

<b>氏 名</b>	シュレンツェツェグ エルデネバヤル Shurentsetseg Erdenebayar
本籍（国籍）	モンゴル国
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第308号
学位授与年月日	令和元年 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	工学研究科デザイン・メディア工学専攻
<b>学位論文 題目</b>	<b>A Study of Recognizing Flake Surfaces of Stone Tool Based on Feature Lines Extracted by Mahalanobis Distance Metric</b> (マハラノビス距離評価を用いた特徴線の抽出に基づいた石器剥離面の認識に関する研究)
学位審査委員	主査 教授 今野 晃市 副査 教授 藤本 忠博 副査 教授 田中 隆充

## 論文内容の要旨

One of the areas that benefit from point clouds is cultural heritage research. The study of point clouds is contributing to cultural heritage saving for the next generation. One example is the study of stone tool. The study of stone tools plays an increasingly important role in the behavior of our ancestors. The surface collection obtained from excavated stone tools required to be open for archaeological research. In this purpose, the publication of the stone tool study needs to be presented. Archaeological research is commonly used stone tool illustration which is called "Scale drawing". Drawing a scale drawing is too time-consuming work. Reassembling Fractured Objects is the important concept of technological analysis of stone tool artifacts. In general, the problem of matching real-world archaeological fragments is a complex and time-consuming task. Because the evaluation of similarity between artefacts and their parts is difficult to evaluate. To facilitate the time-consuming work of scale drawing and matching of fragmented objects, this thesis studied computer graphics techniques to assist the study of stone tools. The thesis mostly considers the two aspects about extracting feature line and recognizing flake surfaces.

In archaeological research, the scale drawing, which is hand-drawn from

measured stone tools, is traditionally used. In the scale drawing creation, a base drawing which consists outline and ridge lines is initially drawn from geometric features of shape. After that other lines are extracted from knowledge of making stone tools and are added to the base drawing. It requires special knowledge to extract feature lines from stone tools so that scale drawing is time-consuming. Therefore, if the base drawing is automatically extracted, the working hours are reduced. To overcome this issue, this paper proposes a feature line extraction method using the Mahalanobis distance metric. First, the points on the outline are extracted from a point cloud. Then, the surface variation is calculated with a various number of neighbors and thus the potential feature points are detected by the analysis of its surface variation. After that, the potential feature points are thinned towards the highest variation points by using Laplacian smoothing. Then, the thinned feature points are shrunk to the potential feature points. Finally, a feature line is extracted by connecting the nearest thinned feature points locating in the Mahalanobis distance field. To verify our method, the extracted outline and ridge lines are compared to scale drawing of the stone tool drawn by archaeological illustrators. Our method is applied to stone tools, and we confirm the effectiveness of our method.

Studying stone tools provides us with information about human history dating as far back as 2.5 million years ago. Nowadays, the important historic artifacts of stone tools are studied by functionality and technological analysis of lithic analysis. The reassembly process of stone tools is commonly done in lithic materials. The reassembly process can be easily done by the refitted flake matching process. The refitted flake matching process is required for highly accurate segmented flakes. The thesis presents an algorithm for automatic recognition of the flake surface based on feature lines of stone tools from point clouds. The feature-line-based recognition method for the flake surface is very effective for stone tools because it is based on the geometric characteristic of stone tools. The proposed segmentation method is based on the seeded-region method. Before the segmentation, surface normal at a point is estimated from neighbor points and the nearest distance from a point to feature line segment is calculated. Initially, the furthest point from the feature line is selected for a seed point. Then, the seed point clusters its neighbor points by the following two criteria. First, neighbor points of seed point are calculated. To save the program processing speed, a distance threshold is used. If the distance

of a selected neighbor point is greater than a given threshold value, the neighbor point is clustered to the seed point region. Second, if the neighbor point is located near the feature line, the local coordinate system is constructed along the normal vector of the seed point. Then, a line is constructed by seed point and its neighbor point. If the line does not intersect with nearest feature line segment on the local coordinate system, the neighbor point is segmented into the seed point region. If line segments intersect with each other on the local coordinate system, the neighbor point is selected to a new seed point and the new region is created. The extracted flakes are compared to other segmentation methods. The implementation of this work can recognize flake surfaces according to the scale drawing of the stone tool with high accuracy.

This thesis presents an algorithm of automatic recognition of flake surfaces from point clouds. The proposed flake surface recognizing method is very effective for stone tool analysis because the proposed method is based on the fundamental characteristic of stone tools. 3D model of lithic material is tested. The proposed method is compared with different segmentation method. Mahalanobis distance metric is used to extract candidate points of feature lines. The extracted feature line is compared to scale drawing of the stone tool drawn by archaeological illustrators. In the result, the flake surface can be efficiently recognized. The limitation of the proposed method has been solved in future work.

## 論文審査結果の要旨

本論文は、遺跡から出土した石器を定量的に解析するための石器特徴線を認識する手法について提案している。本研究では、打製石器を3次元スキャナーで計測した3次元座標点群を用いて、石器を製作するときに発生する剥離面の境界稜線を点群から自動的に抽出するアルゴリズムを開発している。

遺跡から出土した石器は、洗浄、分類を経て石器の形状を表現したイラスト図で記録される。イラスト図は、石器の境界稜線を実測して特徴点をプロットし、プロットした点列をトレースして作成されることから「実測図」と呼ばれている。実測図を作成するためには、石器境界稜線を目視により抽出し2次元平面上にプロットする技術が必要であり、考古学上の高い専門性が要求される。また、特徴点をプロットする作業は、作業者の主観が入ることが知られているものの、複雑でかつ作業者の負荷が非常に高いことが述べられている。作業者の負荷を低減し、実測図の品質を向上するためには、3次元計測された点群からの特徴抽出による実測図の作成が有効であることが、研究背景として述べられている。

本研究では、3次元計測により得られた点群を用いて曲率に基づく特徴線上の点を抽出し、抽出した点列に新たな細線化処理を適用することによって、特徴線の位置を認識できることが述べられている。

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。

第2章では、本研究と関係が深い従来研究について述べられている。具体的には、開度による特徴線抽出法と、石器3次元計測システムについて述べられている。開度による特徴線抽出法では、地形解析に用いられる開度を3次元座標点群に応用した方法であり、特徴線が画像として得られることが示されている。また、石器3次元計測システムは、大量の石器を3次元計測するシステムであり、本研究の準備として位置づけられていることが示されている。さらに、点群からの特徴量抽出法をいくつか紹介しており、それらの手法を石器計測点群に適用するときの課題が述べられている。

第3章では、本論文で提案する特徴線抽出法が述べられている。最初に、実測図に描かれる稜線を認識の対象とすることが明確化されている。その後、K-means クラスタリングを用いて点群をセグメンテーションしながら、尾根線近傍の点群を稜線候補点として抽出し、ユークリッド距離評価により稜線を認識するときの問題点が示されている。それに対して、本研究では、マハラノビス距離評価が導入されており、3次元座標点群の空間分布を考慮して特徴線を構成する候補点を認識できることが述べられている。また、稜線候補となる点群から稜線を推定するため、候補点に基づき表面の変化を解析し稜線位置を推定する手法が述べられている。さらに、提案手法の有効性を示すため、実測図から正解となる稜線形状を抽出し、その稜線と本手法で推定した稜線形状との比較を行っている。比較した結果、提案手法は有効であることが述べられている。

第4章では、第3章で述べた手法を用いて、石器剥離面を認識する手法について述べられている。具体的には、剥離面の境界稜線は点群とは一致していないことから、稜線で囲まれる領域内にある点群を幾何学的内外判定に基づいて、抽出する手法が説明されている。石器剥離面は、実測図作成や接合資料作成の処理単位であり、計測点群から剥離面をセグメンテーションする手法が処理時間短縮に貢献することが述べられている。また、提案手法は大きい面積の剥離面認識には有用であるが、面積の小さい剥離面認識には限界があることが示されている。

第5章は、結論である。本論文では、石器を計測した3次元座標点群から、稜線を認識する手法を提案し剥離面セグメンテーションに適用することで、提案手法の有用性を示している。

以上、本論文は3次元計測により得られた石器点群の稜線を認識する手法と、その結果を用いた剥離面セグメンテーションについて新たに提案したものである。提案手法では、面積の大きい剥離面の稜線を精度よく認識し、3次元座標点群から剥離面を自動的に抽出できることから、剥離面を単位とする石器解析の基盤技術として非常に有用であると評価できる。特に、接合資料生成自動化には大きく貢献できることが期待される。

したがって、本論文は形状処理の分野だけでなく情報考古学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）**

S. Erdenebayar, K. Konno: Feature Line Extraction of Stone Tool Based on Mahalanobis Distance Metric, The Journal of the Society for Art and Science, Vol.18, No. 1, pp.51-62, 2019