

計測点群を用いた石器剥離面と接合資料表面の部分マッチング手法の検討

高橋司¹⁾(非会員) 游梦博¹⁾(正会員) 今野晃市¹⁾(正会員)

1) 岩手大学大学院総合科学研究科

A Study on Partial Shape Matching between Flake Surface and Surface of Joining Material using Measured Point Cloud

Tsukasa Takahashi¹⁾ Mengbo You¹⁾ Kouichi Konno¹⁾

1) Graduate School of Arts and science, Iwate University, Iwate, Japan

t.321100@gmail.com, {ymb, konno21}@iwate-u.ac.jp

概要

石器とは、先史時代に作成・使用されていた、生活のための道具である。出土した石器や剥片を接合して、母岩を再現したものを石器の接合資料と呼ぶ。接合資料を発掘調査報告書に記載する場合、実測して実測図を作成するか、または3D計測した点群に基づいて図化するが、接合資料を調査・研究するには、レーザー計測に基づいた接合資料表面の点群だけでは不十分で、内部の情報を持つ完全な接合資料の三次元点群が必要になる。完全な接合資料を生成するためには、接合資料を計測して得られた表面点群と、接合資料を構成する石器の点群とのマッチングが必要である。しかし、接合資料を計測して得られた表面点群は、一部の石器が他の石器に部分的に隠されており、表面点群と石器剥離面を表す点群とをマッチングさせる場合、石器の一部分に着目してマッチングできる手法が要求される。そこで本稿では、接合資料を計測して得られた表面点群と、石器剥離面を表す点群との部分マッチングを行う、新しい手法を提案する。本手法により、接合資料表面点群と、石器の計測点群から、接合資料を構成する石器の空間配置を復元することが可能となる。

Abstract

Stone tools were created and used for daily life during the prehistoric periods. Excavated stone tools and flakes are joined together to recreate the mother rock and are referred to as a joining material. When describing joining materials in excavation investigation reports, actual measurement maps are created, or plots are drawn based on 3D measurement point clouds. However, surface point clouds of joining materials acquired by laser measurement are not sufficient for the investigation and research of the joining materials, and the internal information of the joining material is also required. To generate complete joining materials, it is necessary to match the measured surface point clouds obtained by measuring the joining materials with the point clouds of the stone tools that comprise the joining material. However, some stone tools within a surface point cloud obtained by measuring the joining material are partially hidden by other stone tools. Therefore, the method matching the surface of the joining material with that of the stone tools needs to focus on the partial shape of the stone tools. In this paper, we propose a new method for partial matching between surface point clouds obtained by measuring joining materials and point clouds representing peeled surfaces of the stone tools. Our method can reconstruct the spatial arrangement of the stone tools that compose the joining material from the surface point cloud of the joining material and the measured point clouds of the stone tools.

1 はじめに

石器とは、先史時代に作成・使用されていた、生活のための道具である [1]。石器は、図 1 のように、母岩と呼ばれる原石から剥片と呼ばれる部分を剥離させることで作成されていた。出土した石器や剥片を接合して、母岩を再現したものを石器の接合資料と呼ぶ [2]。図 2 は、文献 [3] で報告された接合資料の例である。

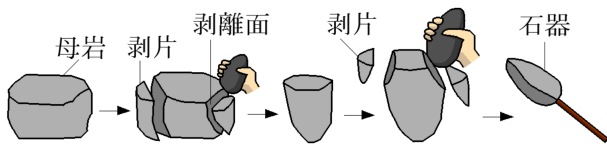


図 1 石器の作成手順

接合資料を発掘調査報告書に記載する場合、実測して実測図を作成するか、または 3D 計測した点群に基づいて図化する。図 3 は、図 2 に表した接合資料を組み立てた後に 3D 計測して得られた三次元点群である。計測には、文献 [4] に示す計測装置を用いた。文献 [4] の計測装置は、レーザー計測に基づいており、対象物の表面のみが計測できる。したがって、図 3 に示すように、計測された点群は表面の点群のみであり、石器ごとに分類されておらず、なおかつ接合資料の内部で接合されている石器の存在も不明である。以降、本論文ではこのような点群を接合資料の表面点群と呼ぶ。接合資料を調査・研究する際には、図 3 のような接合資料の表面点群だけでは不十分で、内部の情報を持つ完全な接合資料の三次元点群が必要になる。



図 2 接合資料の例

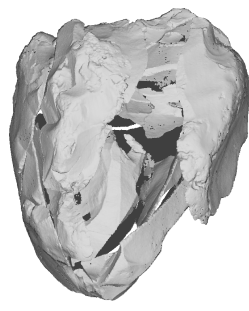


図 3 接合資料の表面点群

一方、接合資料を構成する石器は組み立て前にそれぞれ計測され、石器ごとの点群も記録される。文献 [5] では、石器ごとの点群同士の剥離面をマッチングすること

によって接合資料を構成する石器の空間姿勢を導出する手法を提案している。しかし文献 [5] の手法では、剥離面同士の大きさがそろっている場合には、マッチングが成功するが、石器同士がごく一部の領域でしか接合していない場合には、マッチングに失敗し誤マッチングとなることがある。接合の精度を高めるためには、剥離面が部分的に一致するような場合にも、石器間の隣接関係が得られるように、マッチングアルゴリズムを拡張することが必要である。また、図 3 に示すような接合資料の表面点群では、剥離面の一部が別の石器で隠される状況がしばしば発生する。表面点群と石器剥離面とのマッチングを行うためにも、剥離面が部分的に一致する場合のマッチングアルゴリズムが必要になる。

そこで本論文では、接合資料を計測して得られた表面点群と、石器剥離面を表す点群との部分マッチングを行う、新しい手法を提案する。本手法により、接合資料表面点群と、石器点群から、接合資料を構成する石器の空間配置を復元することが可能となる。本手法を、出土した接合資料を用いて検証し、有効性を確認した。

2 関連研究

2.1 3D 点群同士のマッチングによる手法

文献 [6] では、3D 形状の中心軸に基づいた形状の類似度指標について述べられている。また、文献 [7] では、3D 形状を様々な角度から見たときの情報に基づいて、形状の分類を行っている。これらの手法では、顕著な形状特徴を持つ形状は分類可能であるが、石器のように際立った凹凸が少ないデータに対する適用は、難しい。

2.2 剥離面同士のマッチングの手法

文献 [5] の手法では、石器ごとに計測された三次元点群から抽出した剥離面をマッチングすることで、石器の組み立て順序を推定する。推定された組み立て順序を用いることで、接合資料を作成できる。図 4 は、文献 [5] の手法で推定された接合結果を示したものである。図 4 に示す接合資料のような、石器同士の接合部分が剥離面の大きさと一致する場合には、文献 [5] の手法は効果的である。一方で、隣接する石器同士がごく一部の面でしか接合されない場合はマッチングに失敗する可能性が高い。本研究で扱う接合資料の表面点群は、剥離面の一部が、別の石器で隠されている状態で計測されていることや、母岩が持っていた本来の面（自然面）を剥離面と

して抽出することは困難であるため、文献 [5] の手法を適用することが難しい。

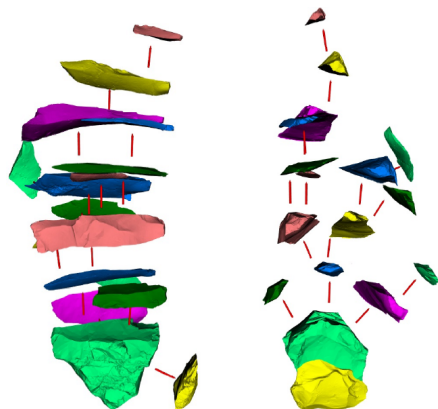


図 4 文献 [5] での剥離面マッチングの図

2.3 ICP アルゴリズム

ICP アルゴリズムは三次元形状間の位置あわせ手法として広く用いられている [8]。例えば、文献 [9] は、レーザー計測で得られた欠損のある点群を、写真計測点群で補完するために ICP アルゴリズムを適用している。本手法では、文献 [9] と同様に、最近傍点ペア間の距離に基づいた反復的な処理によって ICP アルゴリズムを実行している。ただし、ICP アルゴリズムの実行には事前に適切な初期位置を与えることが不可欠である。表面点群と剥離面との間では、図 5 に示すような、形状の大きく異なる点群同士で位置合わせをすることがある。図 5 は、左側がセグメンテーションされた表面点群の一部、右側が石器の計測点群から抽出された剥離面を表している。図 5 の点群の組み合わせでは、領域 A と領域 B の形状が一致するのが正解である。しかし、例示したような形状の大きく異なる点群同士では、適切な初期位置を自動的に与えることは困難である。例えば、例示した点群に対し、点群の重心同士を重ねる平行移動と、主成分分析により得た固有ベクトルを一致させる回転とによって与えた座標変換を初期位置として与えたものが、図 6 に示す姿勢である。この初期位置から ICP アルゴリズムによって位置合わせをした結果を図 7 に示す。図 7 を見てわかる通り、適切な位置合わせができていない。ICP アルゴリズムを意図通り動作させるために、適切な初期位置を自動的に与える手法が必要である。

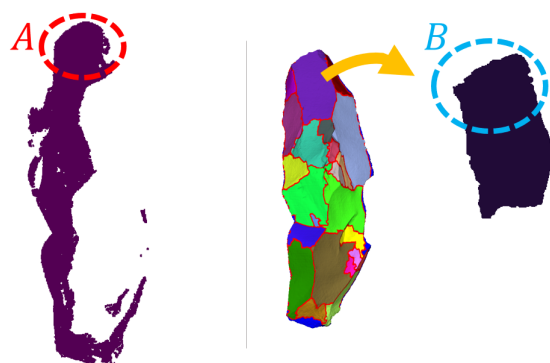


図 5 位置合わせをする点群の組み合わせの例

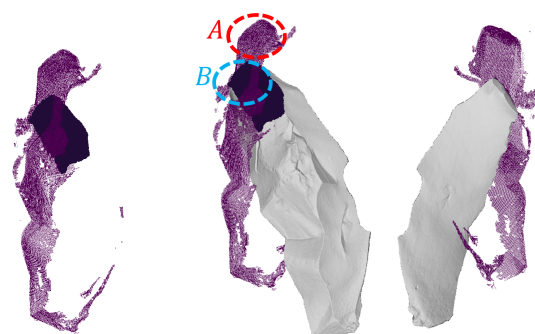


図 6 図 5 の点群に与えた初期位置

図 7 図 6 の初期位置での ICP アルゴリズム実行結果

2.4 位置合わせの評価

ICP アルゴリズムでは、点ペアに基づいて位置合わせを行う。位置合わせの評価は、点ペアの距離の平均距離 D_i の差分が閾値以下かどうかで判定する。

$$|D_i - D_{i-1}| < \varepsilon_1 \quad (1)$$

ただし、 i は ICP アルゴリズムの繰り返し回数を表す。また、本研究では閾値 ε_1 は 0.05 に設定する。しかし、式 (1) だけの条件では、点群の重なり具合によっては、意図しない位置合わせとなるため、本研究では、ICP アルゴリズムの実行結果に対する評価を、文献 [10] の方法に基づいて行う。文献 [10] の方法では、図 8 に示すように、赤色の点群の各点に対する青色の点群の最近傍点との平均距離 D が十分に小さく、赤色と青色の点ペア数 p による対応割合 R を、青色の点群の点数を n としたとき、式 (2) により求める。

$$R = \frac{p}{n} \quad (2)$$

R の値が高い場合は赤色の点群が青色の点群を十分覆っているとみなすことができる。また、 D , R を用いて、

式 (3) により得られる E は、位置合わせの結果を比較するための評価値として用いる。

$$E = D^2 \times (1 - R) \quad (3)$$

式 (3) による評価は、ICP アルゴリズムによる収束した結果に対して行う。本研究では、点群の位置合わせを評価するときに、本節で述べた評価基準を用いる。

点群の重なり方			
平均距離D	小さい	小さい	大きい
対応割合R	低い	高い	高い

図 8 ICP アルゴリズムによる位置合わせの評価基準

2.5 大域的位置合わせ

点群同士の位置合わせ手法において、SHOT[11], PPF[12], FPFH[13], SUPER 4PCS[14] といった、特徴量を用いた大域的位置合わせの手法が存在する。SHOT は、与えた基準点と、周囲の球領域の頂点が持つ法線ベクトルから作成したヒストグラムを特徴量として定義し、マッチングする手法である。PPF は、全頂点から 2 点のペアを定義し、ペア間から 4 次元特徴量を算出して、マッチングをする手法である。FPFH は、与えた注目点に対して、周りの球領域内の頂点から k 近傍点を求め、注目点と近傍点との法線ベクトルから作成したヒストグラムから特徴量を作成し、マッチングする手法である。SUPER 4PCS は、同一平面上に乗る 4 つの頂点の集合を定義して得た特徴量によってマッチングするアルゴリズムである 4PCS[15] を、高速化・効率化した手法である。以上の 4 つの手法は、いずれも点群中から特徴量を抽出してマッチングする手法である。しかし、本論文で扱う点群は出土品である石器を計測して得た点群であるため、凹凸の激しい自然面や、稜線が明確にならない面を持つため、特徴量を算出することは困難である。また、本論文において、マッチングをする点群同士は、ある形状の一部を切り取った形状の場合があるため、SUPER 4PCS で想定している状態とは異なる。著者らの実験結果では、SUPER 4PCS での位置合わせが、一部の石器で意図通りの結果が得られなかった。本論文では、出土品の石器から作成した計測点群に対応するため、部分的なマッチングによる初期位置の推定の手法を提案する。

3 提案手法

本章では、3D 点群を用いて、部分的に一致する形状同士の一致度を評価し、剥離面の部分マッチングを実現する手法について説明する。手法の流れは、以下の通りである。

1. 接合資料の表面点群を石器ごとにセグメンテーションする。
2. 石器の計測点群から剥離面を抽出する。
3. 石器の空間姿勢の推定のため、以下の手順を行う。
 - (a) 剥離面と表面点群のセグメンテーション結果とのマッチングを行う。
 - (b) 最終的な位置合わせの座標変換を石器の計測点群に与える。
4. 手順 3 を全ての石器に対して実行する。

手法全体のフローチャートを図 9 に示す。以降、それぞれの手順について詳細に記述する。

3.1 表面点群のセグメンテーション

まず、接合資料の表面点群を石器ごとにセグメンテーションする。具体的には、人の手によって作成された図を元にして作成した参照画像を用いてセグメンテーションを実行する [16]。図 10 は、発掘調査報告書 [3] に記録された実測図を元に筆者が手書きで作成した参照画像である。図 10 の上段にある図が接合資料を実測して描かれた実測図を示しており、接合資料を上下左右など 5 つの方向から見たときの各石器の輪郭と配置が描かれている。また、図 10 の下段の図は、実測図に基づいて石器ごとに色分けした参照画像を示している。参照画像を用意したら、図 3 のような表面点群と参照画像を同時に同一ウィンドウに描画する。その後、参照画像と 3D 点群をウィンドウ上で重ね合わせ、点群を画像へ正射影し、射影した位置の色を属性情報として点に付加する [1]。以降、この手順によりセグメンテーションされた表面点群を、色情報ごとに取り出した点群を部分表面点群と呼ぶ。

3.2 各石器の剥離面抽出

表面点群と石器の点群を比較する際、石器の点群のうち表面点群に対応する剥離面のみが抽出されていることが求められる。本研究では、点群の法線ベクトルを評価して、領域拡張法に基づいて剥離面を抽出する [17]。3.1

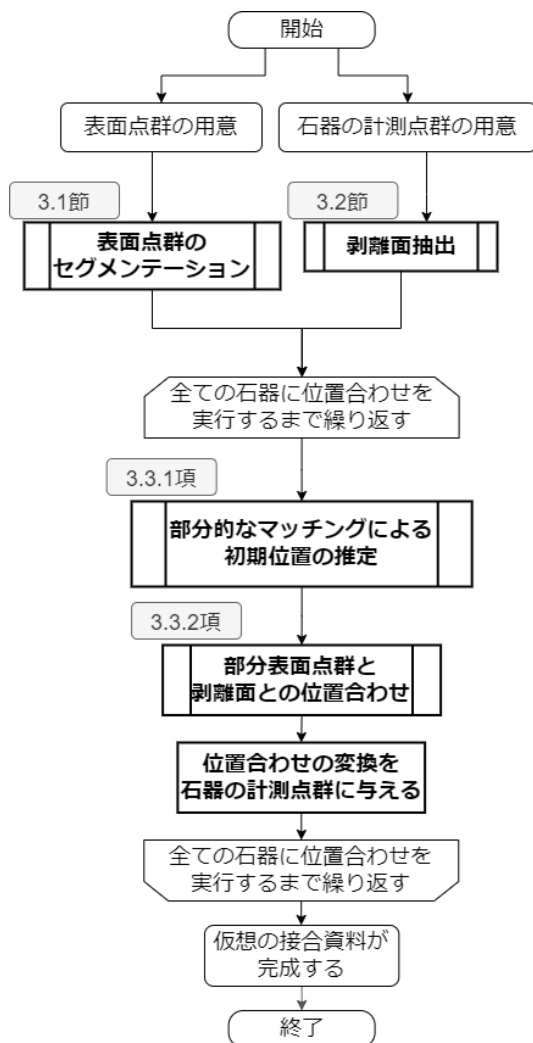


図9 手法全体のフローチャート

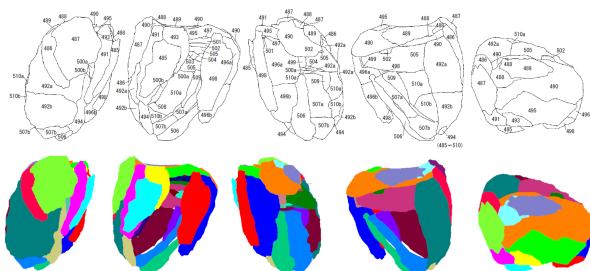


図10 作成した参照画像

節で述べた部分表面点群と、本節で述べた剥離面のそれぞれの例を並べた図を、図11に示す。図11の左図は、部分表面点群を示している。同じ色で表されている点群が、一つの石器を表す部分表面点群である。例えば、桃色の部分表面点群は、その手前にある水色の部分表面点

群に一部が隠された状態である。また、図11の右図には、桃色の部分表面点群に対応する石器点群を示す。ただし、石器点群は、剥離面ごとに異なる色を与えられている。図11の右図の剥離面の領域Bは、図11の左図の部分表面点群の領域Aと重なると考えられる。

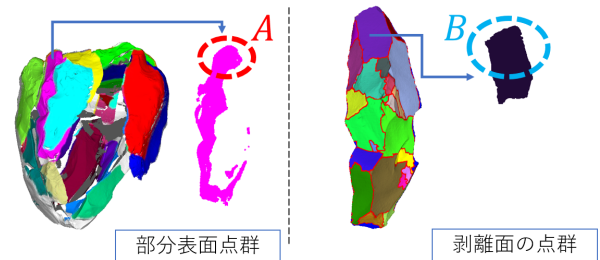


図11 部分表面点群と剥離面の例

3.3 石器の空間姿勢の推定

部分表面点群と剥離面の点群との間でICPアルゴリズムを実行し、石器の空間姿勢を推定する。

3.3.1 部分的なマッチングによる初期位置の決定

2.3節で述べたように、ICPアルゴリズムでの位置合わせには適切な初期位置を与える必要がある。そこで本手法では、以下のような部分的なマッチングのアルゴリズムによって、初期位置を決定する。

1. 部分表面点群と剥離面の点群から主成分分析をして、その第主成分を x 軸、第二主成分を y 軸、第三主成分を z 軸とするように点群を座標変換する。
2. 部分表面点群のバウンディングボックスを任意の分割数 n で等分割する。ただし、本論文でマッチングの対象としている点群は、奥行き方向の厚みがほとんどない点群である。よって、 z 方向の厚みをマッチングに考慮する必要がない点群のため、分割は手順1で得た xy 方向でのみ行う。分割数 n は点群の形状に応じて、点群の境界を含まずに、形状の内側を表す点群のみを含む分割領域が十分な数現れる3以上の数を定める。図12は、部分表面点群を $n=5$ で分割した場合の概念図である。右図は分割された部分表面点群を表していて、領域Iは形状の内側を、領域Oは外側の領域を表している。
3. 剥離面の点群を手順2に用いた分割領域と同じサイズの分割領域で分割する。分割は、剥離面の点群を

囲むバウンディングボックスの頂点のうち最小となる頂点を基準点として、分割領域を敷き詰めるように実行する。図 13 は図 12 に示す点群から作成した分割領域と同じサイズで分割した場合の概念図である。右図は分割された剥離面の点群を表していて、領域 I は形状の内側を、領域 O は外側の領域を表している。

4. 部分的なマッチングに用いる点群を選択する。図 12 のように部分表面点群から作成した点群を A 、図 13 のように剥離面から作成した点群を B とする。それぞれの、点群の境界を含まずに、形状の内側を表す分割領域に分布する点群を A' 、 B' とする。点群 A' が i 個、点群 B' が j 個の分割領域で分割されているとき、それぞれから一つの分割領域の点群 $A'_1, A'_2, \dots, A'_i$ と $B'_1, B'_2, \dots, B'_j$ を取り出す。
5. 手順 4 で得た、分割された点群 $A'_1, A'_2, \dots, A'_i$ と $B'_1, B'_2, \dots, B'_j$ を用いて、 $i \times j$ 通りの評価をする。位置合わせの初期位置は、次のように決定する。
 - (a) 重心を原点とし、主成分分析により得られた直交座標系を求める。このとき、第三主成分ベクトルが、計測時に判明しているモデルの表側を向いていない時には、第三主成分ベクトルを反転する。その後、 z 軸が第三主成分ベクトルの方向になるようにする。
 - (b) 2 つの直交座標系が一致するように座標変換を適用する。
6. 手順 5 で得た、評価値 E が最小となる A'_i と B'_j の座標変換を、剥離面の元になった石器の計測点群に与える。図 14 の左図は、分割された部分表面点群と剥離面の点群を表し、中図は、剥離面の点群に、評価値 E が最小となる A'_i と B'_j の座標変換を与えた様子を表す。
7. 手順 6 で与えた姿勢は、 A'_i 、 B'_j に含まれる点群から算出された座標系が一致した状態である。そこで、回転を加えて最適な初期位置を決定する。回転角は、部分表面点群と、剥離面の元になった石器の計測点群との間でマッチングをして求める。このとき、計算時間を短縮するために、石器の計測点群は、概形を保ったままダウンサンプリングをする。ダウンサンプリングをしたら、 B'_j の z 軸を回転軸として、石器の計測点群を 15 度ずつ回転し、部分表面点

群との間で評価値 E が最小となる回転角を求める。図 14 の右図は、剥離面に、部分表面点群との間で評価値 E が最小となる回転角が与えられた様子を表す。この回転角の座標変換を手順 6 で与えた姿勢に適用して、位置合わせの初期位置とする。

3.3.2 剥離面と部分表面点群との位置合わせ

3.3.1 項で述べたアルゴリズムによって、動かす点群に初期位置を与える。その後、ICP アルゴリズムによって剥離面と部分表面点群との位置合わせを行う。位置合わせが収束したら、変換行列を石器の計測点群に与えることで、石器の計測点群に接合資料中の空間姿勢を与えられる。石器の計測点群を座標変換したら、部分表面点群との、式 (3) に示した評価値 E を求める。ここで、位置合わせの評価をする閾値 ε_2 を定めて、 $E < \varepsilon_2$ を満たさないときは、 n を 1 増やして 3.3.1 項で述べたアルゴリズムを再実行する。ここで、 ε_2 は経験的に 5 とした。以上の流れを、接合資料中に含まれるすべての石器に対して実行することで、内側の情報を持つ仮想の接合資料を作成できる。

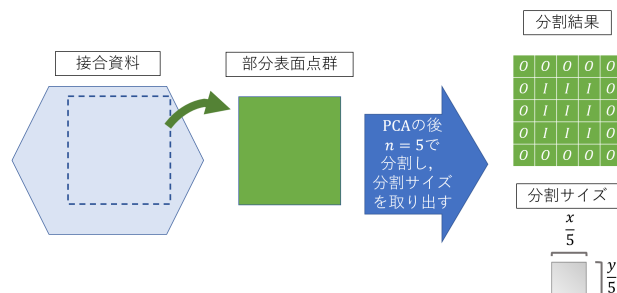


図 12 部分表面点群の等分割の概念図 ($n = 5$ の場合)

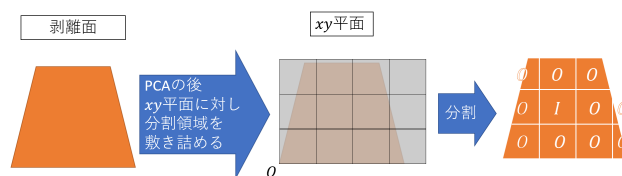


図 13 剥離面の分割の概念図

4 実験

本章では、提案手法を検証するための実験について述べる。本実験に使用するコンピュータの環境は、Windows 10 Pro Education, CPU は Intel®Core™i7-10700

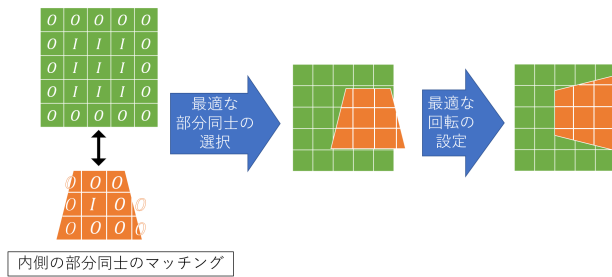


図 14 部分マッチングの概念図

3.00GHz, メモリは 16.0GB である。実験に利用した表面点群は、図 3 に示す表面の情報のみを持つ点群である。この点群は、1,581,625 点を持つ。また、この接合資料は 33 点の接合により構成されていると記録されている [3]。実験に使用したのはそのうち 23 個の、石器ごとに計測された点群である。実験に使用した石器の点群を、図 15 に示し、以降はそれぞれの石器を図 15 に示した番号で呼ぶ。ただし、図 15 に示した点群同士の実寸は実際の点群とは異なっている。

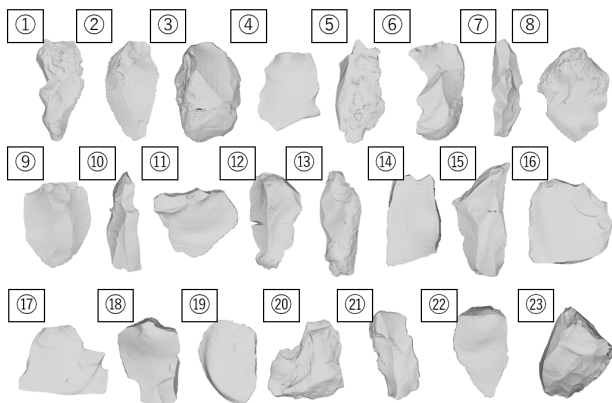


図 15 実験に使用した石器の計測点群

4.1 表面点群のセグメンテーション

まず、セグメンテーションに使用する参照画像を作成する。実験に使用した参照画像は、図 10 に示した 5 つの画像である。

本手法は、参照画像と点群との位置合わせを手動で実行した。図 16 は参照画像のうち 1 つを使用したセグメンテーション結果である。ひとつの表面点群に対して、このようなセグメンテーションを 5 つの画像それぞれを用いて実行し、結果を合成することで三次元空間でのセグメンテーション結果が得られる。

また、接合資料の表面点群は、計測の時点で穴が生じ

ている場合がある。図 17 は図 3 の表面点群の一部を拡大した図である。赤い円で囲んだ領域に、複数の穴が生じていることがわかる。このような部分があることで、セグメンテーションを実行する際に意図しない領域同士が同一の石器として取り出され、遠く離れた位置に頂点が少量存在する点群が取り出される場合がある。本実験では、遠く離れた位置の頂点を人の判断によりノイズとみなし、手動で除去した点群を使用している。実験に使用した 23 個の部分表面点群は、発掘調査報告書から、石器 1～23 に対応すると判断した領域の点群である。部分表面点群それぞれに対応する石器の番号を与え、図 3 の表面点群と重ねて描画した様子を、図??に示す。

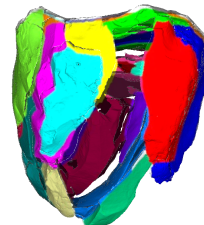


図 16 セグメンテーション結果

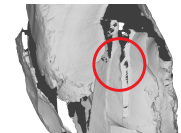


図 17 表面点群に生じる穴

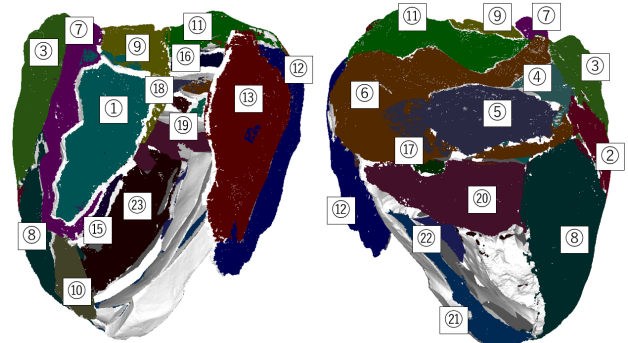


図 18 実験に使用した部分表面点群

4.2 剥離面と部分表面点群との位置合わせの実行

セグメンテーションを実行したのち、2.3 節で述べた ICP アルゴリズムにより石器の位置合わせを行った。実験結果の詳細は表 1 に記す。表 1 の $s1$ は、初期位置の設定に要した実行時間を表し、 $s2$ は、初期位置を与えた後に ICP アルゴリズムを実行し、位置合わせが収束するまでの時間を表す。また、表 1 の E は、位置合わせ先の部分表面点群と、最終的な位置合わせの座標変換を与えた石器の計測点群との間の評価値を表す。 D は、位置合わせ先の部分表面点群と、最終的な位置合わせの座標

変換を与えた石器の計測点群ととの間の、点ペアの距離の平均距離を表す。表 1 を見ると、全ての石器に関して E が十分小さい値となった。最も E が大きかった石器 5 では、 D が約 2.25mm である。石器 5 の両端は実寸で約 50mm なので、2.25mm の差は約 4.49% である。これは誤差とするのに十分小さい差である。他のいずれの石器も、全て両端に対して数 % の差であるため、全ての石器において位置合わせは良好といえる。図 19 は、左図に位置合わせをした石器の計測点群を同時に描画した状態を、右図に接合資料の表面点群を描画した状態を観察した様子である。図 19 の左図に示した石器の計測点群は、図 10 に示した参照画像と同様に分類した色で描画している。図 19 を見ると、接合資料の形状は概ね再現できていることが目視で確認できる。また、図 20 は、図 19 と同様に、左図に位置合わせをした石器の計測点群、右図に接合資料の表面点群を、図 19 とは異なる角度で観察した様子である。ただし、図 19 とは異なり、右図の接合資料の表面点群は、3.1 項の手法によりセグメンテーションした点群である。図 20 を目視で確認したところ、左図に示した位置合わせ結果において、石器 5 と石器 18、石器 6 と石器 17 が交差していることが分かる。石器 5 は、図 20 の右図の黒い四角で囲った領域のように、露出しないことが正しい。また、石器 6 は、図 20 の右図の黒い円で囲った領域のように、ごく一部のみ露出することが正しい。これらの問題は、位置合わせに用いられる点群の頂点数が不十分であることが理由である。本手法の制限事項については次節で説明する。

4.3 制限

本手法の位置合わせは、部分表面点群と剥離面のマッチングに基づくため、石器の、接合資料中で露出していない部分の空間姿勢は、評価できない。そのために、位置合わせ先の部分表面点群とは離れた領域が、他の石器に干渉することがある。このような課題を解決するために、今後は石器同士の干渉を防ぐような位置合わせの最適化が必要になる。

5 まとめ

本論文では、接合資料の計測によって得られた表面点群と石器ごとに計測された点群による、部分マッチング手法を提案した。本手法を、接合資料表面点群を構成する、23 個の石器を用いて検証したところ、概ね有効な

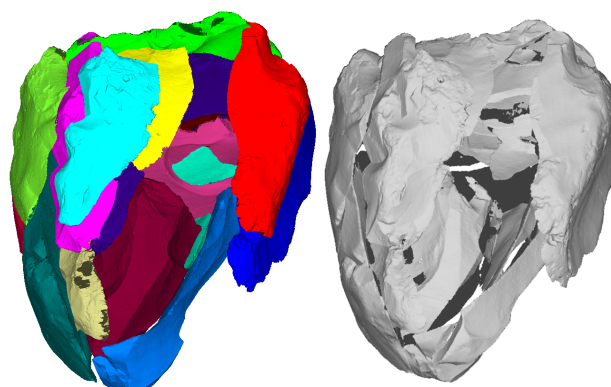


図 19 実験結果 1

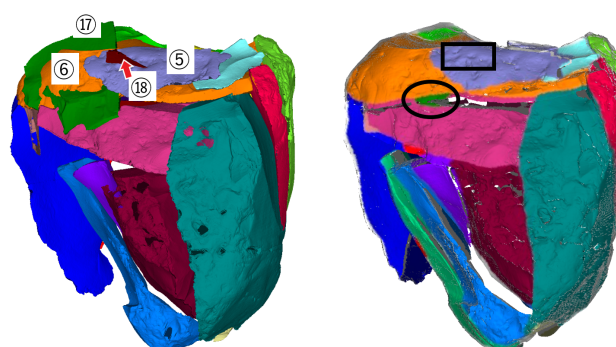


図 20 実験結果 2

結果が得られた。今後は、石器間の干渉を考慮した位置合わせの最適化を検討する。実験に協力していただいた Amgaran Altansukh 氏に感謝する。また、実験資料の提供をしていただいた株式会社ラングに誠意を表す。本研究の一部は、JSPS 科研費 JP22K00998 の助成を受けた。なお、本論文は NICOGRAPH2022 で発表した論文 [18] に加筆したものである。投稿論文 [18] のご確認とご助言をいただいた NICOGRAPH2022 プログラム委員の皆様に深謝する。

参考文献

- [1] 千田 あゆみ, 松山 克胤, 千葉 史, 今野 晃市, “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.
- [2] 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, pp.465-488, 2002.
- [3] 公益財団法人岩手県文化振興事業団埋蔵文化財セ

表 1 実験結果

石器 番号	部分表面 点群の頂点 (個)	剥離面の 頂点 (個)	石器計測 点群の頂点 (個)	$s1$ (s)	$s2$ (s)	E	D (mm)
1	72,261	31,826	272,038	13.420	4.025	0.194	0.631
2	50,584	41,306	294,172	19.463	8.277	0.435	0.818
3	198,885	142,332	440,834	21.352	69.537	0.994	1.220
4	26,263	59,326	130,354	17.569	2.551	0.008	0.130
5	102,072	83,585	199,825	32.197	25.710	3.309	2.247
6	170,599	105,872	728,547	71.315	244.410	0.205	0.598
7	70,650	19,048	319,595	19.581	2.070	0.707	1.102
8	340,633	105,872	1,799,087	106.932	47.311	2.710	1.900
9	45,866	38,274	333,733	25.115	9.803	0.007	0.119
10	25,688	4,169	265,621	11.834	0.146	0.084	0.356
11	82,488	10,911	647,898	16.125	0.977	2.607	2.154
12	121,753	181,953	603,370	102.620	153.319	0.572	1.018
13	160,002	87,981	360,843	27.127	19.610	0.182	0.580
14	928	17,491	47,313	0.832	0.031	0.007	0.176
15	3,607	2,719	213,308	10.119	0.017	0.002	0.075
16	5,047	141,547	314,827	2.347	0.669	0.000	0.040
17	3,815	19,497	266,447	1.463	0.397	0.002	0.077
18	1,037	684	186,841	0.807	0.008	0.054	0.330
19	1,062	57,358	122,354	0.314	0.016	0.001	0.074
20	105,529	9,094	1,552,804	30.343	2.362	0.700	0.968
21	53,022	11,230	1,093,164	24.136	0.547	0.060	0.339
22	12,499	45,229	160,911	5.699	0.502	0.034	0.457
23	48,603	38,046	977,957	32.533	1.960	0.022	0.218

ンター, 下嵐江 I 遺跡・下嵐江 II 遺跡発掘調査報告書 1, 岩手県文化振興事業団埋蔵文化財調査報告書 608, 2013.

- [4] 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.
- [5] X. Yang, K. Konno, F. Chiba, S. Yokoyama, “Visualization of Flake Knapping Sequence with Analyzing Assembled Chipped Stone Tools”, The Journal of the Society for Art and Science, Vol.18, No. 1, pp.40-50, 2019.
- [6] M. Chang, B. B. Kimia, “Measuring 3D Shape Similarity by Matching the Medial Scaffolds”, IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, pp.1473-1480, 2009.
- [7] X. Liu, Z. Han, Y. Liu, M. Zwicker, “Fine-Grained 3D Shape Classification With Hierarchical Part-View Attention”, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 30, pp.1744-1758, 2021.
- [8] 増田 健, “ICP アルゴリズム”, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 2009-CVIM-168, 23, pp.1-8, 2009.
- [9] 古川勝, E. Altantsetseg, 今野晃市, “拡大・縮小可能な ICP アルゴリズムに基づく写真計測点群と

レーザー計測点群の合成による点群欠損補完手法”,
情報考古学, Vol.26, No. 1・2, pp.1-8, 2021.

- [10] 澤田佳紀, 木下勉, A. Renchin-Ochir, 千葉史, 今野晃市: “石器データベースと RGB-D カメラを用いた石器計測点群のマッチングによる石器識別手法”, 芸術科学会論文誌, Vol.21, No.4, pp.213-224, 2022.
- [11] F. Tombari, S. Salti, L. D. Stefano, “Unique Signatures of Histograms for Local Surface Description”, EESV, pp.356-369, 2010.
- [12] B. Drost, M. Ulrich, N. Navab, S. Ilic, “Model Globally, Match Locally: Efficient and Robust 3D Object Recognition”, CVPR, pp.998-1005, 2010.
- [13] R. B. Rusu, “Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration”, IEEE Proc. ICRA, pp.3212-3217, 2009.
- [14] N. Mellado, N. Mitra, D. Aiger, “Super4PCS: Fast Global Pointcloud Registration via Smart Indexing”, Eurographics Symposium on Geometry Processing 2014, Vol. 33, pp.205-215, 2014.
- [15] D. Aiger, N. J. Mitra, D. Cohen-Or, “4-points congruent sets for robust pairwise surface registration”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 27, pp.1-10, 2008.
- [16] T. Takahashi, K. Konno, “A Study on Algorithm to Extract Stone Tool Surfaces from Measured Point Clouds of Joining Materials Based on Images”, IWAIT 2022, Proc. of SPIE, Vol. 12177, pp.1217729-1 - 1217729-4, 2022.
- [17] A. Altansukh, M. You, E. Altantsetseg, O. Khorloo, K. Konno, “A Study on Automatic Flake Surface Segmentation of Stone Tools by Calculating Shape Features”, IWAIT 2023, Abstract Proc. (P-ID 032), 2023.
- [18] 高橋司, 游夢博, 今野晃市, “計測点群を用いた石器剥離面と接合資料表面の部分マッチング手法の検討”, NICOGRAPH2022, pp.F-7:1-F-7:8, 2022