

氏 名	あるたんすふ あまがらん ALTANSUKH AMGALAN
本籍（国籍）	モンゴル国
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	理工博 第26号
学位授与年月日	令和6年 9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	理工学研究科デザイン・メディア工学専攻
学位論文 題目	A Study on Fine-tuned Flaks Surface Matching Algorithm for Interactive Reassembly System of Stone Tools (石器の対話的組立システムのためのパラメータ調整 可能な剥離面マッチングアルゴリズムに関する研究)
学位審査委員	主査 教授 今野 晃市 副査 教授 松山 克胤 副査 教授 齊藤 貢

論文内容の要旨

The Paleolithic era and the Jomon period in Japan produced a wide range of stone tools, including cutting implements and weapons. Given their durability compared to organic materials, such as bones, antlers, and wood, stone artifacts provide significant evidence of the locations and periods of early human activities because of their geographical distributions and adaptive capacities in various environments. A rock is knocked off with a stone hammer to make a stone tool, producing flakes of different sizes referred to as flake stones. A core is the left stone as raw material for stone tools when flake stones are knocked off. The reassembly process on stone flakes is a one of important tool for understanding ancient human activities. It is a reverse process of making stone tool process and requires to identify firstly a core stone and reassemble stone flakes on the core stone.

These reassembled stone tools can also have educational value as exhibition materials at history museums. However, reassembling stone tools is challenging archaeology; it consumes many human resources, time, and special archaeological knowledge. In order to efficiently reassemble

stone tools, this thesis studied computer graphics techniques to assist this archaeological research. This work is mainly focused on developing a fine-tuned flake surface matching algorithm for interactive reassembly system of stone tools.

In recent years, several reassembly approaches have been developed for the reconstruction of fragmented archaeological artifacts such as pottery and fresco wall paintings; however, the successful application of these methods to reassemble stone tools has been limited for the following reasons: (1) Irregular shapes of stone fragments: stone tools exhibit highly irregular shapes, making it challenging for descriptor-based methods to extract crucial features. (2) The lack of distinct regional features on the flake surfaces further reassembly process. Flake surfaces are fractured surfaces created when a stone flake is knocked off from a core stone and tend to be smooth surfaces. (3) Global matching algorithms have proven inadequate, given the requisite for partial matching between pairs of flake surfaces.

The first study calculates point normal vectors of each input point cloud of stone flakes. Then, stone flakes are segmented to extract the flake surface. Also, to define the shape of the flake surfaces, a boundary correction and contour points identification process are performed. Next, according to several reassembly principles in archaeology, the stone flakes are matched starting on the stone core by searching for the best matching flake surface. In order to find the best matching flake surfaces, a new fine-tuned flake surface matching algorithm based on contour points is developed. Additionally, the surface of matched stone tools are detected and reconstructed. The matching process is repeated until all data are matched. To confirm the fine-tuned matching algorithm's efficiency and usefulness, an interactive system for stone tool reassembly is developed. The system's interface allows the control of the reassembly process, enabling users to show visual representation and evaluate the progress and accuracy of the reassembly work. Also, it overcomes the familiar challenges in traditional reassembly methods, such as the irreversible errors in incorrect matching. The experiment of this system demonstrates its effectiveness and efficiency, highlighting its practical utility in archaeological research.

We have implemented the proposed methods and tested the system with three groups of stones. All groups are reassembled through our interactive system with the fine-tuned matching algorithm. A limitation of the matching algorithm is highlighted for future research. Experiment results of the system indicate that the interactive system with the fine-tuned matching algorithm can achieve superior matching results compared to existing methods.

論文審査結果の要旨

本論文は、出土した石器を3次元計測装置で計測した点群を用いて、接合資料を仮想空間でインタラクティブに組み立てるシステムのための、形状マッチングアルゴリズムを提案している。

従来の石器接合資料生成法では、点群から接合の単位となる剥離面を自動抽出して、剥離面同士の幾何学的な一致度に基づく空間姿勢推定手法により、剥離面同士を仮想空間でマッチングしている。従来手法は、計測点群を入力して、剥離面抽出とマッチングを自動的に行い、接合資料を生成することが可能である。しかし、剥離面形状が類似している場合や、剥離面同士が部分的に一致する場合には、誤マッチングが発生し、意図する接合資料を生成できない場合がある。

本論文では、従来の接合資料生成手法により発生した誤マッチングを、リアルタイムに編集可能な、組立システムについて提案している。提案手法では、リアルタイム編集を可能とするために、マッチング精度と実行速度を作業者が制御できるパラメータを導入した形状マッチング手法を提案し、その手法に基づいたインタラクティブな組立システムを構築している。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章は序論である。本研究の背景と目的について述べられている。また、本研究で対象としている石器接合についての、考古学上の課題について述べられている。

第2章では、本研究と関連する、従来の手法について述べられている。具体的には、点群処理の基盤となる法線ベクトル推定と、幾何学的アプローチに基づく点群マッチング手法について述べられている。また、破片となって出土した様々な文化財を、仮想空間で復元する手法について述べられており、本研究との違いを明確化している。

第3章では、計測点群マッチングを行うための準備として、点群から法線ベクトルを推定する手法について述べられている。具体的には、点群をボクセルで表現して、点群表面を表すボクセルで閉空間を生成する。その後、PCA(Principal Component Analysis)を用いて、各点の法線候補ベクトルを決定した後、ボクセルで表現された形状表面と法線候補ベクトルから、法線ベクトルの方向を決定する手法が述べられている。

第4章では、第3章で述べた手法で推定した法線ベクトル付きの点群に、領域拡張法を適用し、剥離面の内側と剥離面の境界線に分類した後、剥離面の隣接情報を利用して、稜線を表す点群を抽出する手法が述べられている。剥離面を表す点群と稜線を表す点群を合成して、部分形状マッチングに利用する形状特徴としている。

第5章では、第4章で述べた手法で得られた特徴量に基づいた部分形状マッチング手法が述べられている。提案手法では、境界線近傍特徴量を抽出する精度を制御するパラメータを導入しており、このパラメータによってマッチング精度と実行速度を制御できることが述べられている。

第6章では、第3、4、5章で述べた手法を統合した、インタラクティブな石器組立システムの処理の流れと、システムの操作方法について述べられている。

第7章では、実装された石器組立システムを用いて、提案手法の有効性を検証している。本章では、考古学者が製作した模造石器と、遺跡から出土した石器を入力として、提案手法を実装したインタラクティブな石器組立システムを用いて接合資料が生成できたことが述べられている。

第8章は、結論である。本論文では、境界線近傍の形状特徴量を用いた部分形状マッチングを提案し、提案手法を実装したインタラクティブな石器組立システムにより、その有効性を示している。

以上、本論文は、3次元計測により得られた計測点群から、剥離面境界近傍の形状を抽出し、形状の部分一致を可能とした部分形状マッチング手法を提案したものである。提案手法は、模造石器だけでなく、実際に出土した接合資料の組み立てにも成功しており、手法の有効性は高く評価できる。また、提案手法に基づいたインタラクティブな石器組立システムは、考古学者からも有用性を高く評価されており、情報考古学分野の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編を記載）

A. Altansukh, M. You, E. Altantsetseg, O. Khorloo, Fumito Chiba, Kouichi Konno: A New Matching Algorithm for Stone Tool Reassembly Based on Contour Points of Flake Surface, The Journal of the Society for Art and Science, Vol.23, No.2, pp.4:1-4:17, 2024.