

積層法における稜線形状の再現性評価による 打製石器モデルの空間姿勢決定法

佐々木舜¹⁾(非会員) 松山克胤¹⁾(正会員)

今野晃市¹⁾(正会員) 徳山喜政²⁾(正会員)

1) 岩手大学大学院工学研究科 2) 東京工芸大学工学部

A Space Posture Determination of Chipped Stone Tool Model by Using An Evaluation of Reproduction for Edge Shape for Laminating Method

Shun Sasaki¹⁾ Katsutsugu Matsuyama¹⁾

Kouichi Konno¹⁾ Yoshimasa Tokuyama²⁾

1) Graduate School of Engineering, Iwate University

2) Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University

{matsuyama, konno} @ eecs.iwate-u.ac.jp

概要

多方向大量同時計測が可能な計測システムによって計測された対象物を3Dプリンタで出力する場合、積層方向が重要である。なぜならば、積層される方向によっては、出力したモデルで、稜線形状がもとのデータの通りに再現されないことがあるからである。各ポリゴンの面積や方向に基づいて形状の再現性を評価する従来手法もあるが、稜線形状ではなく全体の形状を再現するため、稜線形状が失われる可能性がある。本研究は、遺跡から出土した遺物、特に打製石器の剥片を対象に、積層造形法によって生成される積層モデルが、元々のモデルデータの稜線形状を維持する最適な空間姿勢かどうかを評価する方法を提案する。対象モデルは、多方向大量同時計測システムによって計測された点群から生成したポリゴンモデルとする。本手法は、ポリゴンモデルから石器剥離面の境界稜線を抽出し、抽出された稜線の形状と、積層造形により生成される稜線の形状を比較することで、両者を評価するものである。いくつかのモデルに対して本手法を適用し、本手法の有効性が確認できたので報告する。

Abstract

The laminating direction is important when we output an object measured by a system that can perform multi-directional mass simultaneous measurement by using a 3D printer. This is because the original edge shapes of output model may not be reproduced depending on laminating directions. Some methods have been proposed to evaluate reproducibility of edge shapes according to the direction and area of polygons, but they do not reproduce edge shapes but the whole model shape, so the edge shapes might be lost. In this study, according to the polygon models generated from measured points, we examine a method to evaluate the best posture so as to maintain the edge shapes of the original lamination model generated by the laminating method. We use relic models like flakes of chipped stone tools measured by the multi-directional mass simultaneous measurement system. Our method extracts the boundary edges on stripped surfaces from a polygon model. By comparing the extracted edge shapes to those generated by the laminating method, both shapes are evaluated. We have applied our method to some models and confirmed the effectivity of the method.

1 はじめに

ラピッドプロトタイピング (RP) とは、設計された 3 次元モデルに基づいて製品を試作する技術である。RP に用いられる手法のひとつに積層造形法 [1] がある。これは 3 次元モデルを平面でスライスし、スライス断面の形状に合わせて粉体や樹脂などの材料を固めて積層することによって、試作を行う手法である。積層造形法による試作では、試作速度や精度は層の厚さやスライスする方向などのパラメータに左右される。適切なパラメータを決定するためには、試行錯誤が必要であるが、試作しながらでは時間とコストがかかる。

著者らは、大量の遺物を同時に 3 次元計測するシステムを開発している [2]。図 1 に示すように、この 3 次元計測システム [2] は、ガラステーブル上に複数の遺物を乗せて 4 方向からレーザー計測するもの [3] である。本システムでは、ガラステーブル上が XY 軸、ガラステーブルに対して垂直方向が Z 軸となるように座標軸が決められている。また本システムでは、遺物を安定した姿勢でガラステーブル上に置いて計測する。これによって、図 2 のように遺物の特徴を表す稜線は、ガラステーブルに対して平行に近い姿勢で計測される。そのため、計測された点群データからポリゴンモデルを生成し、 Z 軸方向にスライスしたデータにより積層造形する場合、稜線形状を再現することが難しい。

遺物は考古学上、貴重なものであり、実物の入手は簡単ではない。計測および RP によるレプリカ製作は、考古学的な調査・分析に寄与することが可能である。また、レプリカは展示にも用いることが可能であり、再現性を有するレプリカ製作は重要な課題である。

そこで本論文では、積層造形法で作成した試作品について、稜線の再現性を評価する方法を提案する。本手法を用いると、着目している複数の稜線形状を維持するように、形状モデルの空間姿勢が導出され、再現性の高い積層造形が可能となる。

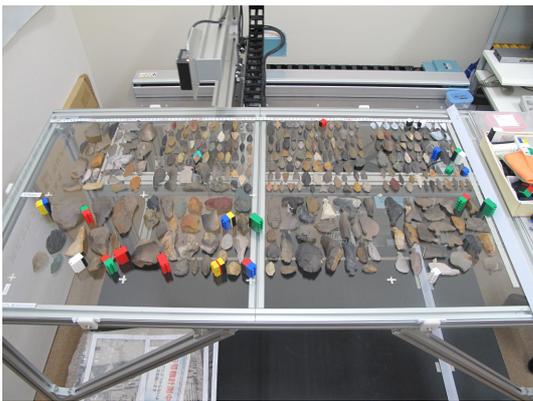


図 1: 多方向大量同時計測システム [2]

1.1 石器の剥離面

本研究では、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ものである [4]。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。剥離面を観察することで、その石器がどのような過程を経て製造されたかなどの情報を知ることができる。剥離面の生成過程を調査するにあたり、剥離面の輪郭部は重要な要素であり、輪郭の形状を再現することは石器の製造過程を正しく再現することにつながる。

なお、本研究では同一色に着色されたポリゴンの集合を、一つの剥離面と定義する。剥離面を囲む閉じた領域は、複数のポリゴンの境界線で囲まれている。ポリゴンの境界線を稜線と定義すると、剥離面は稜線列で囲まれていると考えることができる。本研究では、稜線列を剥離面の角を表す端点で分割して、端点から端点までの稜線列を一つの単位としてシミュレーションを行う。



図 2: 遺物の姿勢

2 従来手法と問題点

2.1 積層造形法の問題点

図 3 は、立方体のモデルに対して、スライス方向を変えて生成された積層モデルである。(a) では Z 軸方向をスライス方向としており、立方体の稜線形状は再現されている。それに対して (b) ではスライス方向を X 軸周りに回転させており、立方体の稜線が階段状になっている。このように、スライス方向によって積層モデルの形状は大きく異なる。

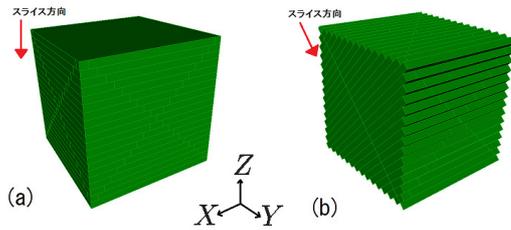


図 3: スライス方向による形状の違い

2.2 従来手法

VP シミュレータ

Choi らは、バーチャルプロトタイプング (VP) システムを用いて、仮想空間で試作を行うシミュレーションシステムを提案した [5]。VP システムを用いることで、ユーザーはディスプレイ上で仮想的な積層モデルを確認することができ、適宜パラメータの決定や修正を行うことができる。これにより物理的な試作の回数は減り、時間的、あるいは費用的コストを抑えて効率的に試作を行うことができる。

Choi らの手法では、まず 3 次元モデルとスライス平面との干渉点を取得し、入力されたスライスピッチ分ずつモデルを下からスライスしていく。続いて干渉点同士を繋いでいくことでポリラインを生成し、得られたポリラインをスライスピッチ分上に持ち上げることで積層モデルを生成する。

Choi らの手法では、積層モデルとオリジナルモデルの体積の差分を利用して、積層モデルの精度を評価する。たとえば、積層モデルの体積がオリジナルモデルの体積に近ければ近いほど評価が高くなる。しかし、Choi らの評価法では、稜線形状が維持できていなくても体積さえ一致していれば高い評価になってしまうという問題がある。

物体の強度を考慮したプリント方向の決定

梅谷らは、3D オブジェクトの限界応力を効率的に検出するための断面構造の解析手法を提案している [6]。

梅谷らの手法では、出力される物体の構造上の弱点をインタラクティブに視覚化し、それらのデータに基づいて最適なスライス方向を計算する。これによって、3D プリント時に出力物体に作用する力による出力物体の変形を防ぐために最適なスライス方向を決定することができる。

ただし、梅谷らの手法では、積層時に元モデルの形状維持に関する計算などは行っておらず、姿勢変更計算に関してもあくまで力による変形を防ぐという点に着目していることから、本研究の目的とは合致しないものとする。

誤差を利用した姿勢最適化

本研究の類似手法として、Feng らの研究 [7] が挙げられる。

Feng らは、球体や立方体、不規則な幾何学的形状の 3D モデルを対象とした事例研究を行い、積層時の加工誤差を最小限に抑えるための製造姿勢を決定する最適化アルゴリズムを提案した。これは本研究と同様に、元となるモデルと出力される物体との形状誤差に着目した研究であるが、稜線形状を対象として評価を行っている本研究と異なり、ポリゴンの法線ベクトルとスライス方向のベクトルの角度によって評価している。そのため、ポリゴンの法線ベクトルを軸とした回転によっては評価値が変動せず、場合によっては稜線形状が失われることもあり得る。よって石器の再現を目的とした場合、適切な姿勢を得ることが困難な場合がある。

3 提案手法

本論文では、稜線の形状を再現することで、元のモデルの特徴を維持した積層モデルを生成する手法を提案する。本手法では、まず再現性に寄与する稜線を取得し、その後取得した稜線に対して積層時の形状再現性を評価し、評価値が最大になるような空間姿勢を導出する。

3.1 稜線列の取得

1.1 節で述べたように、稜線列は、複数のポリゴンの境界線である稜線が連続して接続される境界線列 (ポリライン) である。たとえば、図 4 に、石器の剥離面と剥離面を囲む稜線列を示す。黒色の稜線列で囲まれた領域がそれぞれ剥離面である。この図のように、各剥離面の境界線上に存在する頂点のうち 3 つ以上の剥離面と接する頂点を端点とし、 E_1 線 E_8 のように、端点間で連続した境界線列を稜線列とする。その後、重複している稜線列を検出し、評価対象から除外する。図 4 の例では、 E_4 と E_8 のように両端点が一致する場合は片方を評価対象から除外する。また、 E_7 および E_5 と、 E_2 のように一方の端点が一致していない場合は、 E_2 を E_5 および E_7 が連結したものと考え、長い方となる E_2 を残して E_5 と E_7 を評価対象から除外する。

まずは評価対象となる稜線列を取得する。具体的には、千田らの手法 [8] を用いて剥離面の境界線を取り出した後に端点を抽出し、剥離面の境界線をたどって端点間を結んでいくことで端点間に稜線列を抽出する。その後、抽出した稜線列に重みを付け、再現性を評価する。

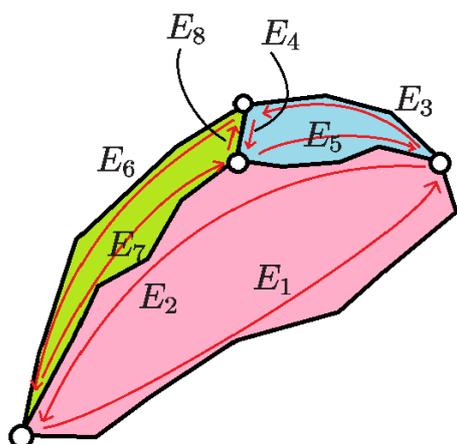


図 4: 稜線列と端点

計算対象となる端点の抽出

本手法では、稜線列の長さに着目するために T-節点を探索し、より長い側の境界線を評価の対象とできるようにする。

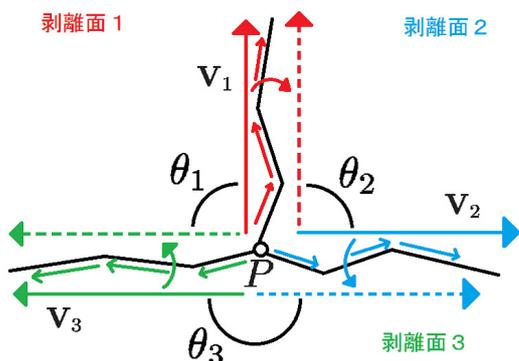


図 5: 角度の判定

図 5 は、剥離面 1、剥離面 2、剥離面 3 と、それらが共有する頂点 P を示す。剥離面 1 と剥離面 2 については、頂点 P は剥離面を囲む稜線列の端点である。しかし、剥離面 3 については、 P が T-節点であれば、剥離面を囲む稜線列の端点として判断されないことが望ましい。そこで、本手法では、以下のような手順で稜線列の端点かどうかを判断する。

1. 頂点 P につながる 3 本の稜線から、連続している一定数以内の稜線（ポリラインの線分）の方向ベクトルの平均 V_1, V_2, V_3 を求める。
2. 剥離面ごとにそれらのベクトル間の角度を求める。このとき求める角度は剥離面ごとの角度であるため、剥離面 1、剥離面 2、剥離面 3 に対応する角度は、それぞれ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ である。
3. $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の値が一定値以下の場合、 P は剥離面にとってその剥離面を囲む稜線列の端点であるとする。

とすると、この図の場合、剥離面 1、剥離面 2 にとって P は、稜線列の端点である。しかし、剥離面 3 にとっては、稜線列の端点でない。

計算対象となる稜線列の抽出

端点間をたどって稜線列を抽出する。対象となるモデルは剥離面ごとにグループ化されているため、剥離面の境界線をたどって、端点の間にある稜線列を抽出することができる。

ただし、図 6(a) のように端点 P_4 が T-節点の場合には、隣接する剥離面の境界からたどれる稜線列が一致しない。たとえば、剥離面 1 から抽出される稜線列は、 P_1 と P_2 を端点とする稜線列 E_2 と E_3 である。また、剥離面 2 から抽出される稜線列は、 P_4 と P_1 を端点とする稜線列 E_2 である。このように、T-節点の周りでは、2 本の稜線列が重複して抽出されるため、稜線列の一方を計算対象から削除しなければならない。

図 6(a) に存在する稜線列のうち、どの稜線列を計算対象から削除すべきか考える。剥離面 1 から抽出される稜線列 E_1 が P_1 から P_2 までを端点としている稜線列であるのに対し、剥離面 2、剥離面 3 から抽出される稜線列 E_2, E_3 は P_4 を端点としているため、それぞれ P_4 から P_1, P_2 から P_4 までつながる稜線列であるということに着目する。

このような場合、本手法では図 6(b) のように、より長い稜線列 E_1 を残し、長さによる評価値の重み付けを有効にすることで、より稜線形状を維持することが可能となる。

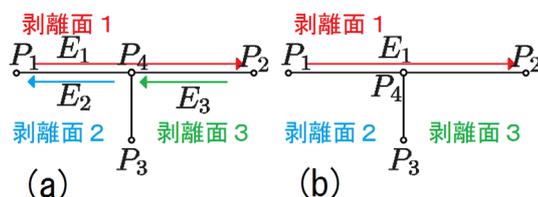


図 6: 稜線列の重複と削除

3.2 稜線列の評価方法

再現性の評価

2.1 節で述べたように、稜線形状を再現するためには、スライス方向が重要である。スライス方向を適切に決定することができれば、形状データを精度よく再現することが可能である。そこで、本論文では、3.1 節で述べた手法により抽出された稜線形状が、積層モデルで再現できるようにするため、稜線列の方向とスライス方向による、稜線の再現性評価法を提案する。説明を簡単にするため、本論文では、スライス軸は Z 軸方向に固定し、形状モデルの姿勢を自由に座標変換することとする。

稜線 i の評価値 $H_i(\theta_x, \theta_y)$ は、式 (1) のように、 i を構成する各稜線 E_{ij} の始点から終点へのベクトル \mathbf{V}_{ij} と Z 軸方向の単位ベクトル \mathbf{W}_z との内積の絶対値を用いる。すなわち、本論文では、ベクトル \mathbf{V}_{ij} と Z 軸との角度が小さいほど、良いスライスであるとなみなしている。その後、 $H_i(\theta_x, \theta_y)$ にすべての稜線列の長さの合計に対する各稜線列の長さの割合 $\alpha(i)$ をかけて重み付けを行い、重み付け後の各稜線列の評価値の合計値 $H(\theta_x, \theta_y)$ をモデルの評価値とする。なお、 θ_x, θ_y は、それぞれ X, Y 軸の回転角度とする。

各稜線の評価に内積を用いるのは、図 7 のように、稜線とスライス平面との交差角度が直角に近いほど稜線に発生する階段状の鈍りが小さくなり、元の形状特徴を維持することができるためである。すなわち、 \mathbf{V}_{ij} と \mathbf{W}_z との内積の絶対値が大きいほど稜線の形状特徴は維持され、それらの数値の合計が大きいほど全体的に稜線列の形状特徴が維持される。

以上のことから、本手法では式 (1) から式 (3) のように、 M_i 個の稜線から構成される N 個の稜線列の評価値の総和 $H(\theta_x, \theta_y)$ が最大となるモデルの空間姿勢を高く評価する。

$$H_i(\theta_x, \theta_y) = \sum_{j=0}^{M_i} |\mathbf{V}_{ij}(\theta_x, \theta_y) \cdot \mathbf{W}_z| \quad (1)$$

$$H(\theta_x, \theta_y) = \sum_{i=0}^N \alpha(i) H_i(\theta_x, \theta_y) \quad (2)$$

$$\alpha(i) = \frac{L_i}{\sum_{k=0}^N L_k} \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{V}_{ij}(\theta_x, \theta_y)$ は i 番目の稜線列に含まれる j 番目の稜線から生成されたベクトル \mathbf{V}_j を θ_x, θ_y だけ回転させたベクトルを表す。また、 $\alpha(i)$ は、稜線の長さに基づいた重み関数とする。この関数は、稜線の長さが長いほど、評価値に寄与する。 L_i は i 番目の稜線列を構成する稜線の長さの合計値を表す。

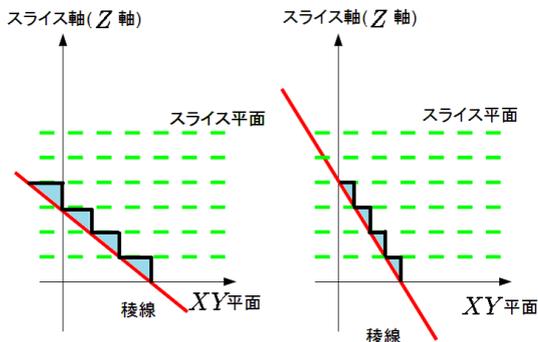


図 7: スライス平面と直線の交差角度による鈍りの違い

評価値の重み付け

本手法では、稜線全体の形状再現性を高めるため、特徴量を再現したい稜線列とそうでない稜線列を区別する。そのために、稜線列の評価値に重みを付ける。これによって、長さが長い稜線列の評価への寄与を高く、短い稜線列の評価への寄与を低く設定することが可能となる。稜線列の長さに従って重みを設定することで、全体の形状に大きく影響している稜線形状の再現性を優先するようになり、全体的な稜線形状の維持が可能になる。

最適角度の導出

最適なモデルの回転角度を求めるために、式 (2) に示す評価関数の値が最大となる、モデルの空間姿勢を導出する。そのためには式 (2) の微分が 0 になる点を求めれば良い。式 (2) は非線形方程式であるため、本研究では Newton 法による反復計算を用いて解くようにする。本手法では、 XYZ 軸において、 Z 軸上をスライス方向にしているため、 XY 軸に対するそれぞれの回転パラメータを、最小二乗法による導出を行うことで最適パラメータを得ることができる。

$H(\theta_x, \theta_y)$ を θ_x 及び θ_y で偏微分すると、式 (4) のように H_x 及び H_y を導出できる。さらに H_x と H_y を θ_x 及び θ_y で偏微分することで、式 (5) のようなヤコビ行列 \mathbf{J} が得られる。

$$H_x = \frac{\partial H}{\partial \theta_x}, H_y = \frac{\partial H}{\partial \theta_y} \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial H_x}{\partial \theta_x} & \frac{\partial H_x}{\partial \theta_y} \\ \frac{\partial H_y}{\partial \theta_x} & \frac{\partial H_y}{\partial \theta_y} \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで補正量を $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ とする。すると、ヤコビ行列を用いて式 (6) が求められ、更に式 (6) を変形することで式 (7) が求められる。

$$\mathbf{J} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -H_x \\ -H_y \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta\theta_x \cdot \frac{\partial H_x}{\partial \theta_x} + \Delta\theta_y \cdot \frac{\partial H_x}{\partial \theta_y} &= -H_x \\ \Delta\theta_x \cdot \frac{\partial H_y}{\partial \theta_x} + \Delta\theta_y \cdot \frac{\partial H_y}{\partial \theta_y} &= -H_y \end{aligned} \quad (7)$$

なお 1 回目の計算を行うための初期角度 θ_x と θ_y には、モデルを X 軸、 Y 軸方向にそれぞれ 1 度ずつ総当りで回転させたときに評価値が最大となる角度を用いる。

i 回目の反復計算のときに式 (6) で用いた回転角 $\theta_{x,i}, \theta_{y,i}$ と、同じく求められた補正量 $\Delta\theta_{x,i}, \Delta\theta_{y,i}$ を用いて、 $i+1$ 回目の回転角 $\theta_{x,i+1}, \theta_{y,i+1}$ を式 (8) のようにして求める。ここで式 (8) で得られた回転角 $\theta_{x,i+1}, \theta_{y,i+1}$ を式 (1) に代入し、評価値の再計算を行う。

表 1: 評価比較結果

名前	ポリゴン数	① 無回転	② α が一定	③ 提案手法	④ Z 軸に沿う
モデル 1	17100	21.538	35.034728	55.977103	47.972308
モデル 2	17340	17.191	29.035385	101.954901	84.960667
モデル 3	10560	31.629829	48.647212	142.621292	130.831196

前回の評価値と今回の評価値の差分がユーザ指定の閾値以下になる、あるいはユーザ指定の反復回数に達するまで反復計算を行い、最終的に導出された回転角度を用いてモデルを最適な姿勢に変更する。

$$\begin{aligned} \theta_{x,i+1} &= \theta_{x,i} + \Delta\theta_{x,i} \\ \theta_{y,i+1} &= \theta_{y,i} + \Delta\theta_{y,i} \end{aligned} \quad (8)$$

4 実験結果

本実験は、模造石器を計測した点群から生成したポリゴンモデルを対象にして行う。スライスピッチは、 $0.5mm$ および $0.1mm$ とする。 $0.5mm$ スライスピッチは、稜線の変化を可視化した際に分かりやすくするためである。剥離面上のある頂点につながる境界線に対して、頂点の前後それぞれ連続する 5 つの境界線のベクトルの平均方向ベクトルの角度が 150 度以内の場合は端点であるとした。

また、本実験ではオリジナルのモデルに対して稜線の抽出を行い、計算された評価値をもとに得られた最適な姿勢でスライスして生成した積層モデルと、計測データの座標系のままスライスして生成した積層モデルを比較する。

なお本実験の実験環境は、OS が Windows 7 Professional 64-bit、メモリが 8GB RAM、CPU が Intel Core i5-3470 CPU@3.20GHz (4 CPUs) である。図 8 の 3 つの石器モデルを用いて、本手法の有効性を確認する。これら 3 つのモデルは、筆者らが所有する石器モデルの中から、稜線が明確に視認できるものを選択した。一塊になった同一色の面の集合が、剥離面を示す。

ここから、各モデルに対しての実験結果を示す。

まず、モデル 1 について、元のモデルを全く回転させずに生成した積層モデルと、得られた稜線列をもとに導かれた最適な姿勢で生成した積層モデルを、それぞれ図 9 の (a) 及び (b) に示す。

図 9 における赤丸部分の稜線形状を拡大したものを図の直下に配置する。形状比較の赤丸で注目した部分を比べると、(b) のほうが (a) より正確に稜線列の形状を再現していることが分かる。なお、回転させない場合の評価値は 21.538 で、姿勢変更後の評価値は 55.977103 となった。実行時間としては、端点の抽出に $10.164[s]$ 、稜線の抽出に $0.088[s]$ かった。

次に、モデル 2 についての実験結果を、モデル 1 と同様に図 9 の (a) 及び (b) に示す。図 9 において各図にある矢印の方向から見た赤丸部分の稜線形状を拡大したものを直下に配置する。回転させない場合の評

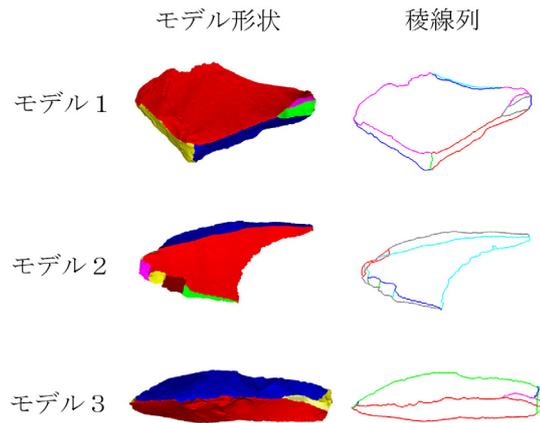


図 8: モデル形状と稜線列

価値は 17.191 で、姿勢変更後の評価値は 101.955 となった。実行時間としては、端点の抽出に $10.523[s]$ 、稜線の抽出に $0.134[s]$ かった。

最後に、モデル 3 についての実験結果を図 9 の (a) 及び (b) に示す。図 9 において各図にある矢印の方向から見た赤丸部分の稜線形状を拡大したものを直下に配置する。回転させない場合の評価値は 31.63 で、姿勢変更後の評価値は 142.621 となった。実行時間としては、端点の抽出に $10.164[s]$ 、稜線の抽出に $0.088[s]$ かった。モデル 2、モデル 3 の両方とも、(a) と (b) の稜線形状を比較すると、(b) のほうがより稜線形状を再現できていることがわかる。図 10 は、スライスピッチを $0.1mm$ としたときの実験結果である。 $0.5mm$ と同様に、(b) のほうが稜線形状を再現できているといえる。図 11 は、実機での印刷結果である。シミュレーション結果と同様、(a) と比較して、(b) のほうが稜線形状を再現できているといえる。

3 つのモデルに関しての実験結果をまとめたものを表 1 に示す。表 1 では、3 つのモデルに対して、①回転させない場合、②式 (3) における α の値を一定にした場合、③提案手法、④境界箱の長辺を Z 軸に沿わせる場合、の 4 種類の方法でモデルの回転角度や評価値を導出している。なお α の値を一定値とするときには、ほかの手法との評価値の比較を行えるように $\alpha = 1/N$ とする。ただし、 N は稜線列の総数である。表 1 の通り、本実験の結果、提案手法の評価値が最も高くなっていることがわかる。重みの有無に関して考えると、重みをつけることによって長い稜線列が評価

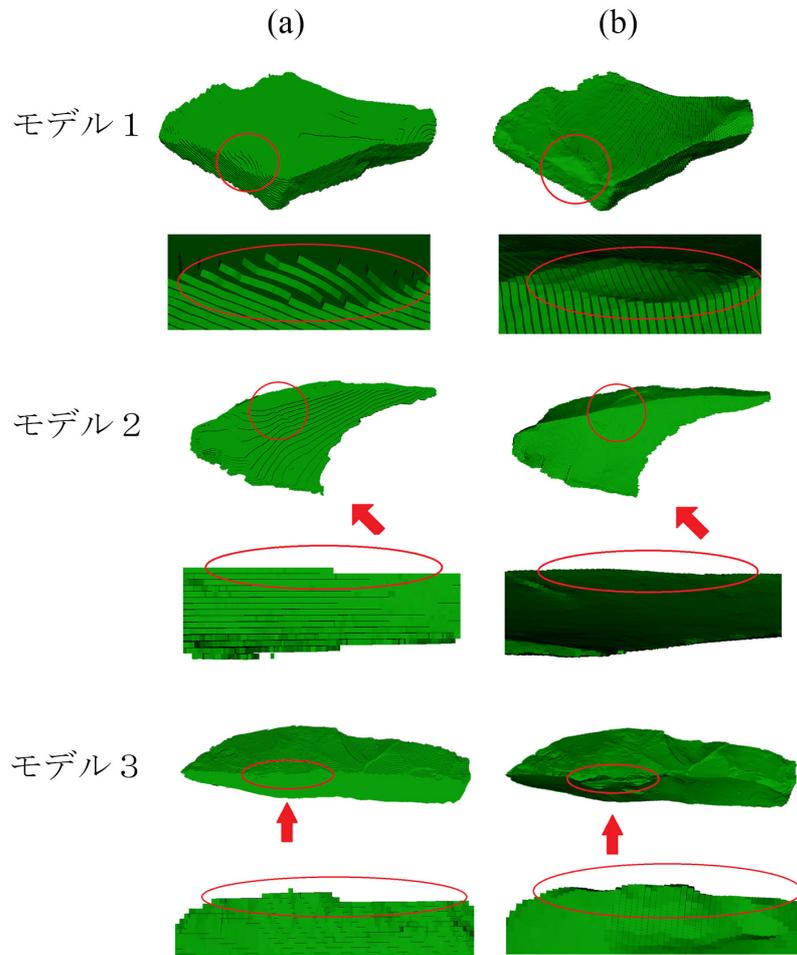


図 9: 実験結果 (1). スライスピッチ $0.5mm$

値の上昇に大きく寄与し、短い稜線列の評価値への寄与が小さくなり、全体として大きく評価値が上昇している。また、境界箱の長辺を Z 軸に沿わせるような姿勢で評価を行う場合、姿勢変更を行わない場合に比べて評価値は高くなるが、提案手法による評価値に比べると低くなっている。以上のことから、本手法の有効性が確認できた。

本実験では、石刃技法とよばれる剥離技術で作成された石器モデルを使用した。石刃技法で作成された石器の形状は、比較的長い稜線を含んでいる。本提案手法は、稜線形状の高再現性を主目的としており、特徴的な稜線を含んでいる形状については有効である。一方で、例えば球形のような、稜線が明確でないような形状については、稜線形状に基づく本手法の評価法は有効ではない。

5 まとめと今後の課題

本論文では、稜線列の形状特徴を再現した積層モデルを生成するための姿勢を導出する手法について提案した。その結果として、本手法によって得られる評価値が高いほど元々のモデルが持つ稜線形状を再現した積層モデルが生成されることを確認することができた。

謝辞

本論文は NICOGRAPH2014 で発表した論文 [10] 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。本研究は、JSPS 科研費 26420090 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Christopher Barnatt 著, 小林啓倫 訳, 原雄司 監修: 3D プリンターが創る未来, 日経 BP 社, (2013).
- [2] 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).
- [3] 村木,アルタンツェツェグ・エンフバヤル,千葉,松山,今野: "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", 第32回大会日本情報考古学会講演論文集, pp.37-42, 3月29,30日, (2014).
- [4] 石器技術研究会: 石器づくりの実験考古学, 学生社 (2004).
- [5] S.H.Choi, A.M.M.Chan: "A virtual prototyping system for rapid product development", Computer Aided Design, Vol.36, No.5, pp.401-412, (2004).
- [6] Nobuyuki Umetani, Ryan Schmidt: "Cross-sectional Structural Analysis for 3D Printing Optimization", SIGGRAPH Asia 2013 Technical Brief.
- [7] Feng Lin, Wei Sun, Yongnian Yan: "Optimization with minimum process error for layered manufacturing fabrication", Rapid Prototyping Journal, Vol.7, No.2, pp.73-81, 2001.
- [8] 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).
- [9] 今野: "3次元形状処理入門", サイエンス社, (2003).
- [10] 佐々木,松山,今野,徳山: "積層法における稜線形状の再現性評価による打製石器モデルの空間姿勢決定法の検討", NICOGRAPH 2014, pp.1-8, (2014).

佐々木 舜



2013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。

松山 克胤



1999年,岩手大学工学部情報工学科卒業。2001年,同大学院工学研究科博士前期課程修了。2005年,同大学院工学研究科博士後期課程修了。公立はこだて未来大学を経て,現在,岩手大学工学部助教。CG,情報可視化,インタラクティブシステムなどの研究に従事。

今野 晃市



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の会員。

徳山 喜政



1986年,東京大学工学部産業機械工学科修士課程修了。2000年東京大学博士(工学)。(株)リコーを経て,現在,東京工芸大学教授。CG,CAD,ゲーム,モデリング手法,3Dプリンター用データの軽量化,ハプティックインターフェイス等の研究に従事。芸術科学会,情報処理学会,映像情報メディア学会,画像電子学会会員。

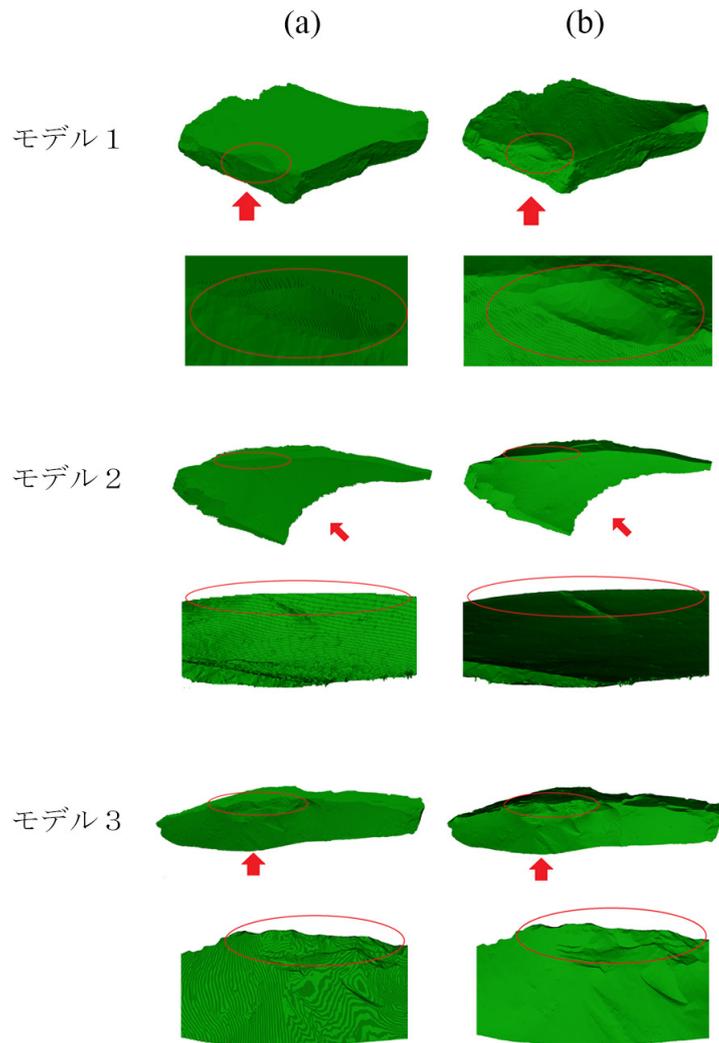


図 10: 実験結果 (2) . スライスピッチ $0.1mm$

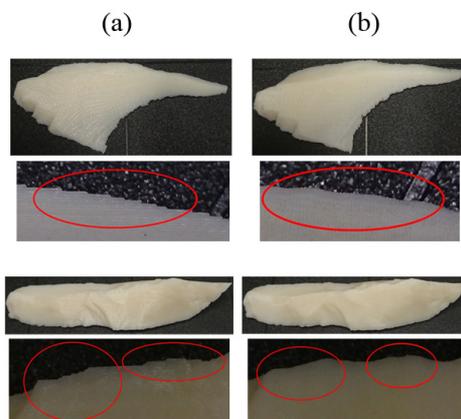


図 11: 実機での印刷結果 . スライスピッチ $0.178mm$