

# 破片の三次元多重解像度表現を用いた接合位置特定の一手法

3L-09

橋村 恭治<sup>†</sup> 島井 清文<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>名古屋工業大学

加藤 昇平<sup>‡</sup> 伊藤 英則<sup>‡</sup>  
<sup>‡</sup>豊田工業高等専門学校

## 1 はじめに

考古学分野において出土した遺物を復元する作業は研究者にとって大きな負担となっている。我々は、その負担を軽減するため、三次元メッシュデータで入力された土器破片を計算機上で自動的に復元するシステムを開発している。現在までに、土器破片の三次元メッシュ表現から、破断面や表面などの領域(特徴面と呼ぶ)を抽出する方法[1]、および、接合箇所を特定するための特徴面の三次元形状比較の一手法[2]を提案している。本研究では、破片の表面形状を用いて、接合対の幾何学的な位置関係を評価するための関数を提案し、同評価関数を用いて、精度の高い接合位置の特定を試みる。

## 2 先行研究とその問題点

先行研究[1],[2]によって、例えば、図1に示す破片A,Bのメッシュデータから6面の特徴面 $a_1, \dots, a_6$ および $b_1, \dots, b_6$ をそれぞれ抽出し、それらの輪郭形状を比較判別することにより、A,Bが特徴面 $a_1, b_1$ を接合面として接合可能と判定するシステムが実現している。しかし、接合処理に関しては提案されておらず、接合面 $a_1, b_1$ の重心と輪郭線をそれぞれ合わせる程度の単純な接合処理では破片間に「ずれ」が生じ、正確な接合位置を特定することは不可能だった。そこで本研究では、特徴面の内部に含まれる三角パッチの幾何情報を用いて面内部の三次元形状を考慮することにより、接合面の正確な接合位置の特定を試みる。

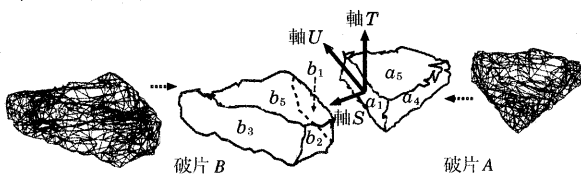


図1: 特徴面と三次元座標系

本研究では、接合対となる一対の破片A,Bが与えられたとき、Aの位置を基準とし、Bの位置を変化させながらA,Bの幾何学的な位置関係を評価することにより、同対の正確な接合位置を探索する。Bの移動方法はAの接合面 $a_1$ の重心に原点を置いた直交3軸S,T,U(図1)の各軸に対する平行および回転移動とする。ここで、S軸は $a_1$ の法線と平行とする。

## 3 破片対の幾何学的位置関係の評価

**定義 3.1** 破片BのAに対する幾何学的な位置関係の評価は以下の評価関数により定義される。

$$F(B) = \alpha f(B) + \beta g(B) + \gamma h(B), \quad (1)$$

ただし、 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

ここで、関数 $f$ はA,Bの復元後の土器の表面(図1中 $a_5, b_5$ に相当)の曲面のずれを考慮に入れた評価関数であり、関数 $g$ および $h$ は接合面 $a_1, b_1$ の距離と噛み合をそれぞれ評価する関数である。

### 3.1 表面の曲形状の評価( $f$ )

復元後の土器の表面は、なだらかな曲形状を持つ場合が多い。そこで関数 $f$ では、破片対の表面の曲形状のずれを評価する。

Finding a Quasi-optimal Joining Position of Potsherds in 3D Multi-resolution Mesh Representation, Kyoji Hashimura<sup>†</sup>, Kiyohumi Shimai<sup>†</sup>, Shohei Kato<sup>‡</sup>, and Hidenori Itoh<sup>†</sup>. <sup>†</sup> Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan <sup>‡</sup> Toyota National College of Technology 2-1 Eisei-cho, Toyota 471-8525, Japan

**定義 3.2** 接合対A,Bにおいて、接合後の表面 $a_5, b_5$ 上にU軸の垂直方向に等間隔に引いたI本の二次の回帰曲線 $l_i^{a_5}, l_i^{b_5}$ をそれぞれ考える<sup>注1</sup>。そして、曲線対 $l_i^{a_5}, l_i^{b_5}$ において、それぞれの接合面 $a_1, b_1$ 側の端点における接線を考え(図2)、これらの接線のなす角を $\phi_i$ とする。このとき、BのAに対する曲形状のずれの評価関数 $f(B)$ は以下の式で定義される。

$$f(B) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \frac{\phi_i}{\pi}. \quad (2)$$

ここで $f(B)$ は0~1の実数値を取り、値が小さいほど表面の曲形状のずれは小さい。

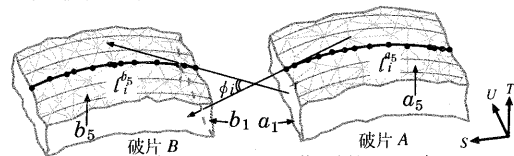


図2: 表面 $a_5, b_5$ の曲形状の評価

### 3.2 接合面の距離の評価( $g$ )

次に、破片対A,Bの接合面 $a_1, b_1$ の距離を評価する関数について説明する。

**定義 3.3** まず、破片Aにおける接合面 $a_1$ に含まれる三角パッチの頂点を $v_j^{a_1}$ とし、 $v_j^{a_1}$ から引いたS軸に平行な直線とBの接合面 $b_1$ との交点 $e_j^{b_1}$ を求め、ベクトル $\overrightarrow{v_j^{a_1} e_j^{b_1}}$ を考える(図3)<sup>注2</sup>。このとき、BのAに対する接合面間の距離を評価する関数 $g(B)$ は以下の式で定義される。

$$g(B) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (1 - \exp(-d_j/\delta)), \quad (3)$$

$$d_j = |\overrightarrow{v_j^{a_1} e_j^{b_1}}|.$$

ここで $J$ は $v_j^{a_1} e_j^{b_1}$ の総数である。 $g(B)$ は0~1の実数値を取り、0に近いほど接合面間の距離は小さい。

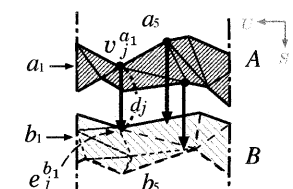


図3: 接合面の距離

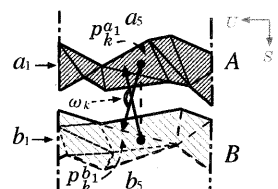


図4: 接合面の噛み合

### 3.3 噛み合の評価( $h$ )

最後に、破片対A,Bの接合面 $a_1, b_1$ における凹凸の噛み合を評価する関数について説明する。

**定義 3.4** 接合面 $a_1$ 上の三角パッチ $p_k^{a_1}$ について、 $p_k^{a_1}$ の重心から引いたS軸に平行な直線と接合面 $b_1$ との交点を求め、交点を含む $b_1$ 上のパッチ $p_k^{b_1}$ を求める(図4)<sup>注3</sup>。このとき、BのAに対する接合面の噛み合を評価する関数 $h(B)$ は以下の式で定義される。

$$h(B) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left( \frac{\pi - \omega_k}{\pi} \right)^2. \quad (4)$$

ここで $\omega_k$ は $p_k^{a_1}, p_k^{b_1}$ の法線ベクトルのなす角であり、 $K$ は $a_1$ に含まれるパッチ数である。 $h(B)$ は0~1の実数値を取り、0に近いほど接合面の噛み合は良好と評価される。

注1 2曲線 $l_i^{a_5}, l_i^{b_5}$ は同一平面内に存在する。

注2 直線が $b_1$ との交点を持たない場合はベクトルを考えない。

注3  $p_k^{a_1}$ に対応するパッチが $b_1$ 内にはない場合は $\omega_k = \pi$ とする。

#### 4 多重解像度表現を用いた探索手法

本稿では、与えられた接合可能な破片対  $A, B$  に対して、 $A$  を基準に  $B$  を徐々に移動させながら、前節で定義された評価関数  $F(B)$  を用いて破片対の幾何学的位置関係を評価することにより、 $B$  の準最適な位置を特定するアルゴリズムを提案する。評価値  $F(B)$  が良くなるような、 $B$  の移動方法とその移動量は、一般に、三次元空間上に広く存在するため、探索空間が爆発することは容易に予想できる。一方、本研究では破片の三次元データ表現としてメッシュ表現を採用しており、同表現はメッシュを構成する三角パッチの大きさを変化させた多重解像度表現 (図5) が可能である。

そこで、本研究では、多重解像度表現を用いた反復深化的探索アルゴリズムを提案する。本アルゴリズムは、探索の初期段階では解像度の低い (すなわち、メッシュを構成する三角パッチが比較的大きな) メッシュ表現を用いて、大まかな破片の移動と評価を行ない、探索が進行するにつれて段階的にメッシュの解像度を上げることで、破片の微細な移動と厳密な評価を行なう。本アルゴリズムにより、破片対の準最適な接合位置の特定が、少ない計算量と移動回数で実現できる。



図5: 破片の多重解像度メッシュ表現

図6に接合位置を特定する探索アルゴリズムを示す。本アルゴリズムにおいて、破片に対する1ステップの移動オペレータは、 $S, T, U$  各軸に対するそれぞれ  $\pm d_S, \pm d_T, \pm d_U$  の平行移動、および、各軸を中心とするそれぞれ  $\pm \theta_S, \pm \theta_T, \pm \theta_U$  の回転移動の計12のオペレータから選択される。移動量  $d_S, d_T, d_U$  および  $\theta_S, \theta_T, \theta_U$  については次節で提案する手法により動的に制御される。

##### 4.1 移動量の動的な制御

移動量の制御方法は、各ステップの移動毎に移動量が動的に変化するもの ( $d_S, \theta_T, \theta_U$ ) と、メッシュ表現の解像度に依存した制御 ( $d_T, d_U, \theta_S$ ) に2分される。

移動量  $d_S$  については、 $S$  軸方向の平行移動が破片対の接合面間の距離を補正する役割を持つため、移動前の  $B$  から得られた同距離を評価する関数  $g(B)$  の値に基づき以下の式で決定される。

$$d_S = -\delta \log(1 - g(B)). \quad (5)$$

移動量  $\theta_U$  については、 $U$  軸を中心とした回転が破片対の表面の曲形状のずれを補正する役割を持つため、移動前の  $B$  から得られた同曲形状を評価する関数  $f(B)$  の値に基づき以下の式で決定される。

$$\theta_U = \pi f(B). \quad (6)$$

また、移動量  $\theta_T$  は移動前の接合面  $a_1, b_1$  の法線のなす角を  $\theta_{a_1 b_1}$  とすると、以下の式で決定される。

$$\theta_T = \pi - \theta_{a_1 b_1}. \quad (7)$$

残りの移動量  $d_T, d_U$  および  $\theta_S$  は、破片  $A, B$  を表現するメッシュの解像度に依存して決定される。

移動量  $d_T, d_U$  については、 $a_1, b_1$  を構成する三角パッチの平均辺長  $\bar{E}$  に基づき、以下の式で決定される。

$$d_T = d_U = \bar{E}/2. \quad (8)$$

移動量  $\theta_S$  については、前述の  $\bar{E}$  および  $a_1, b_1$  の重心からそれぞれの外周までの最大距離  $D_{max}$  より、以下の式で決定される。

$$\theta_S = 2 \arcsin(\bar{E}/(4 \cdot D_{max})). \quad (9)$$

#### 5 実験

先行研究において接合可能と判定された土器破片対 (図7左上) を用いて接合位置の特定を行なった。各評価関数の重みを  $\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{3}$  とし、関数  $f$  におけるパラメータを  $I = 20$ 、関数  $g$  におけるパラメータを  $\delta = 10$  に設定した。

#### 多重解像度表現を用いた接合位置特定

入力  $A, B$ : 破片対  $A, B$

出力  $A, B$ : 位置が特定された破片対

```

1 begin
2  escape := false;
3  A, B を最低解像度でメッシュ表現する。
4  repeat
5    bottom := false;
6    if (A, B のメッシュ表現が最大解像度)
7      then escape := true;
8    repeat % 同一解像度における探索
9      m := 評価値が最小となる1ステップの移動オペレータ;
10     B' := move(B, m)
11     if (F(B) > F(B'))
12       then B := B';
13     else bottom := true;
14   until (bottom)
15   A, B の解像度を一段階上げる;
16 until (escape or F(B)=0)
17 end.
```

図6: 探索アルゴリズム

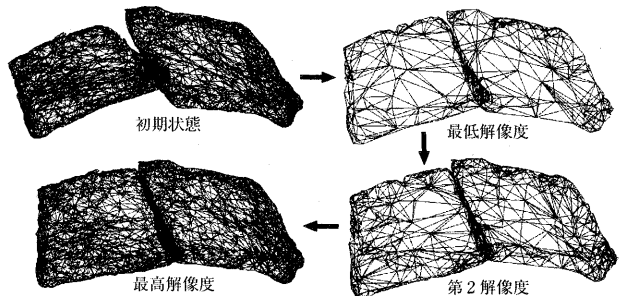


図7: 実験結果

表1: 探索時間と評価値の推移

	$f$	$g$	$h$	$F$	sec(total)
初期状態	0.135	0.296	0.766	0.399	-
最低解像度	0.170	0.101	0.478	0.250	5.253
第2解像度	0.019	0.077	0.499	0.198	16.704
最高解像度	0.031	0.077	0.513	0.207	89.700
単一解像度(最高)	0.022	0.050	0.746	0.273	143.251

図7の実験結果から、ほぼ正確な接合位置が特定できていることがわかる。また、低い解像度の探索で良好な位置関係に収束しており、探索の初期段階における計算量の少ない時点で探索空間が大幅に絞り込まれていることがわかる。表1に各段階における探索開始からの実行時間と評価値の推移を示す。同表下段との比較から、単一の解像度表現を用いた探索に比べ、探索時間が約60%に軽減された。なお、単一の解像度表現を用いた探索では、破片移動による評価値  $F(B)$  が局所解に陥ってしまい、良好な接合位置が特定できなかった。

#### 6 おわりに

本稿では、三次元破片の表面形状を考慮に入れた接合位置特定手法を提案し、実験により、その有効性を確認した。今後は、より多くの破片対に対して実験を行ないアルゴリズムを改良し、また、多数破片における接合システムへの応用を検討する予定である。

#### 参考文献

- [1] S. Kato, K. Shimai, S. Takayama and H. Itoh: "Triangle Patch Synthesis for Detection of Three Dimensional Character Surface of Potsherds", in Proc. of IVCNZ-2000, pp. 138-143, 2000.
- [2] K. Shimai, S. Kato, S. Takayama and H. Itoh: "Joint Detection Method based on Iterative Projecting", in Proc. of IASTED Intl. conf. on AI, 2001. (to appear)