

情報考古学

-情報科学と考古学の融合が創造する世界の収束？-

千原國宏

奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科

〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

考古学的埋蔵物の多くが逸失や破壊の危機を迎えているため、デジタルアーカイブは我々の文化的かつ歴史的なものの保存や理解に重要な役割を果たすようになってきた。デジタルアーカイブは、計測の裏づけのないコンピュータグラフィックスで描いた想像上の絵ではなく、形状や色彩またテクスチャを保有した科学的三次元モデルであるべきなのである。また、バーチャル遺跡はアーカイブ化した時点で完結するのではなく、実際の場所に呼び寄せるようにわれわれにアピールをすることで完結する。幾何学的形状や光学特性を計測するデジタル計測技術や対象物の忠実な再現するためコンピュータグラフィックス技術が、遺物や遺跡のデジタルアーカイブの見地から重要である。本解説では、デジタルアーカイブ化を支える技術、特に、三次元形状や表面テクスチャの非破壊計測技術とバーチャルリアリティ技術と考古学の融合が創造する情報考古学の世界を紹介する。

Information Archaeology

Kunihiro CHIHARA

Graduate school of Information Science, Nara Institute of Science and Technology,

8916-5, Takayama-cho, Ikoma, Nara 630-0192

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 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 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, is described.

1. はじめに

「情報考古学」という言葉は1995年頃より筆者らが用い始めた情報科学と考古学の融合が創造する収束領域を意味するが、1996年3月の情報考古学会 (<http://www.cis.doshisha.ac.jp/htsumura/JSAL/>) 設立以来、関連研究も含め多くの研究者が参入する分野として成長しつつある。

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可能である。もし窯跡がデジタルアーカイブ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。

従来、遺物のアーカイブと言えば、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イブする例として、遺物をターンテーブルに乗せて全

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⁾。

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。しかし、部分的発掘の知見から推定されたデータから全体像が復元されたCGは、情報考古学に含まれる。推定結果の無矛盾性の検証、新しく発見された知見の追加の容易さ、現実感の向上がもたらす思索の場の提供など、今後、インタラクティブな情報環境が計測機器と同様のインパクトを考古学に与えるであろうことは十分に推察できる。

本解説では、センシング技術と考古学の融合、またCG技術と考古学の融合が、新しい学問として収束する可能性をもった対象としての情報考古学の世界を紹介する。

2. センシング技術と考古学の融合

2.1 銅鏡

出土した銅鏡は、欠損や破損がある。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、銘文による制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 スキャニングセンサ LID-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、椿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。なお、 PSD の分解能は X(光ビーム走査)方向で 15 μm 、Z (高さ)方向で 50 μm であり、銅鏡の形状計測には 十分な精度を持っている。しかし、対象物体に照射 した光(半導体レーザー波長 780nm)が直接 PSD に 反射してこないで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 15mm \times 25mm と非常に狭く、直径が約 20cm 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 CAMM-2 の針が 設置されている先端部に、LID 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。

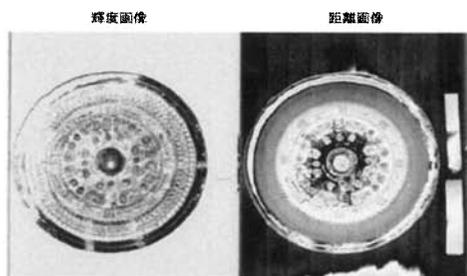


図1:距離データを図化した銅鏡の紋様面

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保持していること、VRLM 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 1 に本システムで計測した 銅鏡(三角縁神獣鏡)の写真(同図右)と距離データ を図化した結果(同図左)を示す。

2.2 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 LID と二次元電動移 動台を組み合わせた計測システムで、0.1mm 刻み で断面形状を計測した。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計測する部分を変えて数回計 測する必要がある。

通常は、鑄造後に刃を砥石で研ぐため鑄型が同じ 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2左)を再構 成し、計測した断面形状を比較すると、図2右に示 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、数本ずつ同じ鑄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

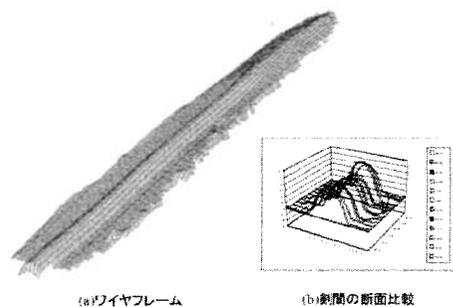


図2:銅剣の計測データ例と断面比較例

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上で、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覗きみることにより、なお一層、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。

2.3 銅鐸

大量の銅鐸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鐸の三次元形状計測に始めて成功した。なお、内側の銅鐸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(ミノルタ製 VIVID 700)である。本センサは、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3)。

また、計測データを三次元形状樹脂形成装置に転送し、作成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成して、劣化を心配することなく展示可能となった。

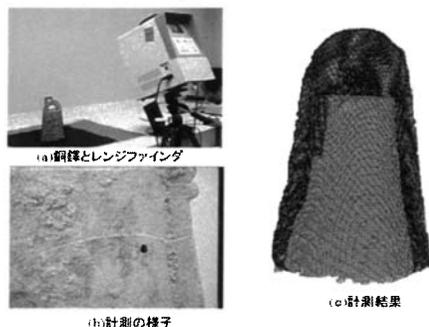


図3: VIVID700 による銅鐸計測と、その計測結果例

2.4 土器

我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われる。その土器が作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合せの中から互いに接合しあう正しい順序を見付ける作業であり、遺物の復元は高度な知識や技術を持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。筆者らはこの問題を解決するために、まず、図4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、つぎに、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舞う、バーチャ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⁴⁵⁾。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支

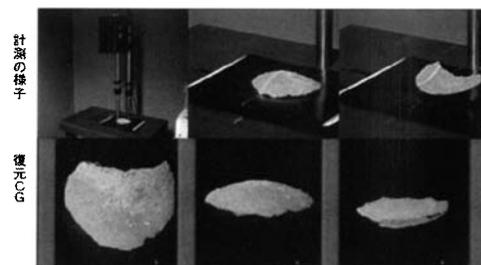


図4: 弥生式土器の形状計測の様子

援するものである。また、阿部らは医療用 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⁶⁾。この方法では土器片の表面模様(テクスチャ)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言えるであろう。

3. CG 技術と考古学

3.1 概要

遺跡のデジタルアーカイブは広く関心を持たれているテーマである。特に我が国では、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他に、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 2 次元の幾何情報しか持っておらず、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きた。遺跡の三次元形状をデジタル化すれば、十分なリアリティを持ってユーザ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、遺跡の持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。

3.2 新亀形石

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船給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。

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⁷⁾。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。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、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を取得する。レーザーレンジファインダー(VIVID 700: 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が、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。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付けと、局所形状と全体骨格との対応付けの 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。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。非接触レーザー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画像として記録した。

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。シミュレーテッドアニメ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。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⁹⁾。

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

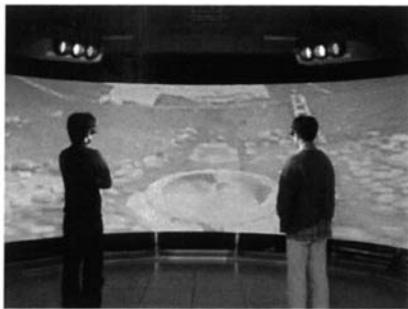


図5: CYLINDRA に描写した新亀形石遺跡

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である(図5)。

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の利用が適している⁹⁾。

3.3 平城京

平成10年10月から平成14年3月まで、通信放送機構(旧 TAO)の直轄研究として、NAIST と日立製作所・NTT の共同研究で、バーチャル空間の構築・提示・通信技術の研究を実施し、そのコンテンツとして「平城京復元プロジェクト」を立ち上げた。南北約4.5km、東西約5.5kmという広域エリアのウォークスルーCGを実現するため、基盤の目の構造をした平城京の特徴を活かし、東西南北の大路とそれに囲まれた坪や町と呼ばれる居住区域と、居住区域の中を

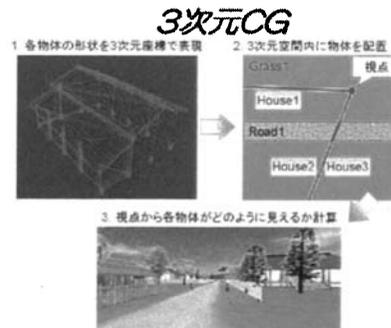


図6:ウォークスルー平城京の3DCGの生成

分ける小路とに分け、建物の分布データを歴史家が形状モデルをアーティストが、それぞれ分担して作成して、必要な視点からの街並みを生成している(図6)。また、興福寺と薬師寺はより詳細に復元し、当時の状況が体験できるようになっている。

平城京ウォークスルー内の建造物

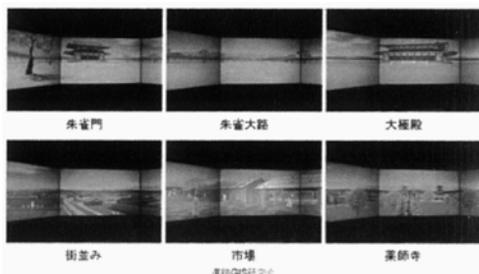


図7:生成した建物群

平城京ウォークスルー内の建造物

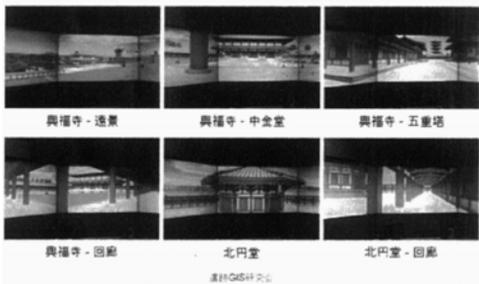


図8:続き



図9:今は失われた興福寺南側からの景観

4. まとめ

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¹⁰⁾。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なセンシングシステムは、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、部分的発掘データによる広域復元 CG は、全てが計測データではないが、インタラクティブな情報環境の開発と提供は、新たな発掘による知見の反映を容易にするだけでなく、推定プロセスにの知能化に有用であり知識の進化に役立つと考えている。

さらに、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、高クオリティのデジタルアーカイブが求められており、コンピュータグラフィックスやバーチャルリアリティ技術の研究の重要性は議論するまでもないことである。

謝辞:銅鏡・銅剣・銅鐸は、元興寺文化財研究所保存科学センタ塚本敏夫氏(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、臨場感溢れる現場調査には参加できなかった。また、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、島根県埋蔵文化財センタ、加茂町、明日香村、ミノルタ(株)には種々の資料提供にご協力いただいた。さらに、平城京CGの作成に関しては、

奈良文化財研究所, 日立製作所, 旧 TAO のご支援を得た。ここに改めて感謝申し上げます。

参考文献

- 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) 8-10.
- 3)
<http://konicaminolta.jp/products/industrial/instrument/3d/vivid910/>
- 4) 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.
- 5) Ichiroh Kanaya, Yuko Kanemoto, Qian Chen, and Kunihiro Chihara:“Three-Dimensional Modeling for Virtual Relic Restoration”,IEEE MULTIMEDIA, 7-2 (2000) 42-44.
- 6) 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.
- 7) Masataka Imura, Yoshito Tabata, Ichiroh Kanaya, Tomohiro Kuroda, Yoshitsugu Manabe, Osamu Oshiro, and Kunihiro Chihara:“Digital Archiving of Kamegata-Ishi (Turtle-shaped Stone)”,Asian Journal of GEOINFORMATICS, 2-1 (2001) 49-54.
- 8)
<http://chihara.aist-nara.ac.jp/people/99/masata-i/research02/kameishi.wrl>
- 9) 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) 66.
- 10) 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—”,日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 7-1 (2002) 103-113.