

「人工知能による仏顔の様式解析とその系譜に関する研究」

藤岡 穰（人文学研究科）、長原 一（D3 センター）、中島悠太（D3 センター）

1. 研究の背景

2018 年度 5 ヶ年にわたり、基盤研究（A）「3 次元データに基づく人工知能による仏顔の様式研究」（以下、仏顔科研）により本研究を実施してきた。2023 年度からは新たに基盤研究（S）「ディープラーニングによる仏像の制作年代・地域推定システムの構築とその実装」により、本研究を継承・発展させる。

美術史研究の根幹の一つに、作者・流派・地域・時代等による類型的表現に注目する様式研究がある。ところが、そもそも様式を類型化するには、作品の個性が捨象され、他の類型との相対化をとらざるを得ない。また、美術作品であるがゆえに、その類型化にあたっては意味や機能、精神性等が意識されることもあり、その結果、抽象化や恣意性、主観が介在し、曖昧さが生じてしまう。様式研究においては、その曖昧さの克服が大きな課題と言える。

ある仏像がいつ、どこで制作されたかは、仏像研究における最も基本的な問いである。しかし、仏像の多くは制作年代をしめすテキスト情報をもたず、場所の属性（伝来）さえ不明な場合がある。それゆえ、その問いへの答えは、多くは研究者の様式観に基づく推定に依存してきた。しかし、上述のとおり様式観には恣意性や主観が介在するため、研究者ごとに相違があるだけでなく、個々の研究者のなかでも揺らぎがあり、判断に迷うことも少なくない。

仏像研究に関しては、たとえば日本の仏像の場合、『日本彫刻史基礎資料集成』（中央公論美術出版、1966 年～現在）によって、平安時代から鎌倉時代にかけての仏像の基

準的作例の詳細データが順次公開され、他の時代の仏像についても基礎データの公開が進み、研究の基盤が形成されてきた。中国の仏像の場合も、各地の石窟寺院における総合調査の報告、近年発掘された仏像も含む博物館の蔵品目録の刊行が進み、しばしば形式研究に基づく編年も試みられており、やはり研究の基盤が整いつつある。東南アジアや南アジアの仏像についても、欧米豪の研究者を中心として、着実に研究が進展している。しかしながら、なお研究者による様式観の相違は解消されず、造像銘記等によって制作事情が判明しない仏像の位置付け、類型的把握についてはかなりバラツキがあると言わざるを得ない。

本研究において AI を活用するのは、様式研究に客観的な視点をもたらし、その曖昧さを改善、解消するためである。十分な学習を経た AI であれば、仏像相互の類似を識別し、仏像の制作年代・地域、作者等を相当の確度をもって推定できるはずである。

2. 研究の目的

本研究は決して単に AI を活用したり、AI に全てを委ねたりするのではなく、AI によって識別された類似関係や推定された年代・地域等の情報を、これまでの仏像研究へとフィードバックすることを目的としている。本研究の核心をなす学術的「問い」は、AI による推定と従来の研究における推定とを照合し、必要に応じて各仏像の位置付けを更新し、かつそれを踏まえてインドから日本へといたる仏像の伝播、あるいは地域ごとの仏像の変遷、さらには作者等の

諸系譜を再検証する点、そしてその研究成果を社会実装する点にある。

3. 研究の方法

3.1 2次元画像による年代・地域の推定— 仏顔の系譜の再検証—

仏顔科研では当初、3次元画像に基づく解析を重視していたが、仏顔の2次元画像の3次元化のためには、既存のモデルを再学習によって仏顔向けモデルに修正する必要があることが判明した。一方、一定の地域、年代の2次元画像で試みた推定年代が、現状ではなお大きなずれを生じる場合もあるが、驚くほど正確な場合もあり、十分に参照に値することが明らかとなった。本研究においてその対象範囲を広げ、精度を高めたならば、仏像の様式観の更新・修正に大いに裨益することが期待される。

そこで、2次元画像のデータセットを拡充してDLに取り組み、年代に加えて地域を推定するDLモデルを構築する。そして、従来の研究における推定と照合することにより、位置づけを再検討すべき作例を抽出し、仏顔ひいては仏像の系譜の再検証を進める。

なお、2次元画像のデータセットに用いる画像は、撮影フリーの遺跡や博物館において撮影した仏像の画像、ないしはすでに公刊ないし公開されている仏像の画像に限定する。オンラインによるアクセスを可能にした場合にも、出典を明記するなど適切な対応をとることによって著作権や所有権上の問題が生じないからである。そもそも、大量のデータを処理するAIによる解析には高解像度の画像は容量が大きすぎてかえって不向きであり、また印刷のドットの影響も大きくないことが確認できている。

3.2 仏顔検索システムの構築と公開

仏顔科研において作成した検索システムは、データセット未構築の段階で試作したものであったため、精度は不十分だったが、にもかかわらず検索の結果、意外な仏顔が類似例として認識され、それによって初めて類似に気付くという事例がしばしばあった（図1）。



図1 検索システムの結果の一例

こうしたAIの活用による気付きは、仏像の位置付けに新たな視点をもたらし、仏像の系譜を再検証するうえでもきわめて有用である。AIとデータセットを共有することで精度を高めるとともに、このシステムについても公開し、年代と地域を超えて仏像の系譜を考えるための仏像研究ツールとする。

3.3 仏顔の2次元画像の3次元化モデルの構築と3次元画像の活用可能性の検証

仏顔科研では不調に終わった仏顔の2次元画像の3次元化をめざし、DLにより独自のモデルの構築を行う。第1段階として、同一の仏顔の多視点からの画像を用い、既存の顔認識モデルと対照しながらDLを進め、仏顔に適用し得る新たな3次元化モデルを構築する。次に第2段階として、仏顔の3次元画像を収集し、これをもとにモデルの構築を行う。

なお、3次元画像は、仏顔科研では再現性を重視して大容量の画像の取得に努めたが、本研究においては方針を改め、再現性よりもデータ量を確保することに努め、スマートフォンで撮影できるレベルの3次元画像を収集することとする。

実は、立体造形の識別、解析において、既存の顔認識プログラムも含め、実際にどのように3次元画像が活用されているかはなお不明な部分が多いとされる。そこで、派生的な問題ながら、あらためて3次元画像の活用可能性についても検証したい。

3.4 具体的課題への取り組み

仏顔科研におけるデータセットによる研究成果は、使用した画像の所有権や著作権への配慮から、具体的な成果は非公開とせざるを得ないというジレンマがあった。また、データセットを使用した年代推定モデルについても、研究成果を美術史研究に還元するには、究極的にはモデル自体の公開を必要とする。そうした点に鑑み、本研究ではA～Cの総合的な課題とは別に、DLや機械学習により以下の具体的な課題を設定する。

3.4.1 三十三間堂千体千手観音の顔貌の正面画像による識別可能性の検討

3.4.2 快慶作品、特に三尺阿弥陀の顔貌の変遷に関する3次元画像（CTスキャン画像）による検討

3.4.3 雲岡石窟の造営過程と仏顔の相関関係の検討

3.4.4 龍門石窟の造営過程と仏顔の相関関係の検討

4. 研究成果

本研究は、仏顔画像を収集し、また仏顔のデータセットを作成するための仏像史班と、それをディープラーニング等によって解析するDL班との協同によって進めるため、以下に各班について研究成果を記す。

仏像史班は、2023年度に引き続き、仏顔画像の解析のためのデータセットの作成

（仏顔画像が掲載されている書籍のスキニングとトリミング、付帯情報の入力）を継続した。また、仏顔の撮影フリーの2次元画像や多視点画像を収集するため、韓国のソウル、春川、中国の山西省、河北省、河南省、陝西省、甘粛省、インドのコルカタ、ビハール、サールナート、マトゥラー、アウランバーバード、デリー等において調査を実施した。

DL班は、仏顔画像の解析のための基盤技術の研究開発に取り組み、次の成果を挙げている。

(1) グラフによる各種付帯情報を付与した仏顔画像解析手法

DL分野における近年の画像解析では、画像の埋め込み空間が広く用いられている。これは、与えられた画像を高次元空間中のベクトルに写像するものであり、この空間中の位置（ベクトルが指す先）が様々な意味に対応する。既存の多くのアプローチでは、限られた概念の集合から単一の概念を画像に対応付け、埋め込み空間中の異なる領域がこの概念集合のそれぞれの概念を表すように写像を学習する。従って、同じ概念に対応する画像が、埋め込み空間中で近接するように写像される。

一方で、仏顔画像の解析では、造立年や仏師などのように様々な付帯情報を組み合わせて解析することにより、新たな発見等が期待される。

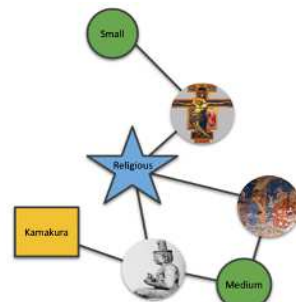


図1: 仏像と概念を結びつけるグラフの例

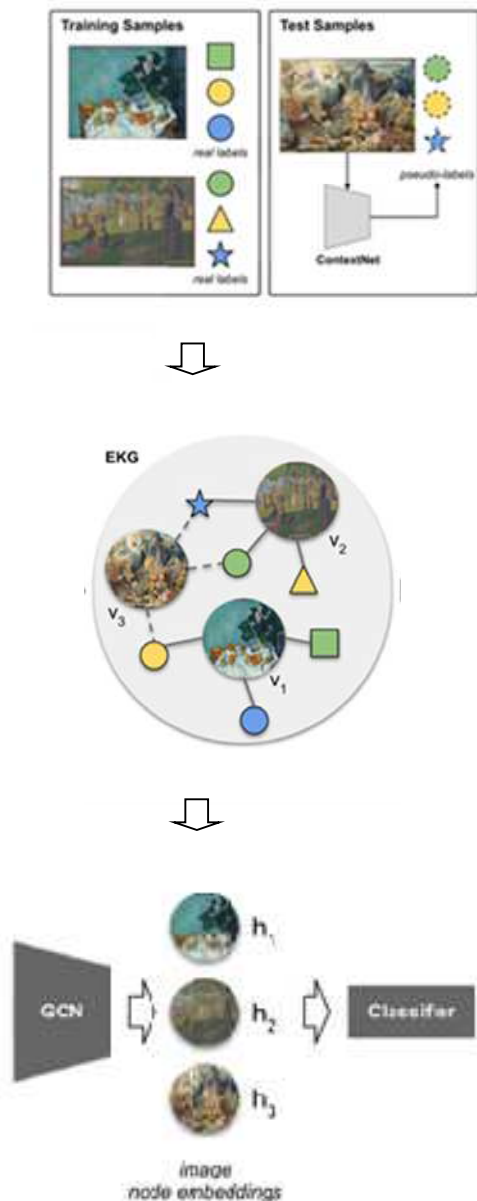


図 2: グラフを利用した画像埋め込みとその結果を利用した各種属性情報推定

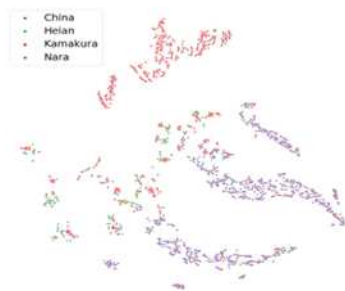


図 3: 埋め込み空間の可視化

そこで、本研究で提案する解析手法では、一つの画像に対して複数の概念集合からそれぞれひとつずつ概念が対応づけられる場合に、それら全てを同時に表すことを可能にする。具体的には、図 1 に例示するように、グラフを利用して概念と画像の関係を表す。グラフとは、ノードとエッジで構成されており、本研究では画像と概念を图中画像、または図形で表されるノードとした。また、エッジはノード間の線で表されるもので、ここではエッジの一端の画像が、他端の概念に対応づけることを表している。このようにすることにより、1 枚の画像に複数の概念に対応づけることができる。このグラフが与えられると、グラフ畳み込みネットワークと呼ばれる手法により、それぞれのノードの埋め込みのための写像を学習することができる。加えて、この埋め込みを利用して仏像画像から造立された時代、仏像のサイズ、様式などを推定するシステムを構築した。図 2 に埋め込みを含む提案手法の全体像を示す。本研究で構築中のデータセットを利用して評価したところ、既存のアプローチを利用して時代等を個別の推定する場合と比較して、多くの場合で推定精度が 10 ポイント以上向上した（例えば建立された世紀を推定するものでは、推定精度が 78% から 93% に向上している）。データセット中の仏像画像の埋め込みを可視化したものを図 3 に示す。この図 3 では、それぞれの画像を表す点を仏像が建立された時代ごとに異なる色で表示している。このことから、鎌倉と平安の一部が中国のもの近接している一方で、鎌倉のものはそれ自体が独立したグループを形成することがわかる。

(2)異なる粒度の付帯情報から学習可能な造立年推定手法

画像から種々の属性を推定する場合は、DL 分野では付帯情報を利用して画像の埋

め込みを学習し、その上で推定を行うことが多い。付帯情報は、通常同一の粒度で記述される。造立時期の例では、その時代（鎌倉、平安）などの場合もあれば、世紀、または年のいずれかで表されることになる。しかし、仏顔研究においては、文献などに記載されている場合を除いて、造立年は明らかではなく、時代や世紀の粒度での予測のみが与えられることが多い。実際に本研究で構築したデータセットでは、図4に示すように、造立年が既知の仏像も多く含まれるものの、時代や世紀しか明らかではないものも多数含まれている。既存のアプローチでは、画像と概念を対応付けるであったり、数値を対応づけるであったりは可能ではあるものの、時代や世紀のようにお互いが重なり合うような付帯情報からの学習はできなかった。

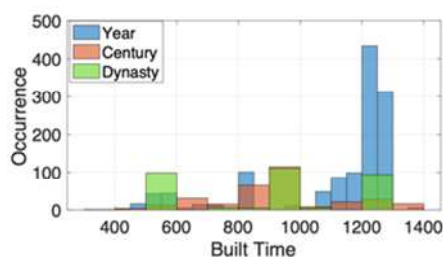


図4：データセット中の仏像の像立時期の分布

本研究では、仏顔画像からの造立時期推定に際して、時代や世紀、年などの異なる粒度の付帯情報を統一的に表現し、そこから写像を学習する手法を提案した。この手法では、時代などのような幅を持つものに対して、その区間のうちのいずれか1点で建立されたというように、確率による表現するアプローチを採用している。これにより、付帯情報が時代だけの画像であっても、学習に組み込むことができる。本研究で構築したデータセットでの評価の結果、平均の推定誤差は34年となり、単純なアプローチに比べて100年以上推定誤差を低減させ

ることができた。加えて、3名の仏像の研究者に、提案手法による建立年推定結果に同意するかを聴取したところ、図5のような結果が得られた。この図では、5段階の研究者の同意の度合いそれぞれについて、その画像の推定誤差を示している。研究者が強く同意する場合には、推定誤差は極めて低い傾向にあり、また、同意の度合いが下がると誤差も大きくなる点は直感と一致するものの、強く同意しない場合にも推定誤差が低くなる傾向が観測された。今回のデータセットは特定の文献を基に構築したものであるが、この結果は、聴取した研究者が考える造立年とデータセットで付帯情報として付与された造立年が異なることによる可能性がある。

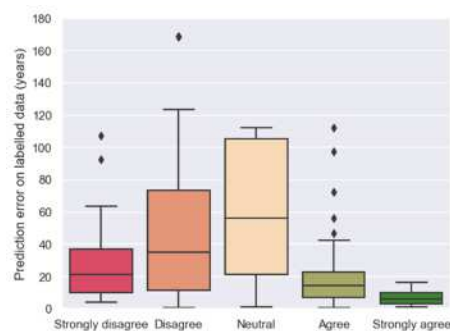


図5：提案手法による推定結果と研究者の同意度合いと推定誤差の関係

発表論文等

〔雑誌論文〕

- ① Cheikh Brahim El Vaigh, Noa Garcia, Benjamin Renoust, Chenhui Chu, Yuta Nakashima, Yiming Qian, Hajime Nagahara, “GNNBoost: boosting artwork classification with graph embeddings”, *Multimedia Tools and Application*, pp.1-21, Feb., 2025.
- ② 「金銅仏の東漸—中国から日本へ—」
藤岡穰、財団法人東洋哲学研究所編『シルクロード研究論集 第2巻 仏教東漸の道 西域・中国・極東篇』、査読無、pp.333-393、2024年

〔学会発表〕

- ① 「仏像診断の可能性と限界」CiRA リトリート招待講演、2025 年 2 月 4 日、藤岡穰
- ② 「宗教の進化を理解するための仏像画像プロジェクト」日本進化学会神奈川大会ポスター発表、2024 年 8 月 22 日、鴨下真由・西川有理・中分遥・中島悠太・藤岡穰・松前ひろみ

〔外部資金〕

- ① R4-8, 科学研究費助成金 基盤 S, 「ディープラーニングによる仏像の制作年代・地域推定システムの構築とその実装」, 23H05427, (代表)藤岡穰, (分担)長原一, 中島悠太