

## トリム曲面を用いた土器の欠落形状の表現手法

木下 勉 村木 祐太 松山 克胤 今野 晃市

岩手大学大学院

## Piece Modeling Method around an Hole to Reconstruct an Earthenware Vessel

Tsutomu Kinoshita Yuta Muraki Katsutsugu Matsuyama Kouichi Konno

Graduate School of Engineering, Iwate University

pxw05066@nifty.com murakiyuta@lk.cis.iwate-u.ac.jp matsuyama@eecs.iwate-u.ac.jp  
konno@cis.iwate-u.ac.jp

### アブストラクト

遺物である土器は、多くの場合が砕けた状態で遺跡から出土する。出土した土器片は、土器の分類から、組み立て、復元までを手作業で行っている場合が多い。このとき、欠落部分は石膏などを用いて人手により埋める必要がある。本論文では、破片が欠落している部分に着目して、欠落部分の周りの形状から、欠落部分を表す曲面形状を表現する手法について述べる。本手法は、まず土器表面にローパスフィルタを施し、表面から文様を取り除く。次に、文様を取り除いた表面を利用して、穴をふさぐ曲面をフィッティングにより生成する。最後に、穴の境界を構成し、その境界とフィッティングした曲面により、トリム曲面を構成する。

### Abstract

In many cases, earthenware is broken and excavated from ruins. Generally, all processes from the classification of earthenware to assembly and the restoration are often done by the hand work. At this time, It is necessary manually to bury a lack part by using gypsum etc. In this paper, we propose the method for expressing the surface shape by using the shape around lack part where earthenware is missed. In our method, first of all, the patterns on the surface of earthenware is removed by using the low-pass filter. After that, the surface which is filled the hole is generated from the pattern removed surface. Surface fitting method is employed to generate the hole filling surface. Finally, the trimmed surface is composed by generating the boundary of the hole, and using the boundary and the fitting surface.

## 1. はじめに

遺物である土器は、多くの場合が砕けた状態で遺跡から出土する。出土した土器片は、土器の分類から、組み立て、復元までを手作業で行っている場合が多い。そのため、土器片の数が多ほど復元に時間を要する。また、復元には専門的な知識や経験も必要となり、考古学分野では遺物の復元作業は大きな負担となっている。それに加え、土器の復元作業を人手で行うと、土器片の破損のリスクが高まるといった問題がある。そこで近年、コンピュータを利用して土器片などの破片からの形状復元を支援する研究が行われている [1-8]。特に、文献 [2,3] は、3次元計測器で破片の表面を計測し、計測点群を解析しながら隣接破片を探索する手法である。また、文献 [4] は著者の一部が提案している土器復元手法である。文献 [4] の手法では、文献 [2,3] と同様に3次元計測器により土器片を計測 [5]し、計測点群の表面情報に基づいて隣接する土器片を探索することが可能である。本研究では、文献 [4] で復元した土器データを元データとする。

土器の復元作業の中には、土器片の空間位置および姿勢などによる、隣接土器片の探索以外に、欠落部分の処理の問題がある。土器片を復元するためには、欠落部分を、石膏もしくは樹脂などを用いて人手により埋める必要があるが、この作業は土器の原型を予想することができず、進めることができないため、極めて高度な技術が要求される。

土器の欠落部分を、自動的に補間することに注力した研究はあまりなく、前述のような複数の土器片をコンピュータ上に表現し、組み立てを行うものがほとんどである。計測点群から欠落部分の補間を行う手法 [9] も提案されているが、対象としている物体が工業製品のように製造精度が高いものであり、土器片などの製造精度の低い物体への対応は困難である。文献 [9] では、境界曲線を覆うような曲面をトリミングした、トリム曲面 [10] を生成している。轆轤成型の土器は、表面が滑らかな形状であり、土器片を復元すると滑らかな表面形状が構成される。よって、欠落形状についても、周りの面との滑らかさが要求されるため、曲面表現をベースにして復元を行う。穴の周りの形状は複雑なので、曲面表現を利用する場合、トリム曲面で表現することが適切であると考えられる。

そこで本論文では、3次元計測器で土器片の表面を計測し、計測点群で表現される複数の土器片に対し、欠落部分を覆うトリム曲面の生成手法を提案する。本手法は、3次元計測器で土器片を計測することで3次元座標点群を獲得し、獲得した3次元座標点群から土器の位置・姿勢を文献 [4] の手法により、マッチングをしたものを対象とした手法である。まず文様と呼ばれる縄文土器特有の凹凸模様を、土器表面にローパスフィルタを施すことで取り除く。次に、文様を取り除いた表面を表す点群を補間して、欠落部分を覆う曲面を生成する。最後に、欠落部分を表す境界曲線で、欠落部分を覆う曲面をトリミングし、欠落部分を表す形状を生成する。トリム曲面を生成することで、土器復元に必要な、欠落部分を補間する形状モデルを生成することが可能となる。また、生成した形状を3次元造型機によ

り試作することも可能となる。

## 2. 関連研究

### 2.1 土器片の凹凸除去手法

縄文土器は、土器表面に文様と呼ばれる凹凸模様が存在するが、土器表面を曲面で近似することを考えた場合、文様の部分はノイズとなる。このようなノイズを除去するためのスムージング手法には、ポリゴン法線に対しガウシアンフィルタを用いた Ohtake らの手法 [11] や、Ohtake らの手法 [11] を基盤とした、彫刻の凹凸を高さ関数で表現する Rony らの手法 [12] がある。文献 [11, 12] はヨーロッパのレリーフのような深い彫刻や、表面の欠損がない場合には向くが、一般的な土器片のように比較的凹凸が浅く、また欠損した状況で出土する土器にはそのまま適用はできない。

### 2.2 曲面補間手法

工業製品に対して、N 辺形領域を自由曲面で補間する手法に、村木らの手法 [9] がある。村木らの手法の対象は自由曲線を境界とする曲面モデルであるが、曲面補間をする過程では、点群モデルを使用するため、本研究で対象とするモデルと同一である。また、最終的にトリム曲面を生成し、曲線で囲まれた N 辺形領域を覆うように補間するアプローチも共通している。しかし、対象としている点群データが、工業製品のように精密に設計された部品向けの手法であり、土器などの製造精度が低いものに適用することはできない。

## 3. 提案手法

### 3.1 文様の除去

縄文土器には、表面に文様と呼ばれる凹凸模様が存在する。計測点群から生成したポリゴンデータを利用して、欠落部分を覆う曲面補間を行うと、生成される曲面データの品質が低くなってしまふ。そこで、本手法では文様をノイズと考え、スムージング処理をすることで、文様の除去を行う。一般的にスムージングの方法としてはローパスフィルタの利用が考えられる。本論文では球面形状を球面としてスムージングが可能であり、処理時間も短時間で実行可能な Taubin の手法 [13] を用いてスムージングを行う。Taubin の手法 [13] はラプラス変換を用いたスムージング手法である。

図 1(a) は、土器片を3次元計測器で計測して得られた点群データに対して文献 [4] の手法を適用し、位置と姿勢を復元したポリゴンデータである。なお、実験で使用した土器片は、著者の一部が作成した縄文土器の模造品を適当に破壊したものである。図 1(b) はこのポリゴンデータにローパスフィルタを1000回施したものである。文様がほぼ除去されている様子が分かる。



(a) 点群データから作成したポリゴン  
[面数 40628]



(b) ローパスフィルタを 1000 回適用したポリゴン  
[面数 40623]

図 1 ポリゴンデータ

なお, Taubin の手法 [13] は, 全てのポリゴンの頂点を, 隣り合う頂点の平均に近づける操作と, 遠ざける操作を交互に行うフィルタリング方法であり, この遠ざける操作の移動スケールファクタと近づける操作の移動スケールファクタを定義する必要がある. ここで, 遠ざける移動スケールファクタを  $\lambda$ , 近づける移動スケールファクタを  $\mu$  とすると, ローパスフィルタ

の伝達関数  $f(k)$ ,  $k \in [0, 2]$  は, 式 (1) のように表される.

また, パスバンド曲率  $k_{pb}$  には, 式 (2) のような条件式があ

り,  $k_{pb}$  を 0.01 から 0.1 の間で  $\lambda$ ,  $\mu$  を求めると良い結果が得られることが実験的に分かっている [13].

$$f(k) = (1 - \lambda k)(1 - \mu k) \quad (1)$$

$$k_{pb} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu} < 1 \quad (2)$$

本研究では, Taubin らの推奨値である式 (3) の方程式の解を利用する.

$$f(1) = -f(2) \quad (3)$$

すなわち, 式 (3) を解くと式 (4) が得られる.

$$(1 - \lambda)(1 - \mu) = -(1 - 2\lambda)(1 - 2\mu) \quad (4)$$

式 (4) を解くためには, パスバンド曲率  $k_{pb}$  を決定する必要がある. Tabuin の手法 [13] では, 推奨値が 0.1 であるが, 本手法では, 土器文様を効率よく除去できるかどうかで, 値を決定する. 具体的には, パスバンド曲率  $k_{pb}$  を 0.01 から 0.1 の間で 0.005 刻みに変化させたときに, 土器文様を効率よく除去できるかどうかを評価した. その結果, パスバンド曲率の値を, 0.01 と決定した.

式 (2) に  $k_{pb} = 0.01$  を代入して式 (5) が得られる.

$$\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu} = 0.01 \quad (5)$$

連立方程式 (4), (5) を解いて

$$\lambda = 0.6324, \mu = -0.6364.$$

が得られる. また, フィルタの適用回数は 1000 回としたが, これは文様がほぼ消える回数を実験結果から求めた実験の数値である.

### 3.2 穴を覆う補間曲面の生成

3.1 節で述べた手法により, 文様を除いたポリゴンを得ることができる. 本節では, 文様を除いたポリゴンを用いて, 複数の土器片で囲まれた領域, すなわち欠落した領域を覆うような補間曲面を生成する手法について説明する. 本研究は, 轆轤成型により製作された土器のような, 表面が滑らかな形状の土器を対象としている. そこで, 欠落部分の周りにおけるポリゴン頂点の空間位置を拘束条件として, 欠落部分を補間する曲面を生成する. このとき, 文様を表す形状は, 滑らかな曲面補間のためにはノイズとなるので, 事前にフィルターをかけて取り除いておく. 曲面補間のアルゴリズムに関する処理の概要を以下に示す.

#### 1. 境界箱の定義

欠落した部分を囲む仮想の境界箱を定義する. まず, 3 点を通る円に欠落部が含まれるように, ポリゴンの頂点を 3 点選択する. ここではユーザが手動で選択するものとする. 次に 3 点を通る円の中心点を重心とし, 1 辺の長さがこの円の直径と同様の正方形を考える. つまりこの円を内接円とする正方形を決定する.

次に, この正方形を平面の法線の正・負の両方にオフセットすることで境界箱を定義する. 本手法では頂点の選択順の 2 点目から 1 点目に向かうベクトルと, 2 点目から 3 点目に向かうベクトルの外積方向を平面の正方向と定める.

図 2 は, ローパスフィルタ後の土器片のモデルと, 境界箱を生成するために選択した 3 点, 及び土器片で囲まれた欠落部分に, 定義された境界箱を示す.

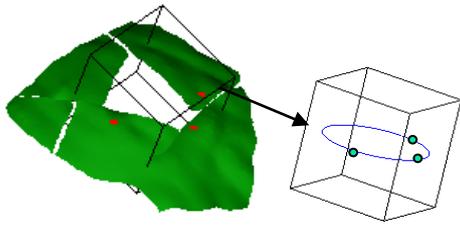


図 2 境界箱の定義

2. 境界箱とポリゴンの干渉線の算出

上下方向を除く境界箱の 4 つの平面とポリゴンの干渉線をポリラインとして求める。それぞれの平面は有限平面と考え、干渉線となるポリラインも完全にそれぞれの平面上にのみ存在するものとする。ポリゴンデータに、微小な穴や隙間などがあり、1 平面に対し干渉線が複数個求まることもあるが、本論文ではすべての頂点を通過する補間法ではなく、最小二乗法を用いた近似法を利用するため、非連続なポリラインは問題にならない。図 3 は、境界箱により定義される 4 つの有限平面とポリゴンデータの干渉線を示している。

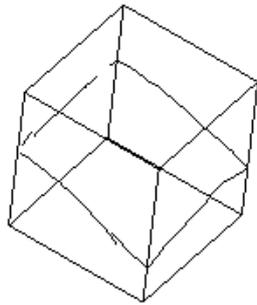


図 3 境界箱の平面とポリゴンの干渉線

3. 干渉線(ポリライン)を 3 次ベジェ曲線で近似

手順 2 の処理で平面ごとに 1 つ以上のポリラインが生成される。このポリラインを干渉線を算出した平面上の 2 次元座標で考えることにする。図 4 は図 3 の 4 つの有限平面のうち、左奥側の有限平面と干渉線を示す図である。

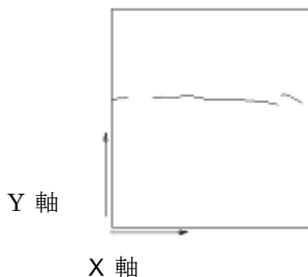


図 4 有限平面とポリライン

図 4 のように有限平面の座標系を、境界箱の 4 辺を利

用した平面上に定義する。平面上のポリラインに対して 3 次スプライン補間を行うことで、曲面の境界曲線を生成する。以下に補間手順を示す。

平面座標系上の頂点数を  $n$  個、座標を  $(x_i, y_i) (i=1, \dots, n)$  とし、求めるスプライン曲線を式 (6) のように定義する。

$$F(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (6)$$

式 (7), (8), (9), (10) の連立方程式から未知数  $a_0, a_1, a_2, a_3$  を解くことで平面座標系上に 3 次スプライン曲線が定義できる。

$$n \cdot a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_3 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (7)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right)a_3 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (8)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5\right)a_3 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \quad (9)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6\right)a_3 = \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i \quad (10)$$

その後、近似したスプライン曲線を 3 次元座標のモデル座標系に座標変換し、ベジェ曲線で表現する。手順 3 の操作をそれぞれの平面に対して行うことで、4 本のベジェ曲線が生成される。図 5 は境界箱とポリゴンの干渉線を、4 本の 3 次ベジェ曲線として生成したものである。

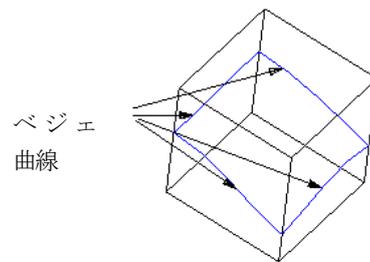


図 5 生成される 4 本の曲線。

4. 4 境界に囲まれたベジェ曲面の生成

手順 3 の処理で生成された曲線をもとに、4 本の曲線で囲まれた領域を 3 次ベジェ曲面で内挿する。ベジェ曲面の内挿方法としては、境界線から基礎パッチ法を用いて、内部制御点を算出 [14] した後、同一の制御点については、平均をとった。内挿の前提条件として 4 本のベジェ曲線の端点が一致している必要がある。手順 3 の処理で求めたベジェ曲線は最小二乗法を利用しているため、端点が完全に一致していない可能性がある。このような場合、有限平面を定義している境界線と曲線の交点を求め、その境界線上での平均点を曲線の端点とすることで、曲線を再生成する。

図 6 は 4 本のベジェ曲線で囲まれる領域を 3 次のベ

ジェ曲面で内挿した例である。

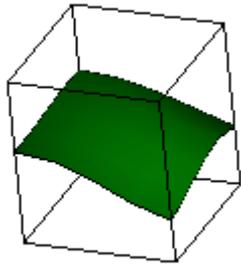


図 6 生成される自由曲面

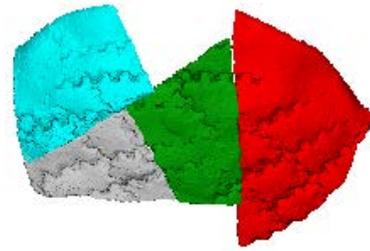
### 5. 境界箱の再定義

手順 4 で生成される曲面の境界曲線は、3.3 節で述べるトリム曲面の元曲面の境界曲線となる。境界曲線の形状は、元曲面の形状の品質に大きく影響するため、より良い品質の曲面を生成できる境界曲線を選出することが必要である。手順 4 で生成される曲面は手順 1 の境界箱の定義に依存する。そのため、手順1 の境界箱の定義で利用した重心点を通り、正方形の法線ベクトルを方向ベクトルとした直線を中心に 1 度ずつ 90 度まで境界箱を回転することで、90 個のベジェ曲面を生成する。その中で境界箱に含まれるポリゴンの頂点との平均距離が最も小さいものを、3.3 節で述べるフィッティング面を算出するときの境界曲線として採用する。

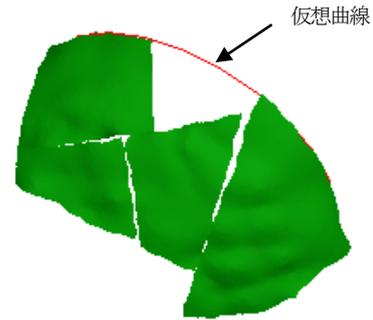
本研究では、曲面の境界曲線の算出が、境界箱の定義に依存する。そのため、曲面と境界箱の定義との依存性を下げるために 90 個の境界箱を定義する手法を用いた。また、フィッティングするサンプル点の多くを、曲面の中心付近に持つ方が良い結果が得られるため、フィッティングのサンプル点の位置を考慮して、平均距離の小さい曲面の中で、最適なものを選択するようにしている。

### 3.3 開口部に対する補間曲面の生成

3.2 節で述べた手法により、4 辺に囲まれた欠落部分に補間曲面を生成することは可能となるが、土器の口縁部の欠損などは 4 辺ではなく、3 辺に囲まれた欠落部分となる可能性が高い。そのため、3 辺で囲まれた部分を覆うような補間曲面の生成方法も必要である。なお、滑らかな曲面補間を行うためのフィルター処理は、3.2 節で述べた手法と同様に事前に施されていると仮定する。3 辺への曲面補間のアルゴリズムの概要を以下に示す。図 7 は、ローパスフィルタ後の土器片のモデルと、仮想曲線の関係を示した図である。



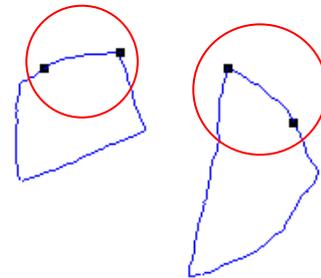
(a) 点群データから作成したポリゴン[面数 24426]



(b)ローパスフィルタ後のポリゴン[面数 24422]と仮想曲線  
図 7 仮想曲線の定義

#### 1. 仮想曲線生成のためのサンプル点の取得

欠落した部分を囲む境界を構成するため、実際には形状の存在しない部分に、仮想の曲線を定義する必要がある。本手法では、欠落部に接する 2 つの土器片について、それぞれの開口部からポリラインを抽出する。まずは、対象となる土器片の境界線上でポリラインの端点を 2 点ずつ選択する。ここではユーザが手動で選択するものとする。そして、それぞれの頂点の間に存在するポリラインを取り出す。図 8 は、仮想曲線が滑らかに接続されるべき 2 つの土器片の境界曲線と、選択された 2 点から定義されるポリラインを示した図である。丸で囲まれた部分に含まれるポリラインの頂点がサンプル点になる。



(a) 仮想曲線が生成される土器片の境界線と選択領域



(b)選択領域に含まれる 2 つのポリライン

図 8 仮想曲線が生成される土器片の境界線

2. ポリラインの頂点を正規化

最初に手順 1 で取り出された 2 つのポリラインは不連続なため、最も近い頂点間に線分を挿入することで、連続な 1 つのポリラインを生成する。ポリラインから仮想曲線を生成するために、それぞれの頂点座標にパラメータ  $t$  を割り振る。手順としてはポリラインの全長を 1.0 とした場合に、始点からそれぞれの頂点までのポリラインの長さをそれぞれの頂点のもつパラメータ  $t$  の値とする。式で表した場合、式 (11) のように定義される。

ポリラインの頂点数を  $n$  個、座標を  $P_i(x_i, y_i, z_i) (i=1, \dots, n)$  とすると、求めるパラメータと頂点の関係は以下ようになる。

$$t_i = \left( \sum_{k=1}^{i-1} \|P_{k+1} - P_k\| \right) / \left( \sum_{k=1}^{n-1} \|P_{k+1} - P_k\| \right) \quad (11)$$

3. ポリラインを 3 次ベジェ曲線で近似

手順 2 の処理で、頂点ごとに正規化されたパラメータ  $t$  は算出されている。

ポリラインの各頂点座標を  $(F_x(t_i), F_y(t_i), F_z(t_i)) (i=1, \dots, n)$  とし、求める 3 次ベジェ曲線を式 (12), (13), (14) のように定義する。

$$F_x(t) = (1-t)^3 a_0 + 3(1-t)^2 t a_1 + 3(1-t) t^2 a_2 + t^3 a_3 \quad (12)$$

$$F_y(t) = (1-t)^3 b_0 + 3(1-t)^2 t b_1 + 3(1-t) t^2 b_2 + t^3 b_3 \quad (13)$$

$$F_z(t) = (1-t)^3 c_0 + 3(1-t)^2 t c_1 + 3(1-t) t^2 c_2 + t^3 c_3 \quad (14)$$

3.2 節の手順 3 と同様の方法で

$a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2, c_3$  を求めること

でポリラインを 3 次ベジェ曲線で近似変換ができる。

図 9 は 2 つのポリラインと、生成された仮想曲線を示す図である。



図 9 ポリラインと仮想曲線

4. 仮想曲線以外の境界線の算出

手順 3 の処理で生成された仮想曲線以外の残りの 3 つの曲面境界線を算出する。仮想曲線以外は 3.2 節の手順 3 と同様の算出方法を利用するために、干渉線を

求めるための平面を定義することにする。まずは、仮想曲線の始点、終点を通り、それぞれの接線ベクトルを法線とする平面を定義する。



図 10 仮想曲線と始点・終点の平面

次に手順 2 で利用したポリラインの頂点を利用して、仮想平面を算出する。具体的には、仮想平面とポリラインの各頂点からの距離が最小になるように最小二乗法で算出する。図 11 (a) は仮想曲線から算出された仮想平面のイメージ図を示す。算出された仮想平面を、欠落部を完全に覆うことが可能な距離だけ、法線方向の負の方向にオフセットすることで残りの 1 つの平面を定義する。図 11 (b) は仮想平面とオフセット後の平面の関係を示す図である。

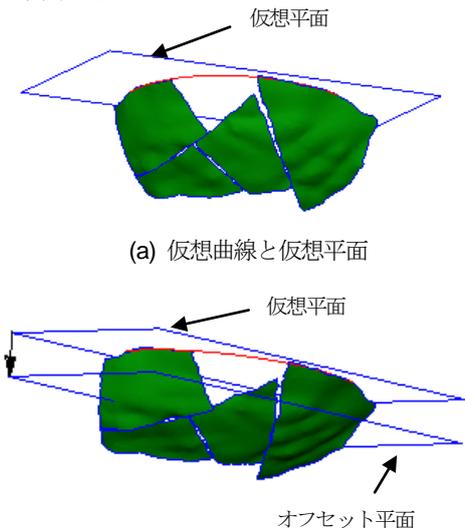


図 11 仮想平面のオフセット

5. 干渉線の生成と曲線の定義

手順 4 で生成される平面とポリゴンの干渉線を求め、3.2 節の手順 3, 4 を用いることにより、1 枚の 3 次ベジェ曲面が生成される。図 12 は干渉線を求めるために求めた 3 つの平面と、仮想曲線、生成されたベジェ曲面を示す図である。

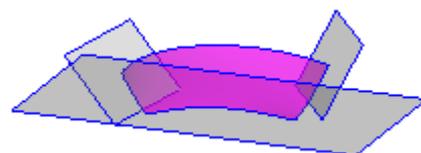


図 12 生成されるベジェ曲面と干渉線

### 3.4 トリム曲面の生成

3.2 節, 3.3 節の手法で, 欠落部を覆うベース曲面の 4 境界の算出は完了している. しかし, 生成された曲面は, 欠落部分の周りの点群を考慮していないので, 欠落部近傍と穴を表す曲面の接続性が良くない場合がある. そこで本手法では, 欠落部の近傍と, 生成されるトリム曲面との接続性を高めるため, ベース曲面のフィッティング処理を行う. 3.2 節の手順 4 で生成した曲面を, 欠落部分と土器片の境界近傍の点群を用いて, 再度フィッティング処理を行い, ベース曲面の再生成を行う. その後, 欠落部分の境界線をこのフィッティング曲面に投影し, トリム曲面の境界曲線を算出する. 処理の概要を以下に示す.

#### 1. 欠落部分から境界線の算出

土器片は配置・姿勢を最適化されてはいるが, 連続したポリゴンデータにはなっていない. そのため, それぞれの土器片から欠落部分に接している稜線を取り出す必要がある. 本研究では各土器片の境界線から 2 点を手動入力し, その区間を土器片の輪郭線から取り出すことで, 境界線となるポリラインを抽出する. なお, ここでの処理対象はスムージング後のポリゴンデータではなく, 点群から直接生成されたスムージング前のポリゴンデータである. なお, 3.3 節で取り扱ったような 3 方向しか欠落部分の輪郭線が存在しない場合, 3.3 節で算出した仮想曲線を利用して, 境界線を定義した.

図 13 (a) は欠落部分近傍の土器片を示したものであり, 図 13 (b) はポリラインで生成した欠落部分を示す境界線である. 図 14 (a) は 3 方向しか欠落部分が存在しない場合の, 境界線を示す図であり, 図 14 (b) はその境界線をポリラインで生成したものである.

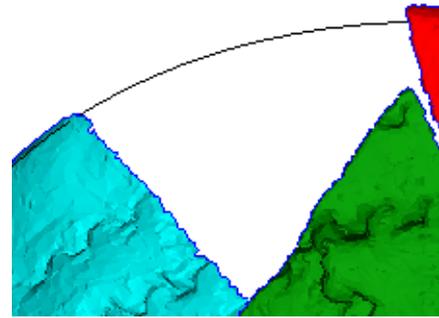


(a) 欠落部分の境界の様子 1

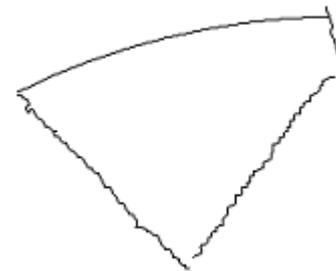


(b) 欠落部分を示す境界線 1

図 13 欠落部分 1



(a) 欠落部分の境界の様子 2



(b) 欠落部分を示す境界線 2

図 14 欠落部分 2

#### 2. 境界線近傍の点群の算出

土器片の欠落部分近傍の点群座標を取得するために, 手順 1 で求めた境界線 (ポリライン) の各頂点から, 半径 2.0mm の境界球に含まれるポリゴンの頂点座標をフィッティングのサンプル点として算出する.

#### 3. 曲面のフィッティング

境界となる 4 つのベジェ曲線から, 手順 2 のサンプル点に乗る B-Spline 曲面を算出する. ここでは村木らの手法 [9] を利用し, 曲面をフィッティングする. ただし, 村木らの手法 [9] では全てのサンプル点が厳しい精度で, 曲面に乗っていることが前提になっているため, そのままでは土器片のように製造精度の低いものには適用できない. そのため, サンプル点との平均距離が許容誤差 0.5mm 以内になる面のうち, 平均距離が最も小さかったものをフィッティング後の曲面とするようにアルゴリズムを変更する. また, 4 つのベジェ曲線を B-Spline 曲線で表現し, さらに各曲線の間中にセグメントを作成するため,  $[0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1]$  のノットベクトルを持つ 3 次 B-Spline 曲線を, ノットベクトル  $[0\ 0\ 0\ 0\ 0.5\ 1\ 1\ 1\ 1]$  を持つ 3 次 B-Spline 曲線に変換した. これは, 村木らの手法 [9] でのサンプル点にフィットする際に, 1 つのパッチ面よりも複数のパッチを持つ面を生成する方が, よりフィッティングの精度が高まるためである.

図 15 と図 16 はフィッティング前後におけるトリム曲面のベース面の変化を示したものである.

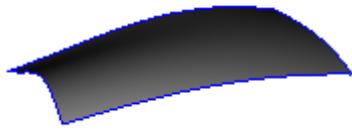


図 15 フィッティング前の曲面



図 16 フィッティング後の曲面

4. 境界線の算出

手順 3 の処理で算出したフィッティング曲面に対し、手順 1 で得られた境界線の頂点を投影する。手順 1 の境界線は連続していないため、投影後の点列の端点をつなぎ、連続した点列とみなすことで、閉ループを構成する。次に、これらの頂点を通る曲線を、曲面上で算出する。

5. トリム曲面の生成

手順 3 で生成したフィッティング曲面と、手順 4 で生成した境界線を用いて、3 次の B-spline トリム曲面を生成する。

図 17 は生成されたトリム曲面を示す図である。赤丸で囲った頂点が、欠落部を示す境界線と最大距離となる部分である。

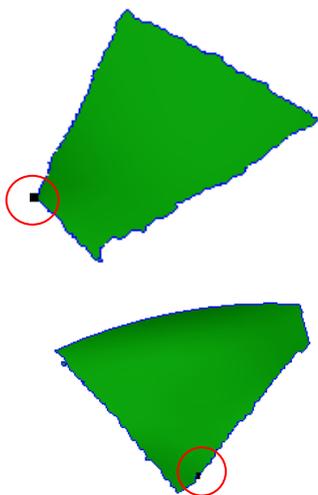


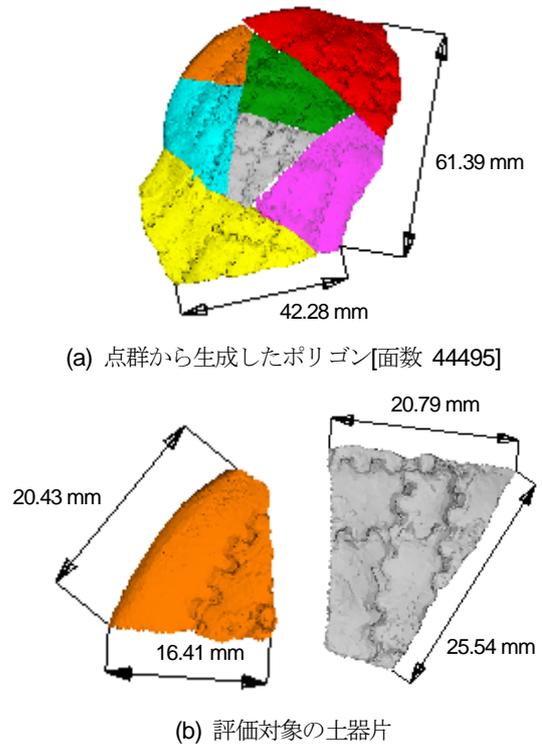
図 17 トリム曲面

4. 実験結果

本手法をいくつかの土器片に適用した結果を示す。実験に利用する土器片は、岩手県滝沢村埋蔵文化財センターで自作した

ものを意図的に破壊したもの、および実際に出土した土器片を利用する。なお、実験で利用した PC は CPU Intel Core2 Duo 2.80GHz メモリ 3.48GB である。

図 18 は、計測点群を用いて 3 次的に位置・姿勢を決定したポリゴンモデルである。実験はまずは、図 18 に示したモデルに本手法を適用する。



(a) 点群から生成したポリゴン[面数 44495]

(b) 評価対象の土器片

図 18 点群から生成したポリゴンとサイズ  
[左:面数 3867] [右:面数 2413]

まず、3.3 節で述べた手法で生成したトリム曲面が妥当かどうかを評価する。図 18 (a) の灰色のモデルと橙色のモデルを削除し、欠落部分とみなしたモデルを作成する。その後、欠落部分を埋めるトリム曲面を生成する。図 17 は、生成したトリム曲面である。また、欠落部分の境界線上のサンプル点と元曲面の最大距離それぞれは 1.36 mm, 1.00 mm 程度となり、妥当なトリム曲面 が生成されたことが分かる。

次に、生成したトリム曲面が、欠落部分を適切に表現できているのかを評価する。図 19, 図 20 は実際の欠落部分となる土器片と、それにローパスフィルタを施したものである。

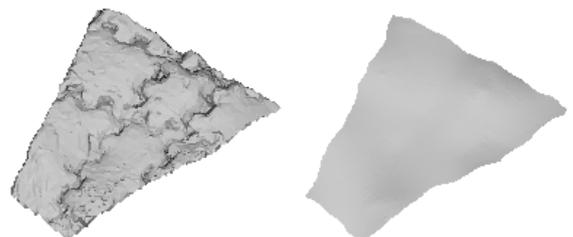


図 19 土器片[面数 3867]とローパスフィルタを施したポリゴン 1[面数 3867]

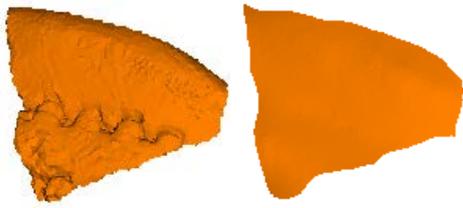
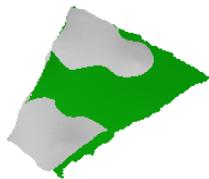


図 20 土器片[面数2413]とローパスフィルタを施したポリゴン 2[面数2412]

図 21, 図 22 は実際の欠落部分となる土器片にローパスフィルタを施したものと, 本手法にて算出した補間曲面を比べたものである。それぞれは上面方向, 側面方向, 背面方向からの図である。近い形状を生成できたといえる。



(a) 灰色のモデルと生成されたトリム面(上面方向)



(b) 灰色のモデルと生成されたトリム面(側面方向)



(c) 灰色のモデルと生成されたトリム面(背面方向)

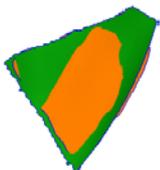
図 21 生成された欠落部分を補間するトリム曲面 1



(a) 橙色のモデルと生成されたトリム面(上面方向)



(b) 橙色のモデルと生成されたトリム面(側面方向)



(d) 橙色のモデルと生成されたトリム面(背面方向)

図 22 生成された欠落部分を補間するトリム曲面 2

実際に出土した土器に対して, 本手法を適用した結果を以下に示す。

図 23 は, 計測点群を用いて, 万福寺遺跡群から出土した土器 [15] をポリゴン化したものである。ポリゴンモデルの中央部分が欠落部分である。本手法を欠落している部分に適用した結果が, 図 24 である。図25は, トリム曲面と元データとの合成を行ったものである。また, 欠落部分の境界線上のサンプル点と元曲面の最大距離は 1.08 mm 程度となり, 妥当なトリム曲面 が生成されたことが分かる。

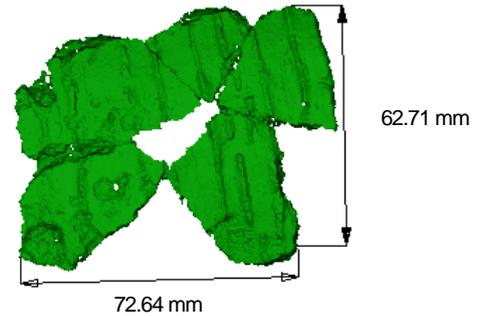


図 23 万福寺遺跡群から出土した土器のポリゴンモデル [面数 48933]



図 24 本手法にて生成したトリム曲面

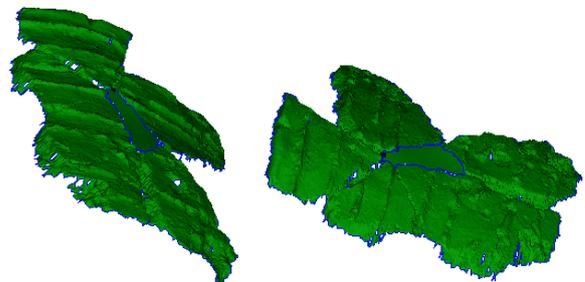
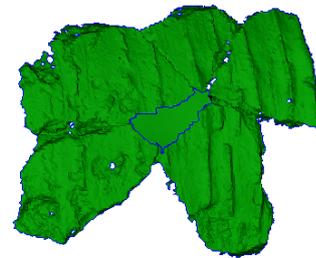


図 25 元データと生成したトリム曲面の合成

図 26 は, 盛岡市遺跡の学び館から借用した土器を, 計測点群を用いて 3 次元的に位置・姿勢を決定したポリゴンモデルである。このモデルから今回の手法にてトリム曲面を生成するために, 一部のデータを取り出して処理を行った。ここでは, 口縁部を欠落部分とした。本手法を欠落している部分に適用し

た結果が、図 27 である。図 28 は、トリム曲面と元データとの合成を行ったものである。また、欠落部分の境界線上のサンプル点と元曲面の最大距離は 2.21 mm 程度となり、妥当なトリム曲面 が生成されたことが分かる。

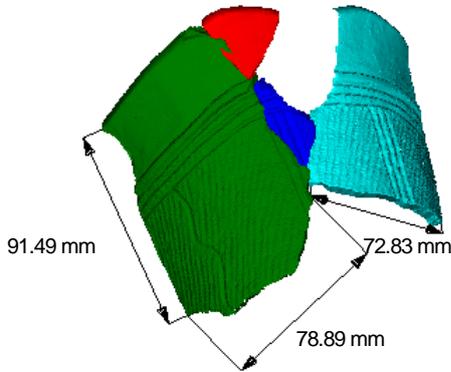


図 26 点群から生成したポリゴン[面数 50685]



図 27 本手法にて生成したトリム曲面

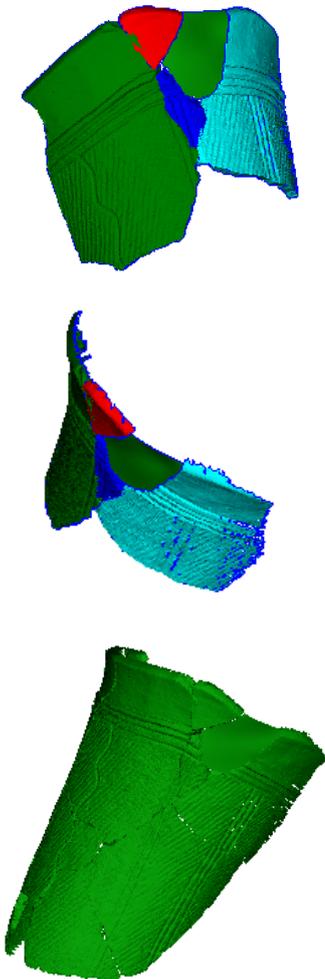


図 28 元データと生成したトリム曲面の合成

最後に、表 1 は、本手法の評価に用いた全てのデータについて、フィルタを施していないポリゴンから生成した欠落部分の境界線の各頂点と、トリム曲面の元曲面の平均距離を示している。また、表 2 は各データの境界箱と本手法にて生成されたトリム曲面の境界箱のサイズを示すものである。この表から、サンプルとなる頂点と元曲面との平均距離、最大距離ともに、期待するトリム曲面が生成されていることが分かる。

表 1 境界線上のサンプル点とフィッティング曲面の距離

対象データ	元データの境界線上の点との平均距離	元データの境界線上の点との最大距離
灰色の土器片	0.23 mm	1.36 mm
橙色の土器片	0.29 mm	1.00 mm
万福寺の土器片	0.22 mm	1.08 mm
遺跡の学び館の土器片	0.64 mm	2.21 mm

表 2 評価したデータの境界箱サイズ

対象データ	生成されるトリム面	欠落部を含むモデル全体
白い土器片	X 19.91 mm	X 57.11 mm Y 83.50 mm Z 21.10 mm
	Y 23.70 mm	
	Z 5.39 mm	
橙の土器片	X 14.62 mm	
	Y 20.45 mm	
	Z 5.67 mm	
万福寺の土器片	X 16.59 mm	X 68.29 mm Y 88.82 mm Z 13.52 mm
	Y 23.62 mm	
	Z 0.74 mm	
遺跡の学び館の土器片	X 52.05 mm	X 149.26 mm Y 147.62 mm Z 77.28 mm
	Y 37.90 mm	
	Z 7.40 mm	

## 5. まとめと今後の課題

本論文では、計測点群にローパスフィルタを適用し、文様部分を除去した後、欠落部を覆うベース面を求め、さらに欠落部近傍点でベース面をフィッティングすることでトリム曲面を生成する手法について述べた。今後は、トリム曲面上に文様の再現を行う手法や、欠落部形状に厚みを持たせることで、より復元作業者の負担を減らす方法を検討する。

本研究の一部は、科研費 (20500880) の助成を受けたものである。

なお、本論文は NICOGRAPH2011 秋季大会で発表した論文 [16] に加筆したものである。論文査読者からの有益なご指摘に深謝する。

## 参考文献

[1] 坂本麻衣, 安原彰吾, 加納政芳, 加藤昌平, 伊藤英則,

輪郭形状の階層表現に基づく接合箇所検出土器復元への応用,  
画像電子学会誌, 第 34 巻, 第 3 号, pp.228-235, 2005.

[2] QiXing Huang, S.Flory, N.Gelfand, M.Hofer and H.Pottmann,  
Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching, ACM  
SIGGRAPH 2006, pp.569-578, 2006.

[3]B.Brown,C.Toler-Franklin, D.Nehab, M.Burns, A.  
Vlachopoulos, C.Doumas, D.Dobkin, S.Rusinkiewicz and  
T.Weyrich, A System for High-Volume Acquisition and  
Matching of Fresco Fragments: Reassembling Theran Wall  
Paintings, ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)  
2008, Vol.27, No.3, 2008.

[4] K. Shoji, K. Konno, T. Konno, F. Chiba, An Algorithm of  
Fracture Matching Based on Measured Point Set of Fragment  
Surface, IWAIT 2011, CD-ROM, 2011.

[5] E. Altantsetseg, Y. Muraki, F. Chiba, and K. Konno, 3D  
Surface Reconstruction of Stone Tools by Using  
Four-Directional Measurement Machine, The International  
Journal of Virtual Reality (IJVR), Vol.10, No.1, pp.37-43, 2011.

[6] 堀謙太, 今井正和, 小笠原司, 遺物復元を考慮した破片デ  
ータの表現モデルと破片間の接合箇所検出法, 日本情報考古学  
会誌, Vol.5, No.2, pp.1-10, 2000.

[7] 堀謙太, 今井正和, 小笠原司, 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-II,  
Vol.J83-D-II, Vol.5, pp.1329-1394, 2000.

[8] 加納政芳, 加藤昌平, 伊藤英則, 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, 第42 巻, 第11号,  
pp.2689-2698, 2001.

[9] Y.Muraki, K.Konno, Y.Tokuyama, Curve Mesh Modeling  
Method of Trimmed Surfaces for Direct Modeling, The Journal  
of Art and Science, Vol.10, No.1, pp.12-27, 2011.

[10] G. Farin, Curves and Surfaces for Computer Aided  
Geometric Design, A Practical Guide, Academic Press, 1996.

[11] Y. Ohtake, A. Belyaev, and H.P. Seidel, Mesh Smoothing  
by Adaptive and Anisotropic Gaussian Filter Applied to Mesh  
Normals, Vision, Modeling and Visualization, pp.203-210, 2002.

[12] R. Zatzarinni, A. Tal, and A. Shamir, Relief Analysis and  
Extraction, SIGGRAPH Asia, ACM Transactions on Graphics,  
Vol.28, No.5, 2009.

[13] Taubin, G, A signal processing approach to fair surface  
design, In ACM SIGGRAPH Conference Proceedings,  
pp.351-358, 1995.

[14] 今野晃市, 3次元形状処理入門, サイエンス社, 2003.

[15] 原田昌幸, 北原賽徳, 今泉克巳, 神奈川県川崎市万福寺遺  
跡群, 有明文化財研究所万福寺遺跡群発掘調査団, 2005.

[16] 木下 勉, 村木 祐太, 松山 克胤, 今野 晃市, トリム曲面  
を用いた土器の欠落形状の表現手法, 第 27 回 NICOGRAPH  
論文コンテスト, 2011.

## 木下 勉



1993年東京理科大学理学数学科卒業。同年トヨタ自動車(株)入社。2003年よりラティス・テクノロジー(株)入社。2008年より岩手大学大学院工学研究科博士後期課程在学中。3次元形状研究に興味を持つ。芸術科学会会員。

大学工学部教授。CG,CAD,VR,遺物計測などの研究に従事。著書に「3次元形状処理入門」がある。博士(工学)、芸術科学会、映像情報メディア学会、日本情報考古学会、情報処理学会、IEEEの会員。

## 村木 裕太



2005年岩手大学工学部情報システム工学科卒業。2010年同大大学院工学研究科博士後期課程修了。同年、同大学術研究員。幾何モデリング、CG、CAD、3D計測システムなどの研究に従事。博士(工学)精密工学会会員。

## 松山 克胤



1999年、岩手大学工学部情報工学科卒業。2001年、同大大学院工学研究科博士前期課程修了。2005年、同大大学院工学研究科博士後期課程修了。公立はこだて未来大学を経て、現在、岩手大学工学部助教。CG、情報可視化、インタラクティブシステムなどの研究に従事。博士(工学)

## 今野 晃市



1985年、筑波大学第三学群情報学類卒業。(株)リコーソフトウェア研究所、ラティス・テクノロジー(株)を経て。現在、岩手