

連想記憶モデルを用いた土器復元図形作成の試み

仁木 滉*・加藤常員**・鎌木義昌***・小沢一雅****

*岡山理科大学・理学部・応用数学科

**岡山理科大学大学院・理学研究科・応用数学専攻

***岡山理科大学・理学部・基礎理学科

****大阪電気通信大学・情報科学センター

(昭和60年6月26日 受理)

1. はじめに

年々、発掘される埋蔵文化財に関する情報は膨大な量にのぼる。調査で得られる遺物等は、経験を積んだ考古学の専門家によって、実測図などに図化され公開されてきた。しかし、収集される情報は増加するにつれて、専門家の手作業による処理能力を越えるようになって来ている。一方で、出土文化財情報の処理の迅速化は、都市化に伴う文化財保護などの点から強く要請され、電子計算機による処理の導入が急務とみられている⁽¹⁾。

出土する遺物のなかで土器は、石器などと共に最も普遍的に扱われる考古学資料であり、形態の類似性にもとづく分類を経て編年や地域性などを知るうえで重要な資料である。出土する土器の多くは、欠損し、幾つもの破片になっている場合が大半である。考古学者は、その破片をつなぎ合わせ、さらに失われた破片を過去の経験により補い元の形状を復元し、図1のような復元図として報告する。この作業は、重要であるが余りにも多くの時間と労力が費やされているのが現状である。

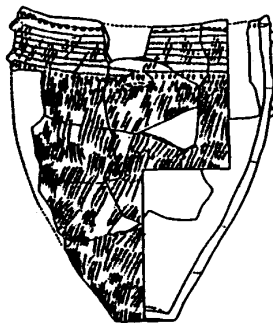


図1 土器復元図⁽²⁾

本稿は、このように失われた部分を補い、復元図を作成する考古学者の処理を想定した復元システム（連想復元システム）を提案し、代表的な土器である須恵器のシルエットを実験対象に用いた計算機シミュレーションの結果について述べる。

考古学者は土器形状の復元作業の際、個々の破片の形状のみならず表面の模様、肉厚な

どの情報も利用していると考えられるが、残存部分の形状を最も重要な情報として用いている。本稿で提案するシステムでは、残存部分の形状に注目し、全体の形状の復元を行なう構成と成っており、一連の土器形状の復元作業の計算機処理化の第一ステップと位置づけることができる。図2に考古学者の土器復元作業における連想復元システムの位置づけを示す。

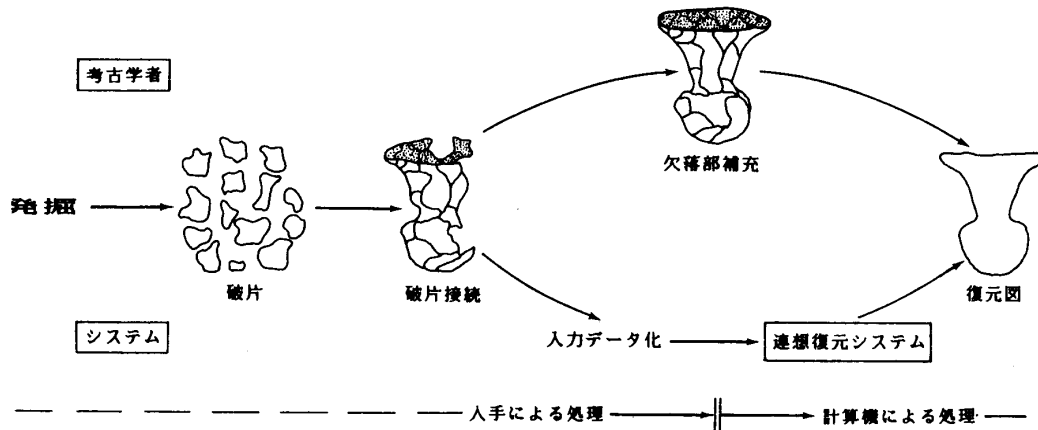


図2 連想復元システムの位置づけ

連想復元システムは、正射影子を用いた連続形自己想記形連想記憶モデル^(3,4)により、一部（輪郭線）が欠落した平面図形の欠落部分を補い、復元図を作成するシステムある。一般に、連想記憶モデルの連想能力は、記憶事項の直交性に依存する^(5,6,7,8)。また、自己想起形の連想モデルでは、記憶事項の一部の要素と一致したベクトルを入力ベクトルとし、その記憶事項全体を正確に連想（想起）する形成のモデルである。したがって、連想結果が適正かどうかは、最初に入力として与えられるベクトルの記憶事項と一致した要素（不変要素）に依存するが、不変要素が連想結果に保持されている保証はない⁽⁹⁾。以上の2点に対する改善策として正準化処理および不変要素処理を提案し、本システムに組み入れた。

以下、連想復元システムの構成、土器（須恵器）および、その破損についての考察、入力データの生成方法、実験データの生成方法および計算機シミュレーション結果について述べ、二、三の考察を行なう。

2. 連想記憶モデル

この章では、連想復元システムに用いる連想記憶モデルの概略（図3参照）を述べ、問題となる2点について考察を行ない、それに対する改善策を提案する。

2.1 連想記憶モデル

記憶事項は実数の要素から成る n 次元ベクトル（標準パターンベクトル）で表されるものとし、

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in})^t, \quad x_{ij} \in R, \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

とする。ここで添字 i は i 番目の記憶事項、 t は転置、 R は実数の集合を表わす。 k 個の標準パターンベクトルを列ベクトルとする行列を

$$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (2)$$

と表す。行列 X より

$$\Pi = X(X^t X)^{-1} X^t \quad (3)$$

を構成し、これを記憶する。 $(\cdot)^{-1}$ は (\cdot) の一般逆行列であり特異値分解などで求めることができる⁽¹⁰⁾。この行列 Π を記憶行列と呼び、以上の Π を構成する過程を記録過程呼ぶ。

つぎに x_i と同形式の未知の入力パターンベクトル (未知パターンベクトル) \tilde{x} が与えられたとき、 n 個の要素のうち s 個を記憶事項 x_i の対応する要素に等しく、残りの $n-s$ 個の要素は等しくないものとする。そのとき、

$$\hat{x} = \Pi \tilde{x} \quad (4)$$

となる \hat{x} を \tilde{x} より想起されたパターンベクトルと呼び、式 (4) の演算過程を想起過程と呼ぶ。

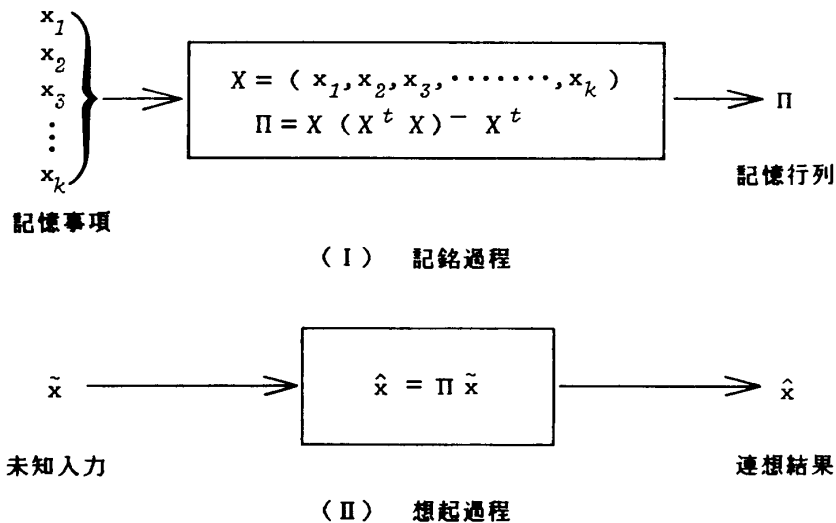


図3 連想記憶モデル

2.2 改善すべき2点

(a) 標準パターンベクトルの直交性

記憶行列 Π は、 n 次元の標準パターンベクトルを n 行 n 列の行列に“分散”させ重畳させた形となっており、すべての標準パターンベクトル相互の“係わり合い”を示す量 $X^t X$ と、各要素間の自己相関量を兼合わせた量を各要素とする行列である。また、 Π が直交射影行列であることから、この想起の過程は未知パターンベクトル \tilde{x} を標準パターンベクトルの集合で張られたパターン空間への直交射影を得ることである。これらのことから、標

準パターンベクトル相互の総合的な直交性を高めることで、連想能力は向上すると考えられる。

(b) 不変要素の保持

想起の際、最初に与えられた未知パターンベクトル \tilde{x} の不変要素 (n 個の要素のうち s 個の記憶事項 x_i に一致する要素) は、想起されたパターンベクトルに保持されるべきであるがその保証はない。特に想起されたパターンベクトルを再び入力パターンベクトルとして繰り返し想起を行なう方式のモデルでは、重要な事柄である。図4は、スペース（空白）と*とから成る (a) 図を未知の入力とし想起過程を行った結果が (b) 図である。このとき入力図の*の部分で正確な部分としたとき、○で囲んだ部分が想起により失われている。不変要素が想起に対して常に変化しない想起過程を考えることは、妥当であり、連想能力の向上につながると考えられる。

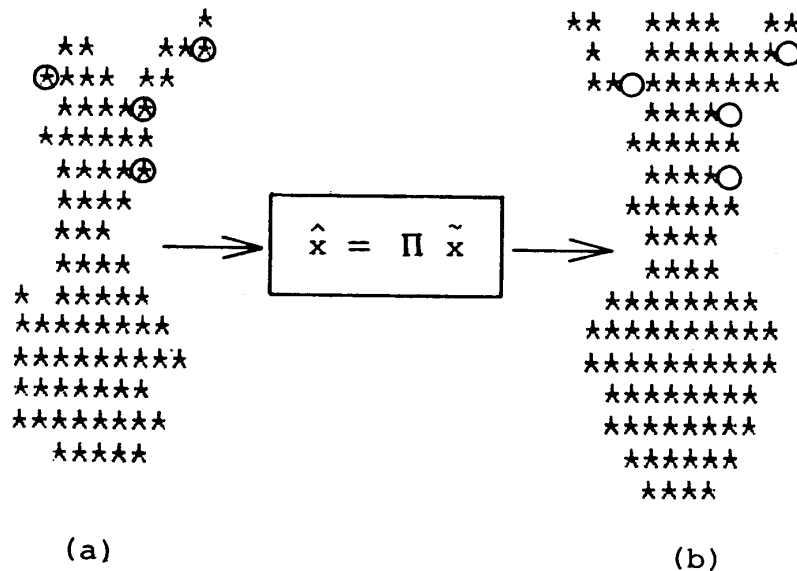


図4 不変要素

○：想起により失われた不変要素

2.3 改善策

上述の2点 (a), (b) に対する改善策として、それぞれ (a) 正準化処理および (b) 不変要素処理を提案する。以下にその内容を示す。

(a) 正準化処理

記録すべき標準パターンベクトル (x_i の列ベクトル) が k 個あるとする。このときの重心パターンベクトル m を

$$m = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \quad (5)$$

と定義し、入力パターンベクトル y と m との差のベクトル

$$n = y - m \quad (6)$$

を作る。この差のベクトル n を正準化パターンベクトルと呼び、与えられた入力パターンベクトル y に式 (6) をほどこすことを正準化処理という。

この処理は、対象となる標準パターンベクトルの集合全体に共通な特徴を一旦除去する操作である。連想するに値する情報 n と値しない情報 m に分ける操作であり、この処理を用いることで標準パターンベクトル x_i の総合的な直交性を高められると考えられる。図 5 は、5つの2次元入力パターンベクトル x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 について正準化処理を行なう概念図である。

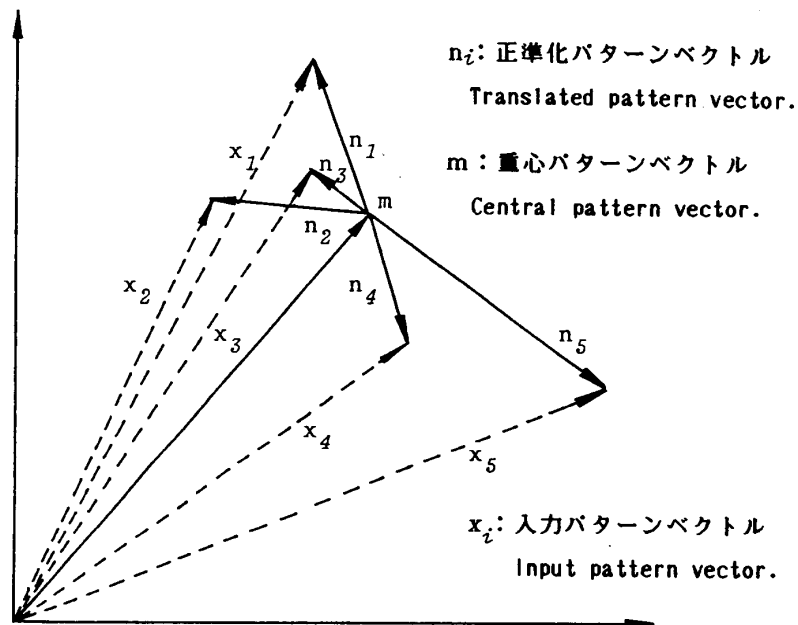


図5 重心を用いた正準化処理

(b) 不変要素処理

ここでは、入力パターンベクトルは、 -1 (低レベル)、 1 (高レベル) のどちらかの値をとる要素よりなるベクトルとし、想起出力も同様に変換 (3.参照) されるものとし、未知パターンベクトルの 1 (高レベル) の値を取る要素を不変要素とする。

未知パターンベクトル \tilde{x} 全体を不変要素ベクトル \bar{x}_0 として保持する。 \tilde{x} より想超されたベクトル \hat{x} に対して

$$\bar{x} = \max(\bar{x}_0, \hat{x}) \quad (7)$$

を生成する。ただし $\max(\cdot, \cdot)$ をベクトルにほどこすときは、各要素ごとに適用するものとする。これにより生成されたベクトル \bar{x} を補整パターンベクトルと呼び、 \bar{x} を得ることを不変要素処理という (図6参照)。

この処理は、高低二つのレベルの高レベルを不変要素と定め、 \max を用いることで不変

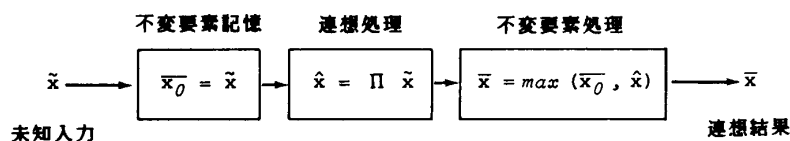


図6 不変要素処理

要素の保持を行なったが、同形式の種々の変形が考えられる。

3. 連想復元システム

本章では、2. で述べた連想記憶モデル、正準化処理、不変要素処理をもととした平面図形の連想復元システムの構成について述べる。4. において具体的に述べるが、本システムに対する入力データは、対象平面図形を何らかの方法で-1, 1の2値に量子化し、ベクトル化されたものとする。このベクトルを図形ベクトルと呼ぶ。

連想復元システムは、連想記憶モデルと同様に記録、想起の二つの過程から成る。以下、この二つの過程について述べる（図7参照）。

(I) 記録過程

記録過程は記録すべき k 個の列ベクトルからなる標準図形ベクトル x_i を入力し、まず式(5)を用いて重心図形ベクトル m を求める。求めた m により各 x_i に対して式(6)の正準化処理を行ない正準化標準図形ベクトル n_i を求め、この n_i により式(2)の形式の行列 X を構成し式(3)の記憶行列 Π を生成する。重心図形ベクトル m および記憶行列 Π を記憶（記録）する。記録過程の概略図を図7-(I)に示す。

(II) 想起過程

想起過程は前処理、連想処理、後処理の3段階からなる。まず、未知図形ベクトル \tilde{x} を、不変要素図形ベクトル \bar{x}_0 として記憶保持する。

前処理は、記録された重心図形ベクトル m を用いて式(6)により、 \tilde{x} を正準化処理を行ない正準化図形ベクトル \tilde{n} を求める。

連想処理では、正準化図形ベクトル \tilde{n} と記憶行列 Π との積

$$\hat{n} = \Pi \tilde{n} \quad (8)$$

を生成する。この生成されたベクトル \hat{n} を想起図形ベクトルという。

後処理は \hat{n} に m を加え、しきい値関数をほどこす；

$$\hat{x} = \Phi(\hat{n} + m) \quad (9)$$

ここでのしきい値関数 Φ を

$$\Phi(a) = \begin{cases} -1 & (a < 0) \\ 1 & (a \geq 0) \end{cases} \quad (10)$$

のように定義する。ただし、 Φ をベクトルに作用させるときは、各要素ごとに適用するものとし、この処理を量子化処理と呼ぶ。

$(\hat{n}+m)$ の各要素は一般に実数値となっているが、 Φ をほどこすことで各要素を-1, 1の2値に圧縮されたベクトル \hat{x} となる。このベクトル \hat{x} を圧縮図形ベクトルと呼ぶ。 \hat{x} と不変要素ベクトル \bar{x}_0 により式(7)の不変要素処理を行ない補整図形ベクトル \bar{x} を生成する。

\bar{x} と正準化処理の入力とした図形ベクトル \tilde{x} とが等しくなるまで、 \bar{x} を再び \tilde{x} として($\tilde{x} \leftarrow \bar{x}$)、正準化処理、連想処理、量子化処理、不変要素処理の段階を繰り返す。 \bar{x} と \tilde{x} が等しくなったときの補整図形ベクトル \bar{x} を復元図形ベクトルとして出力する。想起過程の概略図を図7-(II)に示す。

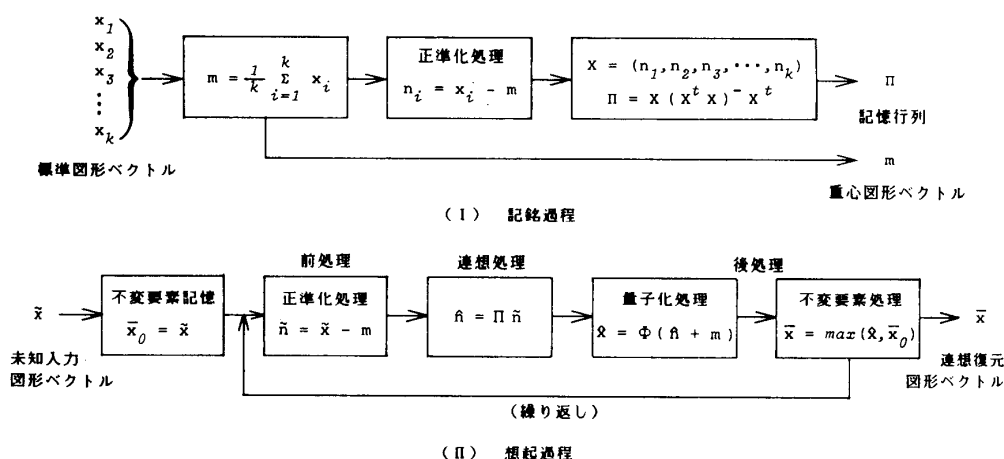


図7 連想復元システム

4. 考古学データ (須恵器)

この章では、本システムの処理対象である考古学資料(須恵器)について述べ、次に須恵器シルエットより計算機シミュレーションに用いる標準図形ベクトルおよび未知図形(実験図形)ベクトルの作成方法を述べる。

4.1 須恵器

土器は、考古学資料のなかで石器などと共に最も普遍的に扱われる重要な資料であり、形態分類にもとづく編年や地域性などの研究に用いられている。代表的な土器である須恵器は、発掘調査により出土する遺物中に占める割合も多く、その出土範囲も北海道を除く日本全域におよんでいる。また、地域差の大きい土師器に比べて地域を越えた共通性を持ち、時代的にも古墳時代から平安時代におよぶ持続性が見られる。遺跡の種類にあっても、窯跡、古墳、寺院跡、集落跡等きわめて多岐にわたっている。このような点から須恵器は、遺跡の性質や時代判定を行なう際の標準的資料として用いられる。

は、出土した破片をつなぎ合わせ、さらに失われた破片部分を経験的手法によって復元する。土器の破損は、傾向として装飾的な凸部や取っ手のような部分は欠落し易く、また、縁となる部分は欠け易いと見られる。一方、小さな点状の欠けが生ずることはまれで、ある程度の領域をもって欠落すると考察できる。

4.2 対象図形のベクトル化

本システムの対象図形として14種類の須恵器のシルエット（図形）を用いた⁽¹²⁾。ここで採用した14種類の図形は、考古学的立場よりも図形として特徴に注目し選択したため年代、地域の統一性はない。また、実物の須恵器は、大きさがまちまちであるため、図形の正方対象領域を定め天地または左右を一定にする正規化を行ない、領域全体は 16×16 の格子状に分割し、各格子内で図形の内部の面積が外部の面積より大きいものを1、そうでないものを-1とし連結度1の4連結形式（位数は任意）⁽¹³⁾で量子化を行なった。量子化した図形（標準須恵器図形）を図8の順序でベクトル化を行ない標準図形ベクトルを作成した。図9に正規化を行なった後の14種類の須恵器のシルエットを示し、図10は、標準須恵器図形の-1, 1それぞれの値に対してスペース（空白）、*を対応させ再生した図で

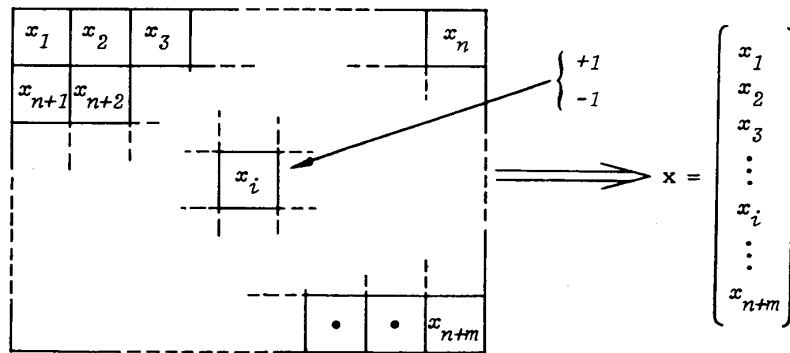


図8 量子化した図形のベクトル化

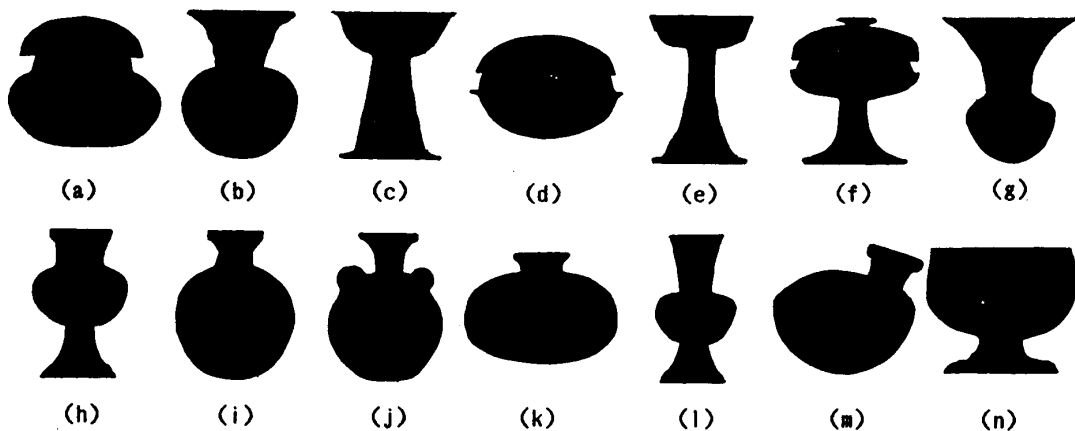


図9 須恵器シルエット

- (a) 短頸壺 (b) 広口壺 (c) 器台 (d) 杯 (e) 高杯
 (f) 有蓋高杯 (g) 瓿 (h) 台付直口壺 (i) 細頸瓶 (j) 提瓶
 (k) 横瓶 (l) 台付直口瓶 (m) 平瓶 (n) 台付盃

ある。

以上の方法による量子化に際しては、實際上、位置ずれ、シルエットの方向、正準化における部位などの多くの問題点があると考えられる。本稿では、図2に示すように、つねに適正な量子化がなされるものと仮定し、それ以後の処理過程に焦点をあてて論ずる。ま

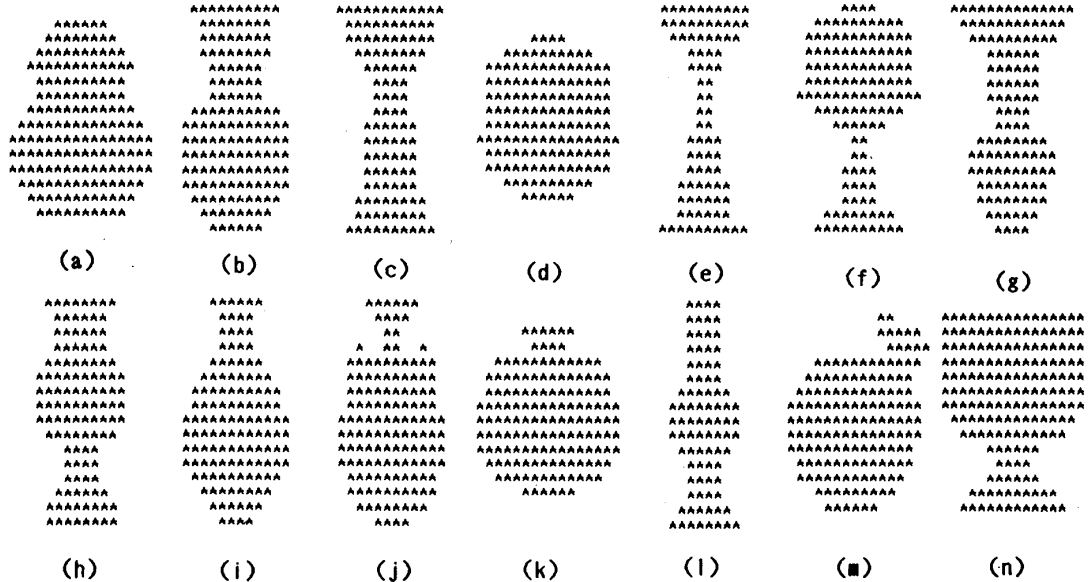


図10 標準須恵器図形

た、量子化された図形より図8の順序でベクトル化を行なうとしているが、他に種々の順序づけが考えられる。図8以外の順序づけを行なっても適正に量子化されたものであるならば、連想記憶モデルの性質^(5,6,7)よりシステムの能力にはさほど影響しないものと考えられる。以上、実際の資料から入力データを作成する段階で生ずる問題点については、本稿の枠外であるが、今後の重要な研究課題として考えてゆく必要があろう。

4.3 未知図形ベクトルの作成

未知図形ベクトルは、標準須恵器図形を欠落させたものを用いた。以下、欠落の条件をまとめ、 3×3 メッシュを用いた欠落方法について述べる。

4.1の考察と4.2のデータ構造より欠落の条件をまとめると、つぎのようになる。

- ①欠落は縁（輪郭線）上から生じる。
- ②凸部は欠落し易い。
- ③欠落はある程度の領域を持つ。
- ④一旦欠落すると欠落は、周辺へ伝播する。
- ⑤図形は、連結度1の4連結形式を保つ。

これらのことを踏まえながら図形を人為的に欠落させる未知図形（実物図形）ベクトルの生成法を述べる。

本生成法は 3×3 メッシュの走査マスクを基本とした方法である。走査マスクを標準須恵器図形の画面全体に図11のようにラスタ走査させ、走査マスクの中心に輪郭線の1点が

来たとき、その点を走査マスク内の周辺8点の状態から欠落の有無を決定する(条件①)。走査マスクに表われる-1, 1の二値のパターンは、512(=2⁹)通りあり、その内、中心メッシュが“1”であるものは、半数の256通りある。条件⑤を考慮すると1/6以下の42通りになる。図12に、回転移動して得られるパターンを省略して代表となる12通りのパターン(有効パターン)を示す。条件②より走査マスク内の“-1”を取る格子が多けれ

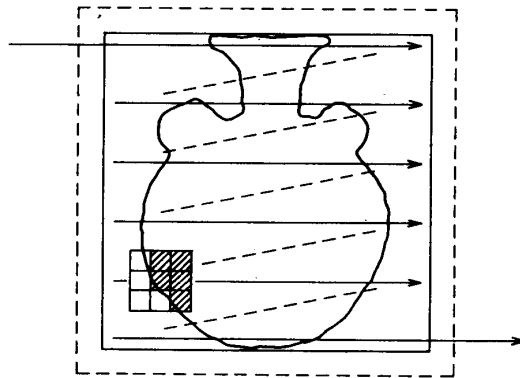


図11 ラスタ走査

ば多いほど中心は、欠落し易いと考えられる。図12-(8), (9)のような直線的な箇所为中心が欠落する場合を基準として、“1”の1メッシュ当たりの影響力 f を次のように定める。

$$f = P/3 \tag{11}$$

ただし、 P は欠落する確率(欠落確率)を表わす。走査マスク内の“-1”の個数 C および一様乱数 $P \in [0,1]$ にしたがって以下のように中心の欠落の有無が決定される。

$$\left. \begin{array}{l} R > C \times f \dots\dots\dots \text{中心欠落} \\ R \leq C \times f \dots\dots\dots \text{中心保持} \end{array} \right\} \tag{12}$$

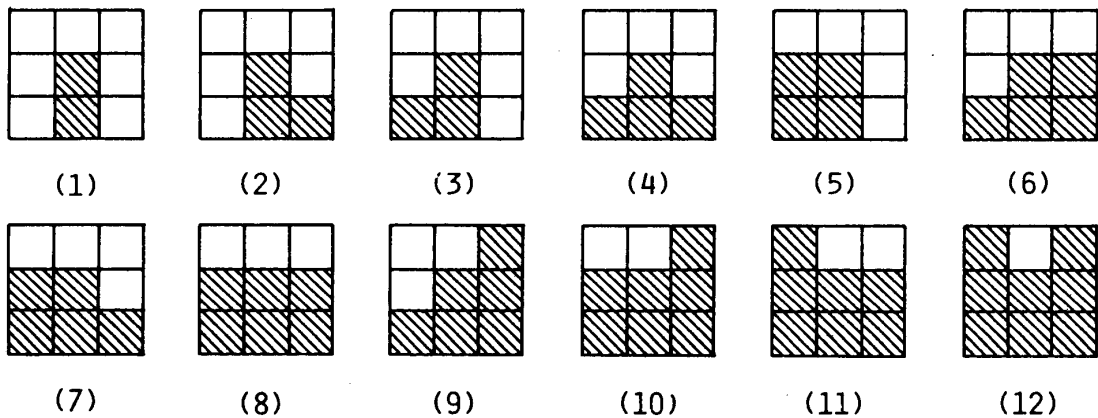


図12 有効パターン

以上のようにして輪郭線の1点の欠落の有無を決定するが、走査マスクを図11のラスタ走査を行ないながら逐次的に欠落させることで次々と隣接する点が、輪郭線上の点となり

欠落が内部へ進行する。この過程によって、近似的に条件③および④が満足されると思われる。

5. 計算機シミュレーション

前述の方法で生成した標準図形ベクトルおよび未知図形（実験図形）ベクトルによる連想復元実験を岡山理科大学 VAX11/780 コンピュータを用いて行なった。14種類の標準須恵器図形に対して式(11)の欠落確率 P を5%から100%まで5%きざみで変化させ各図形毎に25組の実験データを作成し、合計 7000(=20×14×25) 件の実験を行なった。図13

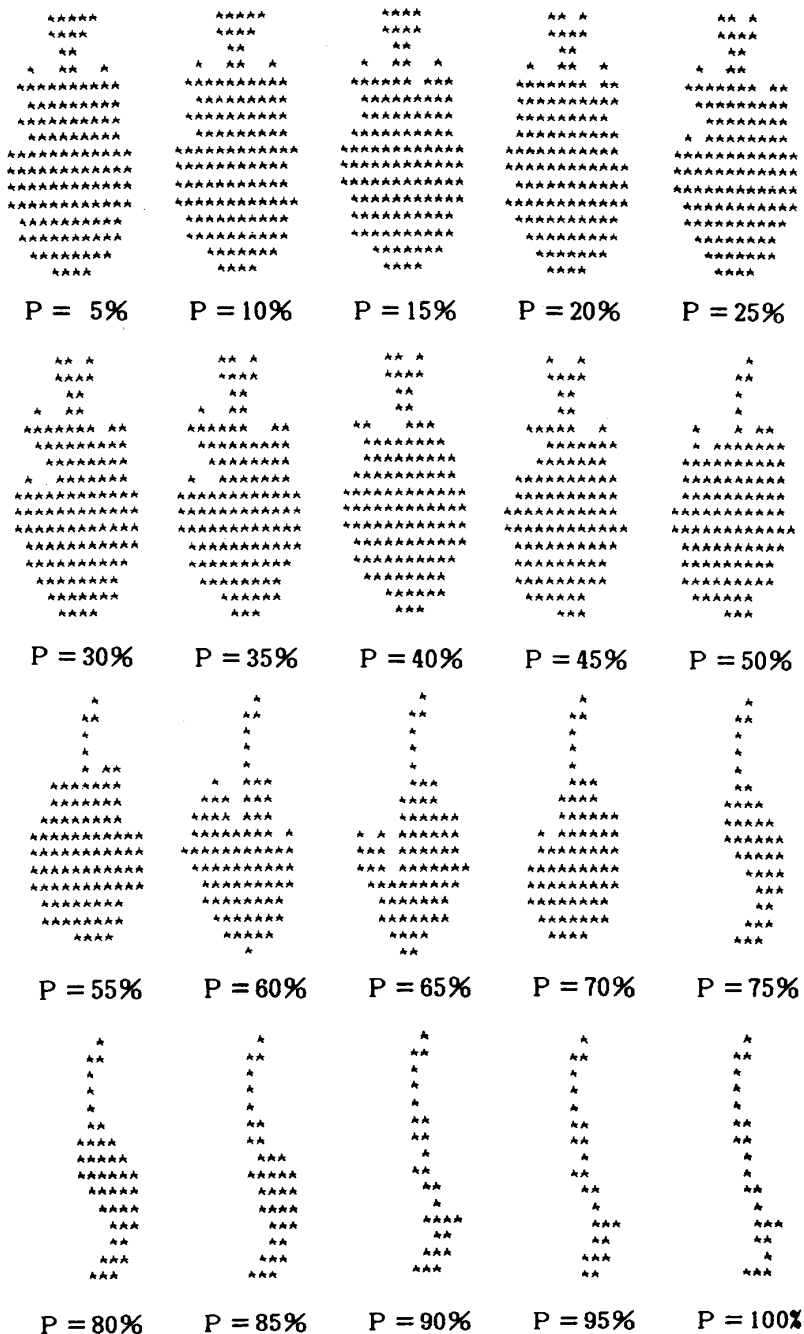
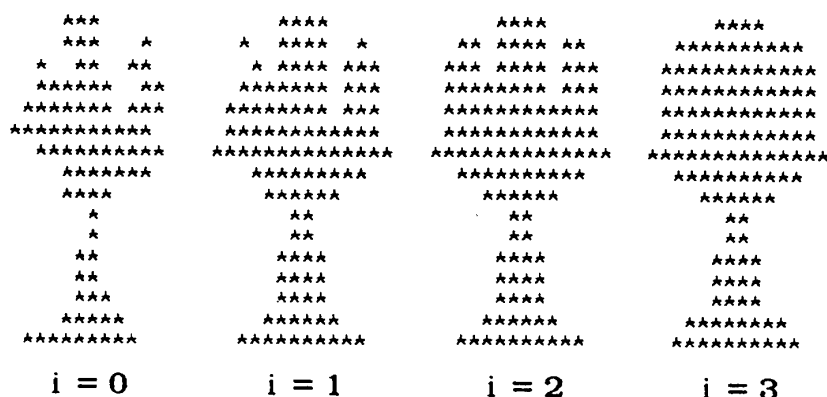


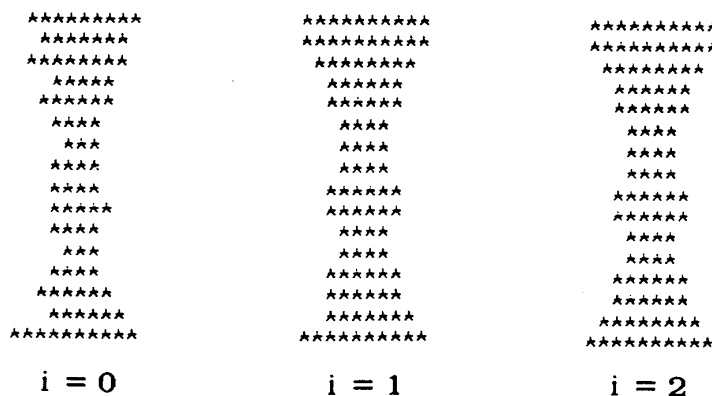
図13 未知（実験）図形

は各欠落確率に対する欠落の状態の一例を示す。

欠落確率が50%のとき，適正に元の標準須恵器図形に復元した出力結果を図14-（I）に示す．図14-（II）は，適正に復元しなかった出力結果の例である．図14において i は想起過程における正準化処理から不変要素処理の段階の繰り返す回数を表わす． $i=0$ が入力図形であり，（I）において $i=3$ ，（II）においては $i=2$ が復元図形である．各欠落確率に対して適正な元の標準須恵器図形に復元した件数と復元率を表1にまとめ，横軸を欠落確率，縦軸に復元率としたグラフを図15に示す．ただし，復元率 = (適正に復元した件数) / (試行件数) と定める．



(I) 適正に復元した結果



(II) 適正に復元しなかった結果

図14 連想復元結果

表1 および図15は，欠落確率が25%以下の確率で欠落したデータでは100%復元し，50%では87%が適正に復元することを示している．50%から75%の間で急激に復元率が低下する．これは，元となる標準須恵器図形を特徴づける要素（部分）が失われる確率が高くなるためと考えられる．このことより各図形を特徴づける要素は45%内外と考察できる．75%以上の欠落のある実験図形に対して復元率は，少々増加し安定な状態となるが，これは4.3で述べた条件⑤により式(11)の f の値が増加しても欠落がさほど進行しない，

また走査マスクを図11のラスト走査の順と定めているため欠落確率が高くなると左側からの欠落が大半を占め、どの図形に対しても右側輪郭線の一部を含み、図形内部の右よりの要素が縦長に残り易い特性を持つ実験図形となっているためと考えられる。このために縦

表1 連想復元率

欠落確率 (%)	復元件数 (件)	復元率 (%)
5	350	100.0
10	350	100.0
15	350	100.0
20	350	100.0
25	350	100.0
30	348	99.4
35	345	98.6
40	337	96.3
45	331	94.6
50	305	87.1
55	273	78.0
60	208	59.4
65	151	43.1
70	95	27.1
75	35	10.0
80	36	10.3
85	40	11.4
90	41	11.7
95	42	12.0
100	38	10.7

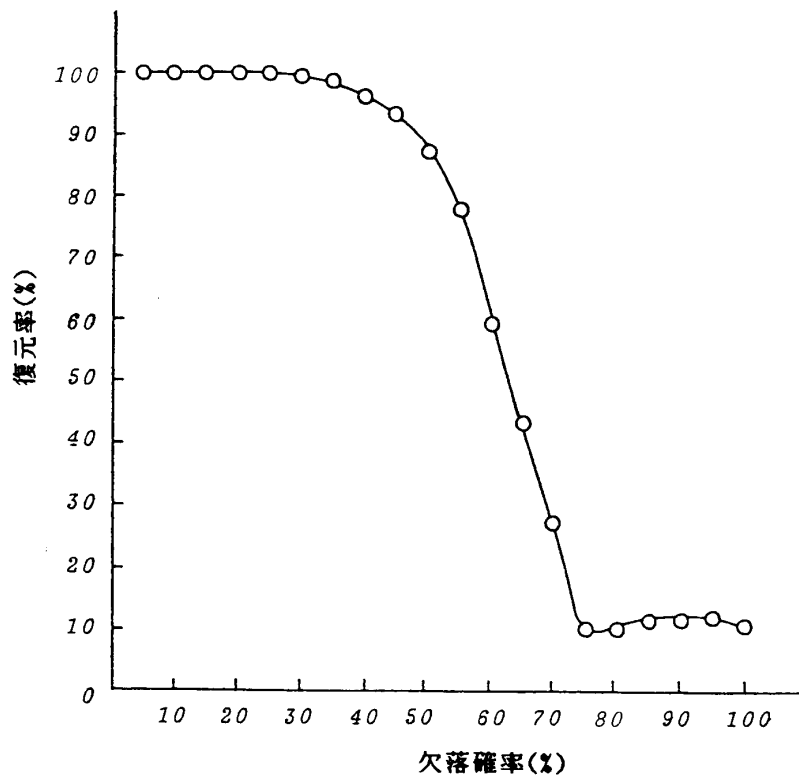


図15 連想復元率

長な高杯，台付直口瓶などの標準図形（図10—(e)，(1)）より作成した実験図形に対して復元率が高くなり，高杯は100%の欠落確率で作成した図形においても適正な標準図形に復元する。他の標準図形から高い欠落確率で作成した実験図形は，同様に縦長な図形となっていることから高杯，台付直口瓶などの標準図形に復元すると考えられるが，多くは何れの標準図形にも復元しない。この結果の意味するところは，不変要素処理の作用に起因して一要素でも元の標準図形の特徴的な要素があれば適正な標準図形に復元するか，そうでなければ何れの標準図形にもならない「復元」になると考えられる。

6. おわりに

本稿では従来の連想記憶モデルを考察し，一，二の改善処理を組入れたモデルを用いて図形の連想復元システムを提案し，考古学資料を用いたシミュレーションの結果について述べた。シミュレーションにより欠落を生じた図形が復元することを確かめた。

考古学者は失われた部分を補う土器形状復元作業の際，残存部分の形状を最も重要な情報として利用しながら過去の経験と連動させて欠落部分を補う。提案したシステムは，残存部分の形状に注目し，連想記憶モデルを用いることにより全体の形状の復元を計算機処理として実現しようとしたものであり，土器形状復元作業の計算機処理化の第一ステップであるとともに，考古学者の復元作業の数理的なモデルの定式化であるとも考えることができる。

今後の興味ある課題としては，実際の土器破片を用いた実験，入力データの自動作成，破片の接続に対する処理などが考えられる。

謝辞 日頃御指導賜わる岡山理科大学池内雅紀助教授，澤見英男講師に深謝致します。有益な御助言を頂いた大阪大学馬野元秀博士に感謝致します。

参考文献

- (1) 小沢一雅：講座・情報工学，季刊考古学，3，p. 91-95 (1983)。
- (2) 甘粕健編：考古学資料の見方<遺物編>，柏書房(1983)。
- (3) T. Kohonen:Content-addressable memories, Springer-Verlag (1980)。
- (4) 梶谷文彦他：一般化逆行列による連想記憶モデル，ME学会大会資料集，p. 326-327 (1974)。
- (5) 村上，相原：連想形記憶の動作範囲について，信学論，58-D，12，p. 776-777 (1975)。
- (6) 上坂，尾関：連想記憶の二，三の性質，信学論，55-D，5，p. 323-330 (1972)。
- (7) 福永，笠井：分散記憶方式とその性質，信学論，161-D，4，p. 222-228 (1978)。
- (8) 飯島泰蔵：講座—パターン認識 [完] 4.，信学誌，56，5，p. 668-677 (1973)。
- (9) 今田，曾根，宇都宮：収束想起方式の連想記憶について，信学論 (D)，160-D，3，p. 224-231 (1977)。
- (10) G. H. Golub, C. Reinsch : Singular Value Decomposition and Least Squares Solutions, Numer. Math., 14, p. 403-420 (1970)。

- (11) 中村浩：須恵器，考古学ライブラリー5，ニュー・サイエンス社（1981）。
- (12) 近藤，藤沢：須恵器編年図表，日本の考古学V古墳時代（下），付録，河出書房新社（1966）。
- (13) Rosenfeld. Kak : Digital pictuer analysis. Springr-verlag (1976).
- (14) 加藤，仁木，馬野，小沢：平面図形の連想について，情報処理学会第30回大会論文集，7M-8，p. 1253-1254（1985）。
- (15) 加藤，仁木，小沢：平面図形の連想復元，情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料 37-5（1985）。
- (16) 加藤，仁木，小沢：土器図形の連想について，情報処理学会第31回大会論文集，6 P-7，p. 1301-1302(1985)。

Studys on the Automatic Figure-based Restoration of Ancint Potteries by the Associative Memory Techniques.

Hiroshi NIKI*, Tunekazu KATO**, Yoshimasa KAMAKI***
and Kazumasa OZAWA****

**Department of Applied Mathematics, Okayama University of Scieuce,
Ridai-cho 1-1, Okayama, 700, Japan.*

***Graduate School of Science, Okayama University of Science,
Ridai-cho 1-1, Okayama, 700, Japan.*

****Department of Fundamental Natural Scinçe Okayama University of Science,
Ridai-cho 1-1, Okayama, 700, Japan.*

*****Information Science Center, Osaka Electro-Communication University,
Hatu-cho 18-8, Neyagawa-shi, Osaka, 572, Japan.*

(Received September 26, 1985)

ABSTRACT

This paper presents an associative restoration system that creates the restoad shape of a given distorted ancient pottery in terms of its plane figure (silhouette). The system has been implemented on the VAX11/780 computer system, based on a mathematical modeling of the associative memory and additional processing techniques.

One of the aims is to reduce archaeologists' labor spent in drawing a huge number of plane figures corresponding to finds given by excaticns.

In our computer simulation, we use 14 types of silhouettes of the "Sueki", Japanese ancient potteries, as the test figures. The results of the simulation are presented and also are discussed in relation to the system performance and archaeology.