

情報考古学

—— 光がつなぐ情報科学と考古学 ——

千原 國宏*・金谷 一郎**・佐藤 宏介**

Information Archaeology: Photo Sensing Technology in Information Science and Archaeology

Kunihiro CHIHARA*, Ichiro KANAYA** and Kosuke SATO**

Digital archive has become to play a great part in conservation and interpretation of our cultural and/or historical objects, because many of archaeological treasures are in danger of being lost or destroyed. It should be not an imaginary picture drawing by computer graphics without measurements, but a scientific 3-dimensional model with shape, color and texture. And also, virtual heritage finishes not to archive, but to appeal us for coming to the real place. A digital sensing technology for measurements of a geometrical shape and optical character of objects and a computer graphics technology for accurate reappearance of objects are important from a viewpoint of the digital archiving of relics and ruins. In this paper, applications for information-archaeology of an optical technology supporting digital archives, non-invasive sensing technology to measure 3-dimensional shape and surface texture, are described.

Key words: virtual reality, archaeology, range finder, sensing system, computer graphics

「情報考古学」という言葉は、1995年ごろより筆者らが用いはじめた、情報科学と考古学の融合領域を指す呼び名である。筆者らは、特に遺跡や遺物など歴史的文化遺産をデジタルアーカイブする研究を行っているが、1998年ころより関連研究も含め多くの研究者が参入する分野となっている。遺物・遺跡のデジタルアーカイブとは、その幾何形状や光学特性を精密に計測し、デジタル化し、コンピュータグラフィックス(CG)で再現することである。一般に、遺物、遺跡のデジタルアーカイブ化には、次のようなメリットがある。

- ① 恒久保存：遺物や遺跡などは劣化を免れないが、遺物や遺跡をひとたびデジタルアーカイブ化すると、その形状や表面特性(模様など)は永久に失われない。
- ② 普遍開示：遺物や遺跡などの実物は現地や博物館に足を運ばなければ見ることができないが、デジタルアーカイブに収録された遺物や遺跡は、インターネッ

トなどの情報ネットワークを通じて全世界に配信可能である。

- ③ 学術利用：考古学の専門家は、必要ならば、デジタルアーカイブ化された窯跡から、焼成部などの容積を容易に計算することができる。もし窯跡がデジタルアーカイブ化されていないならば、窯跡の四方を塞いで水を流し込まなければならないであろう。

一方、近年よくTV報道などで見かけるCGで描かれた現存しない遺跡の想像図などは、計測ベースではないのでデジタルアーカイブ化された遺跡とは呼ばない。従来、遺物のアーカイブといえば、実物の保存に加え、カタログ化するための写真や、学術資料としてのスケッチが一般的であった。また、非接触三次元形状計測技術を応用した遺物の幾何形状の取得が、古くから試みられている。例えば、国立民族学博物館では、1990年代より民具の三次元形状データベースを作成している。さらに、筆者らの研究グループでは、遺物表面の光学特性をデジタルアーカ

* 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 (〒630-0192 生駒市高山町 8916-5) E-mail: chihara@is.naist.jp

** 大阪大学大学院基礎工学研究科 (〒560-0043 豊中市待兼山町 1-3)

イブする例として、遺物をターンテーブルに載せて全周囲から分光計測を行い表面の分光反射特性を調べたり、プロジェクターからスリット光を投影することで計測点の三次元位置を調べ、遺物の三次元形状を同時に取得する形状・分光反射特性計測装置も試作している¹⁾。

本解説では、上記のような多彩なメリットをもっている遺物や遺跡のデジタルアーカイブの方法論、特に、対象物を傷つけずに三次元形状データが取得可能な光センシング技術の考古学分野への応用例を紹介する。

1. 遺物のセンシング技術

1.1 銅鏡

出土した銅鏡は、土などの付着物や破損がある。銅鏡に使用されている銅には、緑青やブロンズ病による錆が発生する。緑青は問題がないが、ブロンズ病になると腐食が進行し、出土後の破損の原因になる。このような腐食を防ぐために、実物の補修や保存などの作業が不可欠となるが、このような保存処理のためには、実物の三次元形状データが重要になる。また、銘文による製作年代の決定や、銅の組成を調べる化学的分析などのほかに、銅鏡の形式分類も重要な分析作業である。現在は銅鏡そのものではなく、専門家が写真・X線像などの二次資料で判別しているが、形状データがあれば容易に実施できる作業となる。

筆者らは、レンジファインダー（松下電工製レーザーセンシングセンサー L1D-150）と X-Y ステージ（Roland DG 製モデリングマシン CAMM-2）を組み合わせ、樺井大塚山古墳と一貴山銚子塚古墳から出土した銅鏡約 40 枚の三次元形状データを取得した²⁾。まず、このレンジファ

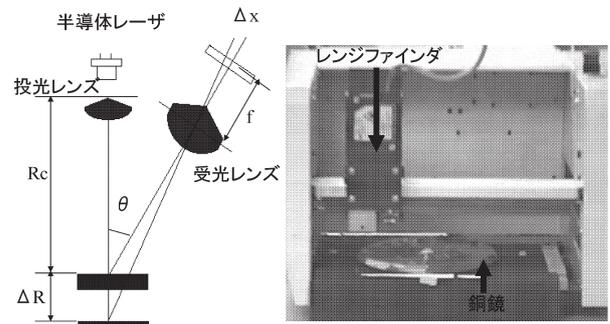


図1 走査型光学的三角測距方式の説明図。

インダーは、走査型光学的三角測距方式により対象物体から反射してくる光の位置を検出することにより、対象物体までの距離を測定し、光スキャナーが投光ビームをスキャンすることによって二次元変位を計測するタイプである。図1に示すとおり、基準位置 R_c からの変位を ΔR とすると、半導体位置検出素子 (PSD) 上での変位 ΔX は、

$$\Delta X = (a \cdot \Delta R) / (b + \Delta R)$$

$$\text{ただし、} a = f \cdot \tan \theta, \quad b = R_c / \cos 2\theta$$

で与えられる。なお、PSDの分解能は X (光ビーム走査) 方向で $15 \mu\text{m}$ 、Z (高さ) 方向で $50 \mu\text{m}$ であり、銅鏡の形状計測には十分な精度をもっている。しかし、対象物体に照射した光 (半導体レーザー波長 780 nm) が直接 PSD に反射せず別の場所に反射する二次反射や、光沢の多い物体での正反射に弱いという欠点がある。これは、本方式が拡散反射成分の一部を受光するという方式であるため、強い光を受光すると、アンプ回路が飽和状態となるか

(a) 輝度画像

(b) 距離画像

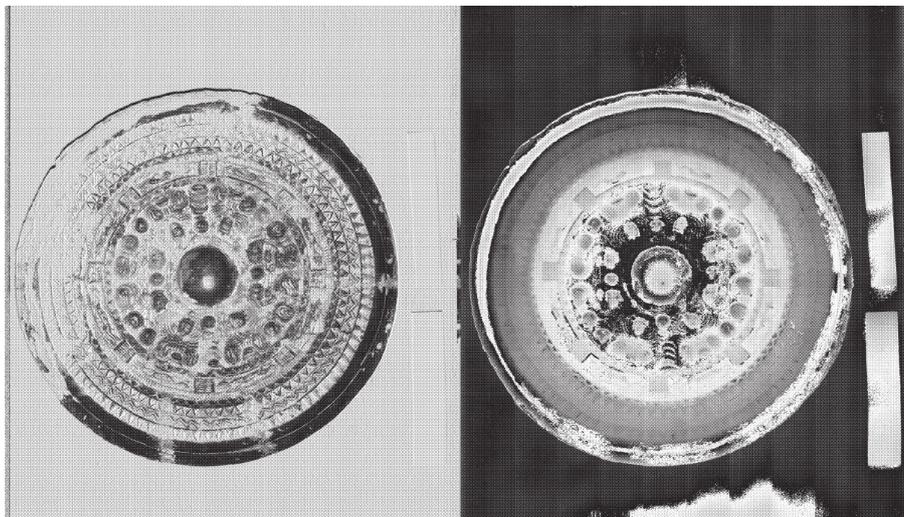
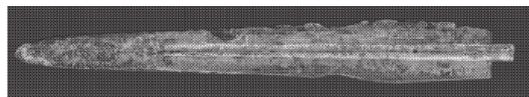
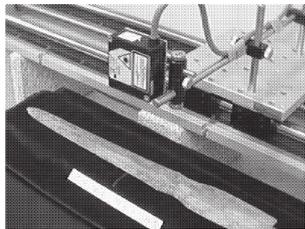


図2 距離データを図化した銅鏡の紋様面。

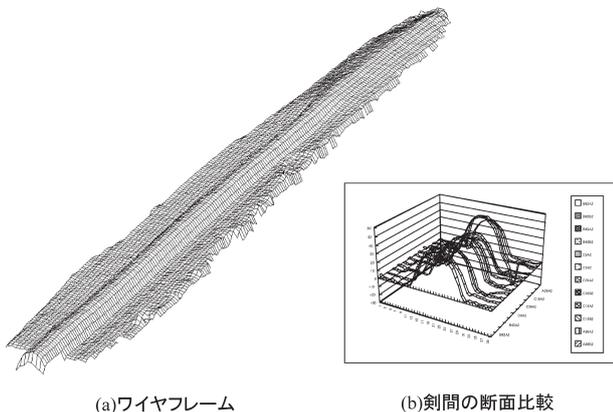


(a)荒神谷遺跡出土銅剣



(b)レーザーセンサと一次元電動移動台

図3 銅剣とレンジファインダーによる計測の様子。



(a)ワイヤフレーム

(b)剣間の断面比較

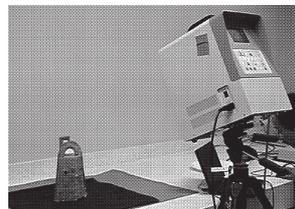
図4 銅剣の計測データ例と断面比較例。

らである。このように、レンジファインダー自体の精度は十分と考えられるが、計測範囲が15 mm×25 mm と非常に狭く、直径が約20 cm 程度の銅鏡全体を計測することは困難であることから、探針方式の厚みセンサーCAMM-2の針が設置されている先端部に、L1Dを取り付けることにより、CAMM-2のX-Yステージを銅鏡の移動台として利用した。

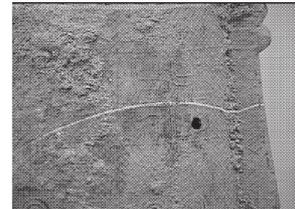
計測結果は、距離画像データとなっており、紋様や彫刻の深さなどの情報を保持していること、VRMLをはじめとして多様なファイル形式に変換可能であることなど、デジタルアーカイブに不可欠の条件を満たしている。なお、図2に、本システムで計測した銅鏡(三角縁神獣鏡)の写真(同図(a))と、距離データを図化した結果(同図(b))を示す。

1.2 銅 剣

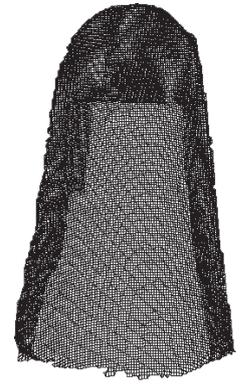
1984年に島根県の荒神谷遺跡で出土した358本の銅剣のうち200本を、前述のL1Dと一次元電動移動台を組み合わせた計測システムで、0.1 mm刻みで断面形状を計測した(図3)。本計測システムでは、銅剣のように幅が広くなく長さ方向に長大なものでも、同じ部分を含みながら



(a)銅鐔とレンジファインダ



(b)計測の様子



(c)計測結果

図5 レーザレンジファインダーによる銅鐔計測と、その計測結果例。

計測する部分を変えて数回計測する必要がある。

通常は、铸造後に刃を砥石で研ぐため、铸型が同じ銅剣かどうかを判別することは難しいが、重複したところを重ね合わせながら計測データ(図4(a))を再構成し、計測した断面形状を比較すると、図4(b)に示すように磨かれていない場所の形状が一致するものが見つかり、数本ずつ同じ铸型で製作していたことが推測できた。このように、デジタルアーカイブ化すると、日本各地に分散する専門家や研究者が出土した現地に行かなくても、情報ネットワーク経由でデータにアクセスして、多彩な観点から比較検討することが可能となり、多様な視点からの研究が進展し、「神の手」事件の再発を防止するうえで、大きな効果があると期待している。これは、もちろん、研究者としての現場経験を軽視するものではなく、ネット経由でアーカイブをのぞきみることにより、なおいっそう、現地に行ってみたくなるという好奇心を湧き上がらせることも重要である。

また、この方法を利用すると、計測データから正確なレプリカを製作することが可能で、色付けなどの作業をすれば、コンピューター内のデジタルアーカイブだけでなく、銅鏡と同じく錆やブロンズ病などの心配を除去しつつ、リアルな展示も可能となる。

1.3 銅 鐔

大量の銅鐔が出土した島根県の加茂岩倉遺跡において、1996年12月、埋まった状態から発掘し、入れ子状態の土のついた銅鐔の三次元形状計測にはじめて成功した。なお、内側の銅鐔を取り出した直後の土つき形状を計測するために、現地に持ち込んだ計測器は、レーザービームによる光切断方式を採用したレーザーレンジファインダー(ミ

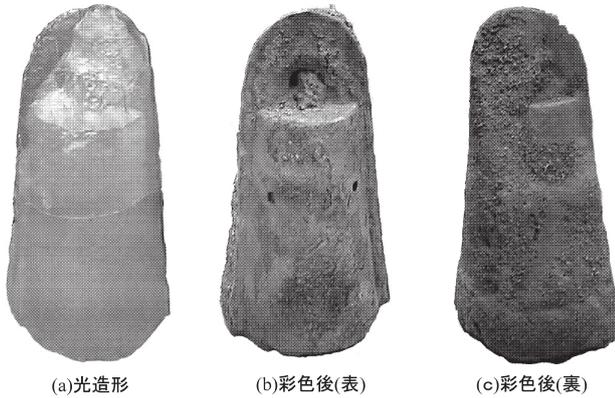


図6 銅鐸のレプリカ作製例（発掘時の再現）。

ノルタ製 VIVID700) である。本センサーは、スリット状のレーザー光で入力対象をスキャンし、その反射光を CCD カメラで受光、三角測距の原理で被写体との距離情報を得て、計測対象を三次元データ化する (図 5)。実際、① レーザー光を高精度ガルバノミラーで走査することにより、1 回のスキャンで 640×480 点の計測が可能であり、計測を高速にするために、独自の高速画像処理回路を採用し、2.5 秒 (FAST モード時は 0.3 秒) の高速化を実現、② 距離データだけでなくカラー画像データも入力可、③ 受光データを回転フィルターで分光することで、距離データと同一 CCD により 640×480 点のカラー画像データも取得可能である*1。

また、計測データを三次元形状樹脂形成装置に転送し、作製した樹脂レプリカに専門家が現物と比較しながら彩色して出土状態の銅鐸を再現した後、出土銅鐸の土を落としたきれいな表面形状を再度計測して同様の作業を実施して、多様なレプリカを作製して、劣化を心配することなく展示可能となった (図 6)。

1.4 土 器

わが国で多数出土する土器に関しては、多くの場合、小さな破片となって現れる。その土器が造られた時代の文化や技術などの研究や、土器そのものを展示するには、土器の復元作業が不可欠である。従来、こうした土器の復元作業は、発掘された破片を直接使って行われてきた。遺物の復元は、数多くの破片の無数の組み合わせの中から互いに接合しあう正しい順序を見つける作業であり、遺物の復元は高度な知識や技術をもつ専門家が行っても、試行錯誤が必要である。

問題は、本物の土器片を用いて遺物の復元を行うと、必ずその土器片に対して損傷を与えることである。筆者らは

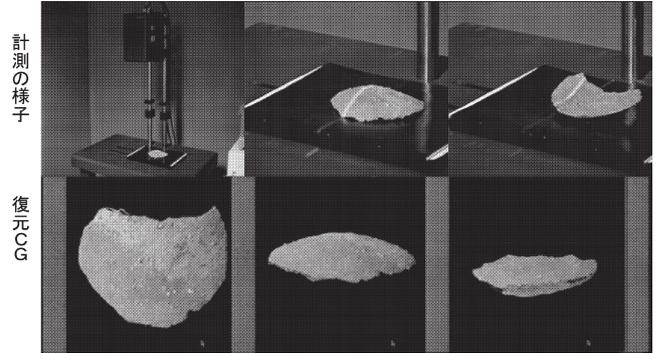


図7 弥生式土器の形状計測の様子。

この問題を解決するために、まず、図 7 上段に示すように、弥生式土器片を土器片のまま片面ずつ、レーザーレンジファインダーで非接触的に三次元形状計測し、次に、同図下段に示すように、物理的拘束条件を考慮して片面モデルを統合する。さらに、統合された破片モデルが立体ジグソーパズルのピースのように振る舞う、バーチャルリアリティ技術を応用した土器のバーチャル復元が可能なシステムを構築した^{3,4)}。このシステムは、モデル化された各土器片は重力のないバーチャル空間内で組み立て可能で、土器片の形状を考慮したバーチャルマニピュレーターを破片モデルに張り付け、複雑な遺物復元作業をコンピューター支援するものである。

また、安部らは、医療用 MRI および X 線 CT を用いた土器片の形状計測を行い、土器のバーチャル復元を可能とするシステムを構築している⁵⁾。この方法では、土器片の表面模様 (テクスチャー) は別途計測しなおさねばならないなど問題点もあるが、将来の土器のデジタルアーカイブへ向けた一歩といえるであろう。

2. 遺跡のデジタルアーカイブ

2.1 概 要

遺跡のデジタルアーカイブは、広く関心をもたれているテーマである。特にわが国では、遺跡は土地開発中に発見されることが多く、その多くは埋め戻されているためである。また、露出された遺跡は劣化を免れず、化学処理で劣化を防止する場合もあるが、遺跡の恒久的な保存は難しい。従来は、観光向け資料としての写真のほか、学術資料としての航空写真、実測図、スケッチなどが保存、閲覧可能な資料として用いられてきた。しかし、これらの資料はすべからず二次元の幾何情報しかもっておらず、遺跡の立体形状を把握するには高度な知識と経験が必要とされて

*1 <http://konicaminolta.jp/products/industrial/instrument/3d/vivid910/>



図8 亀形石遺跡の全容。

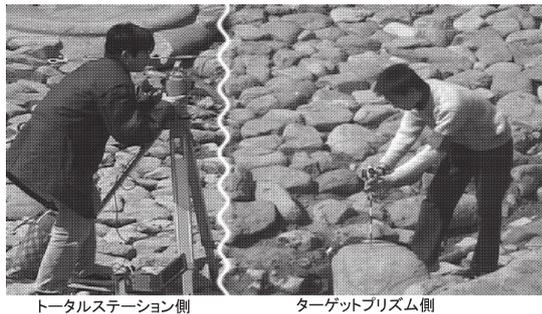


図9 トータルステーションでの計測の様子。

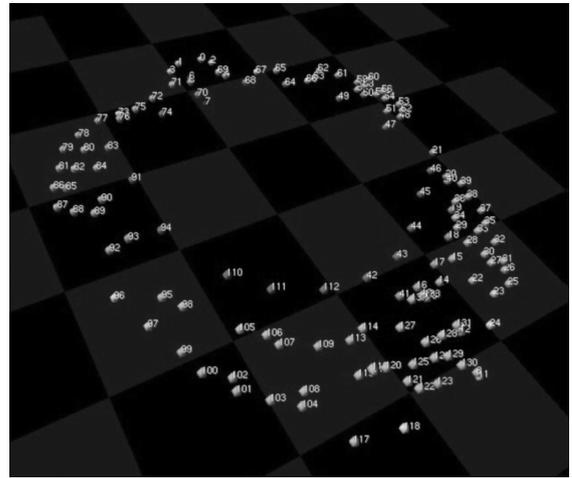


図10 亀形石の全体形状。

きた。遺跡の三次元形状をデジタル化すれば、十分なりアティーをもってユーザーに遺跡の情報を提示できるだけでなく、遺跡の立体形状の学術的利用も可能となり、また、遺跡のもつ情報を恒久的に保存することができるようになり、そのメリットは測り知れない。

図8に外観を示した亀形石は、2000年1月11日に奈良県明日香村万葉文化館の建設中に酒船石遺跡で偶然発見された、幅2.0、長さ2.4、高さ0.6m、甲羅の直径1.25m、甲羅の深さ0.2mの石造物である。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亀形石は、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、顔には鼻と口をかたどったと思われる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

あるといったさまざま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も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、この謎に新しい手がかりを加えるものであり、飛鳥時代の文化を解明するうえで重要な鍵として考古学者の注目を集めている。

ここでは、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処理で実施した、亀形石のデジタル保存の試みについて述べる。

2.2 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。筆者らは、光波測量・レーザーレンジファインダー・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た⁶⁾。

トータルステーション（SOKKIA製SET6E）は、フライト時間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・水平角を測定する光波測量計である（図9）。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ーはまったく取得不可能である。そこで、レーザーレンジファインダー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ーを取得する。レーザーレンジファインダー（VIVID700：前述）は、一度に測定できる範囲は限定されるが、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ー画像が取得できる。また、ステレオカ

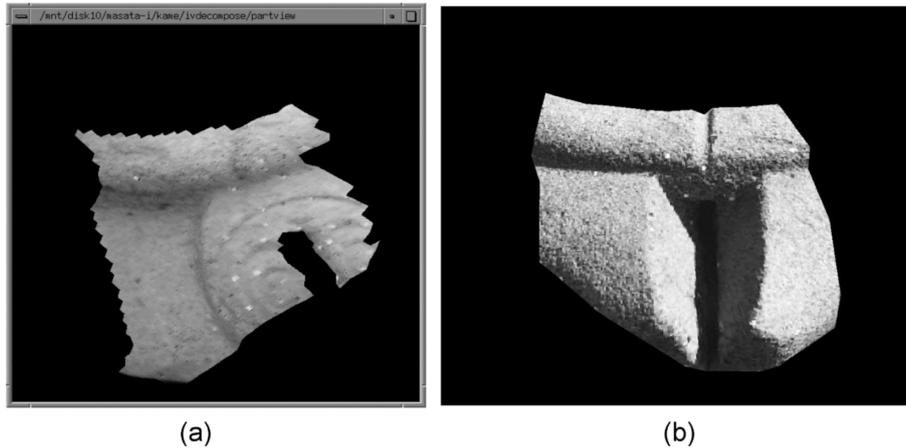


図11 亀形石の局所形状。(a) レーザレンジファインダー(頭部), (b) ステレオ計測(尾部).

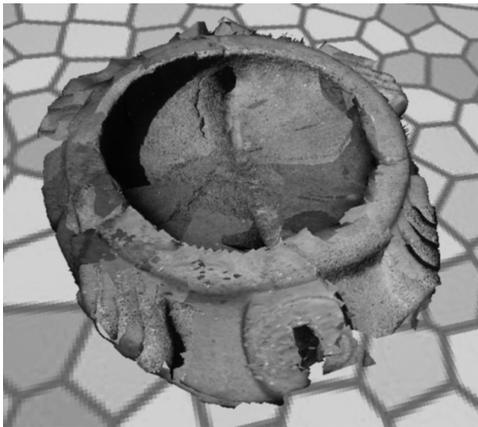


図12 WWW上の亀形石CG.



図13 没入型円筒形ディスプレイ (CYLINDRA) に描写した亀形石遺跡.

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が、テクスチャー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定の計測結果を用い、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ー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。

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、ステレオ計測における左右像の対応づけと、局所形状と全体骨格との対応づけの2種類である。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、対応づ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。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、測定結果はRS-232Cを介してノートPCに保存した。非接触レ

ーザレンジファインダーでは41箇所の局所形状を測定し、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ー画像として記録した。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10に、レーザレンジファインダーおよびステレオ計測より得られるテクスチャーを有する局所形状を図11にそれぞれ示す。

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が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。シミュレーテッドアニーリングによって求めた変換行列によりマーカの対応関係を与えて、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。

ここで、亀形石の再構成モデルを図12に示す。テクスチャー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。計測した形状データを統合しコンピューターグラフィックスで再現した亀形石には、バーチャルに水を流し込むこともできる。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^{*2}。

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がかりとなる。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ともに、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科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、より臨場感のあるバーチャル空間内での観察が可能となる（図13）。

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が、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たかどうかかわからないという欠点がある。現在は、局所形状の取得を複数回行うこと、すなわちステレオカメラとレーザーレンジファインダーの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ーの利用が適している⁷⁾。

文化財のデジタルアーカイブは、急速に普及しはじめている。遺物、遺跡などの文化財は一度失われれば二度と戻らないため、かけがえのないものであり、デジタルアーカイブの重要性はますます大きくなる。実際、筆者らのほかにも、池内らが屋外用レーザーレーダーを用い、アンコールワットや東大寺大仏など内外の多くの文化財のデジタルアーカイブ化に取り組んでいる⁸⁾。レーザーを中心とする光学式のセンシングシステムは、非接触で比較的小規模な装置で、計測対象を傷つけずに、精密で迅速な三次

元計測が可能のため、今後も、デジタルアーカイブの構築に不可欠なセンシング技術であると確信している。

また、文化財や風土はデジタルアーカイブ化の時点で完結するのではなく、それを手にしたユーザーが「次は本物を」と現地へ足をむけるものでなければならない。そのためにも、高クォリティーのデジタルアーカイブが求められており、コンピューターグラフィックスやバーチャリアリティー技術の研究の重要性は議論するまでもないことである。

銅鏡・銅剣・銅鐸は、元興寺文化財研究所保存科学センター塚本敏夫氏（当時企画室主任）との共同研究であり、同氏の協力がなければ、臨場感あふれる現場調査には参加できなかったことを記して、改めて感謝いたします。また、種々の資料提供にご協力いただいた京都大学総合博物館、(財)元興寺文化財研究所、島根県埋蔵文化財センター、加茂町、明日香村、ミノルタ(株)の関係者にお礼申し上げます。

文 献

- 1) 眞鍋佳嗣, 黒坂信一, 千原國宏: “三次元形状と表面スペクトル分布の同時計測システム”, 電子情報通信学会論文誌DII, **J84-D-II-6** (2001) 1012-1019.
- 2) 御崎 充, 佐藤宏介, 塚本敏夫, 千原國宏: “銅鏡の紋様マッチングについて”, 日本情報考古学会第6回大会予稿集(1998) pp. 8-10.
- 3) 金谷一朗, 陳 謙, 千原國宏: “VR 技術を応用した遺物復元システム”, 情報考古学, **3-1** (1998) 35-46.
- 4) I. Kanaya, Y. Kanemoto, Q. Chen and K. Chihara: “Three-dimensional modeling for virtual relic restoration,” IEEE MultiMedia, **7**, No. 2 (2000) 42-44.
- 5) 渡辺恭弘, 田中和明, 安部憲広, 瀧 寛和, 木下良正, 横田晃: “MRI による複数破片計測と仮想現実感による復元”, 電子情報通信学会論文誌DII, **J82-D-II-2** (1999) 259-267.
- 6) M. Imura, Y. Tabata, I. Kanaya, T. Kuroda, Y. Manabe, O. Oshiro and K. Chihara: “Digital archiving of Kamegata-Ishi (Turtle-shaped Stone),” Asian J. Geoinf., **2-1** (2001) 49-54.
- 7) 松橋英幸, 堅田 直, 千原國宏: “PhotoModeler による遺構の写真測量並びに図化”, 情報考古学会第6回大会予稿集(1998) p. 66.
- 8) 池内克史, 倉爪 亮, 西野 恒, 佐川立昌, 大石岳史, 高瀬裕: “The Great Buddha Project—大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化—”, 日本バーチャリアリティー学会論文誌, **7-1** (2002) 103-113.

(2005年12月16日受理)

^{*2} <http://chihara.naist.jp/people/99/masata-i/research02/kameishi.wrl>