

土器 3D-RGB データの深層学習クラスター解析による型式・年代分類基準の検証

藤田 晴啓
Fujita Haruhiro

新潟国際情報大学
fujita@nuis.ac.jp

山本 亮
Yamamoto Ryo

東京国立博物館
yamamoto-r62@nich.go.jp

板垣 正敏
Itagaki Masatoshi

板垣正敏中小企業診断士事務所
itagakim@gmail.com

市川 賢太
Ichikawa Kenta

株式会社 BSN アイネット
ichikawa@bsnnet.co.jp

宮尾 亨
Miyao Toru

新潟県歴史博物館
miyao.toru@pref.niigata.lg.jp

河原 和好
Kawahara Kazuyoshi

新潟国際情報大学
kawahara@nuis.ac.jp

keywords: pseudo cluster label training, PCA + t-distributed stochastic neighbor embedding, pottery 3D-RGB data

1. 要 旨

専門家によって判断基準や種類分別が異なる恣意性の高い出土土器の「型式」や「年代」等の分類が妥当なものであるかを最新のデータサイエンス・深層学習により検証する一連の手法を提案する。光学スキャナーで土器資料を計測、ひとつひとつの 3D 形状, 色, 表面の質感情報である 3D-RGB データを取得し, 「ヒトの判断が介在しない」深層学習クラスター解析により導出したクラスターと, 「ヒトの判断基準による」専門家の分類ラベルで機械学習・推論した分類グループとの乖離あるいはマッチングを数理的に分析する。このことにより, 専門家の分類基準の妥当性を検証するという, 独創的な解析手法を提案し, 考古・文化財科学分野に新たな革新的領域を開くことを目指したい。検証の中心となる TensorFlow/Keras と scikit-learn k-means による深層学習クラスター解析モデルを試作, 解析用データとして公開されている 3D データセットである ModelNet10 を用い, 導出された深層学習クラスターと分類クラスグループをクラスターマトリックスを用いて検証した。色情報を持たない ModelNet10 の各分類グループはクラスター解析による導出クラスターに部分的に反映されており, その他のクラスターはヒトがこれまで分類したことのない「未知の分類基準」でクラスター化されていることが確認された。

2. 考古資料分類の問題点

考古学の分野では膨大な土器資料の時空間的位置づけを中心とする基礎的分析では, 簡便な方法として断面図を伴う実測図 (図 1) が描かれ, 分類の大きな根拠とする手法が行われているが, 土器資料の一箇所の断面ではなく, 特徴的な形状をひとつの断面図に表現するなど, 恣意的な情報が重用されてきた。このように考古学においては, 出土土器についての検討にあたって経験主義的な分類が行われることも多い。そのため特に型式分類の認定基準が曖昧であると, 往々にして同じ土器であっても認定者による異動が生じ, 混乱を招いてきた。このことが研究上のみならず, 特に専門的な立場ではない実際に様々な資料を取り扱う埋蔵文化財行政の担当者にとっては大きな負担となってきた。経験主義にもとづく主観的 분류の有効性が, 十分な検証を得ないまま運用されてしまっていることも大きな問題であると考えられる。

3. 関連分野での先行事例

深層学習法の文化財科学および考古学分野への応用は萌芽的な状況にある。近年試みられているのは調査報告書に多く掲載される 2次元の実測図, あるいは断面図を利用してフーリエ解析を行う方法である (館内, 2020年) [館内 20]。実測図 (図 1) あるいは断面図には作成者で

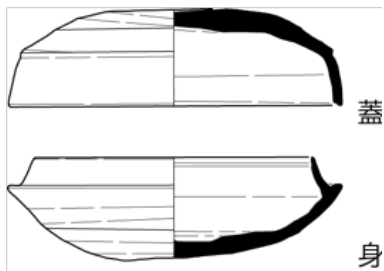


図1 須恵器の実測図

ある人間の主観的認識が反映され、バイアスがかかるとともに深層学習法でも誤差を生じる。また当該文献では3Dデータを2Dデータに置き換えている点で、3Dデータをそのまま利用する深層学習法とは異なる。

さらに、3Dデータを取得したのち断面図を作成して同様の分析を行うものもみられるが(井上ら, 2020) [井上20] 教師なしでクラスタリング分析を行いどのような分類結果が導かれるか検証するものであって、本研究のように専門家の年代や生産地の分類基準の検証を目指す目的とは異なる。考古分野でも3D-CNNを活用した事例はポンペイ近くのヘルクラネウムから出土した遺物に隠された文字をCTデータから3D-CNNにより復元した研究があるが、深層クラスター解析によるヒト判断基準の妥当性の数理的検証は先例が全くない。

4. 本研究の目的

クラスター解析は深層学習の一つで、これまでヒトがさまざまな情報から行ってきた主観的な要素が入る分類ではなく、純粋に数理処理で未知のクラスターを検知する技術である。本研究では既存の3Dデータセットを利用し、クラスタリングによる未知のグループの疑似ラベルをループで解析途中に戻し、3D教師あり学習とクラスタリングを繰り返すことにより、深層学習が導出するクラスターと「ヒトの判断基準による分類」とを比較検討する。

5. モデルの構築と ModelNet10 クラスター解析

1)3D点群情報は2)高密度のVoxel(2Dピクセルデータを3次元化したもの)に変換する(図2)。初回は乱数ノイズ発生で疑似ラベルを作成、3)3次元畳み込み学習ニューラルネットワークを少数回繰り返し、4)生成された特徴ベクトルにより5)主成分分析・K平均法によるクラスター解析を行う。6)クラスター結果を疑似ラベルとして3)に戻し、更なる教師あり学習を行う。この2重ループによるクラスター解析・疑似ラベル・畳み込み学習を繰り返すことにより、3D-RGBデータによる精度の高いクラスターが導出される(今回の実験はRGB情報

は使わず3Dのみ)。導出されたクラスター群は7)主成分分析・t分布確率的近傍埋込による可視化を行い、クラスター毎の須恵器の共通点から各クラスターの解釈付けを試みる。モデル・データは板垣ら(2021)によって報告されたものと同様である。この導出クラスターによる既往の人文的手法による須恵器分類基準の妥当性を検証するには、専門家による分類ラベルを付けたVoxelデータを3D-CNN(3次元畳み込み学習ニューラルネットワーク)を組み込んだマルチヘッド・マルチタスクモデルで学習・推論させ、その分類グループと7)により可視化されたクラスターの乖離あるいはマッチングを計測する。図3に構築した一連の深層学習クラスターモデルを示した。

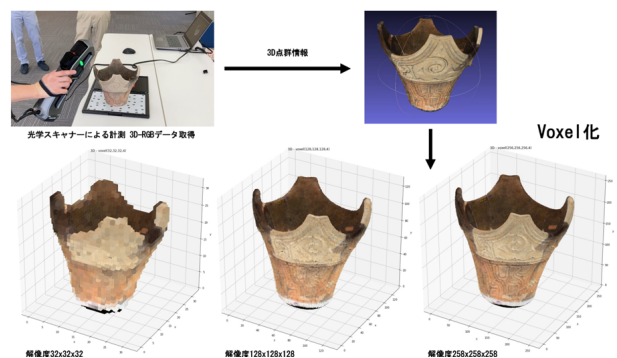


図2 3D点群データのVoxel化

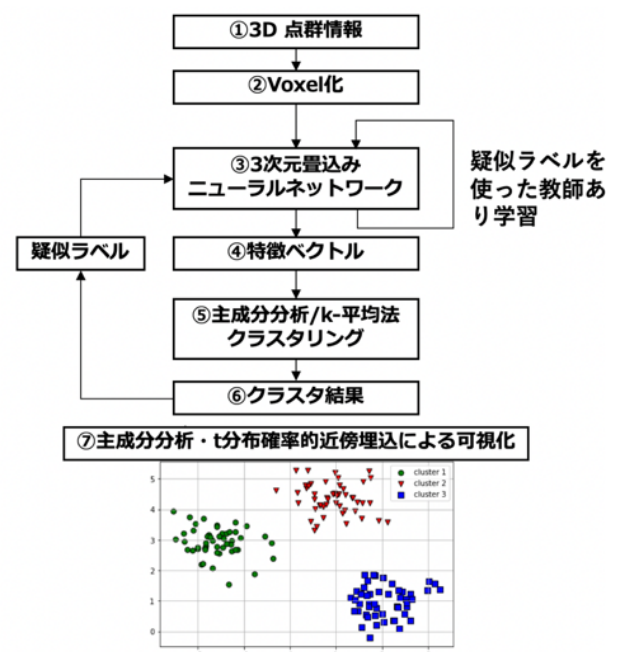


図3 疑似ラベル教師あり分類+クラスタリングモデル

6. 結果と考察

板垣ら (2021)[板垣 21] で発表されたデータセットの分類クラスラベルを行方向に、主成分分析・K-平均法クラスター解析により導出されたクラスターを列方向に配置したクラスター行列を図 4 に示した。10 種類の家具の 3D データセットである ModelNet10 は色情報を持たない純粋に形状だけのデータである。以下にデータ分類クラスと導出された 10 クラスター特徴の解釈を試みる。

クラスター 0 はほとんどが分類クラスのソファに収束している。クラスター 2 もほとんどが分類クラスのソファに収束している。このクラスター 0 とクラスター 2 は特異な形状の特徴として認識されている可能性がある。クラスター 1 はほとんどがモニターに収束しており、同分類クラスのクラスター間での分散もほぼクラスター 1 に集約されているので、ヒトの分類クラスとクラスター解析の特徴抽出が一致した事例である。

クラスター 3 は分類クラスのベッドがほとんどを占め、分類クラスのベッドもクラスター 3 に集中しているので、この事例もヒトの分類クラスとクラスター解析の特徴抽出が一致したと考えられる。一方クラスター 4 は分類クラスでは椅子、机、テーブルに分散しており、おそらく 4 本の脚がありその上は水平方向に平たい特徴を認識しているものと考えられる。同様にクラスター 6 は椅子と便座に集約しているが、形状と高さが類似しており、特徴と認識された可能性がある。

クラスター 7 はほとんどが分類クラスの椅子が集中しているが、クラスター 6 からは別のクラスターと認識されているので、形状面での特徴の差異の可能性が指摘される。クラスター 5、クラスター 8 および 9 については多数の分類クラスに分散しており、形状面での特徴の共通性が現在のところ把握できていない。

7. 本実験での知見と今後の解析予定

当研究で構築・解析した深層クラスター解析（疑似ラベル教師あり分類+クラスタリングモデル）では 3D 形状の認知がヒトと共通するもの、あるいは共通しないものがあることが明らかとなり、（ヒトの基準からみて）未知のクラスターが導出された。この事実からみて多数の土器 3D-RGB データを解析するとこれまでヒトの分類基準では検知できない、未知のクラスターを検出できる可能性は非常に高いといえる。

今後は古墳時代の須恵器 600 点前後、新潟県内の縄文 4 遺跡の出土縄文土器深鉢 4000 点をスキャナー計測する予定である。本研究ではデータセットの分類クラスを学習に使わないクラスター解析導出クラスターとデータセットの分類クラスグループをクラスターマトリックスにて分析することにより土器分類における専門家の分類基準の妥当性を数理的に検証できることに道筋がつけら

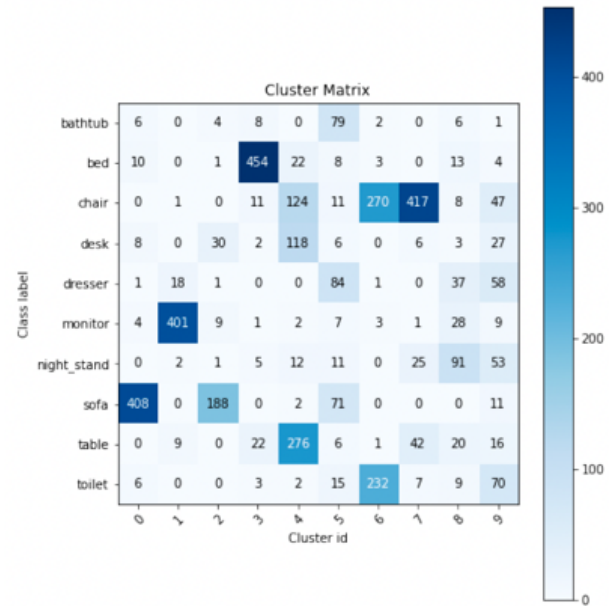


図 4 分類クラスと導出クラスター（クラスター行列）

れた。

8. 深層学習モデルとしての特徴と応用性

本研究ではクラスター結果を疑似ラベルとして 3D-CNN に返す 2 重ループモデル（図 3）がより高い精度のクラスターを導出し、土器サンプルの解析では専門家がこれまで分類したことのない基準でクラスターを創出できる独創的な手法と専門家の判断基準の検証することが可能となる。これまでは機械学習分野で物体認知モデルの学習用として公開された画像とラベルは正しいものとして広く研究開発に使用されてきた。しかし、古墳時代須恵器坏や縄文中期の土器のように生産年代、型式分類、産地同定が専門家でも一致しないようなサンプルを扱う場合、専門家の分類基準が妥当なものか検証する必要がある。深層学習・クラスター解析による専門家の判断基準の検証方法はこれまで開発されてこなかった。従って今後の研究の遂行は、文化財科学における土器分類のみならず、広く深層学習を使った学術研究や産業利用において革新的なマイルストーンを創ることに相当する。

9. 3D-RGB の発展性

3D-RGB データの活用は文化財科学の現場でも今後より広く普及することが見込まれる。高額でない光学スキャナーを用いる本研究のような 3D-RGB データに即応した基礎分析技術を確認することができれば、膨大な時間を費やしてきた年代や生産地の決定といった基礎的な資料の位置づけに関わる作業を簡略化し、専任の研究者のみならず、各自治体の埋蔵文化財担当者も含めて、生産論や

流通論といった文化財科学および考古学的研究にあたる時間を拡大させることにつながり、地域研究ひいては地域文化の発展に大いに貢献できる可能性を有する。また本研究が遺物資料の年代や生産地の分析方法として有効であることが認知されれば、資料報告にあたってより分析に適した方法での資料提示がなされ、日々蓄積されていく考古資料群についてよりビッグデータとしての活用機会を高める好循環が起こると期待できる。

謝 辞

本研究は科学研究費補助および新潟国際情報大学プロジェクト型共同研究の研究費助成をうけた。科学研究費補助は「学術変革領域研究 (A) (土器を掘る/20A102) (公募研究 R3-R4) , 3D マルチ入力・マルチ出力土器分類 DL モデルの開発研究」である。ここに謝意を表したい。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [井上 20] 井上隼多：人工知能による機械学習を用いた須恵器資料の断面形状分析, 日本情報考古学会講演論文集, Vol.23 (2020)
- [館内 20] 館内魁生：実測図を利用した形態の定量的解析の有効性, 日本情報考古学会講演論文集, Vol.23 (2020)
- [板垣 21] 板垣正敏, 市川健太, 藤田晴啓, 宮尾亨：縄文土器 3D 計測データによるクラスター解析モデルの検討, 考古文化財ディープラーニング研究会報告書, 新潟国際情報大学機関リポジトリ (2021)