

● 論文

石器表裏モデルからのソリッドモデル生成手法*

荷田哲久**、今野晃市***、千葉史****、徳山喜政*****

様々な物体形状のデジタル化が推進されている今日、考古学分野においても埋蔵文化財の3次元モデル化が推進されている。従来の石器3次元モデル生成法では、まず石器を3次元測定機器で測定し、測定点群をメッシュ化する。次に、そのメッシュに面を張ることで、サーフェスモデルを生成していた。ただし、石器表面を一度に測定することは困難であるため、石器の表側と裏側の2回に分けて石器表面を測定することで、それぞれの独立した点群から、表裏別々のサーフェスモデルを生成した。しかし、表裏が独立したサーフェスモデルでは、そのモデルを限定的にしか利用することができない。より広範な応用技術で利用するためには、コンピュータ内部で石器を完全に表現できる形式であるソリッドモデルで表現する必要がある。石器をソリッドモデル化することで、現実にはなしえない汚損・破損を伴う解析や、レプリカの作製および博物館での立体展示などの、多彩な利用法が可能となる。本論文では、測定によって得られた2枚のサーフェスモデルからソリッドモデルを生成する手法を提案する。本手法は、表裏が独立した2枚のサーフェスモデルを最適な位置に自動的に配置するための自動位置合わせ手法と、位置合わせされた2枚のサーフェスモデルの境界線を縫い合わせソリッドモデル化するための近似接合法で構成される。本手法により生成された石器ソリッドモデルから閉じた断面線を算出し、モデルの有効性を確認した。

キーワード：サーフェスモデル、ソリッドモデル、測定点群、自動位置合わせ、近似接合

1. はじめに

様々な物体形状のデジタル化が推進されている今日、考古学分野においても埋蔵文化財の3次元モデル化が推進されている。生成された3次元モデルは、デジタルアーカイブや、形状解析、実測図化への利用法が考えられる。例えば、安達らは、博物館資料をデジタル化し活用するための事例研究を行った(安達ら 2002)。そのひとつに、石器や土器などを3次元モデル化し、実物との同時展示について検討したのがある。一般に来館者は、展示物には触れることはできず自由な角度からの閲覧は不可能である。そこで、3次元モデルを利用することにより、自由な角度からの閲覧が可能となった。このことにより、デジタル化が有効であることを示した。ただし、3次元モデルの品質などの問題が内在することも示唆された。

また、コンピュータ上で遺物形状を表現し、実測図化を支援するための研究も行われている。例えば、画像を用いて遺物表面の法線分布を計算し特徴解析する手法(吉澤ら 2003)や、3次元座標点群から石器の形状特徴を、最大2面角を用いて抽出し、そのデータに基づいて石器の特徴をワイヤーフレームモデルとして表現する手法(浅沼ら 2004)などがある。これらの手法は、石

器表面の空間情報を取得して利用するものであるが、実測図化に特化した情報のみを扱うため、適用範囲が限られる。様々な応用事例にて、デジタルデータを有効に活用するためには、元になるデータは、ソリッドモデル(鳥谷ら 1991)で表現されていることが必要である。例えば、石器の実測図には断面形状を記載するが、従来のデジタルデータからは、その情報を得ることが困難である。また、光造形装置などを利用して石器のレプリカを生成することも困難であった。

我々は、特定の応用を見据えた石器形状のデジタル化ではなく、多方面に渡る応用を見据えたデジタル化を目指す(今野ら 2004)。図1は、デジタルデータと応用の関係を示している。石器から生成された3次元モデルを、実測図作成支援、石器レプリカ生成、形状解析などの様々な応用事例へ適用できるモデルとして生成する。そのためには、コンピュータ内部における石器の形状表現は、その形状を完全に表現できることが重要である。すなわち、石器はソリッドモデルで表現されていなければならない。

測定データから生成された形状モデルでは、表面情報が欠落することがしばしば起こる。そのような場合には、欠落部分を何らかの方法で補間しなければソリッドモデルを生成することは困難である。欠落部分を補間する手法のひとつとして、佐川らは符号付距離場を利用して、曲率一定の補間面を生成した(佐川ら 2005)。計測された石器の表裏を表す2枚のサーフェスモデルの欠落部分を補間するときには、補間面に石刃が含まれるため、シャープな稜線が生成されることが望ましい。しかし佐川ら手法では、欠落部分は周辺の形状と滑らかであることを仮定して補間形状を生成するため、意図する形状を得ることが難しい。

* A Method to Generate a Solid Model from Front and Back Surface Models of a Stone Tool

** Tetsuhisa NITA (株) ジューエフピー

*** Kouichi KONNO 岩手大学工学部

**** Fumito CHIBA (株) ラング

***** Yoshimasa TOKUYAMA 東京工芸大学工学部

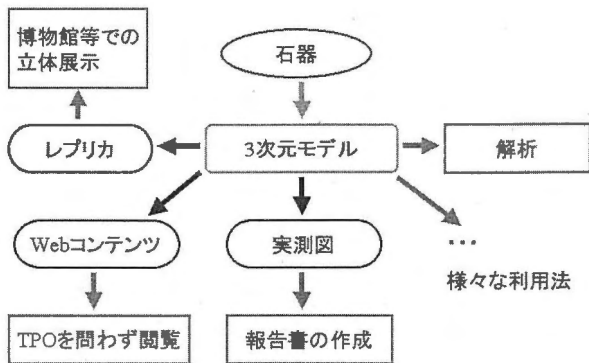


図1 3次元モデルの位置付け

本論文では、石器の閲覧や実測図作成などの様々な応用で、統一的に利用できる石器の形状モデルを作成する手法について提案する。本手法は、別々に測定された石器の表裏を表す2枚のサーフェスモデルを、同一の3次元空間の最適な位置に自動的に配置するための自動位置合わせ手法と、位置合わせされた2枚のサーフェスモデルの境界線を縫い合わせるための近似接合法からなる。我々の測定方法では、表裏を表わす2枚のサーフェスモデルの境界線は完全には一致しないため、境界線付近でデータの欠落が生じる。そこで、サーフェスモデルの境界線付近の形状を延長し、サーフェス間の交差部分をシャープな稜線により表現することで、欠落部分を補間する。本手法により、石器は完全な形式であるソリッドモデルとして表現することが可能となる。

2. 石器の3次元モデル化と問題点

本章では、浅沼らの手法(浅沼ら 2003)に示されている、石器の表面を表すサーフェスモデルの生成法について述べ、ソリッド化の際の問題点を明確化する。

以下に、サーフェスモデルの生成手順を示す。

(1) 石器表面の測定：石器の表側、裏側を別々に3次元測定機器により測定する。このとき、測定点群の輪郭が表側と裏側でなるべく一致するような方向から測定を行う。また、石器の材質に依存しないようにするため、接触型の測定機器を利用する。測定により得られた点群データは、格子状に整列される。

(2) メッシュ化：整列された測定点群について、隣接する点群を接続して3角形メッシュを生成する。このとき隣接する4つの格子点から2枚の3角形を生成することができるが、より形状特徴を捉えた方向に3角形を生成する。

(3) 幾何情報付加：3角形領域に幾何情報を付加することで、サーフェスモデルを生成する。

上記の操作により、石器の表側、裏側を表す2枚のサーフェスモデルを得ることができる。

浅沼らの手法で生成したサーフェスモデルは、石器の特徴解析や実測図生成のための基礎的な情報として利

用することが可能である(浅沼ら 2004)。しかし、生成したサーフェスモデルからソリッドモデルを生成するためには、次に示すような問題点を解決する必要がある。

(1) サーフェスモデルは、表裏別々に生成されるため、3次元空間における位置関係が不明である。

(2) 石器表面を表側と裏側とを別々に測定するため、サーフェスモデルの境界線付近の形状が、表裏で完全に一致していない。すなわち、表側と裏側のサーフェスモデルの位置関係が明確化されたとしても、サーフェスモデル間に交差や欠落部分が存在する。

これらの問題点を解決し、ソリッドモデルを生成するための手法を3章、4章で述べる。

3. サーフェスモデル間の位置合わせ手法

本章では、浅沼らの手法により得られた2枚のサーフェスモデルを、同一の3次元空間に最適に配置する手法について述べる。浅沼らの手法は、我々が提案するソリッドモデル生成手法の元になる石器の表裏を表すサーフェスモデルを生成する手法であり、ソリッド化のための前処理に位置付けられる。

3.1. 位置合わせ手法概要

元になる2枚のサーフェスモデルは、それぞれ独立した座標系で表されており、ソリッドモデルを生成するためには、これらを同一の3次元空間の適切な位置へ配置する必要がある。我々は、サーフェスモデルの境界線に着目し、それぞれのサーフェスモデルの境界線が一致するようなアフィン変換行列を近似的に算出することによって、サーフェスモデルの位置合わせを行う。サーフェスモデルの境界線と石器の表裏を表す本来の輪郭線は、測定誤差などの理由により完全には一致しない。測定されたデータに依存して、本来の位置より近づく傾向となる可能性があるため、できるだけ輪郭線が測定されることが必要である。本手法は、次のような手順で行う。

(1) 2枚のサーフェスモデルを同一の3次元空間に読み込み、サーフェスモデルの表面が、z座標の正方向と負方向をそれぞれ向くように配置する。説明を容易にするため、z軸に対して正方向のサーフェスモデルをサーフェス1、負方向のサーフェスモデルをサーフェス2と呼ぶことにする。

(2) サーフェスモデルの中心位置を一致させ、次にお互いの境界線をだまかに合わせる。これによって、2枚のサーフェスモデルの初期位置を決定する。

(3) サーフェス1の境界線と、サーフェス2の境界線に接触している面の間の距離が最小となるアフィン変換行列を求め、2枚のサーフェスモデルの位置を最適化する。以降、境界線に接触している面を境界接触面と呼ぶことにする。

3.2. サーフেসモデル間の距離の定義と評価モデル

本節では、2枚のサーフェスモデル間の最適配置を評価する計算モデルについて説明する。ここで述べる計算モデルを利用して、2枚のサーフェスモデル間の最適位置を導出する。浅沼らの方法で得られたサーフェスモデルは、石器の表側と裏側を別々に測定した点群に基づいて生成されているため、境界線は幾何学的に一致していない。我々は、一方のサーフェスモデルの境界線が他方の境界接触面上に乗っていれば、2枚のサーフェスモデルの位置が最適であると考えられる。

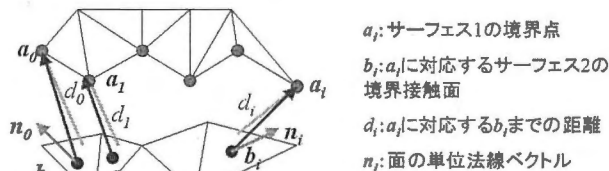


図2 サーフেসモデル間の距離の定義

そこで本手法では、サーフェス1の境界線と、サーフェス2の境界接触面との距離が最短になる計算モデルを考え、それに基づいた評価関数を定義する。図2は、我々が提案する計算モデルを示している。サーフェス1の境界線を構成する点を $a_i (i=0, \dots, n)$ とし、 a_i とサーフェス2の境界接触面との最短距離を d_i とする。例えば、境界接触面の中心を b_i 、面の単位法線ベクトルを n_i とする場合、距離 d_i は式(1)で与えられる。

$$d_i = (a_i - b_i) \cdot n_i \quad (1)$$

ただし、「 \cdot 」は内積を表す。サーフェスモデル間の位置は、式(1)に示した距離の総和がより小さければ、よりよい位置関係であると評価する。

式(2)は、サーフェス1の境界線上の点と、サーフェス2の境界接触面との距離の2乗和を表している。

$$D = \sum_{i=0}^n (d_i)^2 \quad (2)$$

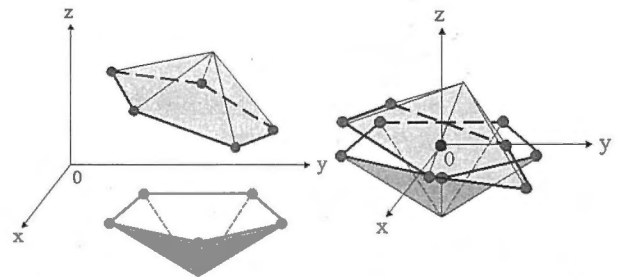
2枚のサーフェスモデルの境界線が一致すれば、 D の値は小さくなり、境界線が一致しなければ大きくなる。そこで本手法では、サーフェス1の境界線とサーフェス2の境界接触面との距離の2乗和 D が最小となるアフィン変換を求める。そして、サーフェス1を構成するすべての点に、算出されたアフィン変換を適用し、 D が最小となる最適な位置にサーフェス1と2を配置する。

3.3. 初期位置合わせ

サーフェスモデルの最適な位置は、式(2)を最小化したときのアフィン変換である。サーフェス1の回転

角と平行移動量を未知数として最小化すると、式(2)は、非線形となるため、反復計算法により近似解を計算する。解が発散しないようにするためには、まず大まかな位置合わせを行う必要がある。そこで、次の手順により2枚のサーフェスモデルの初期位置合わせを行う。

(1) サーフেস1の境界線上にある点の座標値の平均を計算し、その位置が原点になるようにサーフェス1を平行移動する。サーフェス2についても同様の操作を行う。



(a) 初期位置合わせ前 (b) 初期位置合わせ後

図3 初期位置合わせ例

(2) サーフেস1を z 軸の正方向に1度ずつ回転させ、サーフェス1の境界線と、サーフェス2の境界接触面との距離の2乗和 D をそれぞれ求める。1度から360度までの D の値のうち最小値となるときを角度を、サーフェス1に適用し初期位置とする。図3は、2枚のサーフェスに対して初期位置合わせを実行した例である。(a)は初期位置合わせをする前のサーフェスの配置であり、(b)は初期位置合わせ後のサーフェスの配置である。

3.4. 位置合わせ最適化

初期位置合わせによる大まかな位置から、より適切な位置へサーフェスモデルの位置を調整する。式(2)に示した評価式が最小となるアフィン変換を算出し、サーフェス1へ適用する。

$a_i(a_{ix}, a_{iy}, a_{iz})$ をサーフェス1の頂点の座標値とし、 a_i をアフィン変換した座標値を $a'_i(a'_{ix}, a'_{iy}, a'_{iz})$ とすると、これらの座標値の関係は、式(3)で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} a'_x \\ a'_y \\ a'_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & m_x \\ r_3 & r_4 & r_5 & m_y \\ r_6 & r_7 & r_8 & m_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 x, y, z 各軸の回転角を $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ とすると、各軸について回転移動するための変換行列の要素 $r_{ij} (i=0, \dots, 8)$ は、次のような式となる。

$$\begin{cases} r_0 = \cos \theta_y \cos \theta_z \\ r_1 = \cos \theta_y \sin \theta_z \\ r_2 = -\sin \theta_y \\ r_3 = \sin \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z - \cos \theta_x \sin \theta_z \\ r_4 = \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z + \cos \theta_x \cos \theta_z \\ r_5 = \sin \theta_x \cos \theta_y \\ r_6 = \cos \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z + \sin \theta_x \sin \theta_z \\ r_7 = \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z - \sin \theta_x \cos \theta_z \\ r_8 = \cos \theta_x \cos \theta_y \end{cases}$$

また、 m_x 、 m_y 、 m_z は、各軸の平行移動量を表わす。

式 (3) を、式 (2) に適用する。本手法では、回転角 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 、 m_x 、 m_y 、 m_z を未知数として、式 (2) の値が最小となる値を、最小二乗法により導出する。本手法では、回転角と平行移動量を最小化するために、ヤコビ行列を用いて非線型方程式を解くこととする。以下にその解法を具体的に示す。

まず、式 (3) を θ_x 、 θ_y 、 θ_z 、 m_x 、 m_y 、 m_z で偏微分して、式 (4)、式 (5) を求める。ここで、各変数で偏微分した D を、 D_x 、 D_y 、 D_z 、 D_{m_x} 、 D_{m_y} 、 D_{m_z} とする。

$$D_x = \frac{\partial D}{\partial \theta_x}, \quad D_y = \frac{\partial D}{\partial \theta_y}, \quad D_z = \frac{\partial D}{\partial \theta_z} \quad (4)$$

$$D_{m_x} = \frac{\partial D}{\partial m_x}, \quad D_{m_y} = \frac{\partial D}{\partial m_y}, \quad D_{m_z} = \frac{\partial D}{\partial m_z} \quad (5)$$

式 (4)、(5) をさらに θ_x 、 θ_y 、 θ_z 、 m_x 、 m_y 、 m_z で偏微分することによりヤコビ行列 J を導出できる。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_x}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_x}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_x}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_x}{\partial m_x} & \frac{\partial D_x}{\partial m_y} & \frac{\partial D_x}{\partial m_z} \\ \frac{\partial D_y}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_y}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_y}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_y}{\partial m_x} & \frac{\partial D_y}{\partial m_y} & \frac{\partial D_y}{\partial m_z} \\ \frac{\partial D_z}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_z}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_z}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_z}{\partial m_x} & \frac{\partial D_z}{\partial m_y} & \frac{\partial D_z}{\partial m_z} \\ \frac{\partial D_{m_x}}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_{m_x}}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_{m_x}}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_{m_x}}{\partial m_x} & \frac{\partial D_{m_x}}{\partial m_y} & \frac{\partial D_{m_x}}{\partial m_z} \\ \frac{\partial D_{m_y}}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_{m_y}}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_{m_y}}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_{m_y}}{\partial m_x} & \frac{\partial D_{m_y}}{\partial m_y} & \frac{\partial D_{m_y}}{\partial m_z} \\ \frac{\partial D_{m_z}}{\partial \theta_x} & \frac{\partial D_{m_z}}{\partial \theta_y} & \frac{\partial D_{m_z}}{\partial \theta_z} & \frac{\partial D_{m_z}}{\partial m_x} & \frac{\partial D_{m_z}}{\partial m_y} & \frac{\partial D_{m_z}}{\partial m_z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (4)、(5)、(6) より、方程式 (7) を得ることができる。式 (7) を解き、 i 回目の反復計算により、よりよい近似解を得るための差分値 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ 、 Δm_x 、 Δm_y 、 Δm_z を求める。

$$J \begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \\ \Delta m_x \\ \Delta m_y \\ \Delta m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_x \\ -D_y \\ -D_z \\ -D_{m_x} \\ -D_{m_y} \\ -D_{m_z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

差分値から、 $i+1$ 回目の反復計算のための、よりよい近似解 $\theta_{x,i+1}$ 、 $\theta_{y,i+1}$ 、 $\theta_{z,i+1}$ 、 $m_{x,i+1}$ 、 $m_{y,i+1}$ 、 $m_{z,i+1}$ は、式 (8) のようになる。

$$\begin{cases} \theta_{x,i+1} = \theta_{x,i} + \Delta\theta_x \\ \theta_{y,i+1} = \theta_{y,i} + \Delta\theta_y \\ \theta_{z,i+1} = \theta_{z,i} + \Delta\theta_z \\ m_{x,i+1} = m_{x,i} + \Delta m_x \\ m_{y,i+1} = m_{y,i} + \Delta m_y \\ m_{z,i+1} = m_{z,i} + \Delta m_z \end{cases} \quad (8)$$

式 (7)、式 (8) の手順を繰り返し、 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ 、 Δm_x 、 Δm_y 、 Δm_z が十分小さくなったときの解 $\theta_{x,i+1}$ 、 $\theta_{y,i+1}$ 、 $\theta_{z,i+1}$ 、 $m_{x,i+1}$ 、 $m_{y,i+1}$ 、 $m_{z,i+1}$ を変換行列の要素 r_j へ適用することで、変換行列を得ることができる。

4. 近似接合法

3章で述べた位置合わせ手法を実行することで、2枚のサーフェスモデルの最適位置を決定することができる。ソリッドモデルを生成するためには、サーフェスモデル間の境界線を幾何学的に一致させる必要がある。本章では、位置合わせされたサーフェスモデルを幾何的に処理し、ソリッド化するための近似接合法について述べる。

4.1. 近似接合法概要

一般に、複数のサーフェスモデルからソリッドモデルを生成するためには、各サーフェスモデル間の交差により閉じた空間を形成する必要がある。しかし2章で述べたように、本研究の対象である2枚のサーフェスモデルを最適な位置へ配置したときには、サーフェスモデル間に隙間ができる。そのため、隙間を埋める処理が必要である。図4は、位置合わせされたサーフェスモデルを示している。例えば、この図の円で示されているような、白く抜けている部分が隙間を表している。本研究では、サーフェスモデルの境界線付近の形状を後述する方法で延長し、2枚のサーフェスモデル間の隙間を埋める。これにより、2枚のサーフェスモデルは必ず交差し、閉じ

た空間を形成することができる。その後、サーフェスモデルの交線を計算し、不要な部分を除去することによって、2枚のサーフェスモデルの境界線を幾何学的に一致させることができる。最後に、これらを接合することで、石器ソリッドモデルが完成する。

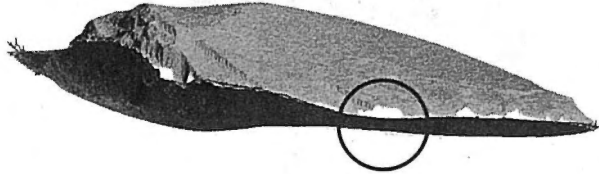


図4 位置合わせされたサーフェスモデル

4.2. 補間面の生成

石器の3次元座標点群は、 xy 平面に対して等間隔のピッチで存在しており、浅沼らの方法で石器を計測するとき、境界の形状を完全に計測できるとは限らない。例えば図5において、曲線Aが石器本来の輪郭線と仮定すると、格子上的●が計測された点であり、計測点の外側には計測幅未済の位置に形状が存在しうると考えられる。我々は、この点に着目し、計測ピッチ以内の幅で、形状を延長する。延長されたサーフェスモデルの境界線を計測ピッチ幅だけオフセットすることによって、サーフェスモデル間の交差部分が、計測ピッチ幅の中間値付近に生成されることを期待する。もし、意図する形状が得られない場合には、オフセット量は計測ピッチ以内で調整することが可能である。本手法は、計測された点群の位置を移動しないので、計測時の誤差範囲内の形状修正となることが、大きな特徴である。

境界線の延長は、次に述べる手順で行う。

(1) サーフェスモデルの計測ピッチ (p mm) をオフセット値として、境界線上の点を外側にオフセットする。オフセットする方向のうち x, y 方向については、境界線上の点とその点に隣接する境界線上の点を、 xy 平面に射影した点から決定する。図6に示すように、境界線上の点を xy 平面に射影した点を A、C、D とし、C、D は点 A に隣接する境界線上の点とする。AC、AD に垂直な方向ベクトルをそれぞれ v_0 、 v_1 とし、 $v_0 + v_1$ の方向に境界線上の点を p mm だけオフセットする。新たに生成された境界線上の点 B における z 値は、もう一方のサーフェスモデルの境界箱 (鳥谷ら 1991) における z 値の最大値または最小値から決定する。境界箱とは、形状を覆う直方体のことである。例えば、サーフェス1の補間面を生成する場合には、新たに生成される境界線上の点における z 値は、サーフェス2の境界箱の z 値の最小値とする。以上のような手法で、境界曲線上のすべての点をオフセットし、新たな境界線を生成する。

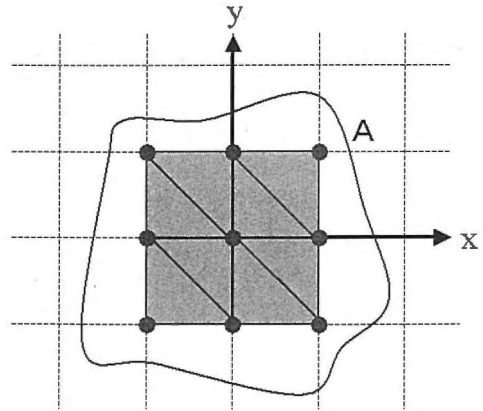


図5 石器と測定点群の関係

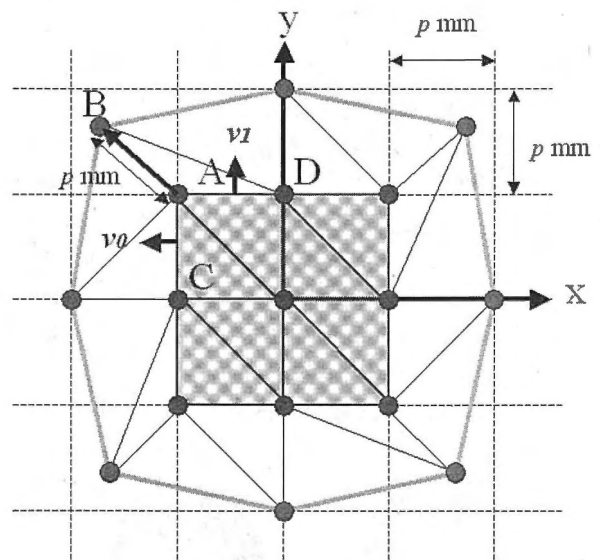


図6 境界線の延長法

(2) 新たな境界線を構成する点と、元の境界線間を3角形メッシュで補間する。

図7に、石器を表すサーフェスモデルに補間面生成手法を適用した例を示す。(a) はサーフェス1を横から見たときの図である。このモデルに対して、下向きに境界線を延長して補間面を生成したモデルを (b) に示す。

4.3 サーフェスモデルの近似接合

4.2節で述べた手法により境界線を延長した2枚のサーフェスモデルは、3次元空間に閉じた領域を形成する。この領域を石器の内部とみなし、2枚のサーフェスモデルを接合する。接合の手順は次のとおりである。

(1) 2枚のサーフェスモデル間の交線を計算する。

(2) 各サーフェスモデルの境界線と交線の間を削除する。これにより、2枚のサーフェスモデルの境界線は幾何学的に一致する。

(3) 2枚のサーフェスモデルの境界線を縫い合わせ、ソリッドモデルを生成する。



(a) 元のサーフェスモデル

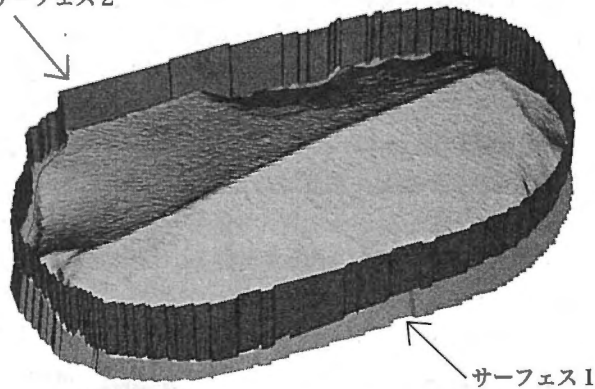


(b) 延長後のサーフェスモデル

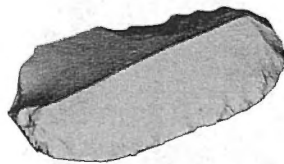
図7 補間面生成例

図8は、サーフェス1、2に対して本手法を適用した例である。図8(a)に示すように、境界線を延長した各サーフェスモデルの面はお互いに交差し合い、2枚のサーフェスで閉領域を構成する。サーフェスモデル間の交線を生成し、交線と境界線の間が存在している不要な面を除去したものが、図8(b)である。また図8(c)は交線を示している。図8(d)は、不要な面を除去した2枚のサーフェスモデルを表している。サーフェス1、2の境界線を分かりやすくするため、サーフェス1の位置を上方に少し平行移動してある。この図から分かるように、2枚のサーフェスモデルは、境界線が幾何学的に完全に一致した状態となる。このようなモデルを接合し、ソリッドモデルを生成する。

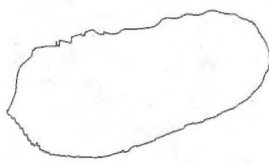
サーフェス2



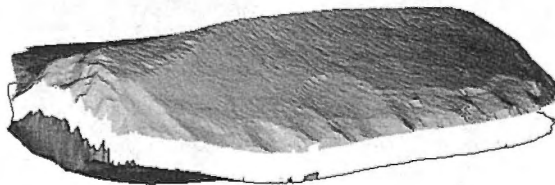
(a) 補間面生成



(b) 不要要素削除



(c) 交線



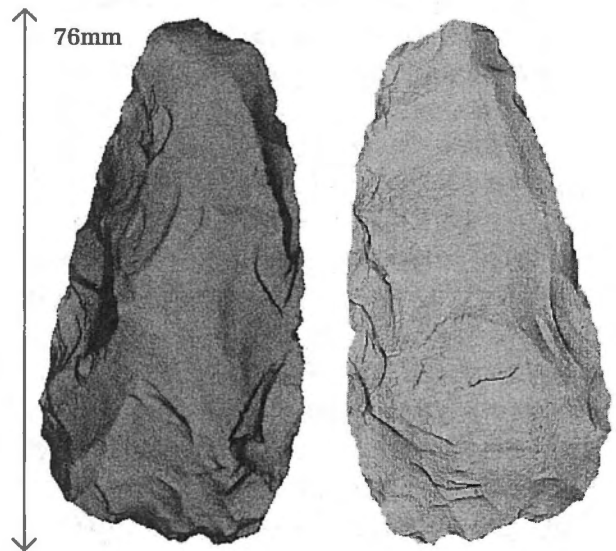
(d) サーフェス1とサーフェス2

図8 境界線が完全に一致したサーフェスモデル

5. 石器ソリッドモデル生成例と評価

本章では、3次元測定機器により得られた石器のサーフェスモデルに、提案手法を適用した結果を提示する。また、生成されたソリッドモデルを任意平面で切断し、閉じた断面線を取り出す。そして、実測図に描かれた断面線と形状を比較し、本手法の有効性を示す。

図9に、石器のサーフェスモデル(サンプル1)を示す。(a)がサーフェス1、(b)がサーフェス2をそれぞれ示す。この石器モデルの縦方向の長さは、約76mmである。計測ピッチは、0.2mmである。図10(a)に、サンプル1を最適な位置に位置合わせしたものを示す。例えば、○で示されているように、白色で表わされる箇所が欠落している部分を示す。また、図10(b)には、近似接合法によりソリッド化したモデルを示す。この図から分かるように、欠落部分は補間されていることが分かる。位置合わせ時の境界線上の点と境界接触面との平均距離は、0.345mmである。図11は、ソリッドモデルを任意の平面で切断したときの断面線を表示したものである。断面線上の点a、b間の距離は、17.8mmである。実測図に記載されている断面図から、同じ位置における距離を計測したところ17.5mmであることから、約2%ほど太くなっている。誤差は少ないことから本手法は妥当であり、実用上も有効であることが分かる。



(a) サーフェス1 (b) サーフェス2

図9 サーフェスモデルの例1(サンプル1)

同様に、図12に、石器のサーフェスモデル(サンプル2)を示す。(a)がサーフェス1、(b)がサーフェス2をそれぞれ示す。この石器モデルの縦方向の長さは、約61mmである。計測ピッチは、0.2mmである。図13(a)に、サンプル1を最適な位置に位置合わせしたものを示す。また、図13(b)には、近似接合法によりソリッド化したモデルを示す。例えば、○で示されている

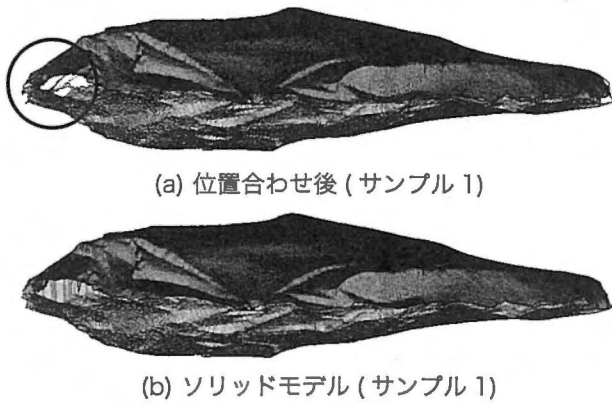


図10 生成されたソリッドモデル (サンプル1)

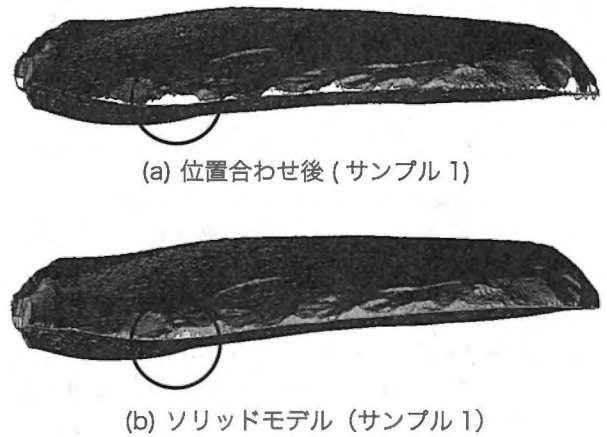


図13 生成されたソリッドモデル (サンプル2)

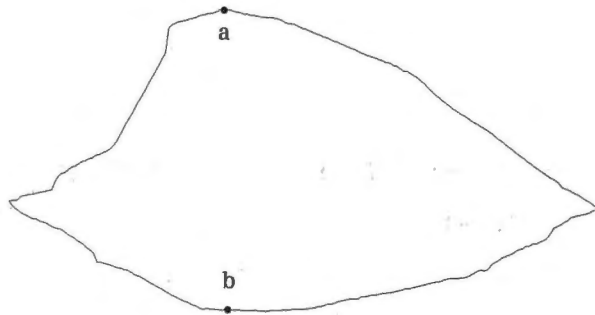


図11 断面線の生成例 (サンプル1)

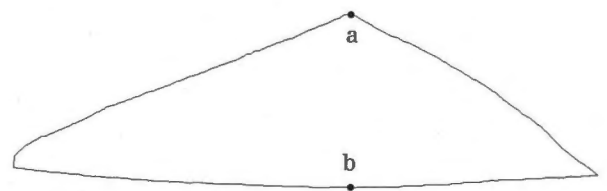


図14 断面線の生成例 (サンプル2)

ように、白色で表わされる箇所が欠落している部分を示す。この図から分かるように、欠落部分は補間されていることが分かる。位置合わせ時の境界線上の点と境界接触面との平均距離は、0.399mmである。図14は、ソリッドモデルを任意の平面で切断したときの断面線を表示したものである。断面線上の点 a、b 間の距離は、9.0mmである。実測図に記載されている断面図から、同じ位置における距離を計測したところ 9.4mm であることから、約 4% ほど距離が近くなっている。誤差は小さいことから本手法は妥当であり、実用上も有効であることが分かる。

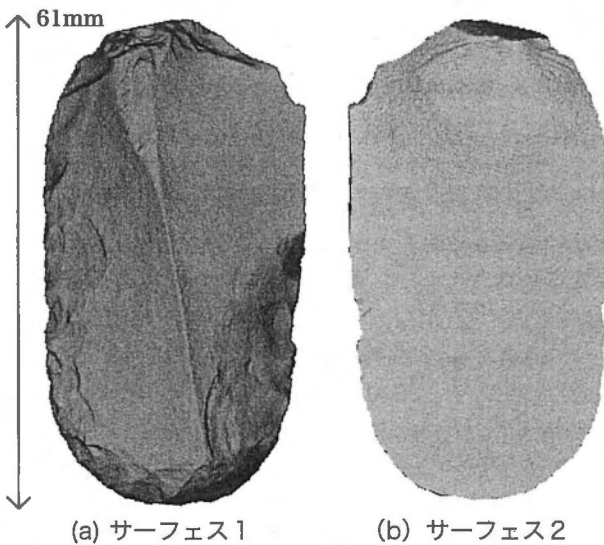


図12 サーフェスモデルの例2 (サンプル2)

6. まとめ

本論文では、表裏別々に測定された石器サーフェスモデルから、ソリッドモデルを自動生成する手法について述べた。本手法では、2枚のサーフェスモデルを同一の3次元空間に配置したときの最適な配置を算出し、配置された2枚のサーフェスモデルの境界線を延長することで、サーフェスモデル間に閉空間を生成した。この閉空間に基づき、不要要素を除去後に、接合処理を行うことで、ソリッドモデルを生成した。本手法は、計測点を変更することなくソリッド化可能であり、計測精度を保つことが大きな特徴である。

また、生成したソリッドモデルに対して、任意の平面で断面線を生成し、実測図に描かれた断面線と比較した。その結果、ほぼ同一の断面が得られたことから、位置合わせが妥当であることが分かった。今後は、本手法で生成されたソリッドモデルを、石器の精密なレプリカの生成や、石器に汚損・破損を伴う解析などへ適用し、応用事例を増やしていく。

謝辞

この研究成果の一部は、独立法人科学技術振興機構が実施する地域研究開発促進拠点支援事業の成果である。本論文で使用した資料を提供いただいた岩手県花巻市教育委員会に感謝する。また、開発環境を貸与してくれたラティス・テクノロジー(株)に感謝する。

参考文献

- 浅沼功二、千葉史、今野晃市
2003 「遺物の3次元モデル化とWeb配信」 日本情報考古学会第16回大会、pp.71-76
- 浅沼功二、千葉史、今野晃市
2004 「石器実測図作成のための3次元特徴追跡法」 日本情報考古学会論文誌、Vol.9、No.2、pp.1-10
- 安達文夫、鈴木卓治
2002 「博物館における資料のデジタル化とその活用」 情報処理学会誌、Vol.43、No.10、pp.1058-1063
- 今野晃市、千葉史、徳山喜政、鳥谷浩志、
2004 「デジタル化された石器モデルのWeb利用と立体視システム」、人文科学とコンピュータ、Vol.2004、No.78、pp.15-22
- 佐川立昌、池内克史
2005 「符号付距離場の整合化による形状モデル補間手法」 電子情報通信学会論文誌 D-II、Vol. J88-D-II、No.3、pp.541-551
- 鳥谷浩志、千代倉弘明
1991 「3次元CADの基礎と応用」 共立出版、pp.8-9
- 吉澤康雄、堀川忠弘、後藤敏行、大竹幸恵、植木武
2003 「画像処理を用いた石器の実測図作成支援システムの検討」 日本情報考古学会第16回大会、pp.81-86

A Method to Generate a Solid Model from Front and Back Surface Models of a Stone Tool

Tetsuhisa NITA, Kouichi KONNO, Fumito CHIBA, Yoshimasa TOKUYAMA

Digital data is widely used in the field of archeology; especially, buried cultural assets are digitalized with a lot of methods. In a method of generating a three dimensional model, a stone tool is measured by a range scanning apparatus first, so that three dimensional point clouds are provided. After that, surface models are generated from the point clouds. In that event, front and back surfaces of the tool are generated independently because it is very difficult to measure front and back surfaces of a stone tool simultaneously. If, however, the surfaces are generated independently, the applications of the generated surface models are limited. If a solid model of a stone tool can be generated in a computer, it is possible to analyze the stone tool about corruption of a digitalized stone tool, or virtual visualization of the tool on computer display. For another example, the replica of a stone tool can be easily generated from the solid model. Because of this reason, it is necessary to represent a stone tool with solid model, so that the generated a digital data will be applied for various purposes. In this paper, we propose a method to generate a solid model from the front and back surfaces provided by measured data. The method consists of appropriate registration of two surface models and gluing two surfaces. We have already calculated cross sections of the solid model generated by our method and we have confirmed the effectiveness of the solid model.