

空間分割法と石器剥離面の境界領域探索に基づく剥離面認識手法

佐々木 陽 (学生会員) 今野 晃市 (正会員)

岩手大学大学院工学研究科

An Examination of Flake Surfaces Recognition Method Based on Space Division and Boundary Area Search

Akira Sasaki Kouichi Konno

Graduate School of Engineering, Iwate Univ.

{h24j057, konno} @ cis.iwate-u.ac.jp

概要

石器の接合資料は、同一の母岩から製作された石器同士を接合し、隣接する石器間の位置や姿勢を復元した資料である。接合資料の作成は、出土した剥片の色や模様、形を手がかりとして、試行錯誤を伴う手作業で行われているため、剥片が多ければ多いほど多くの時間と労力がかかり、専門的な知識が必要とされる。作業者の負担を減らし、効率的な接合資料の作成を行うために、試行錯誤や手作業等の労力を、大幅に削減する技術が必要とされる。従来、接合資料作成のための石器剥離面の抽出手法が提案されている。しかし、著者らの先行研究では発掘調査報告書に必要な実測図を流用しているため、実測図が存在しない石器データについての剥離面抽出は、非常に困難である。また、実測図作成、流用の工程は手作業のため、手作業の工程が増えてしまい、労力と時間を費やしてしまう。そこで、本研究では、実測図作成、流用の工程削減を目指した、石器剥離面の認識手法について述べる。本手法は、元の点群を軽量化したデータを分割し、分割した点群を入力データとする。この入力データから特徴量を計算し、稜線候補点を抽出する。次に、抽出した稜線候補点上の点群から、kd-Treeを構築し、領域ごとに点密度の計算と、代表点の選出を行う。点密度の大きい領域の代表点を用いて、入力データを左回りに追跡する。追跡した点群は、意味のある点列として格納する。さらに、格納した点列から定義される閉領域から、特徴量に基づいた条件を満たすまで拡張し、境界線を表す点列として抽出する。本手法で抽出した点群で囲まれた閉領域は、剥離面を意味する。本実験では、石器の計測点群を軽量化したデータを用いて、自動的に剥離面を認識できることを確認した。

Abstract

Excavated stone tools peeled from the same mother rock can be restored by assembling stone flakes. In general, excavated flakes are joined manually according to their colors, designs and shapes by trial and error. This process makes joining of flakes more complicated because it takes a long time and needs much effort with special technical knowledge. Therefore, the method is required to substantially reduce the burdens for efficient joining of flakes. Methods to extract flake surfaces of assembling stone tools have been proposed. In such methods, point clouds are separated into flake surfaces using surface boundary and scale drawing. Scale drawing are used to write research excavation reports. Since scale drawing are used to write the reports, abstraction of flake surfaces is very difficult if there are no scale drawing. In addition, the more the number of flakes will be, the more the effort and time will be required for scale drawing. This study examines the method to recognize flake surfaces for not using scale drawing. In our method, the density of point cloud is lowered and ridgelines are extracted from the calculated features by using curvatures. Then, a kd-Tree is built from the candidate points and the point density in each region is obtained. High-dense points are tracked counterclockwise. Thus, a ridgeline is derived from a significant sequence of points. Flake surfaces are recognized by using region growing method from the sequence points. We applied this method to the point cloud data and confirmed an automatic abstraction of flake surfaces.

1 はじめに

石器とは、母岩と呼ばれる原石に打撃を加え、剥片と呼ばれるパーツに分離し、その後道具として使用するために剥片を整形したツールである。また、石器の接合資料 [1] は、同一の母岩から製作された石器同士を接合し、隣接する石器間の位置や姿勢を復元した資料である。図 1 に示すように、石器の接合資料の作成は、石器の作成と逆のプロセスであり、石器をジグソーパズルのピースと見立てたときに、ジグソーパズルを組み立てた結果が接合資料に相当する。

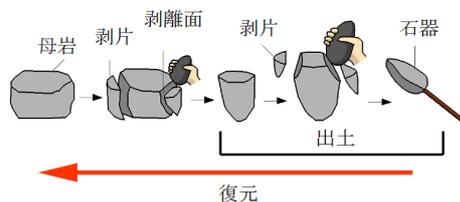


図 1 石器作成と接合資料作成の関係

接合資料からは、石器製作者の製作意図や技術力、行動や生活範囲など様々な情報を得ることができる。接合資料は、通常ひとつの遺跡から出土した石器群を母集団として作成されるが、その中に母岩を復元するために必要な剥片がすべて含まれているとは限らない。そのため、組み立てをいつ終了すればよいかを判断することは困難である。また、図 2 のように、一般に接合資料の作成は、出土した剥片の色や模様、形を手がかりとして、試行錯誤を伴う手作業で行われているため、剥片が多いほど多くの時間と労力がかかり、専門的な知識が必要とされる。さらに、手作業には石器を破損するリスクが伴うため、作業者の負担も大きい。作業者の負担を減らし、効率的な接合資料の作成を行うために、試行錯誤や手作業等の労力を、大幅に削減する技術が必要とされる。著者らの先行研究として、接合資料作成のための石器剥離面の認識手法 [2] が提案されている。しかし、文献 [2] の手法では発掘調査報告書に必要な実測図 [3] を流用しているため、実測図が存在しない石器データについての剥離面認識は、非常に困難である。また、実測図が存在するデータに対して、実測図作成、流用の工程は手作業のため、接合する剥片が多ければ多いほど、手作業の工程が増えてしまい、労力と時間を費やしてしまう。さらに、一般に実測図の作成は手作業であり、ひとつの石器に対

する実測図の作成に 1 日を要することもあるため、文献 [2] の手法では、出土したすべての石器から剥離面認識までには、それぞれの石器に対応する実測図や発掘調査報告書の完成を待つ必要がある。

点群を利用した剥離面認識のためには、点群を剥離面ごとにセグメンテーションする必要がある。例えば、文献 [7, 8] のような、単純な図形への近似や、なめらかな形状の検出するセグメンテーション法が提案されている。また、文献 [9] では、基本形状によるフィッティングを用いたセグメンテーションでは、平面性や曲率が適切であると述べられている。しかし、本研究で扱っている打製石器は、打撃によって形状を生成するため、石器の割れ方によっては複雑な形状が現れる。ゆえに、単純な図形へと近似することは難しく、なめらかな形状が必ずしも存在するとは限らないため、文献 [7, 8] の手法を石器に適用させることは難しい。

そこで、本研究では、実測図作成、流用の工程削減を目指した、石器剥離面の認識手法について述べる。本手法は、石器剥離面の境界稜線近傍の点群を追跡しながら剥離面領域を認識することが可能となる。本実験では、石器の計測点群を軽量化したデータを用いて、自動的に剥離面を認識できることを確認した。2 章以降の構成は次のようである。2 章では、剥離面認識に関する関連研究について説明する。3 章では、計測点群から剥離面の境界稜線の内側に閉領域を生成し、閉領域を拡張する領域拡張法によって、閉領域を剥離面の境界稜線まで拡張する手法について述べる。4 章では、いくつかの石器を計測した点群を用いて、本手法を適用した結果を説明し、5 章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。



図 2 接合資料作成

2 関連研究

2.1 剥離面認識

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石器である。剥片と母岩のように、本来接合されていた石器同士が剥がれたときにできる面を剥離面という [5]。また、石器を計測した点群はデータ量が多く、剥離面認識に時間がかかる。文献 [6] の手法では、計測点群から軽量化データを作成し、軽量化データから剥離面の境界線となる稜線の候補点を抽出する。次に、発掘調査報告書用の実測図を流用し、閉領域ごとに識別子を付加する。そして、計測点群を実測図へ同じ姿勢で正射影することで、実測図に付加されている識別子を各点の属性として付与する。これによって、同一の閉領域に含まれる点群は、同一の識別子を属性として持つことがわかる。文献 [2] で提案された剥離面認識の手法を図 3 に示す。図 3 の黒い枠で囲まれた部分の右側が実測図の例であり、赤い色で示された閉領域が同一の識別子を持つ部分とする。また、右図が転写した結果を示している。

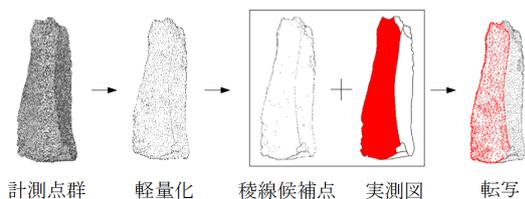


図 3 剥離面認識フロー

2.2 稜線候補点の抽出

2.1 節で述べた剥離面の境界線となる稜線候補点の抽出手法について説明する。剥離面の境界は、稜線で構成される。稜線で囲まれた領域がひとつの剥離面を表し、剥離面の内側は滑らかな形状となる。このことから、稜線近傍では曲率が大きくなり、剥離面内では曲率が小さくなる性質がある。ゆえに、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、剥離面内では点密度が低くなる。この性質を利用し、稜線候補点の抽出を行う。具体的な手順は、各点とその点の K 近傍点との距離を計算し、最も近い点との距離が閾値 d 以下の場合、

稜線上の点と判断する。そうでない場合は、剥離面上の点と判断する。稜線候補点抽出手法の例を図 4 に示す。

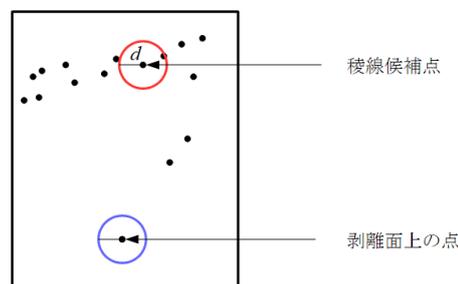


図 4 稜線候補点抽出

3 提案手法

3.1 概要

2.2 節で述べた手法では、発掘調査報告書に必要な実測図を流用しているため、実測図が作成されていない石器データについての剥離面認識は、非常に困難である。また、実測図が存在するデータについて、剥片ごとに色属性情報を付加し、元の点群に転写する必要があるため、剥片の数だけ手間がかかってしまう。さらに、一般に実測図の作成は手作業であり、ひとつの石器に対する実測図の作成に 1 日を要することもあるため、新たに出土した石器の剥離面を認識するためには、膨大な時間がかかってしまうという問題があげられる。そこで、本稿では、図 5 に示すように、実測図を流用しない方法を提案する。図 3 の黒い枠で囲まれた部分の実測図を利用しない方法となっていることがわかる。



図 5 実測図工程削減

本手法では、文献 [10] で提案されている多方向大量同時計測システムで計測した 3 次元座標点群を入力とする。図 6 に計測の様子を示す。この計測装置では、ガラステーブル上が xy 平面、高さ方向が z 軸に設定されており、ガラステーブルに垂直な方向が z 軸となる。以下では、多方向大量同時計測システムで計測した石器の 3

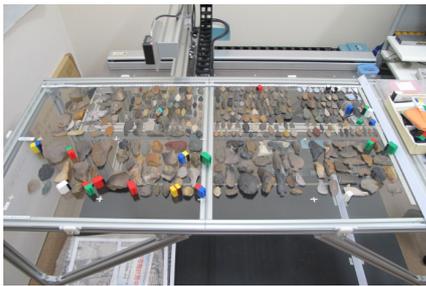


図6 計測の様子

次元座標点群から，剥離面を認識するための具体的な手順を示す（図7）。

1. 計測点群を軽量化 [4] し，軽量化された点群の法線ベクトルを算出する．その後，法線ベクトルが z 軸の正方向を向いている点群とそれ以外の点群に分割する．本手法では，この手順で分割されたデータを入力点群とする．以降，正方向を向いている点群を例に手順を説明する．
2. 文献 [2] の手法により，稜線候補点を抽出する．
3. 抽出した稜線候補点群は，偏った特徴を持つデータとなるため，データの偏りを表現しやすい kd-Tree を構築し，領域を分割する．
4. kd-Tree で表された領域ごとに点密度を計算し，代表点を選定する．
5. 点密度が小さい領域の代表点を除去し，剥離面の境界線付近の代表点を抽出する．点密度によっては，抽出された代表点は剥離面の内側にも現れる．
6. 代表点を左回りに追跡し，閉じた特徴点列（代表点列）を探索する．
7. 探索開始点に戻るか一定回数探索した場合は探索を終了し，そうでない場合は手順6に戻る．
8. 探索した点列から初期シードを決定し，内部の点に剥離面のラベルを付加する．その後，各シードの領域を拡張し，特徴量が閾値未満の場合は成長させ，そうでない場合は，成長を終了させる．成長した領域内部の点には，剥離面のラベルを付加する．
9. 全てのシードで成長が終了した場合，拡張を終了し，そうでない場合は手順8に戻る．
10. 剥離面のラベルが付加された点群を，剥離面として認識する．

手順6～10処理を繰り返すことで，剥離面の認識を自

動化する．以降では，手順3～10について，詳細な手法を説明する．図8に提案手法の例を示す．

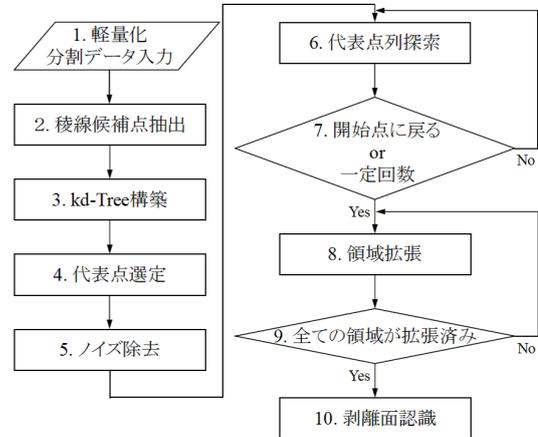


図7 処理の流れ

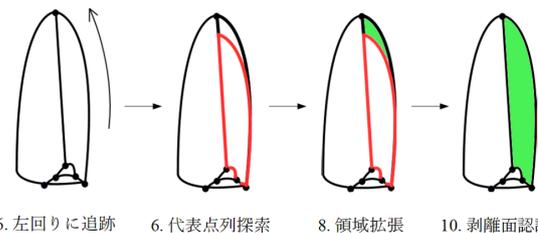


図8 提案手法の例

3.2 空間分割法による代表点の抽出

はじめに，計測点群の軽量化データを分割した，入力データの稜線候補点の抽出を行う．次に，稜線候補点から kd-Tree を構築する．本研究では， $x \rightarrow y \rightarrow x \rightarrow \dots$ の順に分割する座標軸を変え， $x \rightarrow y$ のステップを1回とする場合に，これを偶数回繰り返す．ここで，繰り返す回数は，入力点群の総点数によって定められる．したがって， n 回繰り返す場合，深さ $2n$ ，領域を 2^{2n} に分割する．その領域ごとに AABB(Axis-Aligned Bounding Box)[11] を作成して点密度を計算し，各領域の中心点に最も近い点をその領域の代表点として選出する．また，領域の点密度が閾値 D 未満だった場合，ノイズと判断され，その代表点を除去する．すべての領域に対してノイズを除去し終えた代表点列を，追跡可能な点とする．図9に代表点の例を示す．

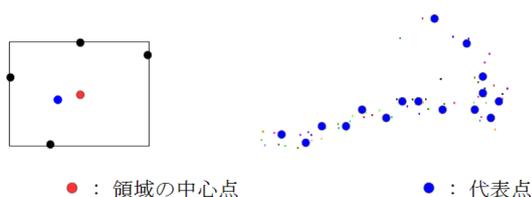


図9 追跡可能な代表点の例

3.3 境界領域の探索

3.2節で述べたノイズ除去後の代表点列のうち、任意の代表点を追跡開始点 S とする。はじめに、図10のように、追跡開始点 S を中心とした半径 R の球内に含まれる他の代表点を探索し、任意の点を次の探索点 P_i ($i = 0, 1, \dots, n$) とする。次に、図11のように、最初の追跡方向 $P_i - S$ を正規化したベクトルを v_0 、点 P_i を中心とした球内の代表点 Q_j ($j = 1, 2, \dots, n$) から、以下の条件式を満たす Q_j を、次の探索点とする。ここで、 $v_j = Q_j - P_i$ 、 n を法線ベクトル、すなわち $n(0, 0, 1)$ とする。また、 v_j を正規化したベクトルを u_j とし、直前に追跡した方向を正規化したベクトルを v とする。 u_j と v とのなす角を θ とし、角度 α 未满是探索から除外する。

$$\begin{cases} \min(\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}_j) & (\text{sgn}((\mathbf{v} \times \mathbf{v}_j) \cdot \mathbf{n}) \geq 0 \text{ and } \theta < \alpha) \\ \max(\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}_j) & (\text{sgn}((\mathbf{v} \times \mathbf{v}_j) \cdot \mathbf{n}) = -1 \text{ and } \theta < \alpha) \end{cases}$$

ここで、左側の点を $\text{sgn}((\mathbf{v} \times \mathbf{v}_j) \cdot \mathbf{n}) \geq 0$ 、右側の点を $\text{sgn}((\mathbf{v} \times \mathbf{v}_j) \cdot \mathbf{n}) = -1$ と定義すると、球内の点 Q_j ($j = 1, 2, \dots, n$) が、前の追跡方向から左側と右側にひとつもなかった場合、図12のように次の点が見つかるまで、球の半径を R_{\max} まで、一定の値ずつ大きくして再探索する。左側の点を探索した場合、条件式を満たす点を次の探索点とする。球の半径を R_{\max} まで探索したとき左側の点を探索できなかった場合、右側の点で条件式を満たす点を次の探索点とする。また、球内に代表点がなかった場合は、球内に代表点が検出されるまで、半径を大きくして探索する。次の探索点が決めた後、図13のように、半径 r の円柱内に含まれる点群を意味のある点列として格納する。さらに、円柱の端点となる開始点と次の探索点、探索した方向、円柱内に格納されている点の数と、稜線候補点のラベルが付加された点の数を保持させる。この操作を繰り返し、球内に追跡開始点 P_0 が含まれていた場合か、一定回数追跡した場合に終了する。

図14に示すように、無限ループ回避のため、円柱の端点となった代表点は、次に探索されないようにラベルを付加しておく。ただし、終了条件に関係している追跡開始点 S はこの限りではない。

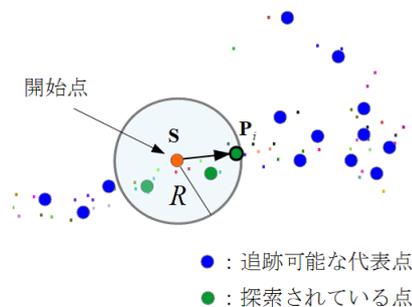


図10 追跡開始

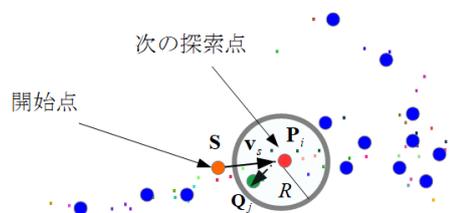


図11 次の点の探索

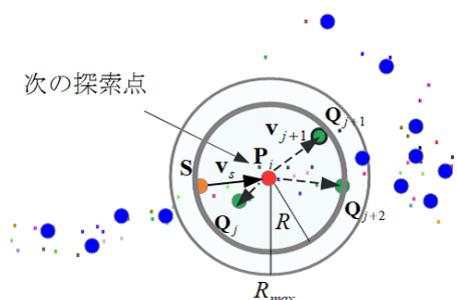


図12 妥協範囲までの探索

3.4 領域の拡張

本手法における、代表点列探索は、左回りに探索することから、剥離面のできるだけ内側を探索するという特性があるため、剥離面の境界まで到達していない部分が出現すると考えられる。そこで、領域拡張法を適用し、剥離面の境界線近傍まで領域を拡張し、剥離面認識を行う。3.3節で述べた円柱には、円柱内の点列、端点、方向、円柱内の点の数と稜線候補点の属性が付加された点の数の情報が格納されている。この円柱の持っている情報を

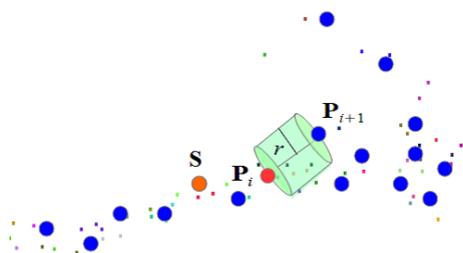
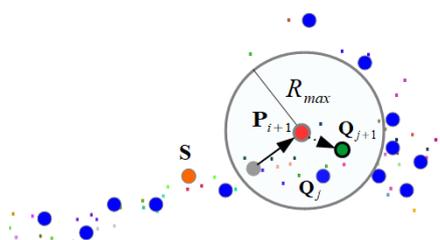


図 13 意味のある点列として格納



●: 探索されない点

図 14 無限ループ回避

以降セルと呼び、セルを初期シードとする．初期シード決定の例を図 15 に示す．

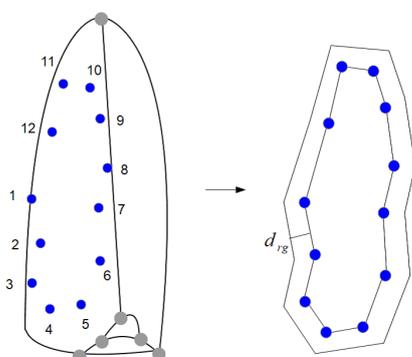


図 15 初期シードの決定

このセルの端点を連結した点列によって構築される領域を微小距離 d_{rg} ずつ広げ、領域拡張を行うが、前段階として、円柱状態のセルのスキャンを行い、入力石器データの剥離面境界線かそうでないかを判別する．その後、各セルを成長させ、領域の拡張を行う．判別方法は、セルの方向に対し、右側に一定の領域を作成し、その内部に含まれる点数を計算する．点が多角形の内部にあるかどうかは、Winding Number Algorithm を用いる．これは、点列が単純な多角形を形成しない場合があること

を考慮したためである．領域の内部に存在する点数が閾値未満だった場合、そのセルを境界線上のセルとみなし、領域を境界線まで成長させ、成長の終了ラベルを付加する．その後、残りのセルは領域を拡張する．次に、図 16 のように、セルの方向に対し、初期シードから d_{rg} だけ外側に広げた台形を、各セル $c_1 \sim c_n$ の次の形状と定義する．セル内に含まれる稜線候補点の割合か、稜線候補点数が閾値を超えた場合、セルの成長は終了する．稜線候補点が含まれるかどうかは、Crossing Number Algorithm を用いる．セルの形状は台形なため、単純なアルゴリズムで十分であると判断した．また、セル c_i は、成長する場合、 c_{i1}, c_{i2}, c_{i3} と子ノードを作る．子ノードは、現在のセル c_i から d_{rg} だけ外側に広げた台形を生成後、分割することによって生成される．具体的には、外側へ広げた台形を、 c_i の端点からセルの方向に対し垂直に外側へ伸ばした直線によって分割し、それぞれ c_{i1}, c_{i2}, c_{i3} とする．子ノードの生成の例を、図 16 に示す．

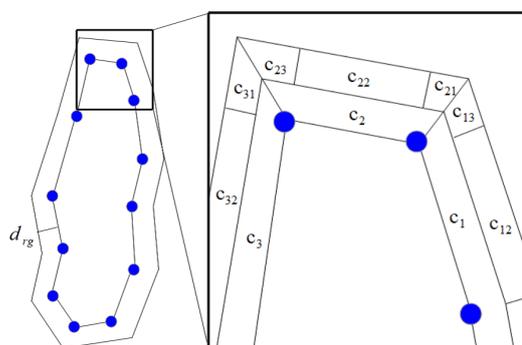


図 16 子ノードの生成

各子ノードでは、それぞれ稜線候補点の含まれる割合と点数を計算し、子ノード間での和を計算する．その値が閾値を超えた場合、領域内の点群には剥離面上の点の属性を付加し、セルを成長させる．図 17 に示すように、成長したセルを c'_i とし、子ノード $c'_{i1}, c'_{i2}, c'_{i3}$ をつくる．この時、隣接領域の状態を確認し、 c'_{i-1} の成長が終了していた場合、子ノード c'_{i1} は破棄する．また、 c'_{i+1} の成長が終了していた場合、図 18 に示す例のように、子ノード c'_{i3} を破棄する．このように領域の拡張を繰り返す、すべてのセルで終了ラベルが付加された場合、本手法は終了する．

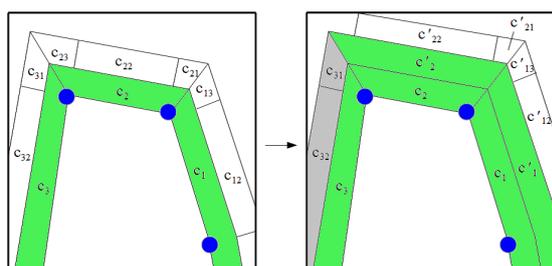


図 17 領域の拡張

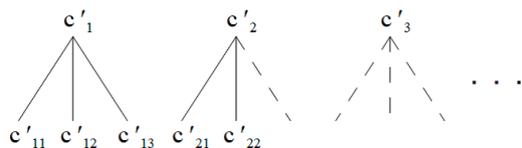


図 18 子ノードの破棄

4 実験結果

3章で述べた手法を、計測点群を軽量化したデータを用いて検証を行う。本実験に使用する機器は、OSはWindows 10 Pro, CPUはIntel Core i7 3.40GHz, メモリは8.00GBである。また、本実験に用いた2つの軽量化データを図19, 20に示す。石器Aの総点数は10,497点, 石器Bの総点数は11,457点によって表現される。本実験では、軽量化データの法線ベクトルを求めた後、法線ベクトルの z 成分が正の点群を表とし、負の点群を裏として表裏に分割し、表のデータを入力データとして用いる。入力データを図21, 22に示す。本実験は、石器A, 石器Bについて、図23, 24に示された剥離面に対し、境界領域探索と領域拡張法の適用する。ここで、文献[12]では、面積の小さい剥離面は、接合資料作成のためのマッチングにおいて、誤マッチングの原因になると述べられており、このことから、文献[6]では、石器Bの剥離面 c を検出していない。よって、本実験でも、石器Bの剥離面 c は考慮しないこととする。したがって、石器Aの剥離面 a, b, c , 石器Bの剥離面 a, b について実験を行う。

4.1 境界領域の探索結果

3.2節, 3.3節で述べた手法を石器A, 石器Bの各剥離面に適用させた結果を図25に示す。紫色が付加されている点群が、追跡結果である。石器A, 石器Bの入力点群に対して、追跡可能な代表点を図26, 27に、実験時に追跡した代表点を、図28石器ごとの総点数, 入力点数, 稜線候補点数, 分割領域数, 追跡可能な代表点数を、表1に示す。本実験では、ノイズ除去時間閾値 D を点密度か

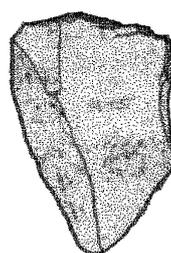


図 19 石器 A

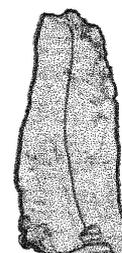


図 20 石器 B

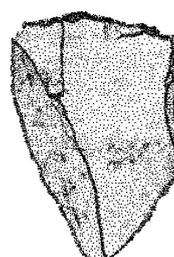


図 21 入力点群：石器 A

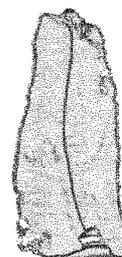


図 22 入力点群：石器 B

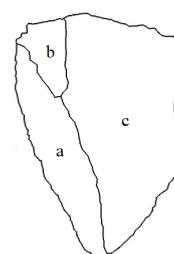


図 23 剥離面：石器 A

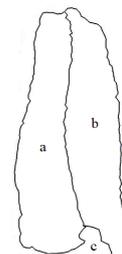


図 24 剥離面：石器 B

ら得られたヒストグラムの中央値, 円柱の半径 r を3.0とし、追跡時の球の半径 R を、入力点群のAABBの最長の辺の長さの30分の1としている。また、文献[12]で述べられているように、接合資料生成における誤マッチングを避けるため、今回は、閾値32.37よりも大きい面積の剥離面を抽出した。

表 1 石器ごとの点数

石器	総点数	入力	稜線候補点	代表点
A	10,497	5,991	2,577	614
B	11,457	7,610	3,309	614

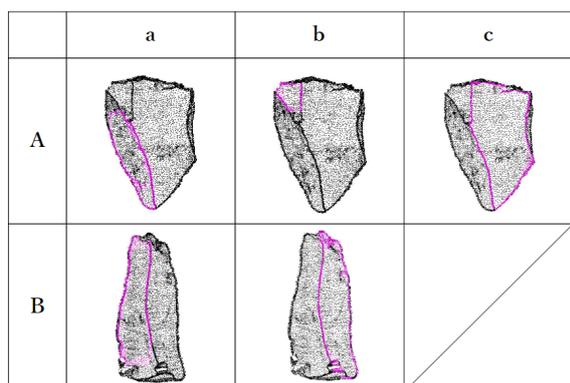


図 25 探索結果



図 26 代表点：石器 A



図 27 代表点：石器 B

割合が 6 割以上の時または、稜線候補点の数が 60 以上となったときにセルの成長は終了する。表 3 が示すように、すべての剥離面において、総処理時間は 10 秒未満である。1 章で述べたように、文献 [2] の手法で用いる実測図作成に、1 日を要してしまう場合があることから、本手法を適用した場合、より高速に石器剥離面を認識することができる。

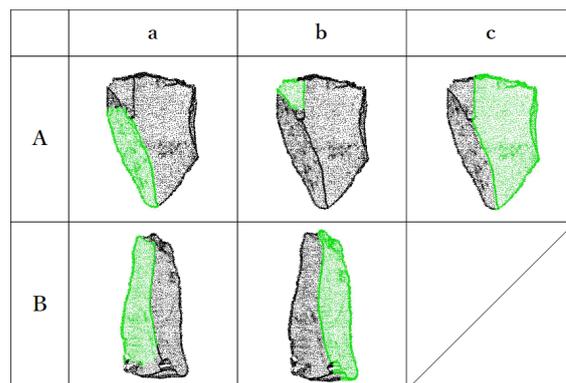


図 29 領域拡張結果

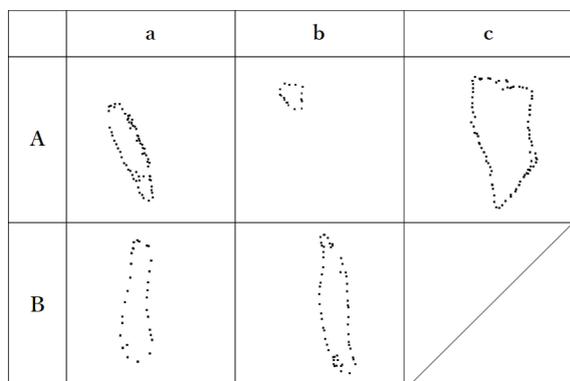


図 28 探索代表点

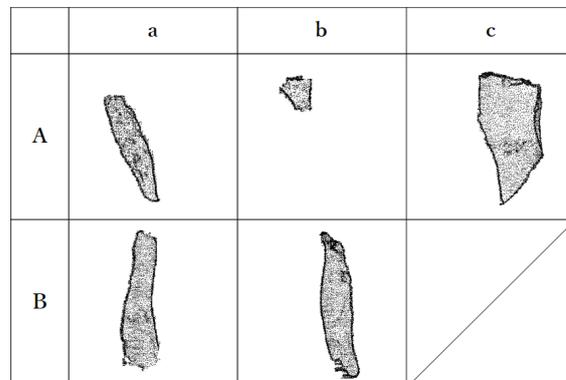


図 30 剥離面認識結果

4.2 領域拡張結果

3.4 節で述べた領域拡張法を、石器 A、石器 B に適用させた結果を図 29 に示す。また、本手法で拡張した領域を抽出した結果を図 30 に、全ての剥離面の認識が完了した結果を、図 31, 32 に示す。本実験における、境界線探索点数、探索した代表点数、領域拡張点数、抽出した剥離面点数を表 2、稜線候補点抽出、代表点抽出、境界線探索、領域拡張における処理時間を表 3 に示す。本実験における拡張させる球または半球の半径は、追跡時の R と等しい。また、各セル内の稜線候補点の個数の

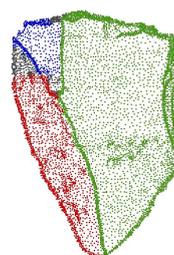


図 31 認識結果：石器 A

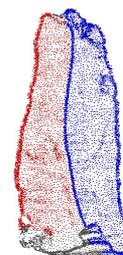


図 32 認識結果：石器 B

表 2 探索後点数

石器	面	探索点	代表点	拡張	抽出点
A	a	1,074	91	82	1,896
	b	336	32	63	496
	c	1,426	89	850	3,816
B	a	1,547	32	346	3,238
	b	2,047	62	283	3,847

表 3 処理時間 (単位 : sec)

石器	面	代表点	探索	拡張	総時間
A	a	2.84	0.52	4.20	7.76
	b	2.72	0.17	1.66	4.59
	c	2.42	0.47	3.65	6.98
B	a	3.98	0.30	3.52	7.95
	b	3.82	0.37	2.91	7.22

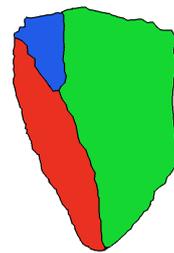


図 33 イラスト図 : 石器 A

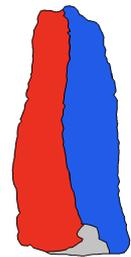


図 34 イラスト図 : 石器 B



図 35 正解点群 : 石器 A

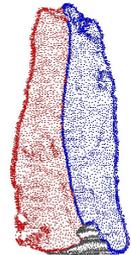


図 36 正解点群 : 石器 B

4.3 評価

本実験で抽出したデータ点群を正解データの点群と比較する。ここでは、2.1 節で述べたように、実測図をもとに作成された点群を正解データとする。本実験では、文献 [6] で述べられているように、実測図と、稜線候補点からイラスト図を作成し、イラスト図のそれぞれの剥離面に識別情報を付加し、識別情報を属性情報として入力点群に付加した点群を正解データとして扱う。石器 A、石器 B のイラスト図を図 33、34 に、正解データ点群を図 35、36 に示す。正解データとの比較方法は、図 37 に示すように、抽出データと正解データを重ね、一致点、誤検出点、未検出点をそれぞれ計算する。比較した結果を図 38 に示す。一致点は水色、誤検出点は赤色、未検出点は黒色で示した。比較結果の正解点数、一致点数、誤検出点数、未検出点数を表 4 に示す。また、一致率、誤検出率、未検出率を、表 5 に示す。それぞれの算出方法を以下に示す。

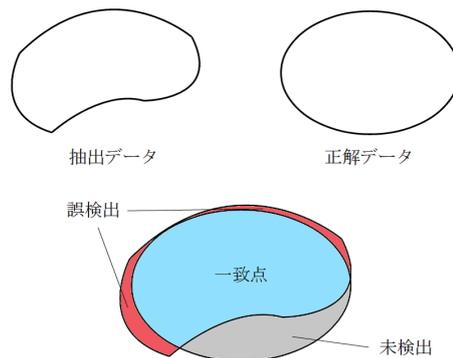


図 37 比較の例

$$S = (\text{一致点数}) + (\text{誤検出点数}) + (\text{未検出点数})$$

$$(\text{一致率}) = \frac{\text{一致点数}}{S} \times 100$$

$$(\text{誤検出率}) = \frac{\text{誤検出点数}}{S} \times 100$$

$$(\text{未検出率}) = \frac{\text{未検出点数}}{S} \times 100$$

	a	b	c
A			
B			

図 38 剥離面認識結果

表 5 の結果から、一致率と誤検出率、未検出率について考察する。まず、誤検出率が高いということは、領域

表 4 点数比較

石器	面	正解	一致	誤検出	未検出
A	a	1,915	1,699	197	216
	b	634	439	57	195
	c	3,442	3,430	386	12
B	a	3,393	2,833	405	560
	b	3,510	3,502	345	8

表 5 一致率計算結果 (%)

石器	面	一致率	誤検出率	未検出率
A	a	80.45	9.32	10.23
	b	63.53	8.25	28.22
	c	89.60	10.08	0.32
B	a	74.59	10.67	14.74
	b	90.84	8.95	0.21

拡張法適用後に、正解点群からはみ出た領域が広いということがいえる。次に、未検出率が高いということは、境界領域にたどり着く前に、領域の拡張が終了したことが原因となる。ただし、どちらも境界領域探索において、石器剥離面のできるだけ内側を追跡していることが前提である。このことから、一致率が高いということは、境界領域探索の精度がよく、誤検出率、未検出率というエラーが少ないということとなり、より正解点群に近い点群が得られたといえる。本手法で得られた剥離面点群は、文献 [6] で提案されている石器接合資料のための隣接面探索法で活用することが目標である。そのためには、剥離面形状からはみ出した点群は、隣接面の誤マッチングとなる可能性があることから、できるだけ誤検出率を下げる工夫が必要である。このことから、未検出率よりは誤検出率を優先して下げるためのアルゴリズムが望ましい。図 38 と表 5 から、石器 A の剥離面 c や石器 B の剥離面 b は、一致率が 89.6% と高く、正解点群と類似している。逆に、石器 A の剥離面 b については、一致率が他と比べて低く、未検出率が 28.22% となっている。これは、石器 A の剥離面 a、石器 B の剥離面 a にもみられるように、未検出部分には代表点が多いため、凹凸の激しい形状であることが観察できる。よって、本手法は、剥離面内部の凹凸等の揺らぎの小さい領域を抽出することができる特徴がある。また、石器 A、B ともに誤検出

率は、最大で 10% 程度であり、文献 [6] の手法で活用する場合、十分な精度であると考えている。文献 [6] の手法による検証は今後の課題である。

5 まとめと今後の課題

本論文では、剥離面を自動的に認識するために、剥離面の境界線の内側に閉領域を生成した後、その領域を拡張することによって、剥離面を認識する手法について提案した。本手法の実装を行い、計測点群の軽量化データに適用したところ、いくつかのデータに対して剥離面を認識することができた。今後の課題として、4.3 節で述べたように、凹凸等の揺らぎの大きい領域の認識が難しい場合があることから、この制限を緩和し、認識精度を上げること、本手法により認識した剥離面を文献 [6] の手法へ適用した認識精度検証が挙げられる。

謝辞

なお、本論文は NICOGRAPH 2017 で発表した論文 [13] 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] 五十嵐彰, “考古資料の接合-石器研究における母岩・固体問題-,” 史学, Vol.67, No.3/4, 2002.
- [2] 佐藤, 松山, 千葉, 今野, “石器接合のための複数の隣接剥離面の併合による剥離面再構築手法,” NICOGRAPH 2012, 2012.
- [3] 鈴木公雄, “考古学入門,” 東京大学出版社, 1988.
- [4] X.Yang, K.Matsuyama, K.Konno, Y.Tokuyama, “Feature-Preserving Simplification of Point Cloud by Using Clustering Approach Based on Mean Curvature,” The Journal of Society for Art and Science, pp117-128, 2014.
- [5] 石器技術研究会, “石器づくりの考古学,” 学生社, 2004.
- [6] 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.
- [7] 祝, 西尾, 小堀, “特徴量抽出を用いた点群データのセグメンテーション,” 情報処理学会第 74 回全国大会, 2012.

- [8] T.Rabbani, F.A. van den Heuvel, G.Vosselman, "SEGMENTATION OF POINT CLOUDS USING SMOOTHNESS CONSTRAINT," IAPRS, Vol. 36, Part. 5, pp. 248-253, 2006.
- [9] A.Shamir, "A survey on Mesh Segmentation Techniques," COMPUTER GRAPHICS forum, Vol. 27, No. 6, pp. 1539-1556, 2008.
- [10] 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.
- [11] S.Gottschalk, M.C.Lin, D.Manocha, "Tree:A hierarchical structure for rapid interference detection," Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp171-180, 1996.
- [12] 山原, 今野, 千葉, 佐藤, "接合資料作成のための石器剥離面に基づく隣接関係検出法," 日本情報考古学会誌, Vol. 17, No.1・2, pp.23-32, 2011.
- [13] 佐々木, 松山, 今野, "領域拡張法に基づく石器剥離面の自動抽出に関する検討," NOCOGRAPH 2017, pp.33-40, 2017.
- 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, 岩手大学理工学部教授. 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.

佐々木 陽



2016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.

今野 晃市

