

令和 6 年 9 月 20 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K00986

研究課題名（和文）人物埴輪顔面の同工品定量分析に向けた類似度の定量化と可視化手法の開発

研究課題名（英文）Development of Methods for Quantifying and Visualizing Similarity in Haniwa Figurine Faces

研究代表者

盧 忻 (Lu, Xin)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：00431461

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：初年度では、埴輪の3Dモデルを用いた顔の類似性評価手法を提案し、6体の埴輪で顔のパーツ配置の法則性が確認された。第2年度では、これを基に型式分類手法を開発し、36体の埴輪を4つのグループに分類した。提案手法は型式分類に有効であり、考古学的調査の支援ツールとなることが示された。最終年度では、3次元点群から生成した2次元画像を用いた簡易手法を提案し、高速かつ効率的な識別が可能となった。さらに、顔のパーツ自動抽出や石器識別、3D計測手法の確立により、技術の高度化と産業応用の可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、人物埴輪顔面の定量的評価方法を確立し、製作規格の解明に貢献すること、さらに、考古学支援システム（CAES）を開発して様々な遺物分析に応用可能な技術基盤を提供し、考古学研究の発展に寄与する点にある。これにより、従来の定性的評価から脱却し、科学的かつ客観的な分析手法を提供する。社会的意義としては、非接触・非破壊の3次元計測技術を用いて貴重な文化財を傷つけることなく分析できる点で、文化財保護に重要である。また、新たな知見が歴史教育や文化的アイデンティティの形成に貢献し、博物館展示をより魅力的にする。

研究成果の概要（英文）：In the first year, we proposed a method to evaluate the similarity of Haniwa faces using 3D models and confirmed the regularity of facial part placement in six Haniwa figurines. In the second year, based on these findings, we developed a classification method and classified 36 Haniwa figurines into four groups. This proposed method proved effective for classification and showed potential as a tool to support archaeological research. In the final year, we proposed a simplified method using 2D images generated from 3D point clouds, enabling faster and more efficient identification. Additionally, the establishment of automatic extraction of facial parts, improved stone tool identification, and integrated 3D measurement techniques demonstrated the advancement of technology and potential industrial applications.

研究分野：情報考古学

キーワード：埴輪 顔面分析 3次元計測 製作規格 考古学支援システム 類似性 定量化 可視化

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

九十九里地域の人物埴輪を A・B タイプで二分する研究が行われているが、近年、実物資料にもとづいた細分化が進んでおり、下総型も加え、三種類に分類される。この三種類の人物埴輪は、全体的に小型で半身像のものが多く、顔の表情は目が細長く切れ長で、鼻や腕は棒状粘土を貼り付けて表現するという特徴を持つ。さらに、それぞれ個別に調査すると、埴輪の形態と製作技法の特徴の上で系譜を異にする埴輪が混在している可能性が指摘されており、同工品分析によって三つの工人集団が相互に関わり合いながら、地域社会の中で生産を行った点が明らかになっている。例えば、考古学者は出土した人物埴輪の器台突帯や裾部の省略に着目し、工人を段階別に分類して製作組織のモデルを示した。また、彼らは人物埴輪の鼻の形態により、九十九里 A・B タイプ、下総型をそれぞれ「三角錐の粘土を貼付」、「円棒を斜めに切って貼付」、「円棒を貼付し、雑にナデつける」という製作技法で区別した。このような目視による同工品推定は、定性的な評価となるため、考古学者の推定を裏付ける定量的な評価法が必要である。3次元計測による3次元座標点群は、実測図や写真、拓本とは異なる「第4の記録」として位置づけられる。従来の記録方法と比べて、3次元座標点群から得られる情報は圧倒的に多い。ゆえに、目視による観察での評価手法と比較して、3次元座標点群に基づく類似度評価は、客観的な評価が可能となり、考古学者の推定を裏付けられる有効な手段となる。本課題では、早稲田大学文学部考古学研究室が計測した、九十九里の埴輪の3次元座標点群を対象として、人物埴輪顔面の類似度を定量的に評価することができるか、また、個体間・古墳館の類似度による分類が、考古学者による定性的分類の裏付けとして利用可能かが、本研究課題の核心をなす学術的「問い」である。

2. 研究の目的

本研究は、以下の3点の方法を確立することを目的とする。

- (1) 人物埴輪顔面の3次元座標点群から、多種類の3次元特徴量を算出する。
- (2) 次元特徴量を指数化し、その指数の類似度を計算することによって個体間・古墳間に人物埴輪製作技法の共通点と差異点を定量的に確かめて、統計的に可視化する。
- (3) 人物埴輪製作技法の共通点と差異点にもとづいて、今までの個体間・古墳間の分類の妥当性を客観的に提示する。

3. 研究の方法

- (1) 顔面輪郭の成形技法に関する特徴量の算出：九十九里の人物埴輪の顔面は、「粘土板貼付」と呼ばれている顔面輪郭の成形技法で作られている。粘土板の貼り付けによって作られた顔面は、下部が円形もしくは楕円形であり、髭を表現する場合にやや細長い逆三角形になる。顔面形態も半球形と筒形でとなり、これらの形状は両方とも楕円体で表すことができる。よって、3次元計測で得られた人物埴輪顔面の点群に、楕円体を当てはめる方法を開発し、CAES システムに組み込む。また、その楕円体のサイズ、向きおよび2次曲面が人物埴輪顔面の特徴量であることを検証する。
- (2) 目と口の穿孔技法に関する特徴量の算出：埴輪の顔を解析するために、目、鼻、口の位置を特定する必要がある。このテーマでは、まず目と口の位置を、点群に空いている穴を抽出することで、推定する方法を開発する。例えば、3次元点群を解析し、目と口の輪郭を抽出すれば、その輪郭から目と口のサイズ、位置、形状などの特徴量を求め、穿孔技法を区別することができる。
- (3) 鼻の連結技法に関する特徴量の算出：本テーマでは、埴輪顔面に当てはめた楕円体を基準として、顔面の点群から鼻のみの点群を切り取る方法を開発する。これによって、例えば、鼻部分を表す点群を抽出することで、鼻のサイズ、位置、形状などの特徴量を算出し、手法や癖にもとづいて見出した工人差を明らかにすることができる。
- (4) 種々の類似度の計算と可視化：まず、九十九里地域から出土した、人物埴輪36点を解析し、各部位の点群をそのまま用いて個体間・古墳間の点群類似度を計算する。また、(1)から(3)で開発した手法で算出された埴輪頭部4つの部位の特徴量を、顔面サイズによって正規化して指数化する。埴輪顔面、目、口および鼻の指数を組み合わせ、人物埴輪の個体間・古墳間の指数類似度を求める。さらに、同じように種々の類似度を統計的に可視化し、人物埴輪顔面に関する製作規格の有無を探る。その後、CAES システムへ組み込み、外部協力者および共同研究者らに考古学的立場で評価をお願いする。
- (5) 分類結果の顕在化：(4)の手法を踏襲しながら、算出された様々な類似度を用いて城倉の個体間・古墳間の分類結果を多角的な視点から客観的に顕在化し、そこから当時の製作組織のモデルを明らかにする試みを行う。その後、(4)と同じように外部協力者および共同研究者らに考古学的立場で評価をお願いする。
- (6) 類似度の計算と可視化ツールの開発：考古学支援ソフト CAES システムの中の必要な機能として、様々な遺物表面に対応できる、計測点群類似性の定量化・可視化ツールを開発し、フリーソフトウェアの形で Web サイト等を通じて広く公開する。

4. 研究成果

初年度では、埴輪の 3D モデルを用いて顔の類似性を定量的に評価する新しい手法を提案した [2]。本手法では、楕円体フィッティングとトポロジカルな穴の検出を組み合わせたハイブリッド手法による顔のアライメント、鼻の点群を基準としたスケール調整を行う。また、二乗平均平方根誤差 (RMSE) と鼻の重心から他のパーツの重心に向かう線の平均角度誤差 (MAE) という 2 種類の類似度指標を導入する。本提案手法を 6 体の埴輪の 3D モデルに適用した結果、鼻・口・目の配置には一定の法則性があるという考古学的仮説を定量的に裏付けることができた。RMSE と MAE が小さい組み合わせほど、パーツの形状と配置が近いことが示された。また、鼻・口・目の位置の違いなどの個体差も定量化できた。考古学者からは、提案手法は埴輪の分析に非常に有用であるとの評価を得ている。

第 2 年度では、埴輪の 3D モデルを用いて顔の類似性に基づく型式分類の定量的評価手法を提案した [1]。この手法では、初年度に得た結果を基に、楕円体フィッティングとトポロジカルな穴の検出を組み合わせた高精度な顔のアライメントを行った。さらに、鼻の点群を基準とした拡張 ICP アルゴリズム (sICP) によるスケール調整と類似度 (RMSE) の算出を行い、階層的クラスタリングアルゴリズムによる型式分類 (図 1) を実施した。36 体の埴輪の 3D モデル (図 2) に提案手法を適用した結果、考古学者の見解とほぼ一致する 4 つのグループ (九十九里 A 型, 九十九里 B 型 (殿塚古墳), 九十九里 B 型 ((経塚古墳), 下総型) に分類された。また、同じ九十九里 B 型でも、殿塚古墳と経塚古墳の埴輪は非常に類似しており、同じ工人集団によって製作された可能性が高いことが示された。提案手法は埴輪の型式分類に有効であり、考古学的調査を支援するツールとなり得ることが示された。考古学者からも、その有用性が確認されている。

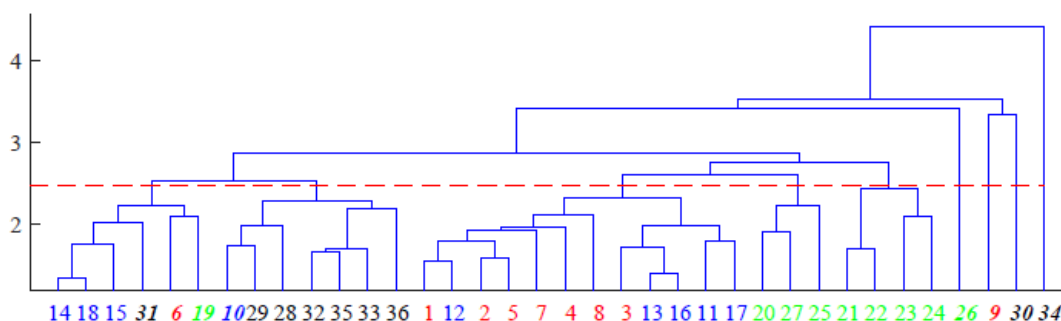


図 1 : 階層的クラスタリングアルゴリズムによる埴輪の型式分類

最終年度では、初年度と第 2 年度に得た結果を基に、3 次元計測点群から生成した 2 次元画像に基づいて、埴輪の顔の類似性を定量的に評価するさらに簡易な手法を提案した [3]。この手法では、事前学習済みのディープラーニングモデル (Yu-Net) を用いて目、鼻、口のランドマークを検出し、その位置の特徴量に基づいて非類似度を算出する。36 体の埴輪の 3 次元計測点群を使用し、階層的クラスタリングを行った結果、考古学的な分類 (九十九里 A 型, 九十九里 B 型 (殿塚古墳, 経塚古墳), 下総型) と概ね一致することが実験的に示された。また、手動でランドマーク位置を修正すると、考古学的視点により近い結果となった。提案手法は、事前学習済みモデルを用いて 3 次元点群から生成した 2 次元画像間の非類似度を計算するため、先行研究の反復処理に基づく点群マッチングよりも高速であり、計算リソースが少なく済むという利点がある。本研究により、考古学的分類を定量的に裏付ける可能性が示された。

また、3 次元点群データから埴輪の顔のパーツを自動抽出する手法を提案した [4]。この手法は、点群の中心軸推定、円柱投影、穴の輪郭点検出、目と口の特特定、鼻の位置推定などの手順で構成されている。実験では、千葉県九十九里地域の 4 つの古墳から出土した 27 体の埴輪の 3D モデルを使用した。各実験で閾値を手動で設定し、27 体中 20 体で正しい顔のパーツが抽出されたことを目視で確認した。失敗したケースの考察として、中心軸の推定が正しくできなかったことや、顔に似た配置の穴が複数抽出されたこと、鼻が平らで認識されなかったことなどが挙げられる。本研究により、埴輪全体の点群から目と口を抽出することができ、ほとんどのモデルで正しい顔のパーツが抽出された。今後は、中心軸の推定方法の見直しや、鼻を含むより精密な抽出方法の開発、関連研究への応用が期待される。

さらに、石器の識別精度と速度を向上させるために、2次元マッチング（Hu モーメント）と3次元マッチング（ICP アルゴリズム）に加えて、3次元的な特徴量である D2 分布を導入した新しい手法を提案した[5]。実験では、16 個の石器（識別番号 21～36）を使用し、提案手法と先行研究の手法を比較した。結果として、正解の候補が上位にランクされる割合は提案手法で 56%（先行研究は 38%）、正解の候補の最低ランクは提案手法で 6 位（先行研究は 9 位）、ICP アルゴリズムの適用回数は提案手法で 160 回（先行研究は 320 回）となり、提案手法は先行研究と比べて識別精度が向上し、処理速度も改善されたことが示された。一方で、一部の厚みのある石器については、識別精度の改善が見られなかった。本研究により、D2 分布を用いた 3 次元的な比較技術により、厚みのある石器の識別精度が向上することが示された。今後は、新しい手法を組み合わせることで、候補の絞り込み精度をさらに改善することが課題として挙げられる。

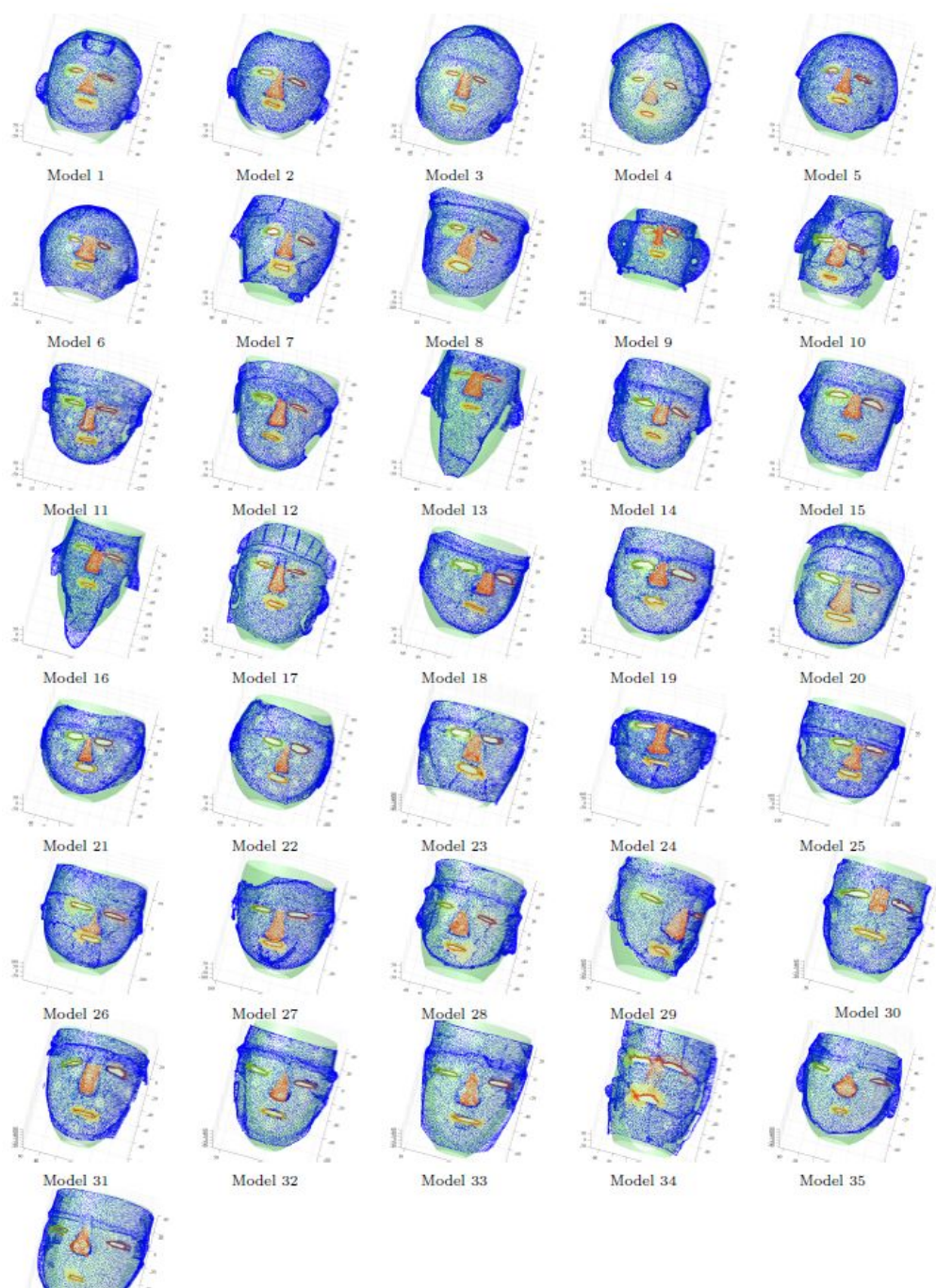


図 2：36 体の埴輪の顔パーツの検出

最後に、レーザースキャニング技術と写真測量技術を統合して、色情報が付加された 3 次元計測点群を生成する手法を確立した[6]。レーザースキャニング技術は絶対的なサイズや距離を正確に捉えることができるが、物体の隠れた部分や複雑な形状の部分の測定が困難である。一方、写真測量技術は物体の隠れた部分や複雑な形状も捉えることができるが、絶対的なサイズの測定に課題がある。これらの技術の特性を理解し、適切に組み合わせることで、より正確かつ高精度な 3 次元形状の復元を可能とすることが、3 次元計測システムの高度化につながると指摘している。また、マルチカメラを採用した新しいデバイス設計により、低コストかつ高精度な測定を

実現した。さらに、sICP アルゴリズムの導入により、異なるデータソースから得られた情報を効果的に統合し、一貫性のある高精度な 3D モデルを生成できることを示した。これにより、レーザー測定技術のコストと効率の問題を解決し、より多くの場面での活用を促進できると提案している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Xin Lu, Tsutomu Kinoshita, Akio Kimura and Kouichi Konno | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Quantitative Evaluation of Archaeological Classification Based on Facial Similarity of Haniwa Models | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Japan Association for Archaeoinformatics | 6. 最初と最後の頁 1-11 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Ryosuke Namioka, Tsutomu Kinoshita, Xin Lu, Akio Kimura and Kouichi Konno | 4. 巻 12177 |
| 2. 論文標題 A Study on Automatic Face Parts Extraction for Evaluating Face Similarity of Haniwa Based on 3D Measured Point Clouds | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 SPIE Proceedings | 6. 最初と最後の頁 121772B-4 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2666839 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Yoshitaka Sasaki, Akio Kimura, Xin Lu, Kouichi Konno | 4. 巻 13164 |
| 2. 論文標題 An Approach to Haniwa Face Similarity Evaluation Using 2D Images Derived from 3D Measurement Points | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 SPIE Proceedings | 6. 最初と最後の頁 1316417-4 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.3018542 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Takeru Fujisawa, Mengbo You, Akio Kimura, Xin Lu, Kouichi Konno | 4. 巻 13164 |
| 2. 論文標題 A Study on Automatic Facial Parts Extraction for Evaluating Facial Similarity of Haniwa | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 SPIE Proceedings | 6. 最初と最後の頁 1316430-4 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.3019573 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Ayaka Seto, Mengbo You, Tsutomu Kinoshita, Fumito Chiba, Kouichi Konno | 4. 巻 13164 |
| 2. 論文標題 A Method to Improve the Accuracy of Stone Tool Identification with D2 Distribution | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 SPIE Proceedings | 6. 最初と最後の頁 131642Y-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.3019564 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Hayato Murakami, Mengbo You, Morimichi Furudate, Xin Lu, Fumito Chiba, and Kouichi Konno | 4. 巻 13164 |
| 2. 論文標題 A Study on Measurement of Surface Shape by Combining Laser and Photogrammetry Techniques | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 SPIE Proceedings | 6. 最初と最後の頁 131642Z-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.3019567 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 加賀隼, 盧忻, 野口淳, 今野晃市 |
| 2. 発表標題 形状類似度評価のための石室の計測点群に基づく中空領域抽出法の検討 |
| 3. 学会等名 令和3年度 第1回芸術科学会東北支部研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|-------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 今野 晃市 (Konno Kouichi) (90333476) | 岩手大学・理工学部・教授 (11201) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------------------|--|--------------------------------------|----|
| 研究 分 担 者 | 木村 彰男 (Kimura Akio) (00281949) | 岩手大学・理工学部・准教授 (11201) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |