

石器剥離面の B-spline 曲面近似に基づく計測点群の圧縮・復元手法

佐々木 将希¹⁾(学生会員) 木下 勉²⁾(正会員) 松山 克胤¹⁾(正会員)
千葉 史³⁾(非会員) 今野 晃市¹⁾(正会員)

1) 岩手大学大学院工学研究科 2) 福井工業大学環境情報学部 3) 株式会社ラング

An Examination of Compression and Restoration Method of Measured Point Cloud Based on B-spline Surface Approximation of Flake Surfaces in Stone Implements

Masaki Sasaki¹⁾ Tsutomu Kinoshita²⁾ Katsutsugu Matsuyama¹⁾
Fumito Chiba³⁾ Kouichi Konno¹⁾

1) Graduate School of Engineering, Iwate University

2) Faculty of Environmental and Information Sciences, Fukui University of Technology

3) LANG CO.,LTD.

msasaki @ lk.cis.iwate-u.ac.jp

PXW05066 @ nifty.com

{matsuyama, konno} @ eecs.iwate-u.ac.jp

f-chiba @ lang-co.jp

概要

石器や土器などの遺物の3次元計測によって得られた点群データに基づき、考古学的な調査や分析が行われている。遺物は考古学上貴重なものであり、移動にリスクを伴うものが存在する。また、一つの遺跡から大量に出土する遺物を計測のために移動させることは、運搬に関わる梱包などの作業の負担が大きい。そこで、出土した遺物を現地で計測し、計測データをネットワークを介した通信により転送できると、効率的にデータ処理を行うことが可能である。しかし、3次元点群データは物体の細かい形状変化の表現に優れる一方、高精度計測を行った場合などに構成要素である点の数が増加し、データ量が大きくなりやすく、データ転送に時間がかかるという問題点がある。データ転送を効率よく行うためには、データの圧縮手法が有効である。そこで、本論文では、石器剥離面を B-spline 曲面で近似して、剥離面を表す点群よりも少ない制御点数のトリム曲面を生成することで、データを圧縮する手法を提案する。また、トリム曲面から計測点群を再生成する手法もあわせて提案する。本手法を実装し、計測間隔 0.1mm で計測した石器計測点群に適用し、有効性を確認した。

Abstract

Relics such as stone implements and earthenware are analyzed and researched archeologically according to point cloud data obtained by three-dimensional measurements of the relics. Relics are archeologically precious and some relics measured in this study are accompanied by a risk of damage caused by movement. In addition, a large quantity of relics are excavated from archaeological ruins. As such, it has a high cost to move the relics for measurement. Therefore it is effective to measure excavated relics locally and to transfer the measured data via an internet. However, as the measurement precision gets better it will result in a greater number of points which will increase the point cloud data size. Also, the long transmission times for these large-scale point cloud data becomes a problem. One of the methods to solve this problem is to use data compression to express point clouds with smaller amount of data. This study examines the method to compress point cloud data by approximating flake surfaces in stone implements with trimmed surfaces, which can be expressed with the smaller number of control points than the total number of points in a point cloud. In addition, this study examines the method to restore a point cloud data from the trimmed surfaces. We applied this method to a point cloud data measuring in a 0.1mm pitch and a good result was obtained.

1 はじめに

3次元計測技術の進歩によって、様々な物体表面をコンピュータに取り込むことが可能になっている。計測された物体の表面は、点群と呼ばれる3次元座標の集合で表現される。物体の計測には3次元計測装置が用いられる。3次元計測装置は、モバイル型装置と固定型装置に分類できる。モバイル型装置の例を図1、固定型装置の例を図2に示す[1][2]。モバイル型装置は、装置が小型で持ち運びに適しているが、固定型装置に比べて計測精度は低く、計測速度も低速である。固定型装置は、モバイル型装置に比べて高精度かつ高速な計測が可能であるが、装置が大型なため装置自体の移動が難しい。

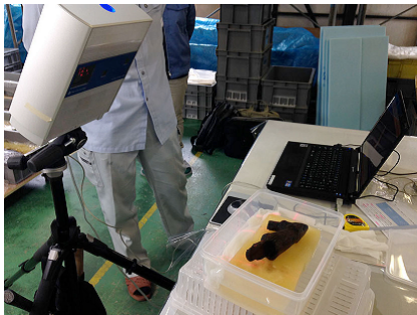


図1 モバイル型計測装置



図2 固定型計測装置

近年、石器や土器などの遺物を3次元計測し、計測データに基づいて考古学的な調査や分析が行われている。例えば、文献[3]では、遺物の3次元計測とデータ処理技術、映像化を活用した歴史資料論の進展を目的とする研究が提案されている。また、文献[4]では、ネットワーク転送によって遺物計測データを集約し、集中的

にデータ処理することによって、発掘調査における作業時間の短縮を目的とした研究が提案されている。

遺物は考古学上貴重なものであり、出土したそのままの形を維持することが非常に重要となる。しかし、遺物運搬専用の梱包を施したとしても、長距離の移動には損壊などのリスクを伴う遺物が存在する。また、遺跡での3次元計測では、大規模かつ精密な計測が必要となることから、固定型の3次元計測装置によって計測を行う必要がある。計測したデータを処理するために計測データを持ち帰る必要がある。複数の遺跡から出土する大量の計測データを短時間で処理するためには、文献[4]で提案されているように、ネットワークを介した通信によって計測データを転送できると効率的である。文献[4]の手法の概要を図3に示す。

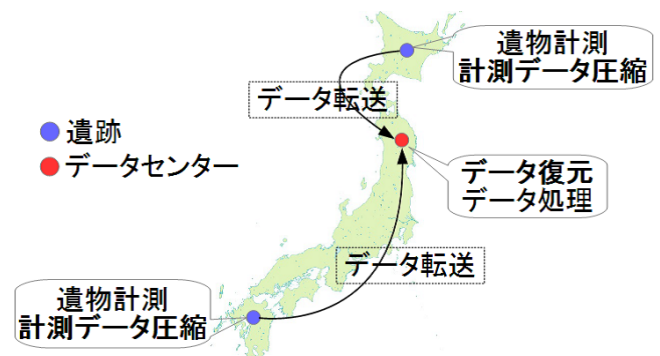


図3 計測データのネットワーク転送

しかし、点群データは計測が高精度になるほど、構成要素である点の数が多くなるため、データ量が大きくなりやすい。また、一つの遺跡から出土する遺物の数は数百から数千点にも上り、全ての遺物を計測した場合、計測データは膨大なデータ量になる。ゆえに、計測データの転送には時間がかかるという問題点が挙げられる。

問題解決の一つの考え方に、点群データを少ないデータ量で表現するデータ圧縮手法がある。文献[5]では、立体の単一の面を表す点群データを、点群の総数よりも少ない制御点数によって表されるトリム曲面で近似することでデータ圧縮を行う手法が提案されている。本研究では、文献[5]の手法を拡張し、点群によって表現される石器モデルの表面を、後述する石器剥離面ごとに分割し、剥離面を構成する点の数よりも少ない制御点数によって表されるトリム曲面でそれぞれの面を近似することで、

データ圧縮を行う手法について提案する。また、近似トリム曲面と計測間隔のデータから、計測時の座標軸方向と、石器の姿勢を再現し、入力した計測間隔で点群を復元する手法についてもあわせて提案する。本研究では、文献 [2] の固定型 3 次元計測装置によって計測された石器計測点群を用いる。

2 関連研究

2.1 多方向同時計測システム

文献 [2] では、多数の遺物の一括測定を可能にするレーザー型自動計測システムが提案されている。図 4 に示すように、この 3 次元計測システムは、ガラステーブル上に複数の遺物を乗せレーザー計測を行う [6]。また、データ欠損が発生しないように、図 4 に示す ABCD の 4 つのレーザー距離センサが取り付けられ、ガラステーブル上の対象物を複数方向から計測することで高精度に一括測定することができる。また、レーザーを用いることで、対象物を非接触かつ高速に測定することが可能である。

レーザー距離センサによる計測結果は点群データであり、図 5 に示すように、ガラステーブル上が x, y 軸、ガラステーブルに対して垂直方向が z 軸になるように、座標軸は決定される。

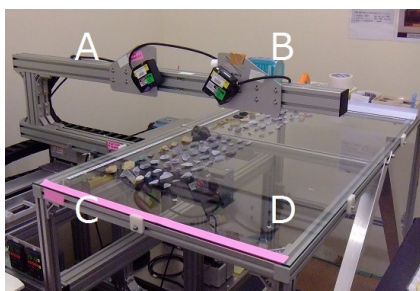


図 4 多方向同時計測システム

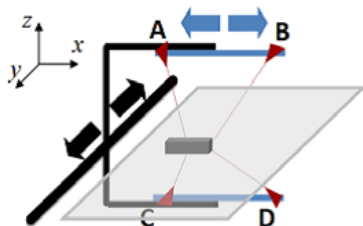


図 5 計測方向

2.2 石器剥離面抽出

本研究は、打製石器と呼ばれる石器を対象としている。打製石器とは、母岩と呼ばれる石器の基となる石に打撃を与えて剥片を作成し、さらに剥片に打撃を加えて道具として整形したものである。母岩から石器を製作する過程を図 6 に示す。石器の製作過程において、本来接合されていた石同士が剥がれたときにできる面を剥離面という [7]。

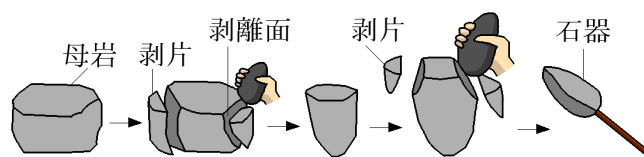


図 6 打製石器製作過程

文献 [8] では、隣接する石器間の位置や姿勢を復元した資料である接合資料を作成するために、石器計測点群から石器剥離面を抽出し、剥離面同士のマッチングを行う手法が提案されている。点群を剥離面ごとに分割するために、剥離面の境界となる稜線を抽出した後、稜線で囲まれる閉領域に属する点群を抽出している。

文献 [8] の稜線の抽出方法は、剥離面の境界となる稜線近傍は曲率が大きく、剥離面の内側は曲率が小さいという性質を利用している。計測点群に軽量化処理を適用すると、稜線近傍では点密度が高く、剥離面の内側付近では点密度が低くなる。そこで、軽量化後の点群の各点とその点の K 近傍点との距離を計算し、最近傍点との距離が閾値以下の場合稜線上の点と判断している。

図 7 は、軽量化された点群から剥離面の稜線上の点群を抽出した結果である。図 8 は、稜線で囲まれる閉領域に属する点群を抽出した結果である。

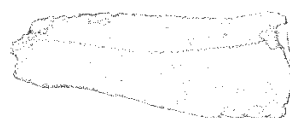


図 7 稜線上の点群

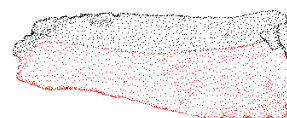


図 8 稜線内の点の抽出

2.3 土器欠落形状のトリム曲面近似

文献 [9] では、土器復元時の欠落部分の補間を目的として、欠落部分を覆うトリム曲面の作成手法が提案さ

れている。文献 [9] では、土器計測点群にローパスフィルタを適用し、土器の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している。近似曲面には 3 次の B-spline 曲面が利用されている [10]。

B-spline 曲面によるフィッティングは、まず、欠落した部分を囲む仮定の境界箱と、ポリゴンの干渉線に基づき、4 本の境界曲線を求める。4 本の境界曲線は端点を接続することで、当てはめる曲面の境界曲線となる 4 辺形領域を生成する。その後欠落部分の輪郭線周辺の点をフィッティングのサンプル点として B-spline 曲面に近似する。曲線・曲面の制御点の導出には最小二乗法を用いる。作成した B-spline 曲面を欠落部を表す境界線に沿ってトリミングすることで、欠落部を覆うトリム曲面を構成する。図 9 は欠落部分を含む土器ポリゴンモデルを示す。図 10 は土器ポリゴンモデルに欠落部を覆うトリム曲面を合成した結果を示す。

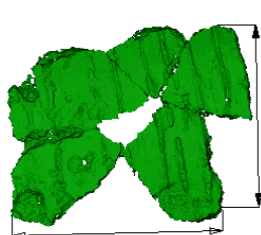


図 9 土器ポリゴンモデル



図 10 元データと生成したトリム曲面の合成

3 提案手法

3.1 概要

本手法では、土器計測点群を剥離面ごとに分割し、各剥離面を構成する点数よりも少ない点数の制御点で表現されるトリム曲面に近似することで、利用する点の量を減らしデータ圧縮を実現する。また、トリム曲面を利用し、計測時の座標軸方向と土器の姿勢を再現し、入力した計測間隔で点群を復元する手法を提案する。

本手法の具体的な手順を圧縮手法と復元手法に分け以下に示す。図 11 は処理の流れである。

- 圧縮手法

1. 計測により、土器計測点群を取得する [2].
2. 土器計測点群を剥離面分割する [8].
3. 曲面近似のために、曲面の境界曲線を求める。
4. 剥離面ごとに曲面近似する [5].
5. 曲面を剥離面の輪郭に沿ってトリミングする。

- 復元手法

1. 復元したい間隔と方向の曲面パラメータを取得する。
2. パラメータに基づき点群を生成する。

3.2 圧縮手法

3.2.1 剥離面分割

まず、土器計測点群を剥離面ごとに分割する。入力した計測点群を軽量化した後に、文献 [8] の手法を用いて土器計測点群の剥離面を抽出する。具体的な手順は以下の通りである。

1. 各点と最近傍点との距離を求める。
2. 最近傍点との距離が閾値以下の場合、稜線上の点として抽出する。
3. 稜線で囲まれる閉領域に属する点群を抽出する。

文献 [8] は、土器片同士のマッチングのために剥離面抽出を行うものであり、剥離面の面積が小さい場合は、誤マッチングの原因となるため、剥離面の抽出を行わない。一方、本手法では土器を構成する全ての面を曲面に近似する必要があるため、剥離面の面積が小さい場合でも抽出を行う。図 12 の赤い点群と緑の点群は、文献 [8] では抽出されていない小領域剥離面点群を示す。

得られた剥離面点群ごとに曲面近似を行うため、それぞれの剥離面点群ごとに適応した方向と大きさの境界箱を作成する。本手法では境界箱に OBB(Oriented Bounding Box)[11] を用いる。OBB は、図 13 に示すように、点群に主成分分析を行うことで各軸が定められる局所座標系によって作成される。

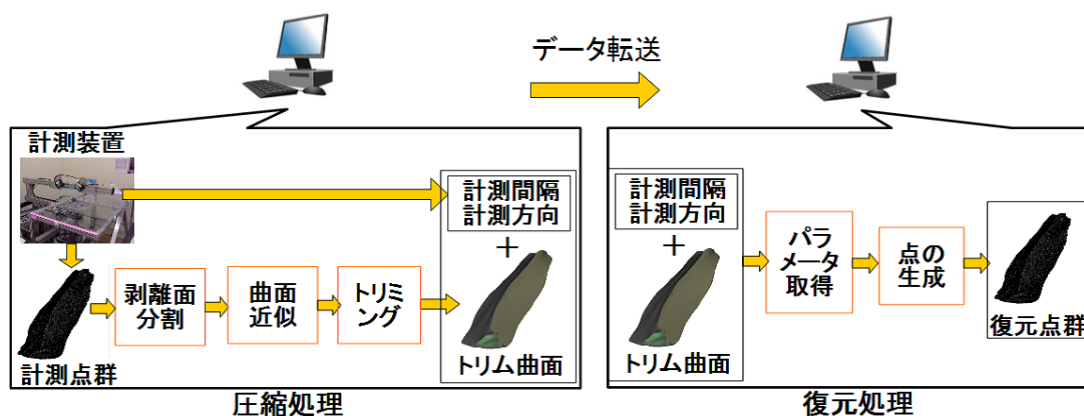


図 11 処理の流れ

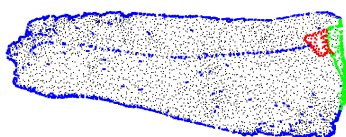


図 12 小領域剥離面の抽出

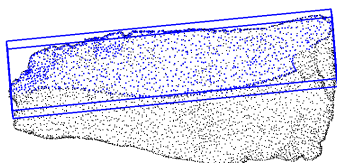


図 13 OBB の作成

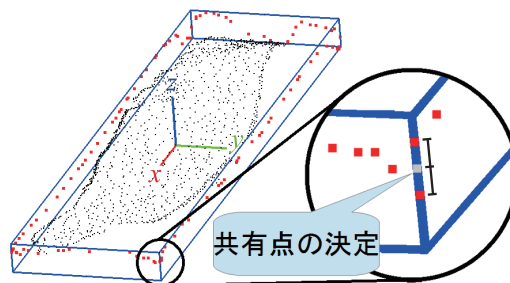


図 14 隣り合う射影面の共有点

3.2.2 曲面の境界曲線作成

点群を B-spline 曲面で近似するには、曲面の境界となる 4 本の曲線を生成する必要がある。本手法では、剥離面点群から輪郭点を抽出し [12]，抽出した輪郭点を OBB の 4 つの側面 (以下、射影面) に射影する。その後、射影した点列を 4 本の B-spline 曲線で近似することで、当てはめる曲面の境界曲線となる 4 辺形領域を生成する。

射影点列の曲線近似を行う際に、隣り合う射影面上の曲線は接続される必要がある。そこで、隣り合う射影面同士で共有する辺の上に共通の点を設定することで、曲線の端点を一致させ、曲線を生成した際に隣り合う射影面の曲線が接続されるようにする。図 14 に示すように、共有点は隣り合う射影面同士で共有する辺の上に端点の z 値平均を求め設定する。端点の共有によって接続された境界曲線を図 15 に示す。図 15 の黒点は曲線制御点を表す。

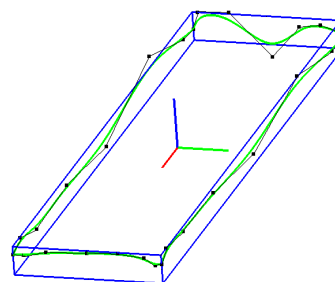


図 15 射影点の曲線近似

$m + 1$ 個の点列 $Q_j (j = 0, \dots, m)$ の B-spline 曲線近似の手順を以下に示す。曲面近似のために、相対する面同士の境界曲線でノットベクトルは等しいものを用いる。

- パラメータの決定

点列を近似する B-spline 曲線を生成するために、それぞれの点を曲線のパラメータと対応させる必要がある。本手法では各点における曲線のパラメータ t_j は以下の

ように決定する [10].

$$d = \sum_{j=1}^m |\mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_{j-1}|$$

$$t_0 = 0, t_m = 1$$

$$t_j = t_{j-1} + \frac{|\mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_{j-1}|}{d}, j = 1, \dots, m - 1$$

● 曲線制御点を求める

最小二乗法により B-spline 曲線の制御点 \mathbf{P}_i を求める. 次数 3, 制御点数 $n + 1$ 個の B-spline 曲線 $C(t)$ は式 (1) のように表される. B-spline 曲線の初期のノットベクトルは, $[0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1]$ である.

$$C(t) = \sum_{i=1}^n N_{i,3}(t) \mathbf{P}_i \quad (1)$$

ここで, $n + 1$ 個の B-spline 曲線の制御点 $\mathbf{P}_0, \dots, \mathbf{P}_n$ は $m \geq n$ を満たす. $N_{i,3}(t)$ は 3 次の B-spline 基底関数であり, $\mathbf{Q}_0 = C(0)$, $\mathbf{Q}_m = C(1)$ を満たす.

● 再帰的処理終了条件の評価

元の点列と生成した B-spline 曲線の距離を計算し, 距離が閾値より小さくなれば処理を終了する. 許容誤差を超えた点が存在する場合は, 許容誤差を超えた点が存在する区間の中央に, その区間の平均値を新たなノットとして挿入する. その後曲線を生成し直す.

3.2.3 曲面近似

得られた境界曲線と境界曲線で囲まれる領域内の点群を利用し, 最小二乗法によって B-spline 曲面の制御点 $\mathbf{P}_{i,j}$ を算出する [5]. 曲面近似の手順を以下に示す.

● パラメータの推定

点群を近似する B-spline 曲面を作成するためには, それぞれの点の u, v パラメータが必要である. 本手法では曲面の境界曲線のうち u 方向に相対する 2 本の B-spline 曲線からルールド曲面を生成し, その曲面に点群を射影することで初期 u, v パラメータを推定する.

ルールド曲面は, u, v パラメータの一つの方向のパラメータ線が直線になる曲面であり, 通常その方向は 1 次式で表現される. 本手法では, OBB による境界箱を用いており, u 方向が最大長になるように曲面式を定義しているため, 曲面の v 方向を 1 次式で表現する. v 方向

の直線は, 相対する u 方向境界曲線の端点をつないだ直線により求める. 曲面の u 方向は相対する 2 本の境界曲線を用いる. 3 × 1 次の B-spline 曲面で表現されたルールド曲面は式 (2) のように表される.

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^1 N_{i,3}(u) M_{j,1}(v) \mathbf{P}_{i,j} \quad (2)$$

ここで, $N_{i,3}(u)$ は 3 次の B-spline 基底関数, $M_{j,1}(v)$ は 1 次の B-spline 基底関数である.

● 曲面制御点を求める

最小二乗法により B-spline 曲面の制御点 $\mathbf{P}_{i,j}$ を求める. 次数 3, 制御点数 $(n + 1) \times (m + 1)$ 個の B-spline 曲面 $S(u, v)$ は式 (3) のように表される. この時曲面の u, v 方向のノットベクトルはそれぞれ x 軸方向, y 軸方向の境界曲線生成の際に利用したノットベクトルを用いる.

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,3}(u) M_{j,3}(v) \mathbf{P}_{i,j} \quad (3)$$

ここで, $N_{i,3}(u), M_{j,3}(v)$ は 3 次の B-spline 基底関数である.

● パラメータ値の補正と再帰的処理終了条件の評価

求めた曲面制御点を利用して, 各点が曲面上で取るパラメータ値を補正する. 補正後, 再び最小二乗法によって曲面制御点を算出する.

元の点群と生成した B-spline 曲面の距離を計算し, 距離が閾値より小さくなれば処理を終了する.

3.2.4 トリミング

3.2.3 項で述べた手法で, 点群を近似した近似曲面と剥離面の輪郭点を用いてトリム曲面を作成する. B-spline 曲面で近似された曲面に剥離面の輪郭点を射影することで, トリム曲面の境界となる点の u, v パラメータを取得する. 得られたトリム曲面の境界によって曲面に作られる閉領域内のみをトリミングすることでトリム曲面を生成できる. 図 16 は近似曲面に輪郭点を射影して得られたトリム曲面の境界を示す. 図 17 は生成したトリム曲面を示す.

一つの剥離面を近似したトリム曲面を作成するために必要なデータは以下の通りである.

- 曲面制御点
- u, v 方向ノットベクトル
- トリム曲面の境界点 u, v パラメータ

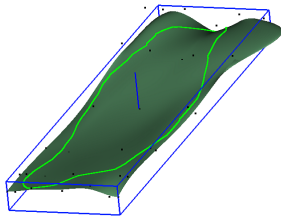


図 16 トリム曲面の境界

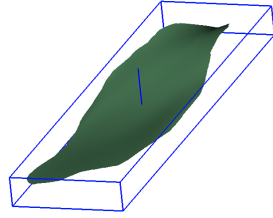


図 17 近似トリム曲面

3.3 復元手法

石器を構成する全ての剥離面に対して近似トリム曲面が作成できている場合、曲面上に点を生成することによって元の石器計測点群を再現した点群を復元することが可能である。本節では、石器計測時の座標軸方向と石器の姿勢を再現し、入力した計測間隔で点群を復元する方法について述べる。

3.3.1 パラメータ方向と間隔の決定

近似曲面は世界座標系の座標軸の方向や距離とは異なった u, v 方向の 0 から 1 までのパラメータによって制御されている。そのため、図 18 に示すように、パラメータの u, v 方向と実際の計測方向である世界座標系の x, y 方向とは関連がない。また、曲面の u, v 方向それぞれの長さも異なるため、 u, v 方向に一定の間隔でパラメータを与えて点を発生させた場合、世界座標系上の x, y 方向において、異なる間隔に点が発生する。

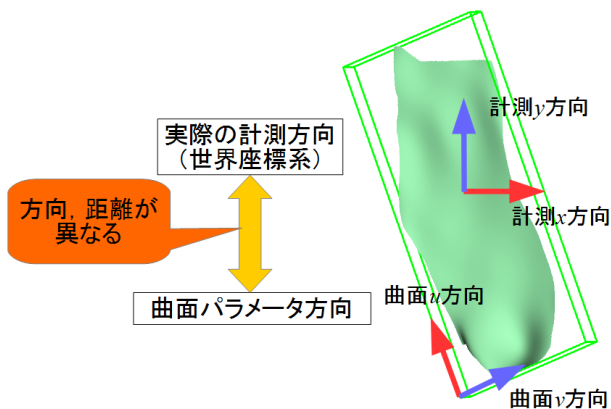


図 18 計測方向と曲面パラメータ方向

そこで、本手法では、まずトリム曲面の輪郭点となる u, v パラメータから復元点群の輪郭点を再現する。再現した輪郭点を、近似曲面の AABB(Axis Aligned Bounding Box)[11] の xy 平面上に射影し、閉領域を作成する (図 19)。作成した閉領域内に、再現したい計測間隔になるような格子点を発生させ、 z 軸を方向ベクトルとして曲面に射影する (図 20)。射影によって得られた曲面上のパラメータから近似曲面上に点を生成する (図 21)。以上の方法により、計測時の座標軸方向と石器の姿勢を再現し、入力した計測間隔の点群を復元することができる。

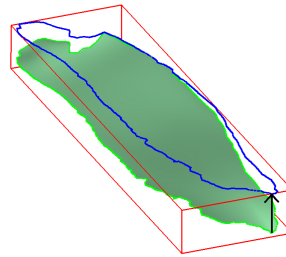


図 19 AABB 上の閉領域の作成

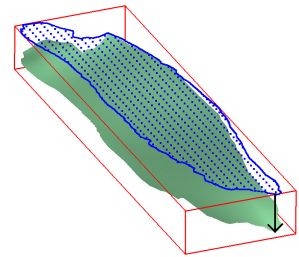


図 20 閉領域内の格子点の作成

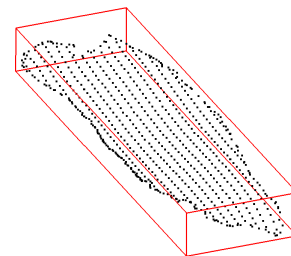


図 21 復元点群

4 実験

3章で述べた手法について、石器を計測して得られた計測点群を用いて検証を行う。実験で使用した PC は、CPU Intel Core i7 3.40GHz、メモリ 8.00GB である。実験には同一の計測装置によって 0.1mm の計測間隔で計測された 2 種類の石器計測点群を用いる。石器 1 の計測点群は総点数 221,207 点、石器 2 の計測点群は総点数 1,050,689 点によって表現される。実験に用いた石器計測点群を図 22、図 23 に示す。なお、図 22、図 23 の計測点群は表示のために点密度を低くしたものである。

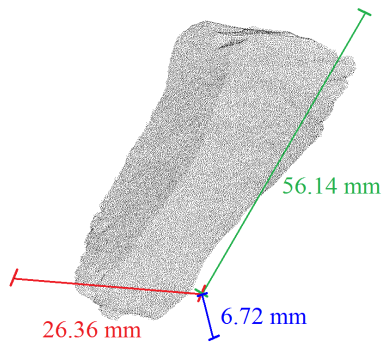


図 22 石器 1 計測点群

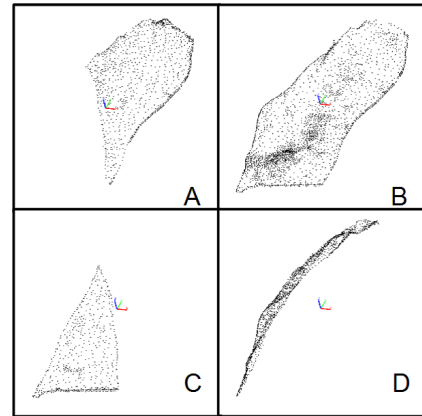


図 25 石器 2 剥離面点群

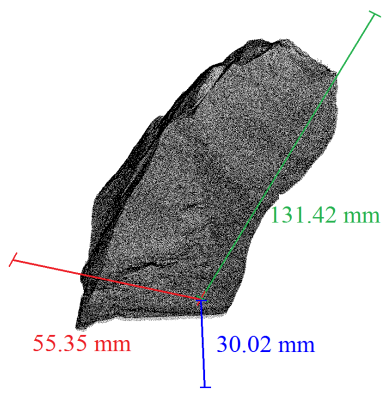


図 23 石器 2 計測点群

抽出した剥離面をそれぞれトリム曲面近似した結果を図 26, 図 27 に示す。また、それぞれのトリム曲面を構成するデータを表 1, 表 2 に示す。

4.1 曲面近似によるデータ圧縮

最初に 3.2 節で述べた、石器剥離面の B-spline 曲面近似によるデータ圧縮手法の有効性を検証する。最初に石器計測点群を軽量化し、軽量化点群を剥離面ごとに分割した。抽出した剥離面点群を図 24, 図 25 に示す。

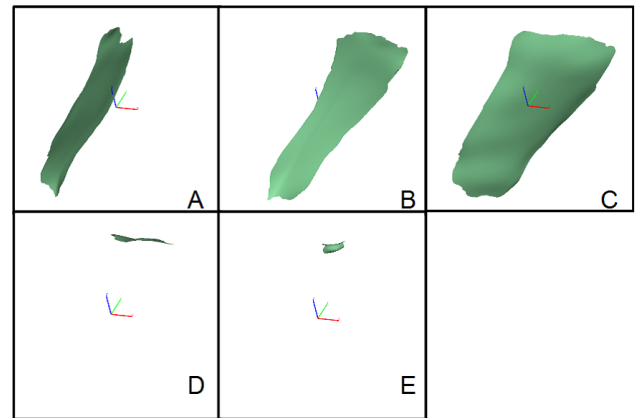


図 26 石器 1 トリム曲面

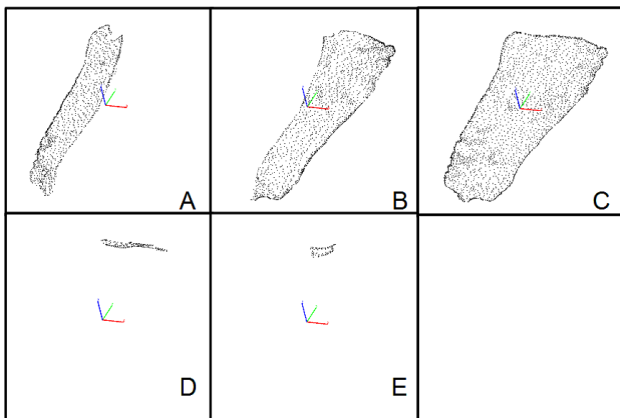


図 24 石器 1 剥離面点群

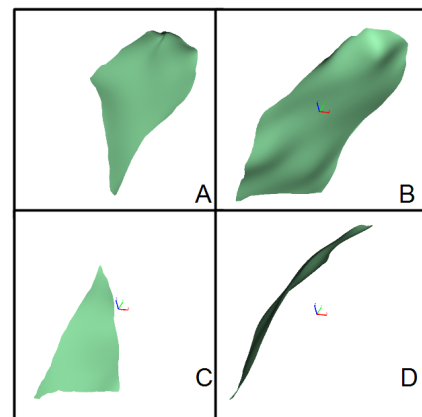


図 27 石器 2 トリム曲面

表1 石器1 トリム曲面構成データ

	曲面制御 点数	総ノット 数	トリム曲面境界 パラメータ数
A	63	24	206
B	63	24	257
C	88	27	312
D	35	20	55
E	36	20	28
全体	285	115	858

表2 石器2 トリム曲面構成データ

	曲面制御 点数	総ノット 数	トリム曲面境界 パラメータ数
A	72	25	77
B	64	24	138
C	42	21	82
D	35	20	165
全体	213	90	462

本手法のトリム曲面は、頂点データだけではなく、ノットベクトルの数値データや、トリム曲面の境界を表す u, v パラメータデータによって表現される。そこで、元の計測点群と本手法によって作成したトリム曲面のデータ量の比較をするために、以下のような計算式に基づきそれぞれの利用する数値データを求める。また、求めた数値データから本手法の圧縮率を求める。表3は本手法による圧縮率を示したものである。

$$(\text{計測点群数値データ個数}) = (\text{総点数}) \times 3[\text{次元}]$$

$$\begin{aligned} (\text{本手法数値データ個数}) \\ = (\text{曲面制御点数}) \times 3[\text{次元}] + (\text{総ノット数}) \\ + (\text{トリム曲面境界パラメータ数}) \times 2[\text{次元}] \end{aligned}$$

$$(\text{圧縮率}) = \frac{\text{本手法数値データ個数}}{\text{計測点群数値データ個数}} \times 100$$

表3 本手法の圧縮率

	計測点群数値 データ個数	本手法数値 データ個数	圧縮率 (%)
石器1	663,621	2,686	0.4047
石器2	3,152,067	1,653	0.0524

4.2 近似曲面を利用した点群復元

次に3.3節で述べた、近似曲面を利用した石器計測点群の復元手法の有効性について検証する。石器1計測点群を近似したトリム曲面から、計測間隔0.1mmと、計測間隔0.5mmで点群を復元した結果をそれぞれ図28、図29に示す。また、石器2計測点群を近似したトリム曲面から、計測間隔0.5mmと、計測間隔1.0mmで点群を復元した結果をそれぞれ図30、図31に示す。0.1mm間隔で復元した図28の石器1復元点群は総点数224,365点、0.5mm間隔で復元した図29の石器1復元点群は総点数9,755点で表現される。また、0.5mm間隔で復元した図30の石器2復元点群は総点数43,536点、1.0mm間隔で復元した図31の石器2復元点群は総点数11,297点で表現される。

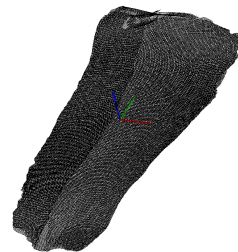


図28 石器1 復元点群 (0.1mm 間隔)

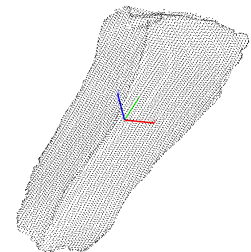


図29 石器1 復元点群 (0.5mm 間隔)

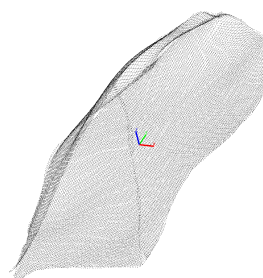


図30 石器2 復元点群 (0.5mm 間隔)

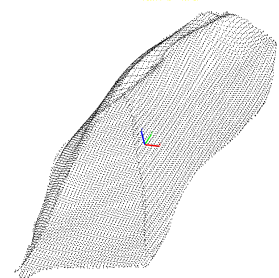


図31 石器2 復元点群 (1.0mm 間隔)

また、計測点群データをそのまま転送する従来の手法と、計測点群データに対して圧縮・復元処理を用いる本手法の合計処理時間を比較する。転送するデータ量は、それぞれの手法で転送する数値データを8Byteの数値データ型として理論値計算したデータ量を用いる。また、転

送処理にかかる時間は、文献 [13] の WiMAX1.5Mbps を利用したデータ転送実験における転送時間を、線形近似計算することで求めた時間を用いる。復元処理にかかる時間は 0.1mm 間隔の復元点群を作成した時間を用いる。石器 1 と石器 2 の処理時間をそれぞれ表 4、表 5 に示す。

石器 1 の本手法による合計処理時間は 16.5 秒であり、従来手法の処理時間と比較して 22.4% 程度の時間となった。また、石器 2 の本手法による合計処理時間は 55.0 秒であり、従来手法の処理時間と比較して 25.1% 程度の時間となった。石器 1、石器 2 共に本手法を用いることで、従来手法よりも短い時間で処理を行うことができています。

表 4 石器 1 処理時間の比較

	圧縮 (sec)	転送 (sec)	復元 (sec)	合計 (sec)	割合 (%)
従来手法	0.0	73.8	0.0	73.8	-
本手法	4.9	1.0	10.6	16.5	22.4

表 5 石器 2 処理時間の比較

	圧縮 (sec)	転送 (sec)	復元 (sec)	合計 (sec)	割合 (%)
従来手法	0.0	218.9	0.0	218.9	-
本手法	16.7	1.0	37.3	55.0	25.1

4.3 誤差評価

計測点群に対して本手法を適用することで生じる誤差を測定する。本圧縮手法は、石器計測点群を軽量化した点群をサンプリング点として曲面近似を行っている。また、復元手法は、近似曲面上に点を生成することで復元点群を作成している。そこで、本手法適用による誤差は、計測点群と同じ計測間隔で復元点群を作成し、作成した復元点群と元の計測点群の距離を計測することで求められる。

そこで、石器 1、石器 2 それぞれに対して、元の計測間隔と同じ 0.1mm 間隔となるような復元点群を作成し、元の計測点群との誤差を計算した。表 6、表 7 に誤差評価の結果と評価した各データの OBB のサイズを示す。表 6、表 7 が示すように、石器 1 の復元点群の最大誤差

は 0.796mm、石器 2 の復元点群の最大誤差は 2.207mm 程度である。また、石器 1 の平均誤差は 0.103mm であり、石器 2 の平均誤差は 0.387mm 程度である。

石器 1 の OBB の最小辺が 6.72mm であることから、石器 1 の OBB の最小辺の長さに対する平均誤差の大きさの比率は 1.53% 程度である。また、石器 2 の OBB の最小辺が 30.02mm であることから、石器 2 の OBB の最小辺の長さに対する平均誤差の大きさの比率は 1.29% 程度である。石器 1、石器 2 共に OBB の最小辺の長さに対する平均誤差の大きさの比率は 2% 以下となっており、石器全体の大きさと比較すると誤差の小さい復元点群が作成できていることが分かる。しかし、石器サイズが大きくなると平均誤差が大きくなることから、曲面フィッティングの精度を向上させるなどの工夫が必要である。

表 6 石器 1 誤差評価と OBB サイズ (単位:mm)

	平均誤差	最大誤差	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
A	0.085	0.796	56.02	13.60	2.86
B	0.111	0.713	55.87	16.75	4.55
C	0.108	0.430	56.14	26.35	2.81
D	0.137	0.472	15.37	5.14	1.44
E	0.085	0.193	5.91	4.12	0.81
全体	0.103	0.796	56.14	26.36	6.72

表 7 石器 2 誤差評価と OBB サイズ (単位:mm)

	平均誤差	最大誤差	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
A	0.323	1.168	112.47	43.74	8.46
B	0.385	2.035	130.98	56.86	8.96
C	0.271	0.955	76.09	39.17	4.33
D	0.573	2.164	131.12	31.18	17.66
全体	0.387	2.164	131.42	55.35	30.02

5 まとめ

本論文では、石器剥離面の B-spline 曲面近似に基づく計測点群の圧縮手法と、近似曲面を利用して計測時の石器姿勢を再現し、入力した計測間隔で点群を復元する手法について提案した。本手法を用いて石器剥離面をトリ

ム曲面近似し，使用する点数を減らすことでデータ圧縮を実現し，近似曲面から計測時の座標軸方向と石器の姿勢を再現し，入力した計測間隔で点群を復元することができた。

謝辞

なお，本論文は NICOGRAPH 2015 で発表した論文 [14] 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] Kaneda, A, “Application of A Low Cost Laser Scanner For Archaeology In Japan”, 22nd International CIPA Symposium, Kyoto, Japan, 2009.
- [2] 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.
- [3] 及川，横山，品川，小菅，松山，今野，千葉，“3D 計測技術を用いた考古資料の接合研究 旧石器時代研究における新しい資料の認識にむけて”，日本考古学協会第 81 回総会，2015.
- [4] F. Chiba, S. Yokoyama, A. Kaneda, K. Konno, “Development of Network-Type Archaeologica Investigation System”, 25th International CIPA Symposium 2015, Taipei, Taiwan, 2015.
- [5] M.Sasaki, T.Kinoshita, K.Matsuyama, K.Konno, “An Examination of B-Spline Surface Approximation for Compression and Transmission of Measured Data of Relics”, IWAIT 2015,CD-ROM, 2015.
- [6] 村木祐太，アルタンツェツェグ・エンフバヤル，千葉史，松山克胤，今野晃市，“多数の遺物を一括測定可能なレーザー型自動計測システム”，日本情報考古学会誌 Vol.20, No.1・2, pp.8-15, 2014.
- [7] 石器技術研究会，石器づくりの実験考古学，学生社，2004.
- [8] 千田，松山，千葉，今野，“接合資料作成のための計測点群による高速な隣接剥離面探索手法”，芸術科学会論文誌，Vol. 13, No. 2, pp. 107 -115, 2014.
- [9] 木下，村木，松山，今野，“トリム曲面を用いた石器の欠落形状の表現手法”，芸術科学会論文誌，Vol.11, No.3, pp.47-58, 2012.
- [10] L. Piegl, W. Tiller, “The NURBS Book”, Springer, Berlin, 1997.
- [11] S.Gottschalk, M.C.Lin, D.Manocha, “OBB-Tree:A hierarchical structure for rapid interference detection”, Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp171-180, 1996.
- [12] S.Oikawa, K.Matsuyama, K.Konno, Y.Tokuyama, “An Examination of Earthenware Restoration System with the Direct Contact to Measured Points”, IWAIT 2012,CD-ROM, 2012.
- [13] G. Silayi, T. Kinoshita, Y. Muraki, K. Matsuyama, K. Konno, “Evaluation of 3D Data Compression and Retrieval Method Based on Curve Mesh Filling”, 14th CAD Conference, CD-ROM, 2014.
- [14] 佐々木，木下，松山，千葉，今野，“石器剥離面の B-spline 曲面近似に基づく計測点群の圧縮・復元手法の検討”，NICOGRAPH 2015, 2015.

佐々木 将希



2014 年，岩手大学工学部電気電子・情報システム工学科卒業．同年より岩手大学大学院工学研究科博士前期課程在学中．

木下 勉



1993年，東京理科大学理学数学科卒業。同年トヨタ自動車社(株)入社。2003年よりラティス・テクノロジー(株)入社。2013年，岩手大学大学院工学研究科博士後期課程修了。現在，福井工業大学環境情報学部准教授。3次元形状研究に興味を持つ。博士(工学)。芸術科学会会員。

松山 克胤



1999年，岩手大学工学部情報工学科卒業。2001年，同大学院工学研究科博士前期課程修了。2005年，同大学院工学研究科博士後期課程修了。公立ほ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)。芸術科学会会員。

千葉 史



1994年，岩手大学工学部情報工学科卒業。2001年，同大学院工学研究科博士後期課程修了。同年，同大学工学部助手。2005年，株式会社ラング入社。現在，同社常務取締役。考古遺物の3次元計測処理技術開発に従事。博士(工学)。日本情報考古学会会員。

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会員。