

土器実測図データベースにおける類似検索

長谷川 修一・梅津 信幸

A Database of Measured Drawings of Pottery with Similarity Search Function

Shuichi HASEGAWA and Nobuyuki UMEZU

1970年の出版以来、R. Amiranの*Ancient Pottery of the Holy Land*は、南レヴァントで行われる発掘調査において、出土する土器の基本的なレファレンスとして使われてきたが、同書は出版から40年近く経った今も改訂されていない。

そこで、同書のような書籍に代わる国際的な基本資料となることを目指して土器実測図をデータベース化し、インターネット経由で検索できるシステムを構築することを提案する。文字情報だけでなく、土器の形状そのものをキーとした検索により、単なる書籍を越えた利便性を目指す。土器形状の特徴は、画像処理による器形断面の輪郭線をフーリエ記述子で表現した特徴量ベクトルを用いて表す。各器形類似度は、 n 次元空間における特徴量ベクトル間の距離として計算できる。162件の土器実測図に対する予備実験の結果から、本研究の検索手法は大規模なデータベースに対しても有効であることが示された。

キーワード：土器実測図、データベース、類似形状の検索、フーリエ記述子、特徴量ベクトル

Since its publication in 1970, R. Amiran's *Ancient Pottery of the Holy Land* has been a standard pottery reference for excavations in the southern Levant. This standard volume, however, has been used for approximately 40 years without any revision. An extensively updated database of measured drawings of pottery, including the ones recently published, has been developed as an alternative international reference to provide more details on Levantine ceramic styles. The database will be available on the internet, supplied with a similarity search function using pottery shape, which makes the database more useful and interactive than a book. The similarity between pottery shapes is defined as the distance between the feature vectors in n -dimensional space. The experimental results with 162 drawings of pottery showed that the proposed method has proved to be highly efficient for a large-scale database.

Key-words: measured drawings of pottery, database, similarity search, fourier descriptor, feature vector

1. はじめに

R. アミラン (Amiran) の著した *Ancient Pottery of the Holy Land* (「聖地の古代土器」) は、南レヴァントから出土した土器を集成した書物である (Amiran 1970)。1963年の出版以来、南レヴァントで行われる発掘調査において、同書は出土する土器の基本的なレファレンスとして使われてきた。この事実は、基本資料としての同書の完成度の高さを示している。しかし同時に、1970年の改訂以後約40年間に発掘された土器資料がまったく盛り込まれていないまま、同書が用いられているということをも意味している。

現在、南レヴァントで発掘調査に従事する調査団の多くは、同書の他に、各自の調査地域・調査対象時代に応じて

レファレンスとなる他の最低限の文献資料を現場に持ち込むことによって、同書のデータを補完している現状である。しかし、ただでさえ調査機材などでかさむ調査団の荷物に、重量のある複数の発掘報告書を加えることは、特に海外から南レヴァントへ調査のために毎シーズン移動している調査団にとっては大きな負担になる。このため、同書の改訂版に対する国際的要望の声は高い。近く、S. ギティン (Gitin) らによって同書の改訂版である *The Ancient Pottery of Israel and Its Neighbors from the Neolithic through the Hellenistic Period* が出版される予定であるが、3巻に亘る書籍になり、やはりその重量から手軽に現地に持ち運ぶことは躊躇される。

近年のインターネットの普及は、南レヴァントで発掘に

従事する諸調査団に、データの共有化と利用の面で従来考えることができなかった利便性を与えている。南レヴァント、特にイスラエル国においては、調査団の基地となる宿舎にインターネット回線が設備されているのがごく普通である。各調査団がインターネット上に置いたデータベースに照会して必要な情報を現地で取り出すことも極めて容易となった。その結果、紙媒体では非常にかさばる遺構・遺物等のデータも、スキニングやデジタル・トレースによってデジタル化しインターネット上に保管することで、より多くの人からアクセス可能となり、共有データとしての価値も高まった。

本研究は、上記のアミランの書では対応できない南レヴァントのここ40年余の土器集成のデータベースをインターネット上に構築し、その土器情報をインターネット経由で検索できるシステムの構築を目指すものである。そのためには、入力した画像から類似した器形の土器を検索できる機能の実現が肝要となる。

本稿では土器実測図をスキャン画像としてコンピュータに取り込み、それと類似した土器の画像をインターネット上のデータベースから検索するための、類似形状の検索手法を提案する。アミランに倣い、今回のデータベースでは前期青銅器時代から鉄器時代までの土器を扱う。

2. 関連研究

2.1 情報処理技術の考古学への応用

コンピュータ処理を用いた土木・測定機器などを発掘に利用する機会は増えてきたが、考古学への直接的な応用としての情報処理技術の提案はあまり多くない。その中で、遺構の測定結果から3次元モデルを構成し、発掘作業において除去すべき土砂の体積を求めて発掘計画立案に役立つ例 (Losier et al. 2007) や、レーザー光を用いた3次元形状計測機器で遺跡や遺物を計測しコンピュータ内に再現する手法 (Al-Kheder et al. 2009; Kampel and Sablatnig 2003) などが提案されている。

破片の照合に基づく土器形状の復元に関しては、比較的多くの研究例が報告されているが (堀ほか 1997, 2000; 加納ほか 2001; Grauman and Darrell 2004; 安原ほか 2005)、復元された土器を系統的に分類・検索するための方策については言及されていない。

また、画像処理技術の応用例として、航空写真に対してラドン変換に基づく画像処理による線分検出を試み、古代の土地境界を推定する手法が提案されている (Bescoy 2006)。これらはいずれも、測定や復元などの作業のコンピュータによる高速化、省力化を企図した研究例である。

2.2 類似形状の検索

ある2次元形状に類似した形状を決定する問題は、手書き文字の識別に代表されるパターン認識処理と類似している。ただし、両者は以下の点で異なる。

- ・文字は種類が有限個で時間的に変化しない対象であるのに対し、一般的な形状に対する検索ではそのような仮定は成立しない。
- ・文字認識においては、文字としての特徴が一致していれば、個々の具体的な幾何学的特徴は重要視しないのに対し、土器実測図の形状に関しては、幾何学的な形状がより重要となる。

アイコンや商標などのロゴマークについて類似形状の検索を行った研究例では、フーリエ記述子に用いた特徴量が提案されている (Folkers and Samet 2002)。ロゴマークと比較して、土器は一般的に形状の類似度がより高いため、フォルカース (Folkers) らの手法をそのまま適用することはできない。

フーリエ記述子を一般的な図形に対して適用して類似検索を行うことが提案されているが (Zhang and Lu 2003)、フーリエ記述子以外の特徴も含めて扱う必要性も述べられている。

3. 器形の類似検索

3.1 手法の概要

本研究でデータベースへの登録対象とする器形実測図は、報告書や学術誌の紙面上に出版されたものである。図1に例を示す。このような実測図から土器断面を表す黒色の領域を抽出し、形状検索に用いる。

土器実測図の類似検索処理の流れを図2に示す。クエリ (検索用キー) としてシステムに与えられる情報は、下記の種類を想定する。

1. すでに登録されている実測図の識別ID
2. 未登録の実測図の画像ファイル
3. ユーザによるその場での簡易スケッチ

登録済みデータのID以外が指定された場合には、画像ファイルおよびスケッチデータから器形特徴を抽出する。

土器の形状は、フーリエ記述子に基づく特徴ベクトルで表現されている。フーリエ記述子は、データを大小の波の集まりとしての表現に変換するフーリエ変換によって得られる数値の列であり、元の形状が持つ特徴を表している。特徴ベクトルとは、あるデータが持っている特徴を代表する、少数の数値の集合のことである。2つの形状の特徴ベクトルの距離を両者の類似度として定義し、入力されたクエリの形状との距離が近いエントリを検索し、候補を決定する。得られた候補は、距離スコアに基づいて上位からユ

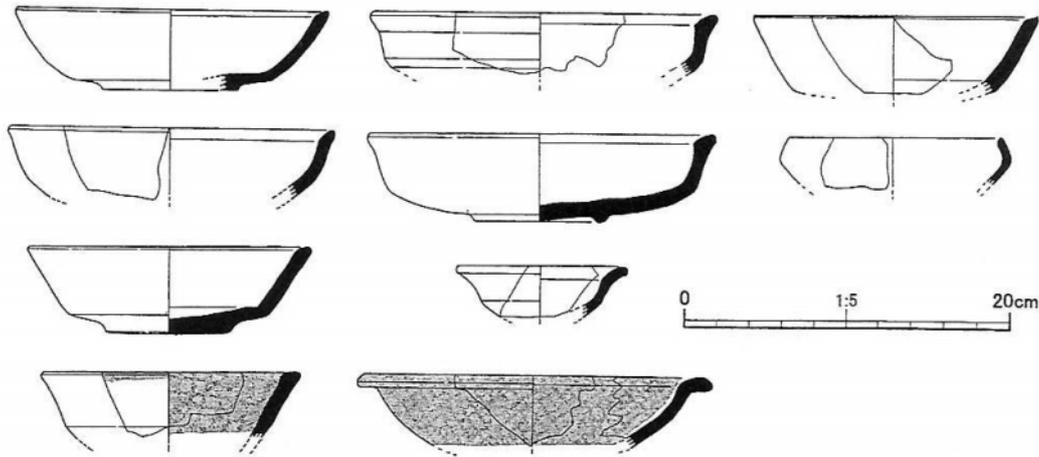


図1 土器実測図の例

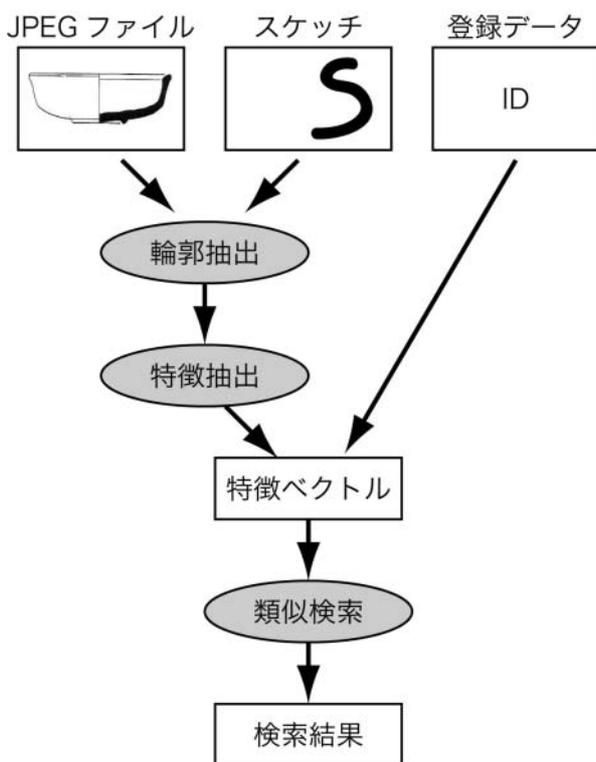


図2 検索処理の流れ

ーザに提示される。

3.2 器形実測図

登録用画像は、一般的なスキャナを用いて 300DPI (Dot Per Inch) でスキャンする。通常は、1枚のスキャン画像中に複数(多い場合で 25 個程度)の土器が含まれるため、ユーザによる矩形領域の範囲指定を行う。その後、器形実測図に付随して記載されているスケールとの比較から、実際のサイズに変換する。

上記の手順で、データ中に単一の土器実測図だけが含まれる画像を生成し、次の画像処理過程への入力として用いる。

3.3 輪郭と中心線の抽出

土器の断面図が持つ形状特徴は、主に下記の 2 点に顕著に表れると仮定する。

- ・局所的に存在する幾何学的特徴(例: 底部、口縁の形状)
- ・土器の全体的な特徴(例: cooking pot, storage jar, krater, jug 等の区別)

局所的な特徴を得るため、土器実測図の画像から、以下の手順で断面の輪郭線を抽出する。

1. (必要に応じて) 画像をカラーからグレースケール(モノクロ)に変換する
2. しきい値に基づいて 2 値化する
3. モルフォロジー演算(領域の収縮, 拡張)によりノイズを除去し断面部分のみを選択する
4. 輪郭線追跡により、器形の外形に相当するピクセル列を抽出するとともに、輪郭線で囲まれた面積(土器の断面積)を求める
5. RDP アルゴリズム (Ramer 1972; Douglas and Peucker 1973) により、ピクセル列を簡略化する。

図 3 に、実測図から断面形状の輪郭を抽出した例を示す。グレーの領域の周囲の黒線が抽出された輪郭である。

続いて、土器の全体的な形状を取得するため、画像の距離変換を用いて器形の骨格線(形状の芯となる線)を求める。距離変換とは、形状内部の各点に対し最も近い輪郭までの距離を与える処理であり、様々な距離の定義や計算方法が提案されている。本研究では、2 乗されたユークリッド距離を求める高速アルゴリズム (Shih and Wu 2004) を用いる。

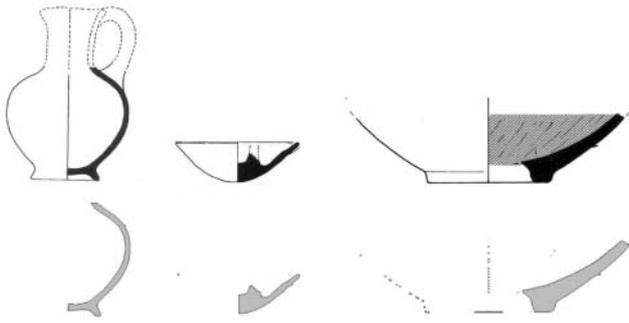


図3 輪郭抽出の例 (下段のグレー領域の周囲の黒線)

得られた距離変換後の画像から器形の骨格線を求め、同様にRDPアルゴリズムにて簡略化する。

以上の手法で、スキャン画像から輪郭線と骨格線を抽出し、後段の特徴量算出処理に用いる。

3.4 器形特徴量の算出

3.4.1 フーリエ記述子

複素平面を考えると、断面形状の輪郭線は複素数の列とみなすことができる。基準点からの輪郭線上の距離を s とすると、図4に示すように輪郭線は $z(s) = x(s) + iy(s)$ と表せる (i は虚数単位である)。 $z(s)$ は実際には離散的なデータであるから、基準点から i 番目の座標を $z[i]$ として離散フーリエ変換を行う。得られたフーリエ記述子 (Grunlund 1972) は形状の特徴を表す量となり、提案者にちなんでG型フーリエ記述子と呼ばれる。

輪郭線の全体的な特徴を示す中心線と、局所的かつ幾何学的な特徴を示す輪郭線のそれぞれをフーリエ記述子に変

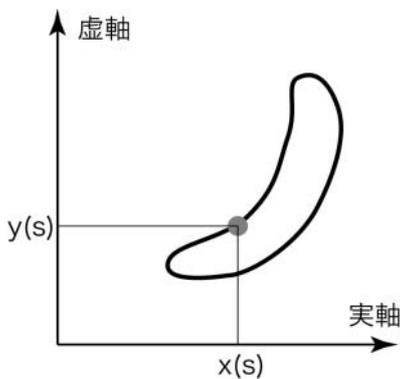


図4 複素平面と輪郭線

換し、器形の特徴量とする。

3.4.2 器形の基準点の決定

土器実測図中の中心線を抽出し、輪郭線の座標の基準点として用いる。

実測図のスキャン画像において、左右の中央付近に存在する鉛直方向の直線を検出する。画像処理の分野では一般的に、直線検出にはHough変換 (Duda and Hart 1972) が用いられる場合が多い。Hough変換は画像中のあらゆる直線に対し、位置や角度を仮定せずに抽出できる方法であるが、計算量が大きいという欠点がある。実測図のスキャン画像においては、土器の中心線は中央付近に鉛直方向の直線として存在すると仮定できるので、Hough変換より軽量な手法が利用可能である。

抽出した中心線に対し、断面形状の輪郭線のうち最も下かつ左にある点を輪郭線の基準点 (開始点) とする。断面が中心線に接している場合には線と底面との交点、接していない場合には線への最近点となる。中心線は、後述の立体形状再構築の際に回転軸として用いる。

3.5 類似する器形の検索

器形の特徴量は n 次元ベクトル (n は数十程度) で表現されているため、 n 次元空間を構成する。一つ一つの土器は、その特徴量に応じて空間内のある一点に対応する (図5)。

ある土器に対する他の土器形状の相違度は、 n 次元ベクトルどうしの距離として定義できる。土器 A, B の特徴量を a_i, b_i ($i = 1, \dots, n$) とすると、両者の類似度 S_{ij} は

$$S_{ij} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}$$

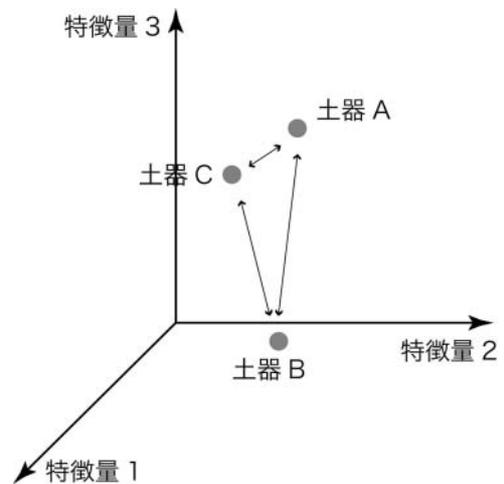


図5 特数量空間における土器どうしの距離

で与えられる。また、距離であるから類似度には $S_{ij}=S_{ji}$ という関係が成り立ち、どちらから測っても同じ値となる。同一の特徴量であれば類似度は0、すなわち完全一致を示す。図5の例では、互いの距離から土器Cは土器Bよりも土器Aに類似していることを示している。

クエリで与えられた形状の特徴量と、データベース中のエントリの特徴量とを用いて類似度を算出し、類似している順に上位候補を出力する。形状の特徴ベクトルの算出に比べ、類似度の計算は非常に高速なため、数万件程度のデータにおいても全数探索で十分な速度が得られる。今後、百万件単位のデータを扱う場合には、特徴量空間をあらかじめ分割しておき、検索時には近傍のみとの比較に限るなどの対応が必要となる。

4. 実験結果と考察

4.1 予備実験

大規模なデータベースの構築の前段階として、提案する

類似検索手法の評価を行った。

土器実測図のスキャン画像162件に対し、形状特徴を求め互いの類似度を計算した。用いた画像の大きさは、約 $300 \times 50 \sim 1000 \times 500$ ピクセルである。形状特徴量は32次元ベクトルとし、実測図1枚あたり128バイトとした。実験に使用したシステムはMacBook Pro 2.2GHz、メモリ2.0GB、開発環境はMac OS X上のXcode (Objective-C言語)を用いた。計算時間は、特徴量の抽出に3.5秒(1枚あたり0.02秒)を要した。類似形状の検索は一回あたり1ミリ秒未満と、非常に高速であった。

図6に、類似検索システムの画面例を示す。また、表1に4個の土器(a)~(d)を対象として、全ての土器との類似度を求め、類似候補の上位1, 2, 5, 10, 30位を表示した。表中で土器の下にある数値は、検索対象の土器とその候補土器との類似度であり、値が小さいほど両者の形状が類似していることを示す。表から、1~5位に比べ、10位、30位と順位が下がるほど明らかに類似性の低い候補が表れており、提案手法は有効に機能している。ただし、上位の数

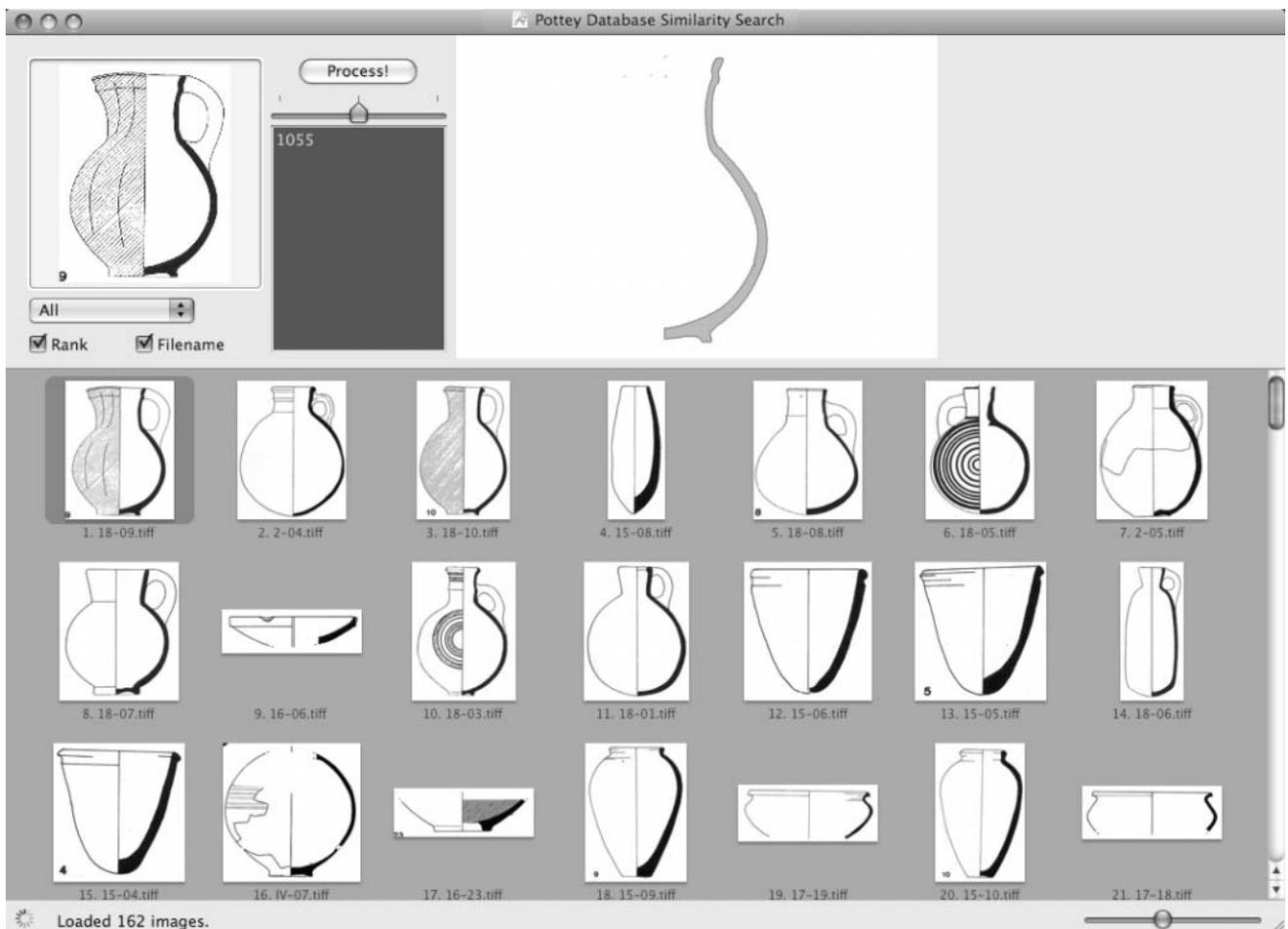


図6 類似形状の画面例

表1 土器の類似検索の結果 (抜粋)

クエリ	1位	2位	...	5位	...	10位	...	30位	...
(a)	362.8	380.0		1002.1		1268.9		2178.3	
(b)	292.7	355.3		739.0		1005.4		1400.6	
(c)	512.8	564.7		632.8		847.3		1021.6	
(d)	189.1	189.4		252.8		392.4		540.8	

候補の類似度に差がなくても、人間の目には異なった形状として感じられる例も存在した。

4.2 考察

予備実験の結果から、提案する類似検索手法を用いることで土器の大まかな形状をとらえることには成功したが、口縁部などの詳細な特徴を効率的に扱えていないなどの課題も判明した。以下に詳細を述べる。

4.2.1 形状の詳細度の取り扱い

形状の中心線の大局的な特徴により、形状の大まかな類似度は算出できている。一方で、より局所的な形状に基づく

- ・口縁に手が引かかる凸部があるか
- ・底部が平面か、円周状に凸部があるか

などの特徴は、まだ特徴量に効率的に反映されていない。フーリエ記述子による特徴量ベクトルに加えて、輪郭線の曲率の変化を考慮することが有効と考えられる。

4.2.2 欠落部分の扱い

土器実測図には完形以外のものも少なくない。得られている土器断片が不十分なために断面図が中心線から離れた位置にのみ描かれている場合、形状情報のみによる比較では多数の候補が該当し、効率的な検索が困難となる。この問題点を解決するには

- ・中心軸から当該部分までの距離
 - ・中心軸と当該部分がなす角
- などの情報も併せて検索に利用することが必要であると考えられる。

4.2.3 全体の作業時間

紙媒体である論文や報告書からのデータ取得は、スキャン作業が不可避である。断裁可能な冊子体であればADF(オートドキュメントフィーダ)による連続スキャンが可能である。しかし、土器実測図を載せた資料は高価・貴重なものが多いため、ADFによらず人手によるスキャン作業が必要となる。

人手によるスキャン作業に比べて、スキャンした画像から器形特徴を抽出するまでの以下の各段階の合計所要時間ははるかに少ない(1/5から1/10程度である)。

1. スキャン画像から特定の土器の範囲を限定する
2. 土器の輪郭を抽出する
3. 適切なしきい値の設定
4. 輪郭から器形特徴量を求める

そこで、より多くの土器実測図のデータ化を進めるためには、紙からのスキャン作業をいかに効率化するのが最重要となる。

4.2.4 データベース容量

実測図1件当たりの特徴量は、32次元ベクトルとして

表現されている。これは、コンピュータの内部表現では浮動小数点形式で合計 128 バイトに相当する。特徴量のデータは画像ファイルそのものの 100 分の 1 程度であり、類似検索手法のために増加するデータベースの容量は無視できる範囲である。

5. 器形実測図データベース

現在、提案した類似検索機能を有する土器実測図のデータベースの構築を計画中である。従来の文字ベースの検索であれば、Google などに代表される通常の検索システムが有効である。しかし近年、文字では表現できない情報をキーとして検索を行う CBR (Content-based Retrieval) が注目を集めている。本研究の器形の類似検索アルゴリズムを用いることで、非言葉的な情報に基づいた土器検索が可能となる。

5.1 レコードの登録内容

データベース中の各レコードは土器実測図 1 枚に対応し、以下の項目を含む。まず、画像情報として

- ・スキャンされた実測図の画像データを記録する。加えて、文字情報として
- ・土器の出土した遺跡名
- ・層位
- ・器形
- ・大きさ
- ・色 (マンセル表色系に基づいた色相表記)
- ・出典
- ・その他

など、従来の土器データベースに含まれる項目も記録する。以下にレコードの一例を示す。

1. スキャンした実測図の画像ファイル (JPEG 形式、平均 200KB)
2. Type: Bowl
3. Sub-type: Carinated Bowl with Flat Base
4. Location: Megiddo K-4/III; Locus 1235
5. Publication: Megiddo IV 2006
6. Fig. 23: 5
7. Note: Red Slip on White

5.2 利用方法

利用者は、通常の WWW ブラウザ (Internet Explorer, Firefox, Safari 等) を用いてインターネット経由でデータベースにアクセスする。あらかじめ登録した利用者限定するか、登録なしでいかなる利用も認めるかは今後の検討を要する。

検索パターンは主に下記の 3 種類となる。

1. すでにデータベース中に登録されている土器を指定して、それと類似した器形を検索する
2. 利用者の所有する土器実測図の画像をデータベースにアップロードし、その画像から抽出した特徴量を元に類似データを検索する (アップロードされた画像データは、検索完了時にシステム内部で自動的に破棄される)
3. 利用者が探したい形状をブラウザ画面にスケッチで描画し、その画像から抽出した特徴量を元に類似データを検索する

形状そのものに基づくこれらの検索が可能であるため、直感的かつ簡便に利用できる点が、本データベースの利点である。

また、データベースの主たる内容が画像であること、またデータベース画面の基本的な表示言語を英語とすること、インターネット経由であることから、海外からも問題なく利用可能となる。

すでに出版されている土器図面の実測図を学術目的で利用することは著作権を侵害しない。データベースの各エントリは、出典を明記することで、元の学術情報の「引用」に該当する。

当初は数千件の土器実測図を登録するが、システムは数十万件の登録に対応する設計としておく。1 エントリあたり 300KB の容量を必要とすると仮定すれば、1TB のディスクに 330 万件のデータが記録できるため、大規模なデータベースでも十分に安価なハードウェアで実現可能である。

5.3 土器の三次元形状の復元

画像データから抽出された輪郭線に基づき、土器の様々な物理的特性が算出できる。

第一に、輪郭の断面積から、土器自体の体積および標準的な重量が算出できる。

加えて、内側に注入可能な液体の容積とそのときの合計重量も計算可能であるほか、底面積と重心位置から容器としての安定性の評価も行える。

図 7 に、実測図から復元した土器の 3 次元形状の例を示す。断面形状のみに比べ、ユーザにとってより実感の得やすい提示が可能となり有用である。ただし、完形でない場合には存在部分のみの復元となる。

土器表面の質感や彩色状態に関する情報を入手できれば、データベースの登録データとして一層の充実が図れる。現時点では検索対象は土器の形状に限定しているが、色彩や質感を含めることも検討していく。

6.まとめ

6.1 結論

土器実測図から画像処理により形状の特徴量を抽出し、その値に基づいて類似形状を検索するアルゴリズムを構築した。さらに、この類似検索機能を有する土器実測図データベースの整備について提案した。

従来の文字ベースのデータベースと比べ、形状そのものを直接比較・検索できるため、ユーザの利便性が大きく向上する。さらに、データベースはインターネット経由でブラウザから利用できるため、ユーザの所在地やコンピュータの機種に依存せず、より制限の少ない利用が可能となる。今後のデータベースの発展により、発掘調査にアミランの書籍などの重い資料を携行する必要性は低下すると予想される。

現在は、類似検索アルゴリズムのプロトタイプを実装し、予備実験を終えた段階である。今後は、登録データ件数の増加とともに、実験で判明した下記の課題について取り組んでいく予定である。

6.2 今後の課題

6.2.1 データベース化作業の効率化

論文誌、報告書等に掲載されている器形は、1ページに複数が含まれる場合が多い。現在はページごとにスキャンし、その画像をコンピュータの画面上でユーザが個別の器形に分割している。この作業を自動化するため、画像中の物体を認識しそれぞれ領域に分割するアルゴリズムが必要である。

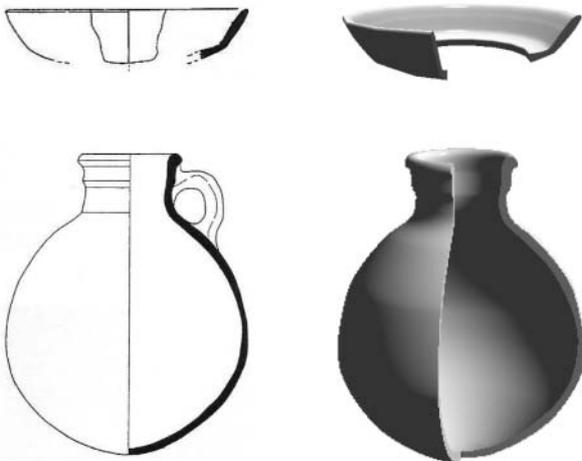


図7 断面図(左)から復元された土器の三次元形状(右)

6.2.2 より大規模な実験による評価

現在は、数十例の実測図に対して特徴量の抽出と類似度の算出をしているに過ぎない。データベース化作業の効率化とともに、より大規模なデータ群に対する類似検索アルゴリズムの性能を評価していく必要がある。

6.2.3 特徴量による器形のクラスタリング

器形の特徴に基づくクラスタリング分析も、有望な応用例である。現在の特徴量のままでもクラスタリングは可能だが、特徴量ベクトルの次元を主成分分析などの手法により2~3の低次元に低減させることができれば、コンピュータによるクラスタリング結果を、研究者による標準的な分類に近づけることができる。その結果、大量のデータに対してより効率的な自動分類が可能となる。

6.2.4 ウェーブレット変換に基づく特徴量

本研究で用いたフーリエ変換は、対象となる関数が周期的であることが適用条件である。ウェーブレット変換もフーリエ変換と同様、信号の周波数解析が可能であるが、周期関数でなくサポート(台)が有限の波(ウェーブレット)を用いるため、より適用範囲が広い。今後は、ウェーブレット変換に基づく器形特徴量の可能性についても検討を行う。

6.2.5 コンピュータによる「土器形態類似」の判断

土器の「形状」が「類似」している、ということと土器の「形態」が「類似」しているということでは本質的な意味が異なる。本研究では前者についてある程度達成することができた。後者は人間が恣意的に設けた様々な基準に基づいて決定される判断であり、そのような土器の系統学的類似性の判断を含めた人間による土器分類をどのようにコンピュータに判断させるかが今後の大きな課題である。

謝辞

査読者の方からは貴重かつ建設的なコメントをいただいた。記して感謝する。

参考文献

Al-Kheder, S., Y. Al-Shawabkeh and N. Haalab 2009 Developing a Documentation System for Desert Palaces in Jordan Using 3D Laser Scanning and Digital Photogrammetry. *Journal of Archaeological Science* 36: 537-546.

Amiran, R. 1970 *Ancient Pottery of the Holy Land: From Its Beginnings in the Neolithic Period to the End of the Iron Age*. New Brunswick, Rutgers Univ Press.

Bescoby, D. J. 2006 Detecting Roman Land Boundaries in Aerial Photographs Using Radon Transforms. *Journal of Archaeological Science* 33: 735-743.

Douglas, D. and T. Peucker 1973 Algorithms for the Reduction of the

- Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature. *The Canadian Cartographer* 10(2): 112-122.
- Duda, R. O. and P. E. Hart 1972 Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Communications of ACM* 15(1): 11-15.
- Folkers, A. and H. Samet 2002 Content-Based Image Retrieval Using Fourier Descriptors on a Logo Database. *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition (ICPR'02)* 3: 521-524.
- Grauman, K. and T. Darrell 2004 Fast Contour Matching Using Approximate Earth Mover's Distance. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'04)* 1: 220-227.
- Grunlund, G. H. 1972 Fourier Preprocessing for Hand Print Character Recognition. *IEEE Transactions on Computers* 15(2): 195-201.
- Kampel, M. and R. Sablatnig 2003 Virtual Reconstruction of Broken and Unbroken Pottery. *Proceedings of International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM'03)* : 318-325.
- Losier, L.-M., J. Pouliot and M. Fortin 2007 3D Geometrical Modeling of Excavation Units at the Archaeological Site of Tell 'Acharneh (Syria). *Journal of Archaeological Science* 34: 272-288.
- Ramer, U. 1972 An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves. *Computer Graphics and Image Processing* 1(2): 244-256.
- Shih, F. Y. and Y. Wu 2004 Fast Euclidean Distance Transformation in Two Scans Using a 3 x 3 Neighborhood. *Computer Vision and Image Understanding* 93: 195-205.
- Zhang, D. and G. Lu 2003 A Comparative Study on Shape Retrieval Using Fourier Descriptors with Different Shape Signatures. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 14(1): 41-60.
- 加納政芳・加藤昇平・伊藤英則 2001「判別の難易度に基づく類似箇所検出の高速化」『情報処理学会論文誌』42 巻 11 号 2689-2698 頁。
- 堀謙太・今井正和・鳥野武 1997「破片群再構成における接合部位検出法」『映像情報メディア学会技術報告』21 巻 7 号 15-21 頁。
- 堀謙太・今井正和・小笠原司 2000「土器復元における接合部位検出のための輪郭の階層型表現」『電子情報通信学会論文誌 D』J83 巻 5 号 1392-1394 頁。
- 安原彰吾・加藤昇平・加藤諭・伊藤英則 2005「色彩パターンと輪郭形状の重み付き類似度を用いた接合判別法」『電子情報通信学会論文誌 D』J88 巻 7 号 1308-1312 頁。

長谷川 修一

立教大学文学部

Shuichi HASEGAWA

College of Arts, Rikkyo University

梅津 信幸

茨城大学工学部

Nobuyuki UMEZU

Faculty of Engineering, Ibaraki University