

知能情報処理によるデジタルアーカイブの 高度化技術

The Advanced Digital Archives Technologies by the Intelligent Information Processing
HAMAGAMI Tomoki

濱上知樹

1. はじめに

歴史資料を用いた人文・歴史研究者の資料研究においては、資料（データ）の収集と分析に基づく史実（事実）の解明・解釈という、自然科学的アプローチがとられる場合が少なくない。科学的・工学的手法を用いた高度な分析から得られるデータから、新たな知見を発見しようとする研究も多く行われている。その研究の一端として、歴史資料のデジタルアーカイブ化とその利活用の研究がある。デジタルアーカイブとは、貴重な歴史資料をデータ化し、計算機利用により様々な応用が可能なデータベースとして管理・運用する考え方である。デジタルアーカイブ化の流れとその関連研究は、貴重な歴史資料の永続的な記録と再発見の手段として大きく期待されている。

一方、近年の計算機技術とネットワークの飛躍的な発展を背景に超大規模データ（Big data）を取り扱う技術が様々な分野で注目されている。Big data では、従来のデータの取り扱いとは異なり、音声や画像などのようにそのままではメタ情報をもたない非構造なデータが時間的広がりをもって大量に存在する点に特徴がある。

デジタルアーカイブの多くもまた、画像を中心としたメタ情報をもたない大規模な非構造データである。これを用いた資料研究や高度な展示技術とは、非構造データの中からメタ情報を抽出、視覚化することで、新たな知の構造の発見につなげようとする Big data の処理にほかならない。たとえば、研究者と資料との知的共同作業を、高度な情報処理によって支援することができれば、新たな知の構造の発見につながる。また、専門的知識をもたない鑑賞者にとっては、新たな知の拡がりが見られる知的鑑賞の手段となる。

本研究では、新たな人文・歴史研究の支援や知的な展示・鑑賞の実現にむけて、高解像度画像データを中心としたデジタルアーカイブの知的処理を進めている。特に、小袖屏風を対象とした高精細画像データベースの構築と、その中に含まれる様々なメタ情報の抽出および高度な展示技術に関する共同研究を推進している。

本稿では、これまでの歴史資料デジタルアーカイブ化の動向を振り返り、現在進めている小袖屏風を用いた知的構造の抽出と活用技術について紹介する。

2. 歴史資料デジタルアーカイブ

歴史資料デジタルアーカイブ研究の経緯を図1に示す。我が国における歴史資料デジタルアーカイブ化は、1980年代に、リレーショナルデータベース（RDB）におけるマルチメディアデータとその時空間表現に関する研究にその萌芽がみられる [1]。90年代になると、デジタルアーカイブという和製英語がつくられ、インターネットの普及とともに大規模なデジタルアーカイブとその活用方法の議論が始まった。2000年以降は、e-Japan構想の中に、デジタルコンテンツの充実が施策目標としてかけられ、美術館、博物館、図書館等の所蔵データのデジタルアーカイブ化も重要なコンテンツとして位置づけられるようになった。現在、その成果は、国立文化財機構の有する重要文化財の超高精細画像の閲覧システム e 国宝 [2] として、誰でも超高精細な画像を手軽に閲覧できる環境として整いつつある。

世界的動向をみてみると、1990年代の情報ハイウェイ構想の中に、芸術や人文科学、社会科学に関するデジタルコンテンツの充実が位置づけられ、2003年には、UNESCOによる「デジタル遺産の保存に関する憲章及びガイドラインの策定」が、また2005年には、600万点の資料をデジタル化し、インターネット公開を目指す大規模プロジェクト「EU デジタル図書館構想」計画がたてられた。現在、そのプロトタイプとなる「Europeana」 [3] が公開されている。また、Googleは、Google Art Projectにおいて、単に作品の記録にとどまらない新たなデジタルアーカイブの在り方を探っている [4]。

以上のように、この20年間における、歴史資料のデジタルアーカイブの蓄積と発展は目覚ましいものがあるが、近年の高度な情報処理技術の発展がその可能性を飛躍的に高めてきたことはいまでもない。今後さらに増え続けるアーカイブデータを利活用するためには、人文・歴史研究と情報技術が融合した新たな知的情報処理—すなわち、歴史を遡って発生する Big data からの知の発見を促す研究が必要である。

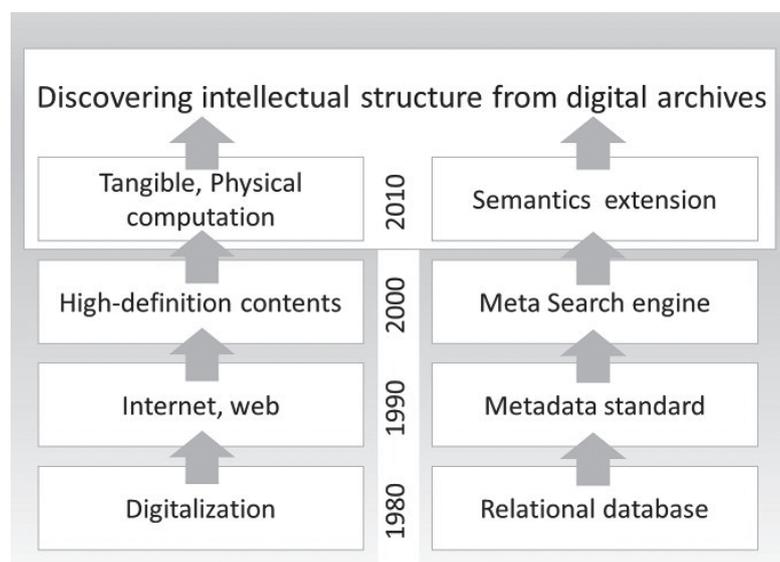


Fig.1 The technical transition and evolution in digital archives.

3. 小袖屏風画像データからの知の抽出

現在、筆者らは、国立歴史民俗博物館蔵の「野村コレクション」[5]のうちの小袖屏風を題材にした、画像デジタルアーカイブの知的利用に関する研究を推進している。小袖とは、平安時代には貴族の下着であったが、次第に上着として着られるようになり、現在の着物の直接的な源流となった衣服である。桃山から江戸にかけて小袖の文様はその時代背景と強く結びつきながら変化し、様々な文様、配置、技法が時代とともに変遷してきた[6]。

「野村コレクション」は、小袖を二曲一隻に仕立てた屏風であり、約100隻が収蔵されている。辻が花、縫箔、慶長小袖、寛文小袖、元禄小袖、友禅染などの小袖の諸相を網羅し、染織資料として史資料として重要な役割を果たす。

図2に小袖屏風のサンプルを示す。

屏風仕立にすることにより、その耐久性・保存性は格段に向上したものの、古い繊維は極めてもろく、展示のための移動や光・外気に触れることによる劣化は避けられない。また、100隻におよぶ屏風のミクロからマクロにいたる様々な文様、配置、モチーフ、技法等のメタ情報を詳細に観察・比較し、分類・分析をする研究においては、現物へのアクセスのしにくさが大きな障壁になる。

そこで本研究では、デジタルアーカイブの高度利用を目的に、まず高精細画像処理による小袖屏風に含まれる様々なメタ情報の抽出を行う。そして、得られたメタ情報から構造抽出およびインデクス化をはかり、デジタルアーカイブの知的利用のための知的構造化をはかる。最終的には、知的構造化がなされたデジタルアーカイブを研究支援と高度展示に応用する。これらの取り組みを実現するために、以下の研究を進めている。

- (1) 高精細小袖画像からの特徴点と構造データの抽出
- (2) メタデータベースの設計と高度知的検索システム
- (3) 非破壊検査技術を利用した分析
- (4) アーカイブデータを用いた知的展示・鑑賞方法

本稿では、このうち(1)と(4)の検討状況を述べる。



Fig.2 Nomura Collection: Kosode screens

4. 高精細小袖画像からの特徴点と構造データの抽出

小袖屏風に貼られている小袖は、構造化されていない様々なメタ情報を含んでいる。分類上の特質（文様、地色、地質、諸技法）のほかに、メタファー、背景にあるストーリー、マクロからミクロに至る構図上の特徴などの非言語的な情報も含んでいる。これらの小袖屏風のメタ情報が与える印象の類似性や、陽に現れない部分の共通性などが抽出できれば、小袖屏風に含まれる隠れたセマンティクスや新たな構造の発見につながる。また、小袖屏風の資料分析においては、小袖表面の柄や織、文様等の様々な特徴をもとに、他資料間との類似性や連続性に着目した分析が行われる。屏風上に貼られた小袖は、元来の様子そのままとは限らず、断片からの再構成や創作となっている場合も多い。これらの制作過程までを含めた資料をまたぐ情報の構造が抽出できれば、これまでにない展示、検索等への応用が期待できる。

この目的のために、本研究では、まず、以下に示す手順により画像中に含まれる特徴を様々なレベルで抽出した。

1. 高精細画像の取得

8×10 ポジフィルムに撮影された96枚の画像を2,000dpiでスキャンする。サイズはおおよそ19,500×15,500pix 24bitである。これは小袖屏風自体の実寸に対する解像度に換算すると約200dpiに相当する。オリジナルの画像を512×512pixのサイズの画像に分割する。この画像の集合をレイヤー0と呼ぶ。レイヤー0に属する画像は約1,200枚となる。そして隣接するレイヤー0の画像を4枚合わせた画像をつくり、512×512pixにリサイズした分割画像を生成する。これをレイヤー1と呼びその枚数は約300枚である。同様の処理を繰り返し、最後に全景が512×512pixの画像に収まるまで同サイズの縮小画像を作成する。その結果、およそ6レイヤーの階層画像集合が約1,600枚得られる。

2. 特徴点の抽出

各画像に対し、SIFT特徴量を用いた類似画像領域の抽出を行う。SIFT特徴量[7]は画像の局所的な特徴を表し、スケールスペースを使った照明変化や回転、拡大縮小に不変な頑強な性質をもつ。ここでは、局所特徴ベクトルとして周辺領域を一辺4ブロックの計16ブロックに分割したのちに、ブロックごとに8方向（45度ずつ）の勾配方向ヒストグラムを作成する。ヒストグラムの方向128次元が特徴量となる。

3. 近接グラフによる構造抽出

次に、得られた特徴点によってつくられる構造を近接グラフによって抽出[8]し、資料間の類似性や相似性を定量的に評価する。特徴点から近接グラフをつくるために以下の式に基づきエッジを生成する。

$$E = \left\{ e_{ij} | \forall i, j \frac{\|P_i - P_j\|}{\sqrt{\sigma_i \sigma_j}} < \chi \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで E は特徴点に接続するエッジの集合, e_{ij} は特徴点 ij 間のリンク, $P_i P_j$ は座標, σ は特徴点のスケール, χ は構造の大きさに相当するパラメータである。この式は χ 以上の場合, エッジが作成されないことを意味する。これによりスケールの大きな点同士は遠くに, スケールの小さな特徴点同士は近くで結合され, エッジで接続された特徴点のクラスタが得られる。

また, SIFT 特徴点は一般的にスケールの大きさと信頼度が比例している。そのため, 画像中の特徴点をスケールに基づいてグラフとして分割することで, より信頼度の高い構造抽出が可能となる。グラフの階層数を L , 階層レベルを l とする。特徴点のスケールに基づいてグラフを部分グラフ $\{G_l\}_{l=1}^L$ の集合に分解するには以下の式に示す閾値 s_l を用いる。

$$s_l = \sigma_{min} \left(\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{min}} \right)^{\frac{l-1}{L-1}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ は各画像における特徴点のスケールの最大値と最小値である。各階層レベル l において, スケール σ が閾値 s_l より大きい特徴のみを保有する。以上の手法に基づき, 構造を抽出した例を, 図3に示す。



whole image+feature points graph The magnified view
Fig.3 An example of extracting feature points and structure of graph.

4. Earth Mover's Distance による類似性評価

以上の過程で得られたグラフに対し, Earth Mover's Distance (EMD) [9] と呼ばれる構造の類似性を評価する尺度で評価する。EMD は, 2つの分布間の距離を測るのに用いられる距離である。分布は特徴量と供給量 (または需要量) の集合 (シグネチャ) からなる。EMD は線形計画問題である輸送問題の解に基づき, 以下の手順で計算される。

グラフ中の特徴点数が key であるとき, すべての特徴点に需要量, 供給量 w を平等に割り当てる。1枚の画像がもつ総需要量, 供給量の合計が1のとき, 各特徴点の w は $1/key$ となる。ここで各特徴点のまとまりを $group_i (1 \leq i \leq N)$ とする。

$|group_i|$ は $group_i$ を構成する特徴点の数である。 $group_i$ に属する特徴点の需要量, 供給量が最も大きくなる, $a/key \times N$ (a は定数) の需要量, 供給量を $|group_i|$ の比に応じて分配する最適化問題となる。このようにして得られた EMD が大きいグラフほど, 近い構造を有すると評価でき, 異

なる小袖画像から抽出されたグラフの類似性をはかり、類似画像検索の指標にすることができる。図4に全景に対してEMDを評価した結果をもとに、自己組織化マップ(Self-organizing map: SOM)を用いて類似性を評価した結果を示す。いくつものカテゴリに分類されるとともに、代表的な様式のクラスができていることが確認できる。

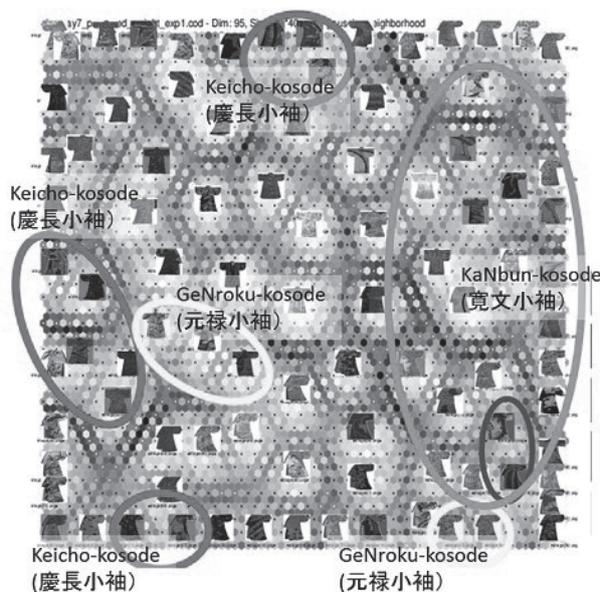


Fig.4 The result of self organizing map with the similarity of pattern structure.

5. アーカイブデータを用いた知的展示・鑑賞方法

近年、コンピュータと人間とのインタラクションを通して、情報と実空間をつなぐ Physical Computing [10] や Tangible bit [11] の技術を、教育や芸術分野へ応用する試みが始まっている。たとえば、デジタルミュージアムにおいては、デジタル映像の閲覧だけでなく、自由な拡大・縮小はもちろん、視点の移動やその中に含まれるメタ情報の提示をタッチパネル上で操作することが珍しくなくなっている。

小袖屏風は、様々な素材や技法がつかわれており、微細な凹凸や光源のあたり方によって様々な表情をみせる。鑑賞者にとっては、ある視点方向からの映像だけでなく、様々な方向から対象を観測することで、対象の存在感や応答性を感じ取り、より深い鑑賞が可能となる。

本研究においては、大量のデジタルアーカイブデータを利用して、高精細な画像の再生にとどまらず、鑑賞する人と対象（モノ）との物理的な相互作用を再現することで、高い現実性を再現することをめざしている。そのために、見ている視点による光線の反射の違いを考慮した、視点の移動による対象の変化を再現するシステムの開発をめざしている。

物体の反射光を再現する手法としては、Bidirectional Reflectance Distribution Function: BRDF (双方向反射率分布関数) による反射特性のモデル化が知られている [12]。BRDF は点ごとの反射特性をモデル化することで微細な凹凸による反射の影響が再現できるが、繊維のようなテクスチャ

をもった物体に対しては、小領域の光の挙動をモデル化した Bidirectional Texture Function: BTF (双方向テクスチャ関数) による表現もできる [13]。BTF の結果を CG として再現する試みもあるが、本研究ではフォトリアルな画像を目指すために、実体の 3 次元スキャンが必要となる。しかし、小袖屏風のような大型の資料に対し、BTF や 3 次元スキャンを直接精度よく行うことは困難である。

そこで、本研究では、資料に負荷をかけず、簡便な撮像により同様の効果が得られる手法を検討した。以下に手順を示す。

- (1) 図 5 に示すように、カメラを固定した上で光源を任意に移動させ、Full HD の動画として撮影する。このとき、基準になる照明位置をアンカー静止画像として別に記録をする。基準になる照明位置は、図 5 に示すように、レンズの光軸に対しておよそ $\frac{\pi}{2}$ となる 4 点である。
- (2) 得られた動画の各フレームを単位とする多点照明画像を、自己組織化マップ (SOM) により半球上にマッピングする。このとき、先に撮像されたアンカー画像はマップ上に固定し、その周辺の画像を補完するように他画像のマッピングを行う。図 6 に、4 点をアンカーに、125 フレームをマッピングに用いた場合の SOM の結果と半球状の視点位置からの見え方を示す。このように、あらかじめアンカーを固定することで、特段の位置決めを行わず撮像したフレームを連続的に配置させている。その結果、撮像時間の短縮と処理の簡易化が可能になる。
- (3) SOM のマッピング結果をもとに、任意視点からの反射を再現する。このとき、視点の位置を半球外側から対象を眺めた場合の映像として、近接の 4 画像を線形合成した画像をリアルタイムで作成する。

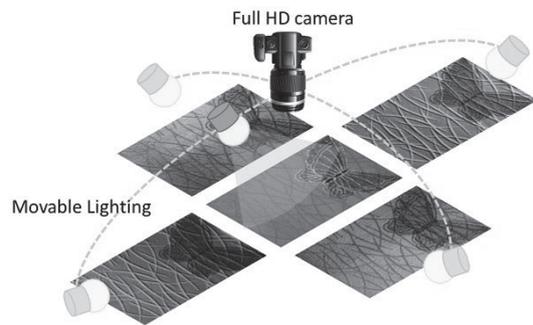


Fig.5 Image capturing system with multiple light source.

以上で述べた手法は、固定カメラと可動照明だけから構成されており、動画として対象を撮像しておくだけで、様々な光源からの反射を、視点を変えた場合の変化として擬似的に再現することができる。

再生にあたっては、観察者側の屏風に対する立ち位置、また、タブレット端末を手に持った際の顔の位置、傾きなどをもとに、実体と同様

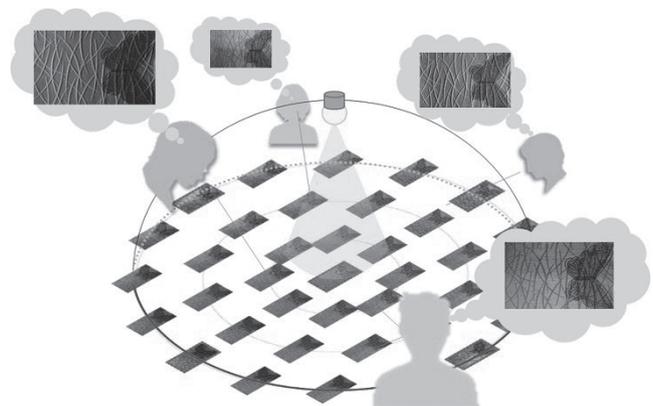


Fig.6 Free angle viewer system by interpolated multi-lighting image on the SOM.

のインタラクティブな見え方の変化を生じさせる。図7に、タブレット上に本システムを実装した例を示す。きわめて簡易な方法ながら、生地之光沢や凹凸によって変化する画像が合成可能となり、対象の存在感を再現させることが可能となった。

6. おわりに

近年急速な発展を遂げている歴史資料デジタルアーカイブ化を背景として、その中から新たな知の構造を抽出し、新たな知の発見を促進するインテリジェントシステムの研究について述べた。特に、(1) 小袖屏風画像を対象とした、高精細画像の特徴分析と構造の抽出、さらにこれを用いた相互類似性の評価が可能な画像データベースの構築、(2) 多点照明映像からの任意光源画像の合成および対象と鑑賞者との相互作用の再現が可能な鑑賞システムの研究について紹介した。これらの研究は従来の画像処理に加え、大量のデータの中から機械学習による新たな知識発見を促すなど、インテリジェントシステムがつなぐ人文系と情報科学の新たな文理融合研究の嚆矢になる。今後は、さらに規模を拡大した類似特徴検索システムおよび鑑賞システムの完成をめざすとともに、非破壊検査技術を応用したデータの測定およびメタデータの付与をはかり、さらなるデジタルアーカイブデータの知的活用をはかっていく。

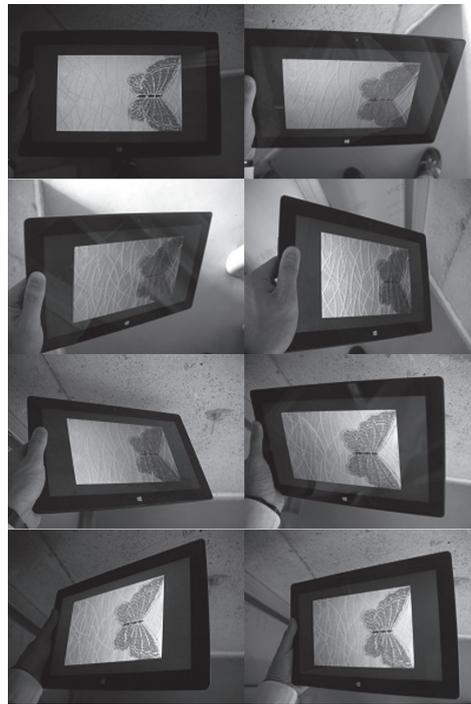


Fig.7 A prototype of intelligent viewer system.

参考文献

- [1] 八重樫純樹, “歴史系研究支援情報処理の研究”, 国立歴史民族博物館研究報告第53集 (1993)
- [2] 国立文化財機構: “e 国宝—国立博物館所蔵 国宝・重要文化財” (参照 2019-7-25) <http://www.emuseum.jp/>
- [3] Europeana Collections (参照 2019-7-25) <http://www.europeana.eu/portal/en>
- [4] Cultural Institute: “アートプロジェクト” (参照 2019-7-25) <http://www.google.com/culturalinstitute/project/art-project>
- [5] 小袖屏風—野村コレクション, 国立歴史民俗博物館編 (2002)
- [6] 江戸モードの誕生文様の流行とスター絵師, 丸山伸彦, 角川選書 (2008)
- [7] D. G. Low, “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,” *Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, pp.91-110 (2004)
- [8] 堀, 滝口, 有木, “グラフベクトル変換を用いたグラフ構造表現による一般物体認識”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011) 論文集, pp.387-394 (2011)
- [9] Rubner, Tomasi and Guibas, “The Earth Mover’s Distance as a Metric for Image Retrieval,” *International Journal of Computer Vision*, Vol.40, Issue 2, pp.99-121 (2000)
- [10] Dan O’Sullivan, et.al., “Physical Computing: Sensing and Controlling the Physical World with Computers,” *Course Technology Ptr* (2004)
- [11] Hiroshi Ishii, Brygg Ullmer, “Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms,” *Proceeding CHI’97 Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*,

pp.234-241 (1997)

- [12] S.Westin, et.al, "Predicting reflectance functions from complex surfaces", SIGGRAPH'92, pp.255-264 (1992)
- [13] Kristin J.Dana, et.al. "Reflectance and texture of real-world surfaces," ACM Trans. Graph., Vol.18, No.1, pp.1-34 (1999)

(横浜国立大学大学院工学研究院, 国立歴史民俗博物館共同研究員)

(2019年3月14日受付, 2019年8月5日審査終了)