

石器実測図作成のための3次元特徴追跡手法*

浅沼功二**、千葉史***、今野晃市****

文化財保護法は遺跡所在地の土地を改変する際には発掘調査を行い、発掘調査報告書を刊行することを義務付けている。発掘調査報告書の大部分は出土した遺物の実測図が記載されている。実測図の作成は高度な技術と多大な労力を要するので効率化を求める声は大きい。我々は、実測図作成を効率化するために、3次元形状処理技術を利用して石器の実測図の一部を自動作成する方法を提案する。まず、石器を3次元計測器で測定することで石器の3次元座標点群を獲得する。3次元座標点群から石器の形状特徴を抽出し、特徴を追跡して3次元ワイヤフレームモデルを作成する。作成されたワイヤフレームモデルに基づいて表面情報を生成し、実測図を構成する特徴線を取り出すことで実測図作成作業の効率化を図ることができる。
キーワード：実測図、3次元形状特徴、測定点群データ、特徴追跡法、ワイヤフレームモデル

1. はじめに

遺跡が所在する土地を改変する場合、文化財保護法に基づき、遺跡の発掘調査を行い、発掘調査報告書を刊行する義務がある。遺跡の発掘調査報告書に記載する大部分は、遺跡より出土した遺物の実測図である。遺物実測図の作成は手作業で行われているので、高度な技術を要し、なおかつ多大な時間を要する。よって実測図作成を効率化することは重要な課題である。

実測図の作成効率化のために、遺物にさまざまなデジタル技術を適用した研究が行われている。例えば、3次元計測器を用いて距離画像を作成し、銅鐸の表面の形状を拓本のように再現する技術(多井ら 2001)や、3次元デジタイザを用いて遺物表面の法線分布を計測して、遺物のさまざまな特徴を解析する手法(吉澤ら 2003)などがある。

石器の実測図の作成手順は、まず輪郭を描く。次に剥離面の輪郭である稜線を描く。そして貝殻状裂痕(リング)や放射状裂痕(フィッシャー)を輪郭と稜線に加えて描き完成させる(加藤ら 1994)。

我々は、3次元形状処理技術を石器に適用することによって、石器の特徴である稜線形状と輪郭線を自動的に抽出する手法を提案する。我々の手法では、まず石器を3次元計測器で測定する。測定点の3次元座標に基づいて、石器の3次元座標点群を取得する。そしてその石器の3次元座標点群を幾何学的に解析し、石器の特徴を抽出する。最後に、抽出された特徴を追跡して3次元ワイヤフレームモデルを作成する。本手法により作成

されたワイヤフレームモデルを実測図の一部として利用することで実測図作成作業の効率化を図ることが可能である。

2. 関連研究

デジタル技術は、仏像などの巨大な文化財にはすでに応用されている(倉爪ら 2002)。文化財のなかでも石器や銅鐸などの細かい特徴を持った遺物にデジタル技術を応用し実測図作成の効率化を図った例は少ないが、その例の中から2つ紹介する。

2.1 拓本画像の自動生成

デジタル技術を遺物へと応用した例として距離画像を利用して銅鐸の拓本画像を作成する研究がある(多井ら 2001)。

拓本とは、2000年前の中国で発明された、銅鐸や瓦、銅鏡等の模様や絵などの採取したい面に、上から墨を含ませたスポンジを当てて凹凸を紙に写し取って保存する資料である。写し取った拓本は遺物の表面の模様などを解析するのに重宝されている。しかし、拓本は手作業で紙と墨を使って表面の模様を写し取る手法をとっているため、遺物が汚損する可能性や、作業中に破損する可能性がある。

多井らは3次元計測器を用いて、銅鐸を計測し、保存することによって、拓本作成を効率的に行う方法を提案した。遺物の模様の凹凸情報を3次元計測器で読み取り、その結果から拓本化した場合墨が付くであろう場所を黒色、また付かない場所を白色と仮定し画像化する。その結果、拓本と同様の画像が得られるという手法である。彼らの手法では拓本で取り切れない細かな模様までデジタル化できるという利点がある。

この手法によって作成されるものは2次元の拓本画像である。石器の稜線を抽出する目的には、この手法は適さない。

* A 3D Character-Tracing Method for Use in Making Measured Drawings of Stone Artifacts

** Koji ASANUMA 岩手大学工学部情報システム工学科

*** Fumito CHIBA 岩手大学工学部情報システム工学科

**** Kouichi KONNO 岩手大学工学部情報システム工学科

2.2 画像処理を用いた石器の実測図作成支援システム

石器をデジタル解析する試みとして、画像処理を用いた実測図作成支援システムが検討されている（吉澤ら 2003）。

吉澤らが検討しているこの方法は、黒曜石などの鏡面反射成分が大きく、レーザを利用した3次元計測器では計測しにくい石器に対して適応される手法である。対象物にさまざまな照明パターンを投影し、画像を撮影する。その収集された画像から表面の法線方向を計算し輪郭や内部特徴を解析する。そして実測図の自動トレースを目指すという研究である。

吉澤らの手法では、石器の特徴のうち輪郭については背光投影画像から輪郭画素を検出し、ベジェ曲線（鳥谷ら 1991）で近似し SVG 形式（アドビシステム URL）で出力する方法を実現している。しかし、内部特徴の稜線形状については、法線分布図は存在するがその利用法はまだ発表されていない。

3章では、2章で挙げた既存技術を踏まえ、石器実測図の一部を作成する手法について提案する。

3. 遺物の特徴抽出法

本章では、3次元形状処理技術を適用し、石器の特徴である輪郭線と稜線を抽出する手法について述べる。

3.1 石器特徴抽出の概要

本論文で提案する石器実測図作成の手順を以下に示す。図1は、その手順を示している。

まず石器を3次元計測器により測定する。得られた

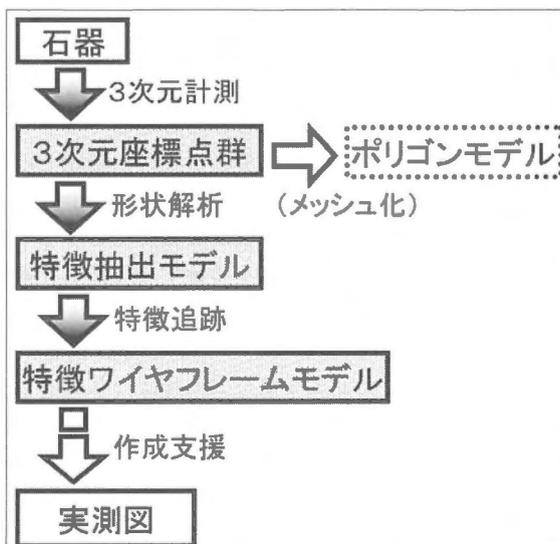


図1. 石器の特徴抽出の流れ

点群をメッシュ化すれば石器のポリゴンモデル（浅沼ら 2003）となる。ポリゴンモデルはデータの可視化に用いる。

次に、得られた3次元座標点群より輪郭線の抽出を

行う。内部形状については3次元座標点群の幾何学的解析を行い、形状の特徴を抽出する。更に、得られた特徴から稜線形状の追跡を行う。以上の手順により稜線と輪郭線からワイヤフレームモデルを構築する。ワイヤフレームモデルに自由曲面（徳山ら 2002）を内挿することによって表面形状を生成し実測図を構成する輪郭線と稜線を取り出せば実測図作成の効率化を図ることができる。

次節から提案手法を手順に沿って説明する。

3.2 石器の3次元座標点群の取得

まず石器を3次元計測器で測定し、3次元座標点群を作成する。

本研究では3次元計測器にローランド ディー・ジー、株式会社の PICZA Model PIX-4（図2）を用いた。

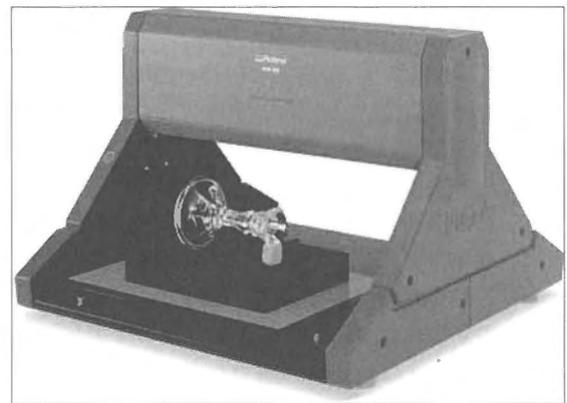


図2. 触針式3次元計測器 PIX-4

この計測器はレーザ式ではなく、接触型メッシュポイント高さ検出方式であるために、測定時、レーザの要因によるノイズがない。さらに、レーザ式では測定が難しい、黒曜石などのガラス質の石器を測定することができる。

また表1のように、 xy 平面の格子が0.05 mm単位、高さの精度が0.025 mm単位で測定できる。計測精度が非常に優れており、石器のような細かな特徴を持つ遺物の測定に適している。

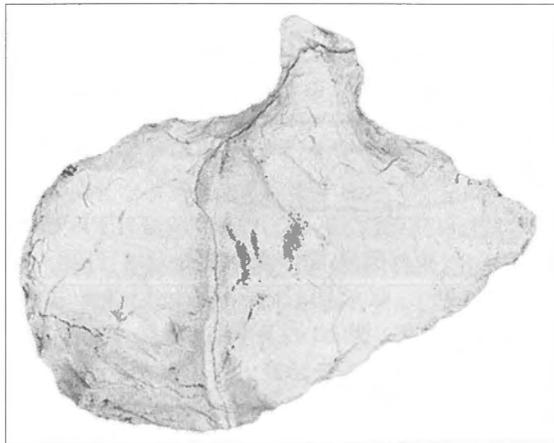
表1. PIX-4 の仕様

テーブルサイズ	x	最大 152.4[mm]
	y	最大 101.6[mm]
	z	最大 60.5[mm]
z 方向の精度		0.025[mm]
スキャンピッチ		最小 0.05[mm]

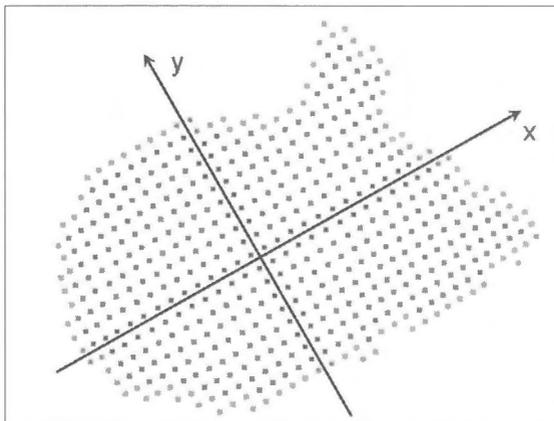
図3 (a) に石器の写真、図3 (b) に石器から3次元計測によって得られた3次元座標点群を示す。図3 (b) は点分布を見やすいように、実際に扱うデータから点を間引いてある。図3 (b) の通り、座標点は xy 平面に

において均等な格子状の点列になっている。

3次元座標点群をメッシュ化し、メッシュに面を張ると測定した情報を可視化できる(浅沼ら 2003)。図4に可視化した石器を示す。



(a) 石器写真



(b) 同石器の3次元座標点群
図3. 石器の写真と3次元座標点群

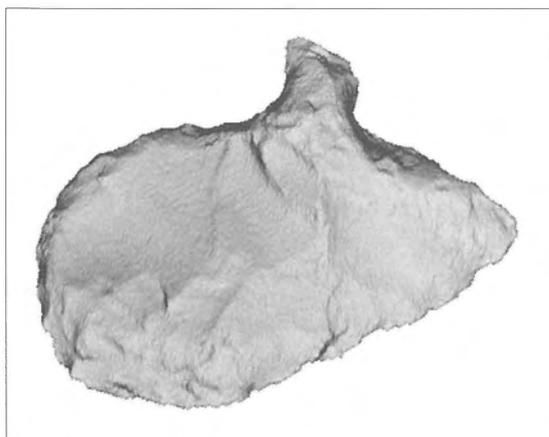


図4. 石器の3次元可視化

3.3 3次元座標点群からの特徴抽出

前節で得られた3次元座標点群から石器の稜線上の点を抽出する。図5に実測図の一部と、その陰影図を

示す。石器実測図の稜線となる場所は、実物では地形図の尾根のような形状である。すなわち、3次元座標点群の中で稜線上の点は、その点の周囲の8点とで尾根形状が形成されていると考えられる。

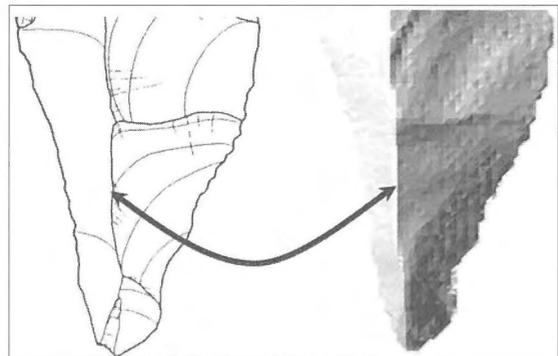


図5. 実測図の稜線と陰影図の対応

次の手順で、点群から尾根形状を検出する。まず点群の各点における接平面を算出する。その接平面を用いて、尾根形状を作成し、2面角を計算する。2面角は尾根を挟む2面の法線のなす角度である。2面角がユーザの設定した閾値より大きくなった場合に尾根であると判断する。

石器から得られた点群は図3(b)に示す通り xy 平面に投影した場合、格子状に並んでいる。点群の各点について、図6に示すように、隣接する8点に対して作成された面の平均を求める。これを接平面と呼ぶ。

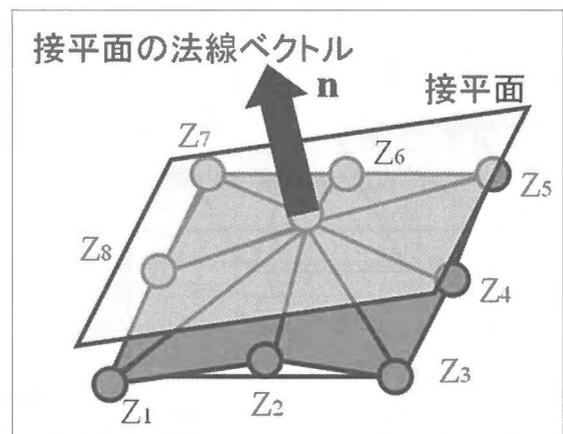


図6. 接平面

接平面の計算法は、接平面の法線ベクトル n 、対象点と周りの点でなす三角形の法線ベクトルを $n_1 \sim n_8$ とすると、次の(1)式で表される。

$$\mathbf{n} = \frac{\sum_{i=1}^8 \mathbf{n}_i}{8} \quad \dots (1)$$

3次元座標点群の全ての点について接平面の法線ベクトルを計算する。さらに、各点の8近傍の点を利用して、2面角を計算し、2面角の最大値を利用して尾根を検出する。以下では2面角の最大値を最大2面角と呼ぶ。最大2面角は次のように算出する。図7は点群の一部である。

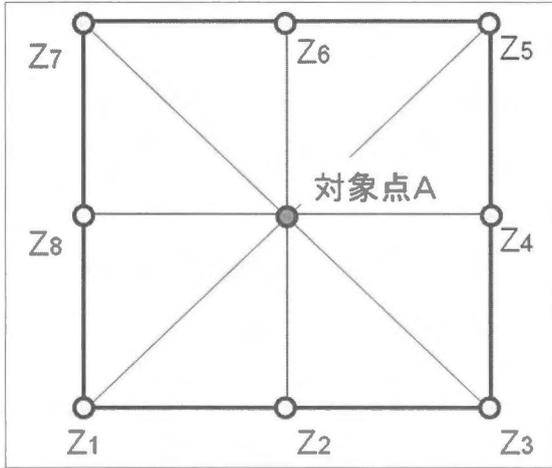


図7. 対象点と周囲の点

最大2面角を求める対象点をAとする。Aの周囲の点はZ1~Z8である。対象点と周りの2点を通る線を稜線と仮定する。例えば点Z4から点Z8への線を稜線とした2面角を考える。

図8の点線部分を、求める2面角の稜線とした場合、稜線の左右の面を決定しなければならない。

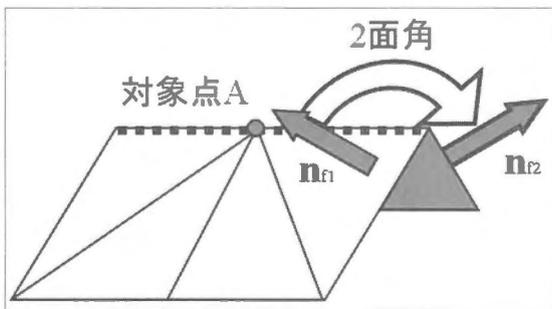


図8. 2面角

面の導出方法は、図9に示すように、稜線の両側にある3点を組とし、それぞれの点における接平面の法線ベクトルの平均を左右の面の法線ベクトルとする。

例えば、図9の下側の面f1の単位法線ベクトルn1は、点Z1、Z2、Z3の単位法線ベクトルの平均である。もう片方の面f2の単位法線ベクトルn2は点Z5、Z6、Z7の単位法線ベクトルの平均である。

面f1、f2の2面角θは、内積を用いて(2)式で表すことができる。

$$\cos \theta = n_{f1} \cdot n_{f2} \quad \dots (2)$$

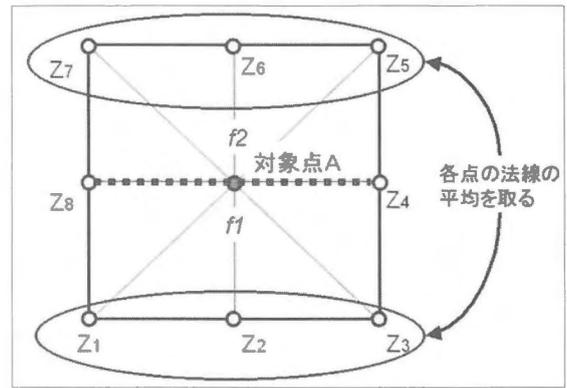


図9. 面の導出方法

2面角の計算を、図10のように対象点Aを通る4本の線について適用し、その最大値を最大2面角として対象点に情報を持たせる。これを全ての点について適用し、尾根の点を算出する。

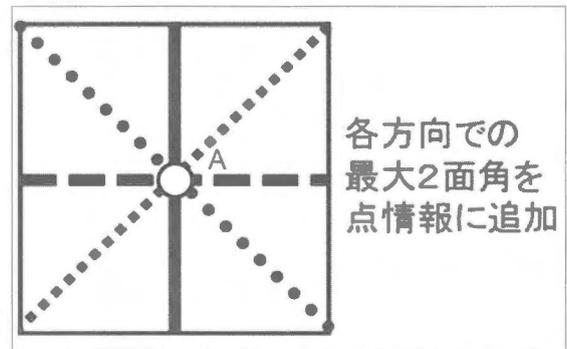


図10. 対象点を通る線

図11に算出した最大2面角の値を可視化したモデルを示す。これを特徴抽出モデルと呼ぶ。図では、色が白くなるほど最大2面角が大きいことを示す。白い部分が、実測図では稜線となる可能性がある。この白い部分について特徴の追跡を行う。

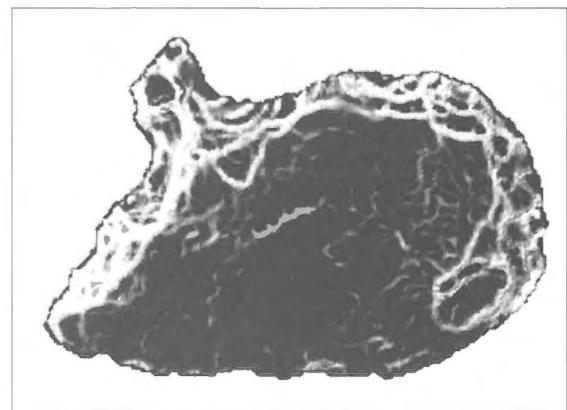


図11. 特徴抽出モデル

3.4 特徴の追跡

前節で得られた最大2面角を用いて特徴を追跡する。

特徴を1本の線で表現することにより実測図の稜線形状に近いワイヤフレームモデルを得ることが目的である。

特徴を抽出する手順は次の通りである。

- [1] 3次元座標点群から輪郭線となりうる点を検索し、石器の輪郭線をワイヤフレームモデルで作成する。
- [2] 作成したワイヤフレームモデルから特徴の追跡開始点となる点を全て検索する。
- [3] すべての追跡開始点について特徴線を追跡する。
- [4] 追跡した特徴線の中から、最も特徴線が長いものを選択し、ワイヤフレームモデルに加える。
- [5] [2]～[4]を繰り返す。

以下に手順について具体的に解説する。

3.4.1 輪郭抽出

座標点群からまず輪郭線を求める。まず座標点群を xy 平面上に投影する。 xy 平面上を座標点が見つかるまで左上から右下へ検索し、見つかった座標点を輪郭線の始点とする。図12に輪郭の始点を検索する様子を示した。

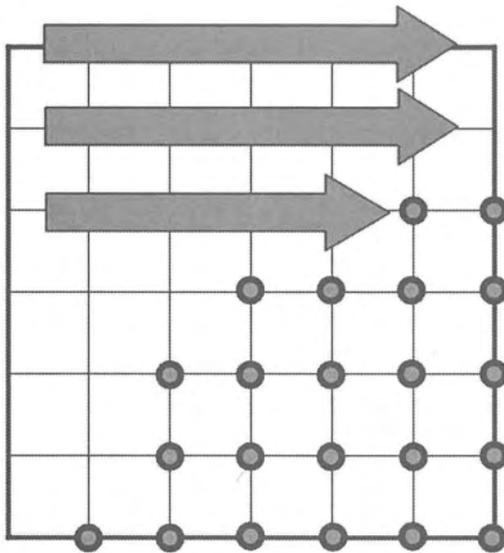


図12. 輪郭の視点の検索

検索によって求められた始点は図13の星印の点となる。始点の左側から反時計回りの検索を行い、座標点が最初に見つかった方向に輪郭線を引く。検索順は図13の番号順の通りであり、図13の場合では輪郭線を引くのは2番の方向である。

続いて次の点を検索する。図14の星印が現在の点、直前の点は白丸である。検索する順番は、反時計回りで白丸が最後になるように検索する。すなわち順番は図14の番号順で、はじめに見つかる点は3番なので3番の方向に輪郭線をのばす。

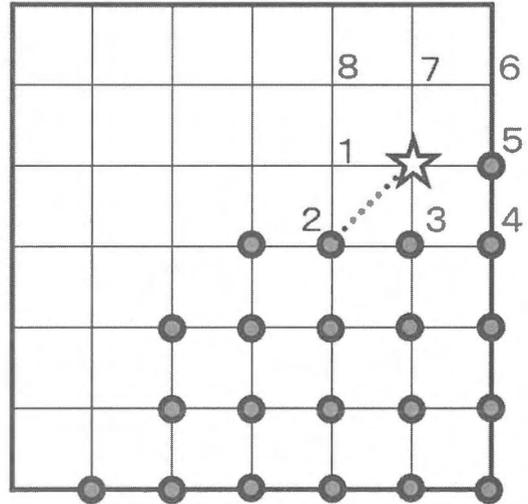


図13. 輪郭の追跡点の検索

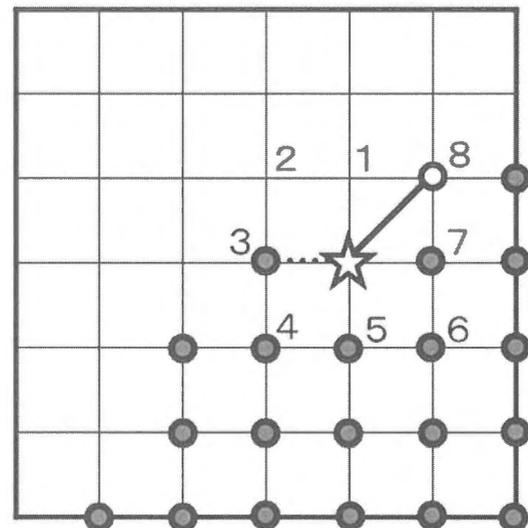


図14. 輪郭線の追跡

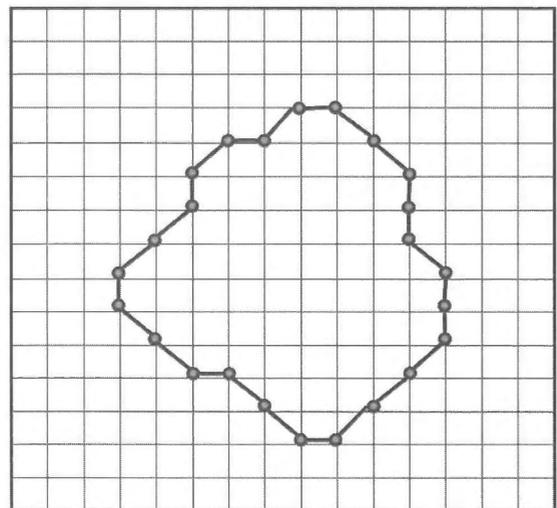


図15. 輪郭線を構成する点

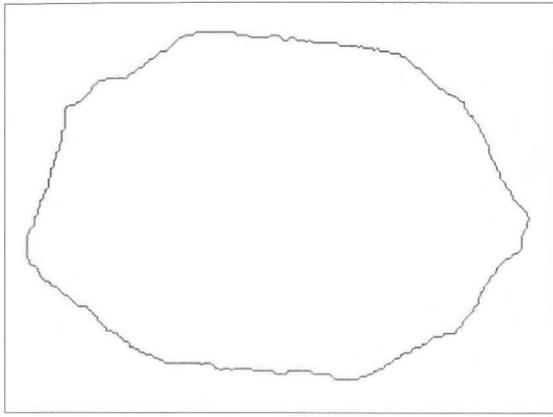


図 16. 輪郭線ワイヤフレームモデル

輪郭線の追跡を始点に戻るまで続けると図 15 のような輪郭線が完成する。

この手順で石器の輪郭線を抽出し、ワイヤフレームモデルにしたものを図 16 に示す。この輪郭線ワイヤフレームモデルに稜線を追加する。

3.4.2 追跡開始点検索

稜線を追跡するために、稜線の始点となる点を検索する。条件は以下の 2 つである。

- ・ワイヤフレームモデルに使用された点であること (図 15 の黒丸)
- ・ユーザが設定した閾値以上の最大 2 面角を持つ点が周りにあること

この 2 つの条件に合う点を候補点とする。1 つ目の条件は、稜線の分岐に対応するために設定した条件である。稜線は輪郭からのびているものだけではない。1 回目の検索では輪郭線上のみから候補点を検索するが、2 回目以降では新たに引いた稜線も候補に加えて、稜線から稜線へ接続する場合にも対応した。

2 つ目の条件は輪郭線上と稜線上から分岐して稜線を作成してよいのかを問うもので、閾値を高く設定すると線の数が減り、実測図で稜線として描かれる線が作成されない可能性が出てくる。逆に低く設定すると実測図で稜線として描かれない線が多く作成されることになる。

閾値に関しては何度か試行錯誤を行い、適切な値を設定する。

3.4.3 追跡の方法

追跡の方法について説明する。図 17 に追跡の模式図を示す。星印が追跡の現在位置で、矢印の方向から進んだという直前の位置 (図 17 では白丸) の情報を持っている。

追跡する方向は直前の位置以外の 7 方向のいずれかとなる。基本的には最大 2 面角を 7 点について比較し、最も大きい点の方向に追跡する。

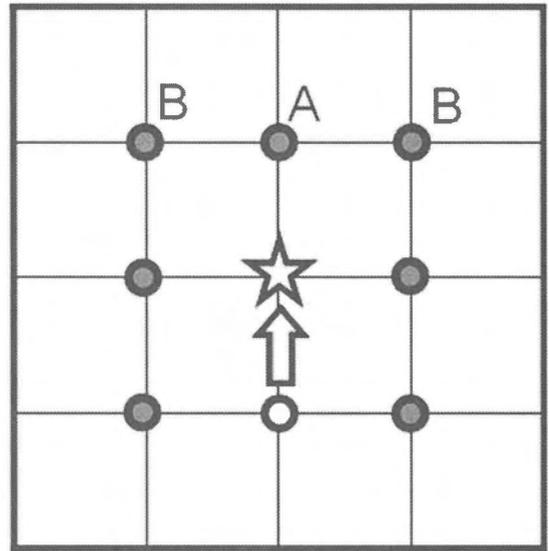
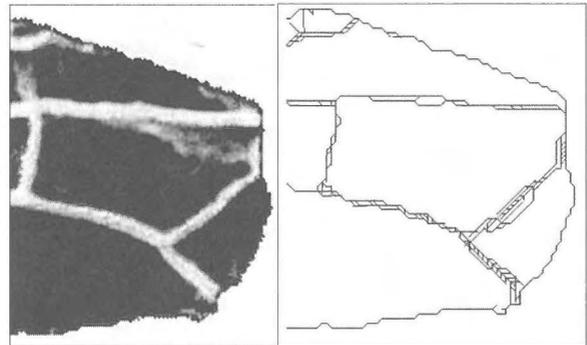


図 17. 特徴の追跡

ただし、図 18 (a) のように最大 2 面角で求めた稜線の太さが 2 点以上で構成されている場合がある。この場合、最大 2 面角について比較しても大差がなく、図 18 (b) のように蛇行してしまう問題が発生する。



(a) 最大 2 面角データ (b) ワイヤフレームモデル
図 18. 太い特徴線の追跡

この問題については進行方向に重み付けをすることで解決した。図 17 の進行方向、つまり A 点について最大 2 面角を R_1 とすると、比較に用いる値 R'_1 は重み K_1 を用いて (3) 式のように表すことができる。

$$R'_1 = K_1 R_1 \quad \dots (3)$$

同様に進行方向に 45 度付加した方向 (図 17 の B 点) についても (4) 式で表すことができる。

$$R'_2 = K_2 R_2 \quad \dots (4)$$

ただし $(1 \leq K_2 \leq K_1)$

A、B 以外の点は重みを 1 とする。解決したワイヤフレームモデルを図 19 に示す。最大 2 面角の稜線が太い

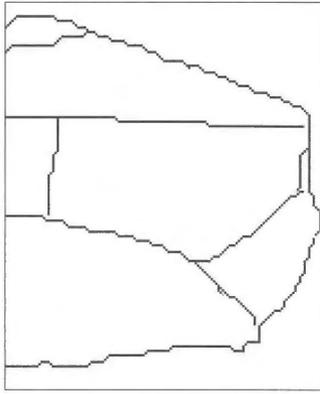


図 19. 解決済みモデル

場合でも一本の稜線で表されている。

追跡はワイヤフレームモデル上の点にたどり着くまで続けられる。またワイヤフレームモデル上の点にたどり着かず追跡中の自身の引いた線にたどり着いた場合は、稜線として選択しない。

3.4.4 特徴線を選択

すべての追跡開始候補点から追跡を完了した後で、どの稜線をワイヤフレームモデルへ追加するかを決定する。本提案手法では最も長い特徴線を追加する。これは線を引く順番に結果が依存しないようにするため、また少ない本数で稜線を表示するためである。さらに、稜線が細かな網状になることを防ぐ効果もある。

3.4節で述べた手順 [1] ~ [4] を 1 回実施すると、輪郭線と特徴稜線を 1 本作成することができる。またこのあと手順 [2] ~ [4] を繰り返すことで実測図の稜線形状に近いワイヤフレームモデルを自動的に得ることができる。手順 [2] ~ [4] の繰り返し回数はユーザが設定することができる。

3.5 後処理と実測図化

得られたワイヤフレームモデルの実用化は次のような手順を考えている。まずワイヤフレームに描かれている輪郭線と稜線をなめらかに曲線化し、曲面補間を行う。次にワイヤフレームモデルの 6 面展開を行う。そして本手法で生成されるワイヤフレームモデルは輪郭線と稜線のみであるので、リングとフィッシャーを追加し、報告書へ記載する実測図とする。これによって手書きで作成するよりも実測図作成にかかる労力が軽減できる。

4. 適応例

本提案手法を適応した例を 3 つの石器について示す。実験は重み $K_1 = 1.75$ 、重み $K_2 = 1.375$ で行った。また特徴線を引く本数は 20 本としている。これについては目視で適切な設定を行った。

ワイヤフレームモデルの評価については、実測図に

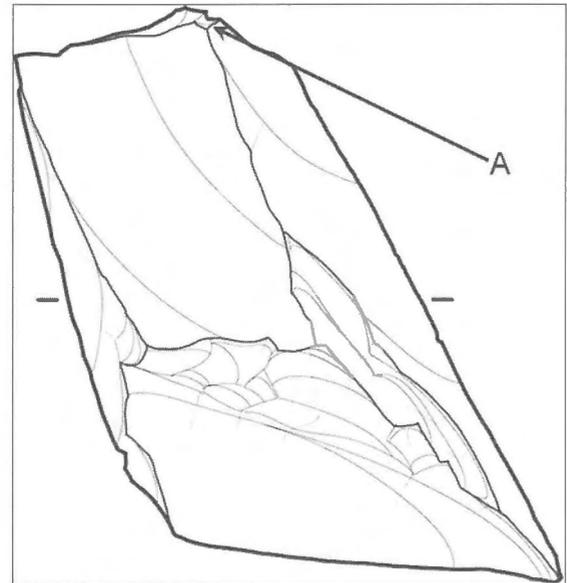


図 20. 実測図 (1)

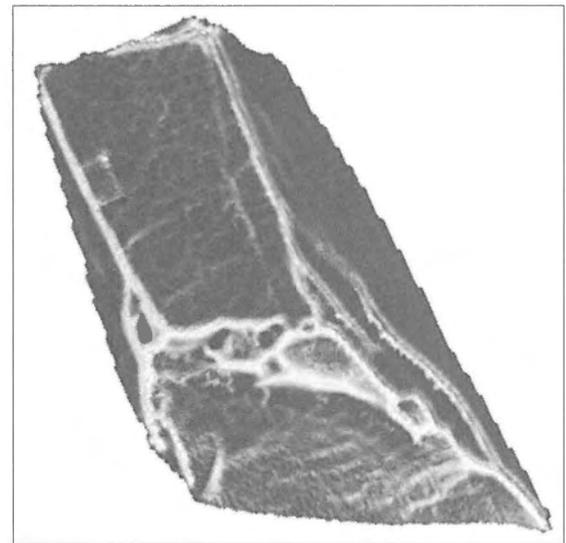


図 21. 最大 2 面角データの表示 (1)

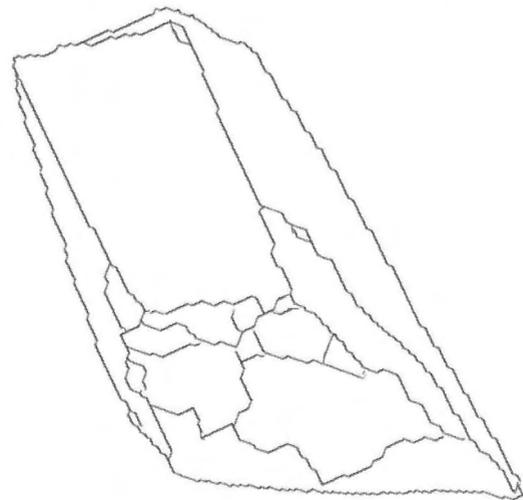


図 22. ワイヤフレームモデル (1)

描かれる稜線がすべてワイヤフレームモデルに含まれているかを評価する。その理由は今回のワイヤフレームモデルを用いて実測図を作成する場合には、まず余計な線の削除を手入力で行うことが前提であるためである。実測図に稜線を追加することよりは、削除する作業のほうが手間が少ないので線が少々多くても問題とならない。よって実測図に描かれているの稜線がワイヤフレームモデルに出ない場合が問題となる。

(1) 石器サンプル 1

図 20 に実測図、図 21 に点群より抽出した最大 2 面角データ、図 22 に本手法により作成したワイヤフレームモデルを示す。

実測図に描かれている稜線の中で、リングとフィッシャーを除く稜線について A で示した部分のみ現れていない。図 21 の最大 2 面角データでは同じ箇所に白い線が現れている。これは長さ順で 20 本の線を引くと設定したため、稜線 A が短く選択されなかったと考えられる。

また、実測図の稜線以外の部分も現れているが、これについてはユーザ入力の本数を変化させることや実測図作成の際に削除することで改善が可能である。その他

の部分では問題はなく、残るすべての稜線がワイヤフレームモデルに現れている。本手法で自動作成したワイヤフレームモデルは測定点を連結したポリラインで構成されている。よって、測定点の密度に依存するので図 22 のようにのこぎりの刃状の形状となる問題がある。この問題は今後解決する必要がある。

(2) 石器サンプル 2

図 23 に 2 つめの実測図、図 24 に点群より抽出した最大 2 面角データ、図 25 に本手法により作成したワイヤフレームモデルを示す。

この石器のワイヤフレームモデルでは実測図中 B と C で示す稜線が現れていない。C で示す稜線は図 24 では 1 本の太い稜線になってしまっている。これはこの部分の剥離が非常に細かいうえに平行に近い稜線が存在するために起こっている現象だと思われる。また B の線は、輪郭線に接続する点の最大 2 面角が低い値であったために、分岐点が追跡の開始点として選択されなかったためであると考えられる。この B 線のように、実測図で描かれなければならない稜線の 2 面角が大きくない場合がまれにある。このような場合は稜線を手書き

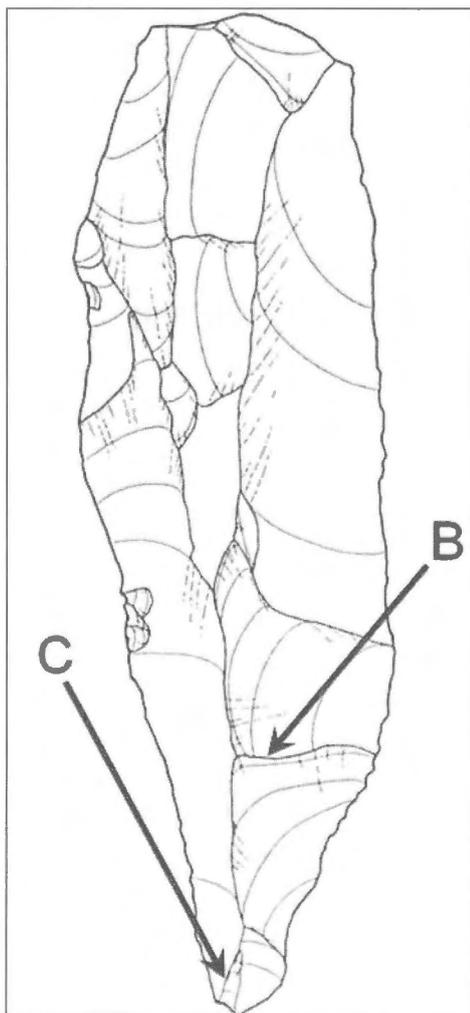


図 23. 実測図 (2)

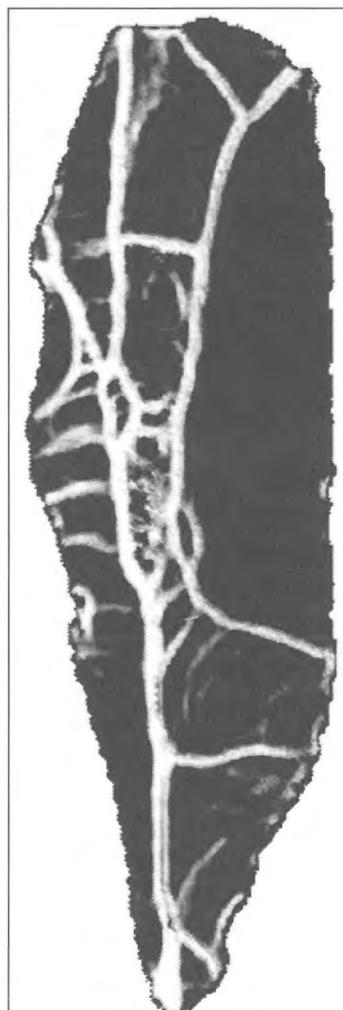


図 24. 最大 2 面角データの表示 (2)

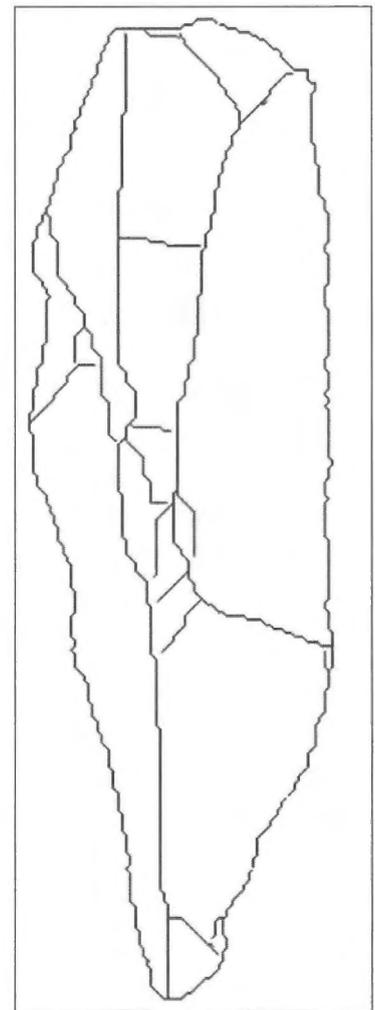


図 25. ワイヤフレームモデル (2)

で加えて修正する。この石器も問題点以外の稜線に関してはワイヤフレームモデルに特徴が現れている。

(3) 石器サンプル3

図26に2つめの実測図、図27に点群より抽出した最大2面角データ、図28に本手法により作成したワイヤフレームモデルを示す。

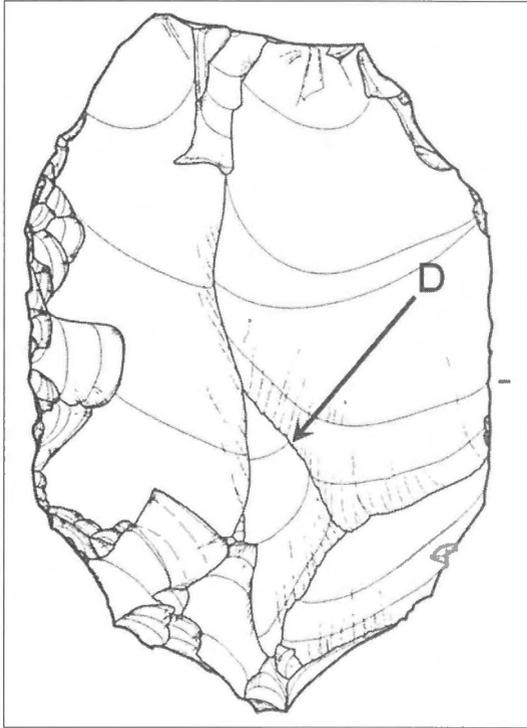


図26. 実測図(3)

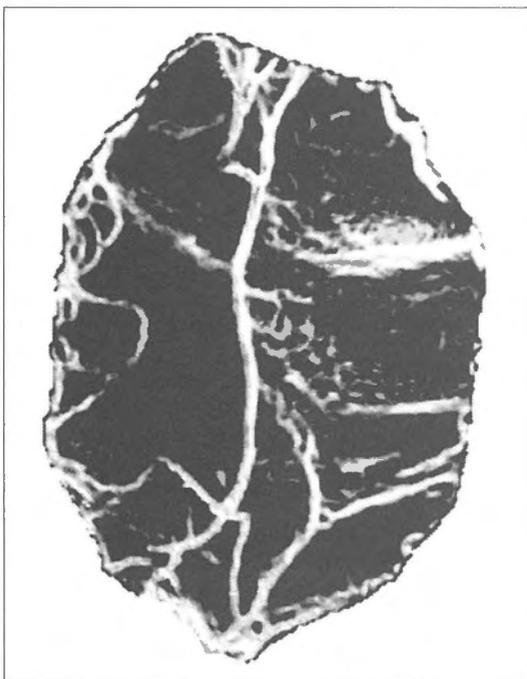


図27. 最大2面角データの表示(3)

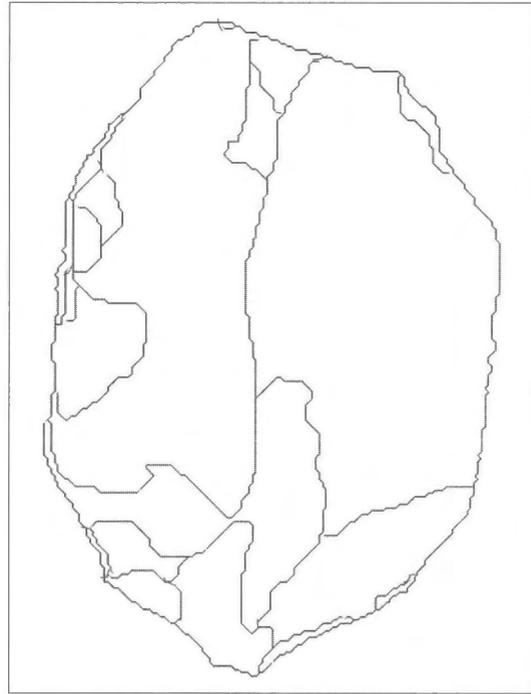


図28. ワイヤフレームモデル(3)

このワイヤフレームモデルでは実測図中Dで示す稜線が実測図と違う方向に追跡されている。これは図27の最大2面角データにおいて、実測図の方向で特徴がまだらになっているために発生したものである。石器サンプル2と同様に、剥離面によってできる2面角が必ずしも大きくない、あるいはきれいな直線ではない場所が実測図では書かれる場合がある。これについては、手書きで修正する必要がある。

この石器のワイヤフレームモデルも、実測図に描かれているほとんどの稜線が現れている。

5. まとめと今後の課題

本論文では、石器の実測図作成を支援するために、3次元形状処理技術を利用して、石器の特徴である輪郭線と稜線を取得する方法について提案した。

本手法では、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、特徴の追跡アルゴリズムを用いて3次元ワイヤフレームモデルを作成した。3種の石器に対し本手法を適用し、実測図と比較し良質な結果を得た。

今後の課題としては、2面角が最大にならないような稜線を追跡し、実測図の精度を向上することや、作成したワイヤフレームモデルの精度を上げること、またリングやフィッシャーなどの形状特徴について対応することなどがある。

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と鹿児島県金峰町教育委員会に感謝する。

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」情報考古学会第16回大会、pp.71-76

アドビシステムズ

<http://www.adobe.co.jp/>

多井堅一郎、塚本敏夫、佐藤宏介

2001「考古遺物の3次元形状計測とその紋様の画像処理に関する研究」情報考古学会第11回大会、pp.17-22

加藤晋平、鶴丸俊明

1994「石器入門辞典-先土器」柏書房、pp.189-214

倉爪亮、西野恒、佐川立昌、大石岳史、高瀬裕、池内克史

2002「The Great Buddha Project -大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化-」日本バーチャルリアリティ学会誌、Vol.7、No.1、pp.103-114
徳山喜政、今野晃市

2002「N角形を覆うようなB-spline曲面の生成方法」情報処理学会論文誌、第43巻、第10号 pp.3209-3218

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.41-58

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」情報考古学会第16回大会、pp.81-86

A 3D Character-Tracing Method for Use in Making Measured Drawings of Stone Artifacts

Koji ASANUMA, Fumito CHIBA, Kouichi KONNO

On utilizing a land consists an archeological site, the Cultural Properties Protection Law in Japan obliges to carry out an archeological excavation and to publish a research report of the archeological excavation. The research report of the archeological excavation mostly contains measured drawings of excavated relics. Since the generation process of measured drawings requires a high skill and a large amount of labor, there is a considerable discussion about the need for streamlining the process. To generate a measured drawing efficiently, we propose an automatic method to delineate a part of the measured drawing of the stone artifact by using three dimensional shape modeling techniques in which a wire frame model is generated by tracing a character lines calculated from three dimensional coordinate points derived from a range sensor. The efficient measured drawing generation can be achieved since the proposed method automatically extracts feature character lines from surface shape interpolated by the wire frame model.