

# 異種計測手法の統合による亀形石のデジタル保存

井村 誠孝,<sup>1</sup> 田畑 慶人,<sup>1</sup> 金谷 一郎,<sup>2</sup> 黒田 知宏,<sup>1,3</sup>  
眞鍋 佳嗣,<sup>1,3</sup> 大城 理,<sup>1,3</sup> 千原 國宏,<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

<sup>2</sup> 和歌山大学 システム工学部

<sup>3</sup> 通信・放送機構 奈良リサーチセンター

2000年1月に奈良県明日香村で発掘された亀形石は、飛鳥時代の文化を解き明かす鍵となる石造物として、考古学者の注目を集めている。本稿では異種計測手法を用いた亀形石のデジタル保存の試みについて述べる。光波測量・非接触3次元デジタル・ステレオ計測という性質の異なる複数の計測手法を用いることにより、亀形石全体の3次元形状をテクスチャと共に細部まで取得することが可能となる。

## Digital Archiving of *Kamegata-Ishi* (Turtle Shape Stone) Using Heterogeneous Measurement Method

Masataka Imura,<sup>1</sup> Yoshito Tabata,<sup>1</sup> Ichiroh Kanaya,<sup>2</sup>  
Tomohiro Kuroda,<sup>1,3</sup> Yoshitsugu Manabe,<sup>1,3</sup>  
Osamu Oshiro,<sup>1,3</sup> Kunihiro Chihara,<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

<sup>2</sup> Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

<sup>3</sup> Nara Research Center, Telecommunications Advancement Organization of Japan

*Kamegata-ishi* (Turtle Shape Stone), which was excavated on January 11, 2000, in Asuka, Nara, Japan, has been attracting archaeological attention as the key to elucidate culture of the Asuka era. This paper reports a trial of digital archive integrating heterogeneous measurement methods, which are a total station, a non-contact 3D digitizer and a stereo camera. The developed digital archive enables a reconstructed model to hold a detailed 3D shape and surface texture images of the stone.

# 1 亀形石とは

亀形石は2000年1月11日に奈良県明日香村の酒船石遺跡で発掘された石造物である[1]。表1に亀形石の諸元を、図1に外観を示す。

亀形石は、階段で囲まれ砂岩が敷かれた広場の南端に位置していた。砂岩の産地から、この遺構全体が斉明天皇(在位 A.D. 655-661)の命により飛鳥時代(A.D. 592-710)に造られたものと推測されている。同じ発掘調査で、小判状水槽や湧水施設も発見されている。

亀形石は1枚の花崗岩から彫り出されたと考えられている。顔と手足は石表面に彫刻されており、顔には鼻と口を象ったと思われる2つの穴、尾部にもさらに1つの穴が開けられている。これらの緻密な細工は、飛鳥時代の彫琢技術が非常に高かったことを示唆している。

亀形石の碗型の形状、および小判状水槽や湧水施設との位置関係から、甲羅部に水を注ぎ入れて使用された可能性が高い。遺構全体の用途としては、祭祀場、禊の場、あるいは庭園であるといった様々な見解が示されている。飛鳥時代には、多くの特異な外見を持つ石造物が数多く造られているが、それらの用途および相互関係は現在でも不明である。亀形石の発見はこの謎に新しい手掛かりを加えるものであり、飛鳥時代の文化を解明する上で重要な鍵として考古学者の注目を集めている。

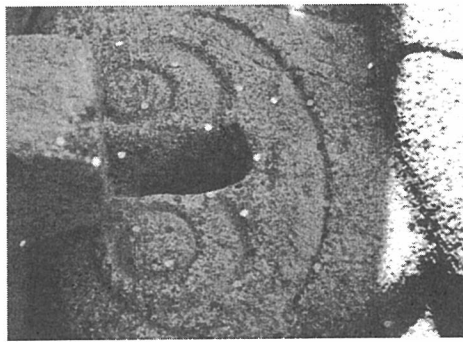
本稿では異種計測手法より得られた性質の異なる計測結果を統合することで行った亀形

表 1: 亀形石の諸元

幅	2.0m
長さ	2.4m
高さ	0.6m
甲羅の直径	1.25m
甲羅の深さ	0.2m



(a)



(b)

図 1: 亀形石の外観 (a) 全体像 (b) 頭部

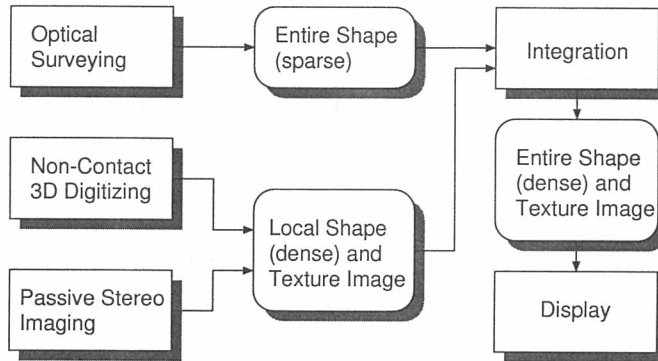


図 2: デジタル保存の手順

石のデジタル保存の試みについて述べる。

## 2 保存手法

保存の手順は大きく (1) 測定 (2) データ処理 (3) 統合 に分けられる。

### 2.1 異種計測手法

現在、多種多様な計測手法が遺跡および遺物の保存に適用されている [2-5]。ここでは、光波測量・非接触 3次元デジタイズ・35mm フィルムを用いたステレオ計測といった複数の計測手法を採用し、各手法により得られた性質の異なる計測結果を統合することで亀形石の保存を試みる。図 2 に保存の手順を示す。

トータルステーション (SET6E; SOKKIA; 図 3(a)) は time-of-flight 法によりステーションとターゲットプリズム間の距離・高度角・水平角を測定するものである。測定可能範囲が広く、対象全体の形状を同一地点からの計測で得ることができる。しかしプリズムの設置とステーションの照準を人手で行わねばならないため、多数の点を計測するには長時間を要し、高密度の形状計測を行うことは困難である。さらに、対象表面のテクスチャは全く取得不可能である。

そこで、デジタイザおよびステレオカメラを用いて、局所的に密な形状とテクスチャを取得する。非接触 3次元デジタイザ (VIVID 700; MINOLTA; 図 3(b)) は、一度に測定できる範囲は限定されるものの、密なポリゴン群で表現された局所的形状とその表面のテクスチャ画像が取得できる。またステレオカメラで取得した局所形状は、奥行き方向の正確さに欠けるものの、テクスチャ画像はより鮮明である。

局所形状のみから全体を構成する場合は、局所形状の統合時に誤差が蓄積するため再構築モデルが不正確なものになる。この欠点を解消するために、本手法では全体骨格として光波測量の計測結果を用い、その上に局所形状を配置することで、誤差の蓄積なしにテクスチャ情報を含んだ詳細なモデルを構成することを可能とする。



(a)

(b)

図 3: 測定の様子 (a) 光波測量 (b) 非接触 3次元デジタイズ

## 2.2 測定

測定は 2000 年 3 月 27 日に行われた。

### 2.2.1 マーカ貼付

計測前に、直径約 2cm のマーカを亀形石に貼付した。形状の特徴を捉えるために、角および辺には特に密にマーカを貼付した。マーカの用途は次の 2 種類である。

- ステレオ計測における左右像の対応付け
- 局所形状と全体骨格との対応付け

マーカの色は近傍のマーカの色と異なるように選択されている。これは対応付けを行う際のマーカの組の検出が容易になるようにとの配慮からである。

### 2.2.2 形状と色の取得

マーカ貼付後、3 種類の測定を並行して実施した。トータルステーションでは 135 点を測定した。測定結果は RS-232C を介してノート PC (ENDEAVOR NT-100; EPSON) に保存された。非接触 3 次元デジタイザでは 41 箇所の局所形状を測定した。形状は 200×200 の格子点の奥行き情報と、400×400 ピクセルのテクスチャ画像として記録された。ステレオカメラでは 31 組のステレオ写真が撮影され、左右の視差から各点の奥行きを求めた。

光波測量により得られる全体骨格を図 4 に、3 次元デジタイズおよびステレオ計測より得られるテクスチャを有する局所形状を図 5 にそれぞれ示す。

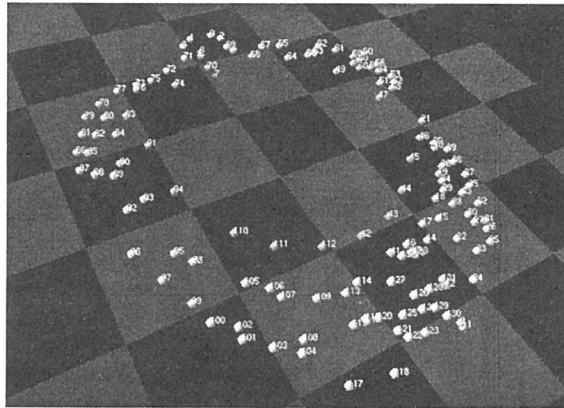


図 4: 全体形状

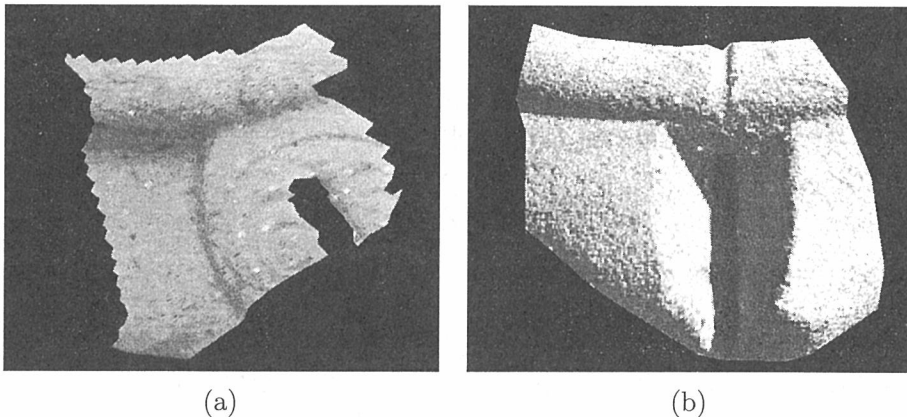


図 5: 局所形状 (a) 非接触 3 次元デジタイズ (頭部) (b) ステレオ計測 (尾部)

## 2.3 統合処理

対象物全体の詳細な形状を構成するためには、全体骨格上の適切な位置に局所形状を配置する必要がある。この統合処理は測定前に貼付されたマーカの対応を手掛かりにして行われる。

その際、局所形状の各マーカの座標を局所座標系からグローバル座標系へと変換する必要がある。変換行列をシミュレーテッドアニーリングによって求めることにより、マーカの対応関係を与えることで、対応するマーカ間のずれの和を最小にするような位置に、局所形状を自動的に配置することができる。

### 2.3.1 シミュレーティッドアニーリング

$\vec{p}_i, \vec{q}_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) を, それぞれ局所形状上のマーカ座標とそれに対応する骨格上のマーカ座標とする. 求める座標変換行列  $G$  は次式を満たさねばならない.

$$\vec{q}_i = G\vec{p}_i \quad (\text{for } i = 1, \dots, N)$$

行列  $G$  を求める詳細な手順は以下のようになる.

1. 対応するマーカの組のうち 3 組を用いて, 仮の解  $G$  を次の条件を満たすように定める.

- 変換先の点  $\vec{p}'_i \equiv G\vec{p}_i$  が  $\vec{q}_i$  ( $i = 1, 2$ ) に一致する.
- 変換先の 3 点  $\vec{p}'_1, \vec{p}'_2, \vec{p}'_3$  によって構成される面が  $\vec{q}_1, \vec{q}_2, \vec{q}_3$  によって構成される面と同一になる.

2. 微少な擾乱  $R$  を現在の  $G$  に加えることで, 解候補  $G'$  を作成する.

$$G' = RG$$

3. 解候補  $G'$  が  $G$  よりも適切であるか判断する. そのために, 変換先の点と骨格上の点とのユークリッド距離の和  $E(G)$  を求める.

$$E(G) = \sum_{i=1}^N (\vec{q}_i - \vec{p}'_i)^2$$

以下の基準により解  $G$  を更新する.

- $E(G') < E(G)$  の場合,  $G'$  をより適切な解として採用する.
- $E(G') > E(G)$  の場合, 確率  $e^{(E(G)-E(G'))/T}$  で  $G'$  を採用する.

ここで  $T$  は不適切な解であっても採用する度合を表すパラメータである.

4.  $T$  を減じつつ 2-3 を繰り返す.

## 3 結果

亀形石の再構成モデルを図 6 に示す. テクスチャの不整合が若干みられるものの, 全体の形状が忠実に再現されている.

本手法により構成されたモデルは VRML2.0 フォーマットで出力することも可能であり, 現地に足を運ばずともインターネット上で亀形石を観察することができる.<sup>1</sup>

また, 石造物の用途の解明にあたっては, 遺物がどのような状況下で使用されていたかという周辺環境の情報も重要な手掛かりとなる. 再構成されたモデルを, 全方位カメラで撮影した遺構全体の様子と共に, 奈良先端大に設置されている全周型円筒スクリーン CYLINDRA (直径 6m, 高さ 2.7m) へ投影することで, より臨場感のある仮想空間内での観察が可能となる (図 7).

<sup>1</sup><http://chihara.aist-nara.ac.jp/people/99/masata-i/research02/kameishi.wrl>

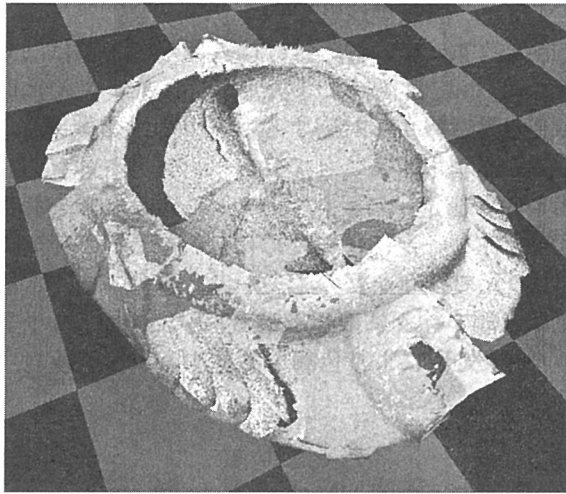


図 6: 再構成された亀形石

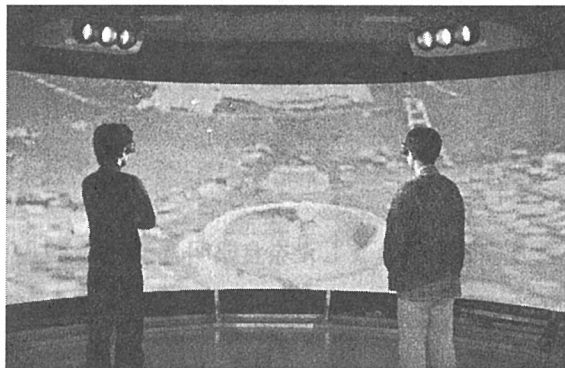


図 7: 全周型円筒スクリーンへの投影

## 4 考察

異種計測手法を用いることによって、亀形石の形状とテクスチャ画像を限られた時間で取得することができた。性質の違う計測手法の組み合わせにより、全体の形状を細部まで精度よく再現することが可能となった。

本手法では統合処理を行うまで、対象全体の局所形状がくまなく取得できなかったかわからないという欠点がある。これに対しては局所形状の取得を複数回行う、すなわちステレオカメラと非接触3次元デジタルの2種類の手法で行うことで欠落を回避した。しかし、現在の計測状況を測定中にチェックできる機構があるとより便利であると考えられる。このようなシステムの構築には近年実用化に向けての研究が盛んに行われているウェアラブルコンピュータの利用が適していると思われる [6]。

一方で、細部にはいくつかの問題が残っている。

まず、局所形状と骨格上のマーカの対応付けは人間が行わねばならない。対応するマーカの探索を自動化するためには、計測時に3次元デジタイザやステレオカメラの位置を計測しておく必要がある。位置情報から対応するマーカの探索範囲を限定し、限定された範囲内ではマーカの色の違いを利用することで、マーカの一対一対応が得られると思われる。

野外においては照明条件が測定中に変化するため、テクスチャ画像の色調を一定に保つことが困難である。照明条件を一定に保つためには、全体をドーム状の膜で覆ってから撮影する、夜間に人工照明の元で行うなどの工夫が考えられるが、現実的ではない。そこで、局所形状のつなぎめでは色調を徐々に変化させる、あるいは1枚の全体像写真からテクスチャを取得するといった、後処理により色調を調整する手法を検討中である。

## 5 まとめ

異種計測手法を用いて亀形石をデジタル的に保存することを試みた。光波測量・非接触3次元デジタイズ・ステレオ計測という性質の異なる複数の計測手法を用いることにより、亀形石全体の3次元形状をテクスチャと共に細部まで取得することが可能となった。計測結果の統合は半自動的になされるため統合にかかる手間や時間が大きく削減され、全体骨格上に局所形状を貼り付けるために統合時の誤差の蓄積を防ぐことができた。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり御協力頂きました奈良県明日香村および奈良国立文化財研究所に感謝致します。

## 参考文献

- [1] 相原嘉之: 亀形石造物と酒船石遺跡, シンポジウム “いま探る古代の庭園”, pp. 20-29 (2000).
- [2] Barceló, J. A.: Visualizing What Might Be: An Introduction to Virtual Reality Techniques in Archaeology, *Virtual Reality in Archaeology* (Barceló, J. A. et al.(eds.)), Archaeopress, Oxford, pp. 9-35 (2000).
- [3] Miyazaki, D. et al.: The Great Buddha Project: Modelling Cultural Heritage through Observation, *Proc. Intl. Conf. Virtual Systems and MultiMedia*, pp. 138-145 (2000).
- [4] Addison, A. C. and Gaiani, M.: Virtualized Architectural Heritage, *IEEE MultiMedia*, Vol. 7, No. 2, pp. 26-31 (2000).
- [5] Nagano, M. et al.: Shape Integration for 3D Reconstruction of Archaeological Sites, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 5, pp. 200-207 (1998).
- [6] 松橋英幸: 強調現実感を応用した考古遺跡計測システム, 修士論文, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 (1999).