

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24501253

研究課題名(和文)多方向大量同時計測システムによる石器の接合資料生成自動化に関する研究

研究課題名(英文)A Study of Generating a Joining Material from Stone Tools by Using a Four Directional 3D Measurement System.

研究代表者

今野 晃市 (Konno, Kouichi)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：90333476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、4方向から同時に計測された石器(破片)から接合資料をコンピュータで復元するために、ある石器と接合される別の石器を高速に探索する手法を開発した。まず、本手法の入力となる石器データに対して、計測点群の位置合わせと欠落補間技術により、表面が完全なデータを生成した。次に、このようなデータを用いて、石器剥離面を抽出し、剥離面同士のマッチング手法により、隣接剥離面を探索しながら3次元空間姿勢を導出するアルゴリズムを開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a method of fast finding adjacent joining flakes from stone tools is developed. Each stone data that is measured by a four directional laser scanner is processed by both the registration method and the hole filling method to create complete surface data. By using such surface data, each peeling surfaces are extracted and the posture of stone tools to connect two peeling surfaces, are derived.

研究分野：情報工学

キーワード：3次元計測 接合資料 剥離面 欠落補間 計測点群処理

## 1. 研究開始当初の背景

土木工事や発掘調査などにより発見される埋蔵文化財は、全国各地の歴史や伝統・文化の解明のための重要な材料である。遺物はひとつの遺跡から数百から数千も出土するため、これらの埋蔵文化財を保存・解析するための高度な計測技術が求められている。

代表者(今野晃市)らは、多方向大量同時計測を可能とした計測システムを、遺物処理専門ベンチャー企業と共同で開発している。この多方向大量同時計測システムを利用すると、約 200 個の石器を 10 時間程度で計測することが可能である。計測結果は、大量の点群からなる。4 方向のレーザー装置から得られた点群を位置合わせし、データの欠落を補間する手法がこれまでの成果となっている。

本研究では、従来ほとんど実施されていない、石器及び石器を製作する過程で排出される剥片を計測して、コンピュータ上で石器接合資料を生成する手法を確立し、隣接する複数の遺跡から出土した大量の石器や石器剥片(以下、破片と呼ぶ)をすべてコンピュータに取り込み、これらを接合して自動的に組み立てることが最終目標である。破片を組み合わせることで、その製作技術、当時の人々の生活や行動パターンなどを解明するための貴重な資料を容易に構築できる。

一般に、複数種類の破片が混在して出土したり、製作した石器は別の場所で使用されたりするため、接合資料を復元するための部品はそろっていないとも限らない。そのため、破片の分類、組み立ては、高度な専門知識が必要であり、かつ非常に手間がかかる。特に色や模様が非常に類似している場合、人手による組み立ては極めて困難である。また多くの場合、遺物処理は遺跡ごとに行われるため、意図的に実施しない限り遺跡間の関係を見出し、古代人の生活や行動パターンを調査することは、非常に困難な課題となる。

コンピュータや 3 次元計測機器を駆使したアーカイブや土器の復元手法は、数多く提案されている。しかし、計測データを高度に活用し、石器接合資料の自動生成を目的とした研究は非常に少ない。一方、下記の文献 [1],[2] では、破壊された石像やフレスコ壁を 3 次元的に復元する手法を提案している。これらの手法は破片断裂面の曲率分布に基づいており、本課題の対象である石器剥離面のような滑らかな形状を接合することは難しい。

[1]Q.X.Huang, et al., Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching, ACM SIGGRAPH 2006, pp.569-578, (2006).

[2]B. J. Brown, et al., A System for High-Volume Acquisition and Matching of Fresco Fragments: Reassembling Thera Wall Paintings, ACM Transactions on Graphics (Proc.SIGGRAPH), Vol.27, No.3, pp.84:1-84:9, (2008).

## 2. 研究の目的

代表者(今野晃市)は、石器剥離面の接合箇所探索手法、土器の空間的な隣接関係探索手法、3 次元計測技術、データ欠落補間技術について研究してきている。本課題の対象である接合資料は、石器をジグソーパズルのピースと見立てた 3 次元ジグソーと概念が共通する。そこで、これまでの研究成果である、石器や土器の隣接関係探索手法を発展させ、人手では困難な、大量の石器や石器剥片を組み立て、接合資料を自動的に生成するための新しい手法を確立することを目的とする。また、これまで容易に実施されなかった、隣接する複数遺跡から出土した破片に対して、本手法を適用し、接合資料を作成する。これにより、近隣の遺跡間の交流などの関係性を見出し、これまでに作成が困難であった、当時の人々の生活や行動パターンを表す資料作成を試み、本手法の有効性を検証する。検証は、申請者と共同研究している企業の考古学者や、連携研究者である東京国立博物館の考古学専門家と共同で実施する。

## 3. 研究の方法

### (1) 4 方向点群の位置合わせ

本課題では、多方向大量同時計測システムから得られた 4 方向の計測点群を、一つの 3 次元座標系に位置合わせする手法を開発する。詳細は、[雑誌論文, 学会発表]にて公開された。

### (2) ポリゴン生成及び欠落部分補間

本課題では、(1) で得られた 4 方向からの点群を入力として、計測した物体表面を表すポリゴンモデルを生成する。生成されたポリゴンモデルを解析すると、計測情報が欠落している部分は、形状表面の穴となることがわかる。そこで、本課題では、穴となった部分に、新たにポリゴンを生成することで穴を埋める手法を開発する。

### (3) 稜線および剥離面抽出

本課題では、(1) で得られた計測点群に対して、(2) のポリゴンモデル生成法を適用して、次のような手順で剥離面を抽出する。(1) の計測点群を軽量化する。

軽量化点群の点密度を考慮して、稜線を抽出する。

稜線で囲まれた閉領域を抽出する。

閉領域内の点群から(2)の手法でポリゴンを生成する。

詳細は、[雑誌論文, , , 学会発表, , ]にて公開された。

### (4) 剥離面間のマッチングによる隣接破片の姿勢決定

本課題では、(3) で得られた剥離面同士をマッチングして、ある剥離面にもっとも幾何学的に一致する別の剥離面と効率よく探索して、剥離面同士が接合される空間姿勢を

決定する．ここでは，2つの剥離面の距離に基づいた評価関数によるマッチング手法と，周波数領域でのマッチング手法の2つの手法を開発する．

詳細は，[雑誌論文 ， ，学会発表 ， ， ， ， ]にて公開された．

#### (5) 破片の組み立てに関する評価・検証

本課題では，連携研究者が制作した模造石器に対して(4)の手法を適用し，コンピュータで接合可能かどうかを検証する．本手法の適用結果に対して，連携研究者が考古学的立場から，接合資料が意図したとおりか，作られているのかを評価する．

#### (6) 大規模データによる手法の拡張と問題点の明確化

本課題では，実際に出土した石器データを借用して，(4)の手法の問題点を明確化する．実際の接合資料は，下嵐江遺跡から出土したものをを用いる．計測点群には，欠損があるため(2)の手法により欠落を補間する．

### 4. 研究成果

#### (1) 4方向点群の位置あわせ

代表者らが開発している多方向大量同時計測システムにより計測された点群を，本手法で位置合わせした例を図1に示す．同色の部分は，各レーザー装置で計測されたデータである．この例では，これらが適宜重なり合っており，各レーザー装置では計測できなかった欠損部分を補完しあひながら，表面を構成していることが分かる．

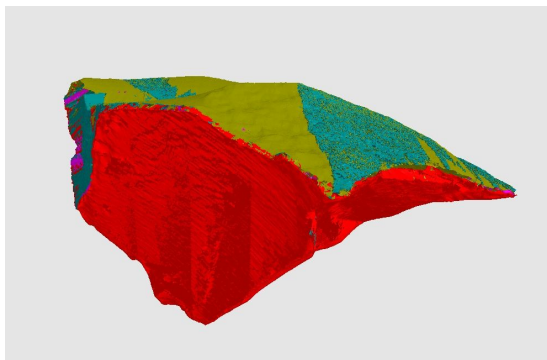


図1 4方向点群の位置合わせ例

#### (2) ポリゴン生成及び欠落部分補間

(1)の手法により位置合わせした点群からK近傍点を探索して，領域拡張法によりポリゴンを生成する手法を開発した．また，計測困難な部分は，欠損領域となるため，下記の研究成果[3]をベースにした欠落補間手法を開発した．

[3]E. Altantsetseg, Y. Muraki, F. Chiba, and K. Konno: 3D Surface Reconstruction of Stone Tools by Using Four-Directional Measurement Machine, The International

#### (3) 稜線および剥離面抽出

(2)の手法で得られた点群を，形状の変化に着目して軽量化すると，剥離面の稜線近傍は点密度が高く，剥離面の内部は点密度が低くなる．軽量化した例を図2に示す．図2のような点群に対して，点密度の高い部分を探索しながら追跡していくことで，剥離面の境界線を表す稜線を抽出できる．また，稜線で囲まれる領域に含まれる点群が剥離面として得られる．

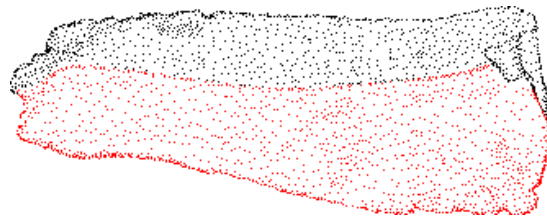


図2 点群軽量化例

抽出した剥離面に基づいてポリゴンを生成し，同じ剥離面に属するポリゴンを同色で分類したものが図3である．本手法では，同色に分類された剥離面を単位とする．

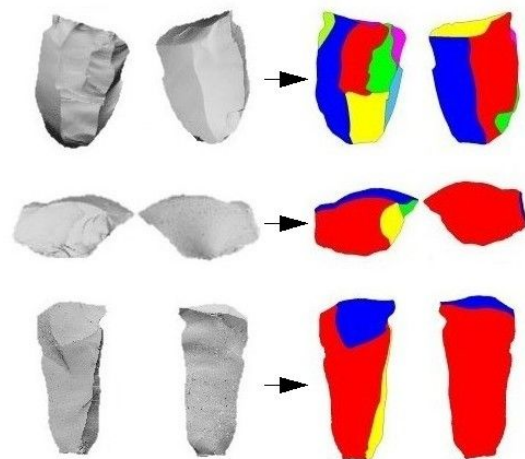


図3 剥離面検出例

#### (4) 剥離面間のマッチングによる隣接破片の姿勢決定

(3)の成果である剥離面に対して，ターゲットとなる剥離面と接合される別の石器の剥離面を探索する手法を開発した．剥離面探索は，時間がかかるため，複数の探索手法を組み合わせたアルゴリズムにより，従来のアルゴリズムと比較して約8倍の高速化を実現した．図4は，複数の石器を組み立てた例である．同じ色がひとつの石器を表している．また，この図の黄色い線で囲まれた部分は，ひとつの剥離面が複数の石器剥離面の組み合わせで構成されている例である．この図のような剥離面の探索が可能となるように本

アルゴリズムは構成されている。

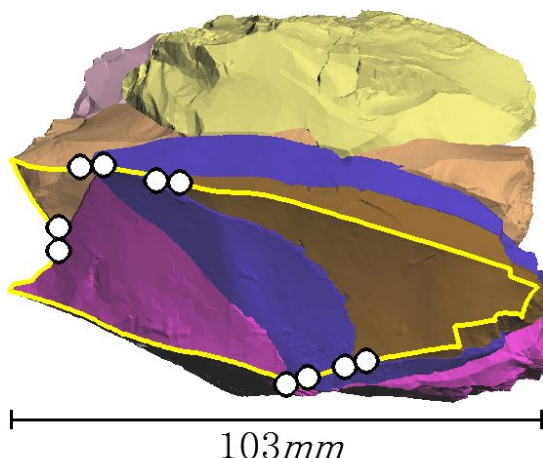
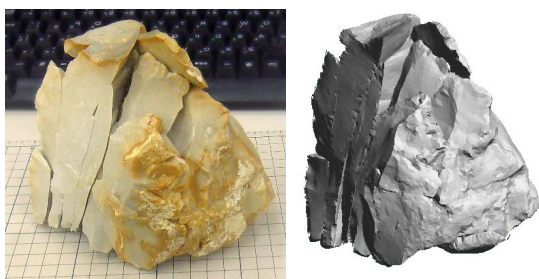


図4 接合例

(5) 破片の組み立てに関する評価・検証

(4)の手法を検証した。連携研究者が作成した模造石器を計測して、本手法により組み立てたものが図5(b)である。(a)は実物を人手により組み立てたものである。図5より、本手法の有効性が示された。図5のデータの他に2つの模造石器に対しても、同様の結果が得られた。本テーマにより評価・検証した結果については、平成27年度5月に開催される第81回日本考古学協会総会で発表する予定である。



(a) 実物の組み立て例 (b) 本手法適用例  
図5 接合資料生成例

(6) 大規模データによる手法の拡張と問題点の明確化

(4)の結果を実際に出土した石器に適用するため、下嵐江遺跡から出土した石器、約550個を計測したデータを借用した。その後(2)の手法によりデータの穴埋めを試みた。借用したデータのうち接合することが分かっている42個のデータに対して、穴埋めを行った。穴埋めプログラムの不具合修正に思ったより時間がかかったため、本課題では、(2)までの作業を行い、(3)のためのデータを構築した。現在は、引き続き(3)以降の検証を実施している。

また、図6に示すように、実際の接合資料では、内側に貫通する穴のような空洞ができあがる。その空洞にマッチする石器を探索す

るための、内側の形状を取り出すアルゴリズム開発が必要であることがわかった。この課題についても、現在検討中である。



図6 出土した石器から復元した接合資料の例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

村木祐太, アルタンツェツェグ エンフヤル, 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, 情報考古学, Vol.20, No.1・2, pp.8--15, (2014).  
<http://gmhost.lk.cis.iwate-u.ac.jp/member/20.pdf>

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).  
<http://art-science.org/journal/v13n2/v13n2pp107/artsci-v13n2pp107.pdf>

E. Altantsetseg, K.Matsuyama, K.Konno: Pairwise Matching of 3D Fragments Using Fast Fourier Transform, The Visual Computer, Vol.30, No.929-938, (2014).  
DOI 10.1007/s00371-014-0959-9

E. Altantsetseg, Y.Muraki, K.Matsuyama, K.Konno: Feature Line Extraction from Unorganized Noisy Point Clouds Using Truncated Fourier Series, The Visual Computer, Vol.29, Issue 6--8, pp.617--629, (2013).  
DOI 10.1007/s00371-013-0800-x

E. Altantsetseg, Y. Muraki, K.Matsuyama, F. Chiba, and K. Konno: Feature Extraction and Modification for Illustrating 3D Stone Tools from Unorganized Point Clouds, The Journal of Art and Science, Vol.12, No.1, pp.36-47, (2013).  
<http://art-science.org/journal/v12n1/v12n1pp36/artsci-v12n1pp36.pdf>

[学会発表](計11件)

趙岩, 松山克胤, 今野晃市: A Partial Retrieval Algorithm for Searching Stone Flakes to Generate Refitted Flakes of Stone Implement, 平成 26 年度第 1 回 芸術科学会東北支部研究会, 7 月 26 日, 青森県八戸市ユートリー八戸地域地場産業振興センター, (2014) .

E. Altantsetseg, K.Matsuyama, F. Chiba, K.Konno: Pairwise Matching of 3D Fragments Using Fast Fourier Transform, CGI 2014, 2014 年 6 月 10 日 - 13 日, オーストラリア, (2014).

村木祐太, アルタンツェツェグ・エンフバル, 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, 日本情報考古学会第 3 2 回大会, 2014 年 3 月 29,30 日, 奈良県, 帝塚山大学, (2014) .

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, NICOGRAPH 2013, 2013 年 11 月 8, 9 日, 山梨県ぶどうの丘, (2013)

趙岩, 松山克胤, 千葉史, 今野晃市: 計測点群の分類に基づく接合資料の内部空洞形状再構築手法の検討, NICOGRAPH 2013, 2013 年 11 月 8, 9 日, 山梨県ぶどうの丘, (2013) .

E. Altantsetseg, Y.Muraki, K.Matsuyama, K.Konno: Feature Line Extraction from Unorganized Noisy Point Clouds Using Truncated Fourier Series, CGI 2013, 2013 年 6 月 12-14 日, ドイツ (2013).

A.Chida, K.Matsuyama, K.Konno, F.Chiba: Study on Search for Matching Surfaces for Adjacent Peeling Surface by using Sets of Measured Points, IWAIT2013, 2013 年 1 月 7-8 日, 愛知県, 名古屋大学, (2013).

佐藤真麻, 松山克胤, 千葉史, 今野晃市: 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 年 11 月 16, 17 日, 京都府京都大学, (2012) .

Yan ZHAO, Katsutsugu MATSUYAMA, Fumito CHIBA, Kouichi KONNO: Inside shape extraction to find stone tools for restoration by refitted flakes, 平成 24 年度第 2 回 芸術科学会東北支部研究会, 2012 年 9 月 29 日, 秋田公立美術工芸短期大学, (2012) .

E. Altantsetseg, Y.Muraki, K.Matsuyama, F. Chiba, K.Konno: Feature Extraction for Illustrating 3D Stone Tools from Unorganized Point Clouds, NICOGRAPH International 2012, 2012 年 7 月 2,3 日, インドネシア, (2012).

佐藤真麻, 松山克胤, 千葉史, 今野晃市: 開度を利用した剥離面抽出による 3 つの隣接剥離面のマッチング, 平成 24 年度第 1 回 芸術科学会東北支部研究会, 一関工業高等専門学校, 5 月 26 日, (2012) .

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 1 件)

名称: 閉領域同士の隣接面を探索する探索プログラム及び装置  
発明者: 今野晃市, 松山克胤, 千田あゆみ,  
権利者: 岩手大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2 0 1 3 - 2 3 1 6 2 1  
出願年月日: 25 年 11 月 7 日  
国内外の別: 国内

〔その他〕  
ホームページ  
<http://gmhost.lk.cis.iwate-u.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

今野 晃市 (KONNO KOUICHI)  
岩手大学・工学部・教授  
研究者番号: 9 0 3 3 3 4 7 6

##### (2) 研究分担者

松山 克胤 (MATSUYAMA KATSUTSUGU)  
岩手大学・工学部・助教  
研究者番号: 8 0 4 0 4 8 0 4

##### (3) 連携研究者

品川欣也 (SHINAGAWA YOSHIYA)  
東京国立博物館・学芸員研究部調査研究課  
研究者番号: 3 0 4 4 0 1 4 2  
及川 穰 (OYOKAWA MINORU)  
島根大学・法文学部・准教授  
研究者番号: 1 0 4 0 9 4 3 5