112, H115と同じ傾向である.

5 まとめ

本研究では,縄文土器の3次元計測点群に対する,表 面模様セグメンテーション手法について提案した.提案 手法の検証の結果,表面模様の高さがある程度高い土器 に対しては,良好な結果が得られた.

今後の課題として,非表面模様点の誤認識への対応で ある.一部,非表面模様点が表面模様として認識されて おり,これらの除去手法を検討する.また,対象とする 模様を本研究では,凸部に限定していたが,これを凹部 に拡張する.つぎに,断面を楕円に限定せず,より多様 な土器への対応手法を提案する.

6 謝辞

本研究は科研費 (24K04334) の助成を受けたものであ る.また、本研究の実験土器データを提供していただい た、盛岡市遺跡の学び館、ならびに東京国立博物館に感 謝する.

付録 A Fitzgibbon の手法の概要

Fitzgibbon の手法も 3.2 節で説明した,著者らの提案 手法 [15] と同様に, ラグランジュ未定乗数法による当て はめである.具体的には,式(3)で定義される 2 次曲線 の一般形に対し,制約条件を式(4)とすることで,楕円 に限定した 2 次曲線当てはめを行う手法である.

$$F(\mathbf{A}, \mathbf{X}) = \mathbf{A}\mathbf{X} = 0 \qquad (3)$$
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a \ b \ p \ u \ v \ d \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x^2 \ y^2 \ xy \ x \ y \ 1 \end{bmatrix}^T$$
$$n^2 - 4ab = -1 \qquad (4)$$

付録 B ガウスの平滑化の概要

ガウス平滑化は、対象となるデータポイントの周囲に 対し、その距離に応じて点に重みをつけ、加重平均を計 算する手法である.重みを示すガウス関数は、平均0,標 準偏差 σ の正規分布に従う確率密度関数であり、式(5) のように定義される.また、データポイント x_i につい て、平滑化で考慮する範囲をNとすると、式(6)とし て、 x_i を平滑化したデータポイント y_i が求まる.

$$G_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{i^2}{2\sigma^2}} \tag{5}$$

$$y_i = \sum_{j=-N}^{N} x_{i+j} \cdot G_j \tag{6}$$

付録 C z スコア

zスコアとは、データの個々の値が標準正規分布にお ける平均から、どれだけ離れているかを示す指標であり、 zスコアは式 (7) で定義される.ここで、X は観測値、 μ は平均、 σ は標準偏差を示す.

$$z_{score} = \frac{X - \mu}{\sigma} \tag{7}$$

参考文献

- [1] 野口淳,文化財デジタルデータの保管と活用[11]
 三次元データの可能性 活用と課題 . 奈良文化財 研究所研究報告,第 24 冊, pp.59-70, 2017.
- [2] K.Yamamoto, History of Decorative pattern study, Hannan Journal of Humanities and Natural Sciences, Vol. 40, No. 2, 2005.
- [3] S.Bechtold, S.Kromker, H.Mara, B.Kratzmuller, Rollouts of Fine Ware Pottery using High Resolution 3D Meshes, The 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, Vol. 10, pp. 79-86, 2010.
- [4] Z.Wang, K.Matsuyama, K.Konno, Unfolding a PointCloud on Relic's Surface for Surface Pattern Visualization, The Journal of the Society for Art and Science, Vol.15, No.2, pp. 32-42, 2016.
- [5] S.Yang, S.Xu, W.Huang, 3D Point Cloud for Cultural Heritage: A Scientometric Survey, MDPI Remote Sensing, Vol.14, Issue.21, 2022.
- [6] S.Yang, M.Hou, S.Li, Three-Dimensional Point Cloud Semantic Segmentation for Cultural Heritage: A Comprehensive Review, MDPI Remote Sensing, Vol.15, Issue.3, 2023.
- [7] T.Rabbani, F.A.van den Heuvel, G.Vosselman, SEGMENTATION OF POINTCLOUDS US-ING SMOOTHNESS CON-STRAINT, IAPRS, Vol.36,Part.5, pp.248-253, 2006.
- [8] D.Borrmann, J.Elseberg, K.Lingemann, A.Nüchter, The 3d hough transform for plane detection in point clouds: A review and a new accumulator design, 3D Research, Volume 2, Issue 2, pp.1-13,

2011.

- [9] M.Fischler and R.Bolles, Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysisand Automated Cartography, Communications of the ACM Vol.24,No.6, pp.381-395, 1981.
- [10] B.Q. Shi, J.Liang, Q.Liu, Adaptive simplication of point cloud using k-means cluster-ing, Computer-Aided Design, Vol. 43, No. 8, pp. 910-922, 2011.
- [11] Di Angelo, L., Di Stefano, P., Morabito, A.E., Pane, C, Measurement of constant radius geometric features in archaeological pottery, Meas. J. Int. Meas. Confed, 124, 138–146, 2018.
- [12] Poier G, Seidl M, Zeppelzauer M, Reinbacher C, Bischof H. PetroSurf3D - a high-resolution 3D dataset of rock art for surface segmentation,arXiv preprint arXiv:1610.01944, 2016.
- J.Long, E.Shelhamer, T.Darrell, Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation, 2015
 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 3431-3440, 2015.
- [14] T.-L. Chen, Textures Segmentation of Pottery Images with Fully Convolutional Neural Networks and Meta-learning Algorithms, Master Thesis, National Kaohsiung Normal University, Taiwan, June, 2024.
- [15] T.Kinoshita, K.Matsuyama, K.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.
- [16] A.Fitzgibbon, M.Pilu, and R.B.Fisher, Direct least square fitting of ellipses, IEEE trans, Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.21, No.5, pp.476–480, 1999.
- [17] Moo K.Chung, University of Wisconsin-Madison-STAT 692 Medical Image Analysis-3, The Gaussian kernel.https://pages. stat.wisc.edu/~mchung/teaching/MIA/ reading/diffusion.gaussian.kernel.pdf. pdf. 参照: 2024-8-21.

- [18] 盛岡市遺跡の学び館. https://www.city. morioka.iwate.jp/kankou/kankou/1037106/ rekishi/1009437/.参照: 2024-8-21.
- [19] 人形装飾付壺形土器. 東京国立博物館 貯蔵, https://bunka.nii.ac.jp/heritages/ detail/439095.参照: 2024-8-21.

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.

游 梦博



2012 年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 年同大学同研究科博士後期課程修了.博士(工学). 同年より西北農林科技大学講師.2022 年より岩手大学 助教,現在に至る.機械学習,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. 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.

Che-Chern Lin



Graduated from the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan in 1987. Appointed as a professor at the Department of Software Engineering and Management, Faculty of Technology, National Kaohsiung Normal University, Taiwan since 2010. Engaged in research on artificial intelligence, fuzzy systems, genetic algorithms, and image processing. Holds a Ph.D. in Engineering.