

照度差ステレオ法を用いた遺物の表裏形状の計測

Measurement of the front and back form of a relic by using the Photometric Stereo Method

結城宏和*、宝珍輝尚*、都司達夫*

Hirokazu YUUKI*, Teruhisa HOCHIN*, Tatu TSUJI*

* 福井大学 工学部 情報工学科

〒910-8507 福井市文京3丁目9-1

*Department of Information Science, Faculty of Engineering, Fukui University
3-9-1, Bunkyo, Fukui-shi, Fukui 910-8507 Japan

あらまし：カメラ2台を使用して遺物の表面と裏面を同時に計測し、照度差ステレオ法で遺物破片の形状を求めた結果を報告する。

Summary : This paper describes the results of the measurements of the front and back forms of relics. Pictures of two sides of relics are taken with two cameras. The front and back forms are obtained from these pictures by using the Photometric Stereo Method.

キーワード：遺物、照度差ステレオ法、破片

Keywords: relic, photometric stereo method, broken piece

1 はじめに

一乗谷朝倉氏遺跡では、毎年多くの遺物が発掘されている。その数は約200万個にもものぼる。発掘された遺物は、完全な形で発掘されているものもあるが、多くは破片の状態で発掘されている。これらの破片をデータベース化することで、従来人手に頼っていた集計作業を自動化できることや、様々な破片から計算機を用いて新たな仮説を導出することができると考えられ、破片のデータベース化が必要となってきた。また、これらの遺物に対して形状、紋様、色、重さなどの特徴を用いて遺物の検索を行いたいという要求や、遺物の形状からもとの物体を推定したいという要求がある。しかし、微小で大量の複雑な破片の形状計測には時間と経費をかけられ

ないという制約がある。

我々は、現在、微小で大量の雑多な破片の形状計測に関する検討を行なっている。これまでに、照度差ステレオ法を用いて遺物の3次元形状の測定を球体を用いて行った[1,2]。また、現在までに、球体並びに実際の遺物として白磁の陶器の破片の形状測定を試み、計測する物体ごとに照度の強さを変化させることによって形状の計測を行なえることを明かにしてきた[2]。しかし、形状計測にあたり、破片を上方から撮影した画像のみを用いているため、裏面の形状は計測できていなかった。

ここで、金谷らは、表面と裏面を別途計測し、表面と裏面の対応点を検出することによってこれらの2面の貼り合わせを提案している[6]。しかし、この方法では、例えば円筒状の破片に対しては対応点を検出できないので適用できないという問題や、測定に手間がかかりすぎるという問題がある。また、レーザ光を用いた測定で、物体またはカメラを回転させる方法が考えられるが、これも微小で大量の破片を測定するには手間がかかりすぎる。これらの点から望ましい方法は、表面を計測した状態で裏面を計測することである。このために、アクリル板やガラス板といった透面な板に破片をのせて計測可能かについて検討を行い、これまでの実験で、照度差ステレオ法を用いた計測方法において、アクリル板を用いても計測できることを明かにしてきた[3]。

そこで、本論文では、照度差ステレオ法を用いて、破片の表面と裏面を同時に計測する方法について述べる。また、製作した計測装置を用いて破片の形状を求めた結

果を示す。

以下、2では、測定対象とする遺物について述べ、3で照度差ステレオ法について説明する。4で作成した計測装置について述べ、5で計測手順を述べ、6で本装置を用いた測定結果について述べる。最後に7でまとめを述べる。

2 対象とする遺物データ

本研究では、福井県にある越前一乗谷朝倉氏遺跡より発掘された遺物を対象とする。

発掘された遺物は約200万個あり、遺物のなかには発掘後すぐに茶碗や皿と識別され選別されるものもあるが、なかには破片の形状が小さすぎて識別することができないものもある。復元対象の遺物はこの識別できない破片である。

対象となる破片の例を図1に示す。図1は約43mm×41mm程度の小さな遺物である。

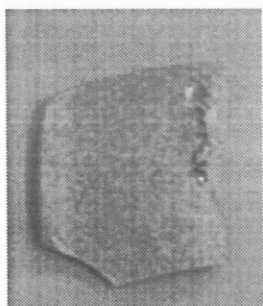


図1: 対象とする遺物

3 照度差ステレオ法について

3.1 明るさからの3次元形状の推定

一般に、物体面に照射された光エネルギーは一部吸収されるものの、大部分は反射され、これが面の明るさとして観測される。このとき、面の明るさを決定する要因として、面に照射されている光量、面の光反射特性、面の向きなどが考えられる。

図2は、一般によく知られた2種類の光反射特性であり、左が鏡面反射、右が拡散反射である。通常の物体面の光反射はこの2つの反射成分が混じりあっている。鏡面反射では、光の特定の方向にしか反射されないのを、

その方向から観測しない限り面の明るさを測定することはできない。しかし、もしその反射光が観測されたならば、観測方向と光源の向きから面の向きを推定することができる。

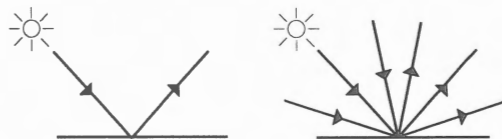


図2: 鏡面反射(左)と拡散反射(右)

完全拡散反射面の明るさは、どの方向から見ても同じ明るさとして観測される。つまり、カメラをどの方向に置いても測定した明るさは同じである。図3の右図のように面に対して低い角度から照射されている場合は、単位面積あたりの光量が少ないので暗くなる。図3の左図のように、明るさが最大となるのは、面の法線方向から照らされているときである。光源の方向と面の法線方向との角度を θ とすれば、完全拡散反射面の明るさ I_p は $\cos \theta$ に比例する。すなわち、 I を点 p での入射光量として $I_p = I \cos \theta$ となる。

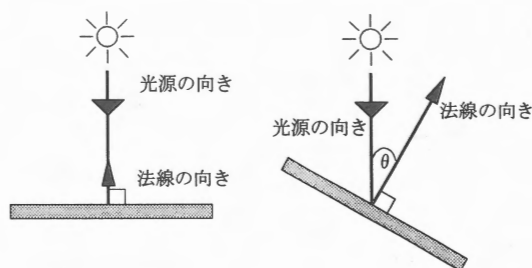


図3: 光源と平面の法線の向き

ここで、図4のようにカメラ中心の座標系を導入し、 $z = z(x, y)$ 、 x 方向の勾配を $p = \frac{\partial z}{\partial x}$ 、 y 方向の勾配を $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ とすると面の法線ベクトルは $(p, q, 1)$ で表せる。光源方向も勾配ベクトルを使って $(p_s, q_s, 1)$ と表せる。このときの $\cos \theta$ はこの2つのベクトルを使って、式(1)のように表せる。

$$\cos \theta = \frac{pp_s + qq_s + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} \quad (1)$$

すなわち、面の明るさは面の勾配 (p, q) の関数として表すことができる。 (p, q) 平面を勾配空間と呼んでいる。

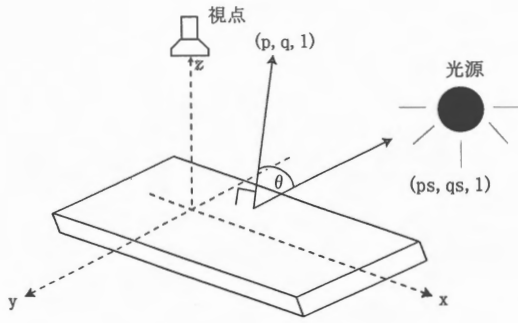


図 4: 光源と面の向き

明るさと面の向きとの関係は反射率分布図 $R(p, q)$ と呼ばれ、最大値が 1 となるように正規化する。したがって、完全拡散反射面の反射分布図は 以下のように式 (1) そのものである。

$$R(p, q) = \frac{pp_s + qq_s + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}\sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} \quad (2)$$

この反射率分布図を勾配空間上に明るさを高さとし、等高線を描くと図 5 のようになる。もし、光源がカメラの方向と一致していると $(p_s, q_s) = (0, 0)$ であり、反射率分布図は同心円を描く。

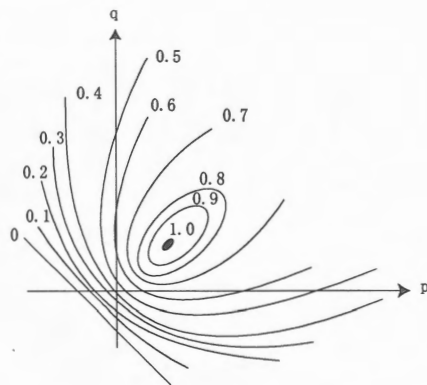


図 5: 反射率分布図

明るさが最大となるところは、面の法線方向と光源の方向が一致しているところであり、逆に一番暗い 0 となるところは勾配空間上の直線である。(式 3)

$$0 = pp_s + qq_s + 1 \quad (3)$$

この直線の外側は光が届かず反射率分布図が定義されない。これは図 6 のように求める点が物体の影になるところである。

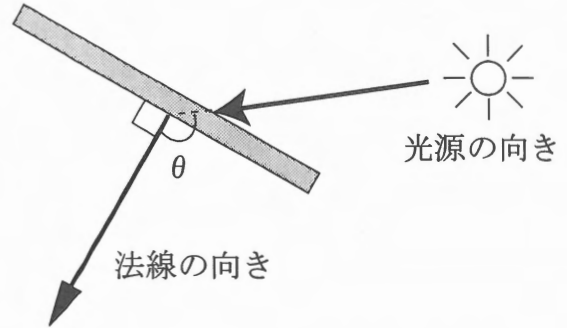


図 6: 光源と平面の向き (光があたらず)

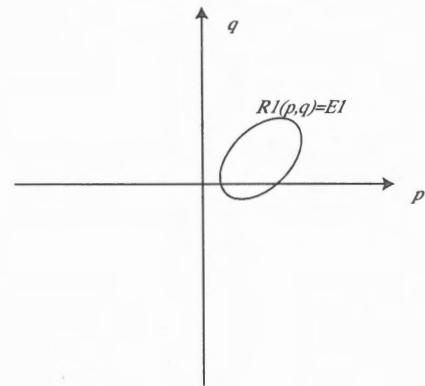


図 7: R_1 のグラフ

3.2 照度差ステレオ法

カメラと対象物体の位置は固定しておき、最初に置かれた光源下の明るさを E_1 とすると照度方程式 $R_1(p, q) = E_1(x_0, y_0)$ の解は図 7 のような楕円になる。次に光源の位置を変えて得られた照度方程式を $R_2(p, q) = E_2(x_0, y_0)$ とすると 2 つのグラフは 2 点で交わる。交わったところの (p, q) の値が求める面の傾きある。さらに光源の位置

を変えて得られた照度方程式をたてると2つの解のうちのどちらが正しいか求めることができる。(図 8)

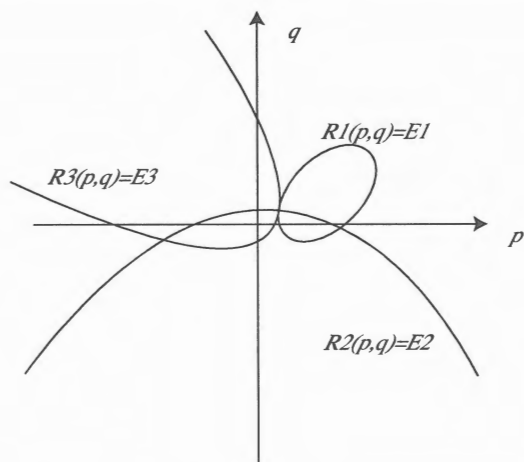


図 8: R_1 , R_2 , R_3 による面の傾きの決定

3つの光源を用いて、1つ1つの画素に対して求めた p, q の値は、X-Z 軸、Y-Z 軸の傾きであり、それを利用して Z 軸の値を求めることによって立体を表すことができる。

3.2.1 特徴

照度差ステレオ法は、物体とカメラの位置は固定し、異なる複数の光源を利用して画像を撮る方法である。したがって、カメラは一台しか使用しなくてもよく、ステレオ画像処理である両眼ステレオ法等で起こる探索点の問題が起こらない。カメラを1台しか使用しないのでコストが安いという利点もある。

しかし、照度差ステレオ法は、物体の面の勾配を求めるのに使用されるものであり、3次元形状を推定する用途には用いられないのが一般である。

4 計測装置

製作した計測装置の全体を図 9 に示す。この計測装置全体の大きさは、幅 450mm、奥行き 450mm、高さ 141.5mm である。この計測装置はフレームに木材を使用して頑強なものにし、また、外部からの環境光の侵入を防ぐために計測装置全体を暗幕で囲っている。上部からデジタルカメラを使用して撮影し、下部からは、ビデオカメラを用いて撮影するように製作されている。

計測装置内部写真を図 10 に示す。また、計測装置の内部のモデル図を図 11 に示す。

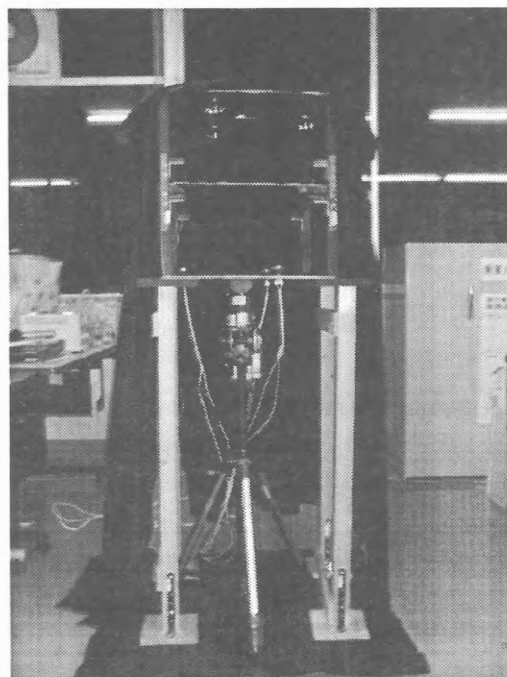


図 9: 計測装置

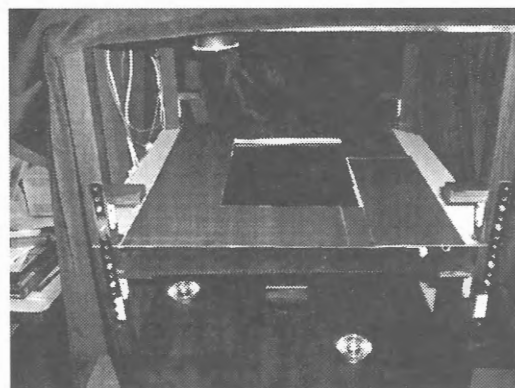


図 10: 計測装置内部

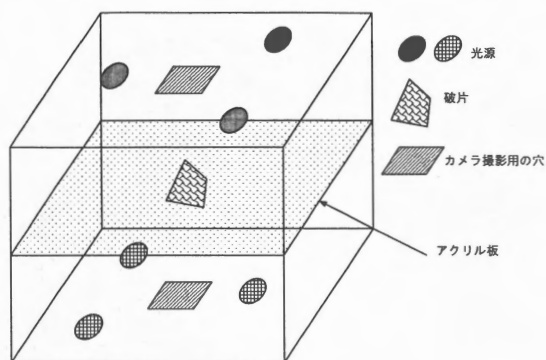


図 11: 計測装置内部のモデル図

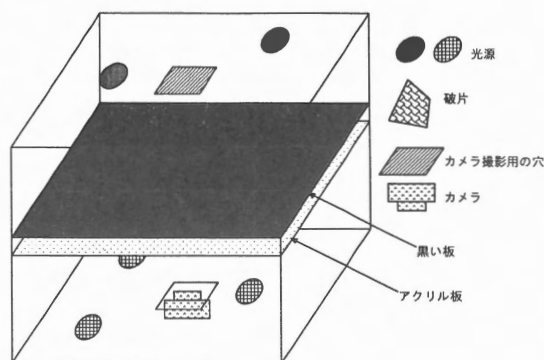


図 13: 計測図(裏)

この計測装置内部は、中央を厚さ 3 mm のアクリル板で仕切っており、このアクリル板の上に計測する遺物を置く。計測装置の上部、下部には、それぞれの光源となる電球が3つずつ設置しており、自作のスイッチでON、OFFを切替えることができる。電球の照度は、電源の電圧、電流を操作することによって変更が可能である。実際に計測を行うときには、アクリル板を通して、カメラや電球が破片と一緒に写らないようにするために、表面を計測するときは、アクリル板とビデオカメラの間に黒い板を挟んで撮影し(図 12)、裏面を計測するときは、アクリル板とデジタルカメラの間に黒い板を挟んで計測する(図 13)。なお、ビデオカメラの出力は、直接パソコンに入力されている。

これは、表面からみた物体との位置関係と裏面からみた物体の位置関係も同じである。

表 1: 計測装置の光源の角度

	光源 1	光源 2	光源 3
ϕ	60	180	300
θ	30	30	30

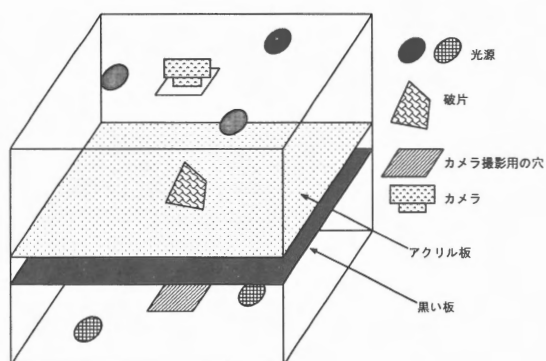


図 12: 計測図(表)

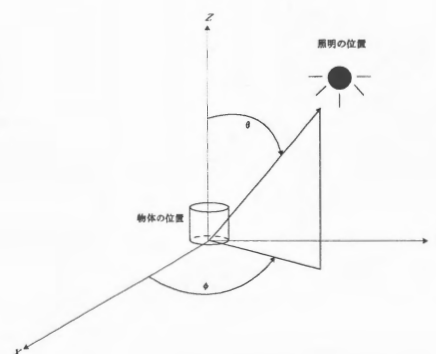


図 14: 電球とカメラのモデル図

3 光源とも破片を置く中央の位置から均等な距離と角度に位置するように固定してある。

5 計測方法

電球とカメラと物体の位置関係を図 14 に示す。光源となる電球の位置関係を示す θ と ϕ の値を、表 1 に示す。

計測を行ったときの照度は 110 ルクス。電圧は 6.5 V、電流は 2.8 A である。この照度の値は、これまでの

実験結果より、最適と思われる値である。

5.1 手順

撮影手順を以下に示す。

1. 計測対象となる遺物をアクリル板の上に置く。
2. 裏面を撮影するビデオカメラが、アクリル板を通して写らないように黒い板を挟んでおく。
3. 3つの光源それぞれについて、表面を撮影する。
4. 次に裏面を撮影する前に黒い板を挟む場所を上部のデジタルカメラが写らない場所に入れ換える。
5. 裏面を撮影する。

以上を繰り返して遺物の撮影を行う。カメラと遺物は、動かす必要がない。

6 計測

6.1 計測対象の遺物

計測に用いた遺物の表面画像と裏面画像をそれぞれ 図 15 と図 16 に示す。

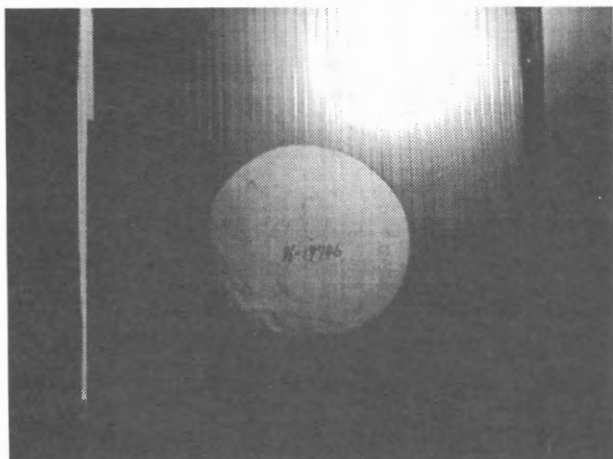


図 15: 表画像

この遺物は、縦 77 mm × 横 88 mm × 高さ 17 mm の素焼きの皿である。

6.2 計測結果

表面画像からの形状の計測結果を図 17 に示す。

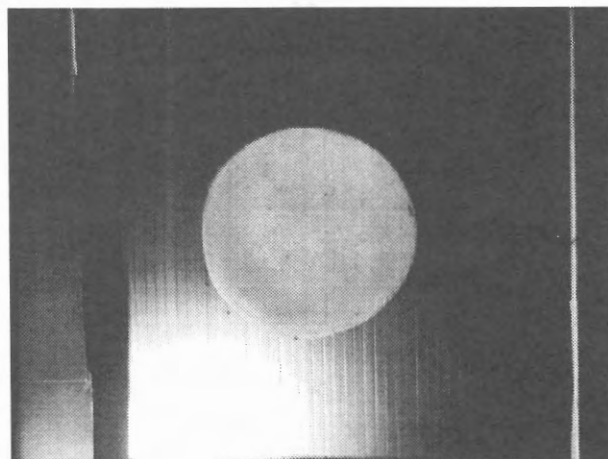


図 16: 裏画像

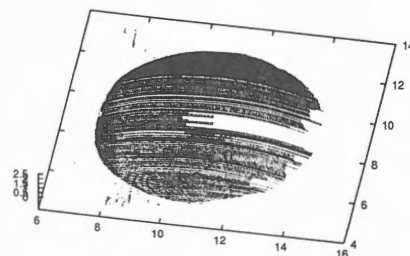


図 17: 表面計測結果

また、裏面画像からの形状の計測結果を図 18 に示す。

さらに、表面、裏面の結果を張り合わせた結果を図 19 から図 21 に示す。

図 19 は斜め上方向から見たものであり、図 20 は横方向から見たものであり、図 21 は中央で切った断面図である。図 21 の下の線が、裏面の計測から得た結果であり、上の線が表面の計測から得られた結果である。

6.3 考察

図 17 の中央の計測できない部分は、遺物番号による影響である。図 21 より、計測された素焼きは、厚さ 15 mm といえる。図 19 から図 21 より、素焼きのおおまかな形状を求めることができたといえる。

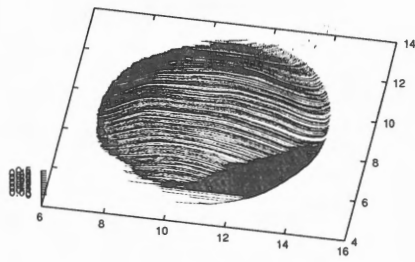


図 18: 裏面計測結果

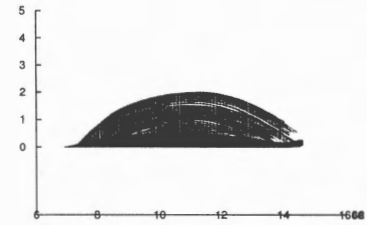


図 20: 表裏面計測結果 (側面)

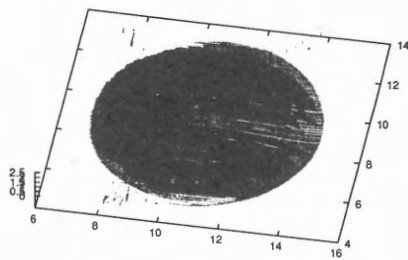


図 19: 表裏面計測結果 (上方)

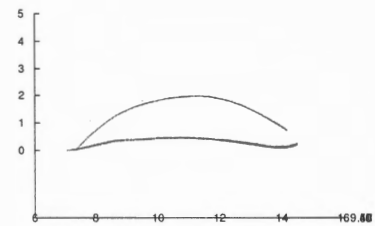


図 21: 表裏面計測結果 (断面)

計測する遺物の表面は、凹形よりも凸形の方が正確に求めることができるようである。すなわち、この例の場合裏面画像から得た形状の方が誤差が大きくなっている。

カメラと遺物は、固定してあるにもかかわらず、図 17 と図 18 結果より、同じ大きさとなっていない。これは、表面は、デジタルカメラ、裏面はビデオカメラで撮影したためにレンズの歪みや倍率の違いによって生じたものと考えられる。

7 まとめ

遺物の 3 次元形状を求めることを目的として表面、裏面同時計測可能な装置を製作した。形状計測には、照度差ステレオ法を用いている。計測の結果、おおまかな形状を求めることは可能だが、撮影に用いた 2 台のカメラ

が異なっていたため、レンズの歪みや倍率の為に、正確に表面と裏面の張り合わせができなかった。

今後は、同じカメラ 2 台を使用した表面と裏面の形状計測、ならびに、より多くの遺物破片に対しての計測と評価が課題である。

謝辞

データの収集・分類作業や考古学におけるデータ管理についての議論などでお世話になった福井県立一条谷朝倉氏遺跡資料館の水村伸行氏に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 結城宏和、寶珍輝尚、都司達夫. “照度差ステレオ法を用いた遺物の3次元形状の推定”. 日本情報考古学会第5回大会 発表要旨, pp.65-70,1998.
- [2] 結城宏和、寶珍輝尚、都司達夫. “遺物破片の計測－照度差ステレオ計測装置の製作と計測－”. 第4回公開シンポジウム 人文科学とデータベース, pp.61-70,1998.
- [3] 結城宏和、寶珍輝尚、都司達夫. “破片の裏面形状測定のための基礎検討”. じんもんこもん:-)1999 人文科学とコンピュータシンポジウム, pp.87-8,1999.
- [4] 池内克史. “反射率地図に基づき、二次元濃淡画像より三次元形状を再構成する2手法”. 電子通信学会論文誌”, 842-849(1982).
- [5] Berthold K.P.Horn and Robert W.Sjoberg.
“Calculating the reflectance map”. APPLIED OPTICS, Vol18, No11, pp.1170-1179(1979)
- [6] 金谷一朗、金本優子、陳謙、千原國宏. “遺物破片の形状計測の一手法”. 日本情報考古学会第5回大会, pp.71-6,1998.