



小特集

文化財と映像技術

文化財のデジタル化が文化財自体の保護・保存や修復について非常に有効な手段であることは明らかになって来ています。このような文化財のデジタル化に関する最新技術が一般へ認知されるのと並行して、得られたデジタルデータの更なる利活用事例が数多く見られるようになりました。特に近年の傾向として、最新のデジタル技術を専門家のみが使うのではなく、一般にも用途を広げていく方向性が顕著になっています。

本小特集では文化財デジタルデータの利活用面についても高く認知されている5グループの方々にご寄稿をいただき、最新の事例についてご紹介いただきます。

東京大学池内氏のグループからはヨーロッパ（ポンペイ）での計測事例やそのVR応用システムについてのご紹介をいただき、(株)凸版印刷の中山・山崎氏からは文化財の3次元デジタル化やその事業化に対する事例をご寄稿いただきます。九州国立博物館の輪田・鳥越・今津氏からは国立博物館としての立場から同博物館におけるデジタルデータを使った新たな文化財の展示方法についてご紹介をいただき、京都大学の井手氏からは氏らの開発された高精度画像計測システムの文化財データをデジタルミュージアム利用に展開された事例について解説いただきます。最後に東京大学の廣瀬氏から、展示物の複合的な見せ方を支援する「複合現実型デジタルミュージアム」プロジェクトについて解説をいただきました。

なお、本小特集は、相澤清晴前編集長の下、越後富夫・佐藤宏介両編集幹事と私が主に担当いたしました。

編集幹事 中澤篤志



1.文化財の3次元モデリングとその利活用

～ソマ・ポンペイ遺跡での活動を通して～

小野 晋太郎[†], 川上 玲[†], 大石 岳史^{††}, (正会員)池内 克史^{††}

キーワード 仮想修復, テクスチャ, 分光反射率, 全方位画像, 複合現実感

1. ま え が き

計測技術やソフトウェアの進化により、実物体の3次元デジタルデータが手軽に利用できるようになってきた。筆者らはこれまでも、奈良、鎌倉大仏や世界遺産・バイヨン寺院のデジタル保存プロジェクト¹⁾²⁾などを通じてモデリング技術を開発するほか、3次元モデルならではの利活用や、建築、歴史、考古学などの問題を視覚情報工学の立場から考察するなどの取組みを行ってきた^{3)~5)}。

本稿では、東京大学ソマヴェスヴィアーナ発掘調査隊(団長:青柳正規国立西洋美術館館長)が行っている発掘現場や関連遺跡における事例を紹介し、これを通じて計測の際の問題点やそこで得られたデータの利活用法について述べる。対象の遺跡は、ポンペイとソマ・ヴェズヴィアーナで、いずれも紀元79年、472年のヴェズヴィオ山噴火により火山灰や土石流に埋もれた遺跡である。ソマ遺跡では青柳らによる発掘調査の結果、邸宅や像などが出土しており、神域の一部とも推察されている。ポンペイ遺跡は世界遺産にも登録され、観光地として整備されている。筆者らは、2003年より延べ2ヵ月ほど現場へ赴き、計測調査を行った。

一般にアーカイブデータは幾何形状に関するものと光学情報に関するものに分類できる。2章では幾何形状モデリングとその応用事例、3章では光学モデリングとその応用事例を述べる。さらに、得られたデジタルデータをどのように展示するかといった点に関して4章で述べることにする。

2. 幾何モデリングとその利活用

2.1 幾何モデリングの手法

遺跡などのデジタルアーカイビングは、形を計測する幾何モデリングと、色や艶といった光学情報のモデリングに大別できる。ここでは幾何モデリングについて述べる。幾何モデリングは大きく、下記の三つの処理からなる。

(1) データ取得

通常の計測ではカメラを用いてカラー画像を取得し、レンジセンサと呼ばれる測定装置を用いて距離画像を取得する。カラー画像では各点にその点の色情報が保存されているのに対し、距離画像では対応する点までの距離が蓄積されている。

距離画像を得るレンジセンサは、さまざまなタイプのものが考案されている。一番理解しやすいのは飛行時間測定型と呼ばれるタイプである。レーザー光を対象に投影し、帰って来るまでの時間を測定することでその点までの距離を測定する。レーザー光の方向を変えることで距離画像中の各場所での距離を測定していく。飛行時間型のほかに周波数変調型や三角測量型もあるが、いずれを用いるにしても、距離情報の2次元配列として距離画像が得られることには違いない。Cyrax/HDS (Leica Geosystems), Z+F Imager (Zoller+Fröhlich), VIVID (コニカミノルタセンシング)といった市販のセンサが広く使用されている。

これらの市販センサに加え、筆者らは、広域のデータを移動しながら測定できるセンサも開発した。特にローマ時代の市街地であったポンペイ遺跡は60ha以上にも及び、効率的な計測は一つの課題である。そこで、文献6)で開発した浮遊型センサ(FLRS)を改造し、人手により持ち運んで形状を計測するシステムを開発した。FLRSにはカメラとレンジセンサが設置され、動画像処理から得たセンサの動きをもとにレンジセンサの計測結果(密)から歪みを補正すると、動画像処理から得た形状(疎)に一致するという拘束によって正しい形状を推定する。FLRSによる計測結果を図1(a)に示す。固定設置センサの計測結果と重ねてもほぼ同一形状に復元されている。

(2) 距離画像の位置合わせ

レンジセンサはレーザー光が当たる領域しか計測することができない。カメラも同様に可視領域のみである。そのため得られるカラー画像や距離画像は対象の一部の情報である。全体の情報を得るためには、異なる位置、方向から計測を複数回行ってカバーすることが必要である。この際、レンジセンサによって得られた複数の部分形状は、計測した際のセンサの位置と姿勢に依存してそれぞれ異なった座標系で記述されている。そのため、これらの座標系を統一

[†] 東京大学 生産技術研究所

^{††} 東京大学 大学院情報学環

"3D Modeling of Cultural Heritage Objects; Activities in Somma and Pompei" by Shintaro Ono, Rei Kawakami (Institute of Industrial Science, the University of Tokyo), Takeshi Oishi and Katsushi Ikeuchi (Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

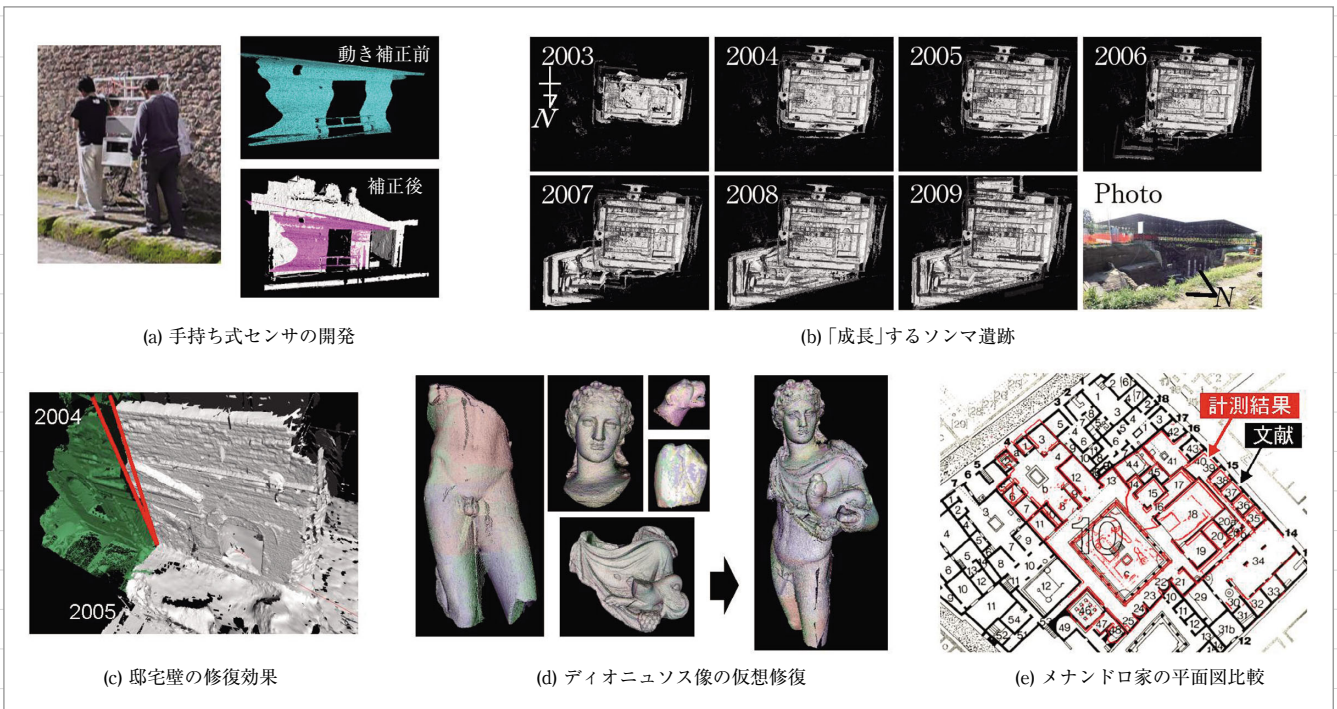


図1 幾何モデリングとその利活用

する位置合わせ処理が必要である。

位置合わせ処理は一般に、二つの距離画像に含まれる頂点間で対応点を探索し、対応点間距離が最小となるような相対位置姿勢を求める。ただ、多くのデータからなるソンマ遺跡などの距離画像を順次位置合わせしていくと誤差が蓄積し、局所的に大きな誤差が生じてしまう。これを避けるため、すべての部分形状の相対位置を同時に推定する並列同時位置合わせ手法を開発した⁷⁾。

(3) 統合

位置合わせされた距離画像群は統合され、一つの全体モデルを生成する。処理手法としては、複数の距離画像を一つの空間内に投影し、空間中の各位置での面の存在確率を表現する陰関数表現を得、最大確率をもつ部分を繋いでいく。この手法でも、大規模データを扱う際には使用するメモリー量が大きくなるため、表現を階層的にしたり、計算を並列化した統合手法を開発した⁸⁾。これをPCクラスタ上で実行することにより、メモリー使用量と計算時間の両方の問題を同時に解決した。

2.2 幾何モデルの利活用

(1) 成長する遺跡

ソンマ遺跡は2009年現在も発掘が進んでおり、毎年新たな構造を現す「成長する遺跡」である。50m×40m×10mの現場において、この過程を手手で記録することは容易でない。これまで発掘途中の記録は写真で残されることが多かったが、今回発掘の最初から調査団に加わることで「成長する遺跡」の3次元形状モデルを得ることができた。図1 (b)は、遺跡全体の形状を年毎にレンジセンサで計測したものである。各年とも1～2日ほどで5mm精度の3次元モデルを構築することが可能である。

さらに図1 (c)は、発掘の途中で崩壊を防ぐため、角度を

変更して修復された邸宅の壁を3次元データで表示したものである。10°程度の角度変化が起こったことが判る。このデータから発掘時の状況が記録できる。

(2) 仮想修復

ソンマ遺跡では、2003、2004年にギリシア神話の神・ディオニュソスの石像が複数に壊れた状態で発掘された。これらを3次元モデル化すれば、位置合わせ処理により計算機上で像を接合し、断面を傷つけることなく仮想的に修復することができる(図1 (d))。さらには、前述の形状計測で得た邸宅のCGモデルに修復した像を仮想設置して、当時の見え方を再現することも可能である。

(3) 平面図作成

ポンペイ遺跡では、メナンドロの家(Casa del Menandro)、秘儀荘(Villa dei Misteri)、王宮(Villa Imperiale)、および周辺街路等のモデリングを行った。

当時の代表的建造物として知られるメナンドロの家では、3次元モデルを利用して水平断面図を自動的に作成した。水平面は、計測時にレンジセンサを設置した各箇所水準器により概ねの鉛直を出しておき、各データを位置合わせした後に最尤推定を施すことで自動決定することができる。得られた平面図を図1 (e)に示す。人手により計測された図面⁹⁾とスケールを揃えて比較すると、全体的にはほぼ一致、右上部では図面の方がやや広がった。厳密な考察には更なる検証が必要だが、原因の候補として、当該箇所にはちょうど地面に傾斜がついており、人手による図面が厳密な水平面を表していない可能性が考えられる。

3. 光学モデリングとその利活用

3.1 色彩テクスチャリング

光学モデリングとは、対象のテクスチャスペクトルを

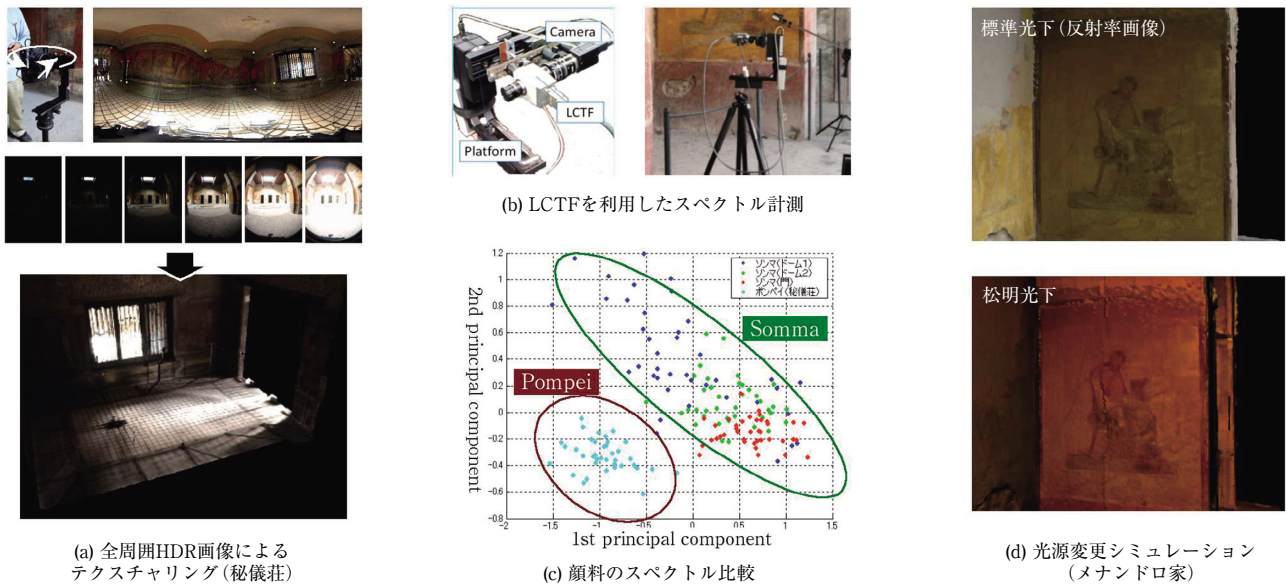


図2 光学モデリングとその活用

正確に取得することを意味する。そのうち、主に形状モデルの上にカラー画像を貼り合わせる処理をテクスチャリングと呼ぶ。単純には、カラー画像と幾何モデルとの間で対応点を探し、これに基づいてカメラと幾何モデルの位置関係を決定する。

この際、特に屋内の場合は、特有の難しさとして、①テクスチャの必要な方向(立体角)が非常に大きくなる、②対象までの距離が取りづらく、一枚の中に十分な特徴点を得られない、③複数のテクスチャ間で不整合を生じやすい、などが挙げられる。ポンペイの小部屋状空間などではこの傾向が強い。

そこで、テクスチャとして全方位画像を撮影し、これと3次元モデルの間で対応点を指定して貼り合わせる手法を導入した。全方位画像の取得には、必要な解像度に応じて回転パノラマ雲台や魚眼レンズなどを用いる。これによれば上記の問題点を一度に解決できるうえ、撮影の作業性が向上するため、多段階露出を設定してハイダイナミックレンジ(HDR)テクスチャを得ることも容易に可能となる。この手法を用いてポンペイ遺跡の秘儀荘の幾何データの上にテクスチャリングした結果を図2(a)に示す。

3.2 スペクトル解析

一般に、観測される光は多くの波長で構成されている。対象物を単にカメラで撮影した場合、この連続波長のうち、そのカメラに特有のRGBの各フィルタを通した信号が記録されているに過ぎない。正確な記録のためには、連続スペクトルを測定する必要がある。

スペクトルの計測には一点照準型の分光放射輝度計がよく知られている。これは光源光の計測には最適だが、広いシーンを計測することは現実的でない。そこで、液晶チューナブルフィルタ(LCTF)を用いたスペクトル計測システムを導入した(図2(b))。LCTFは透過する光の波長を電子

的に制御できるフィルタで、これをモノクロカメラに装着し、透過波長を段階的に変えながら撮影することでスペクトルが計測できる。

LCTFシステムを利用すると、壁全面からの反射光のスペクトル分布が得られる。同時に光源光のスペクトルを計測し、両者の比をとると、その壁の表面に備わる固有属性である分光反射率が得られる。この分光反射率を利用すると、例えば任意の光源下で、この壁の見えのシミュレーションができる。図2(d)は、松明光のもとで見たメナンドロ家の壁画を仮想的に再現したものである。現在は、夜間はポンペイには入場できないが、例えばローマ時代、メナンドロ家に晩餐に招かれた客は、この図のような光景を目にしたことであろう。

一方、南イタリアの遺跡の特質として、ポンペイレッドと呼ばれる赤い顔料が多様されていることが知られている。ポンペイの秘儀荘は、壁全面にこの赤が使用されていることで有名である。ソマ遺跡のドーム部などにも赤い顔料が認められる。そこで筆者らは、その両者のスペクトルを測定した。もともとのスペクトルは80次元のため、主成分分析により次元を圧縮したものが図2(c)である。明らかに、ポンペイの赤とソマの赤ではスペクトルの傾向が異なっていることが判る。この差が顔料の違いを意味するのか、あるいは時代の違いを意味するのかに関しては、更なる詳細な研究を待たなければならない。

4. 提示技術

計測・モデリング技術のみならず、豊かな臨場感とともに遺跡を体感するための試みも行っている。

4.1 ポンペイウォーカー

現状ありのままの遺跡を仮想体感することに関しては、実画像を用いることで視覚的臨場感を高められる。広大な



図3 提示技術

敷地ながら車両の乗り入れが禁止されているポンベイ遺跡では、立ち入り可能なほぼすべての街路に沿って歩きながら撮影した全方位動画データベースを構築した。これを用いて、Googleに先駆けて地図インタフェースを通じたパノラマ体感システムを実現している(図3(a))。また、この映像データを磁気センサと接続して仮想的にポンベイの街路を周遊したり、ドライビングシミュレータと接続して仮想的に運転走行することも可能となっている。

4.2 ソンマ遺跡パブリックデー

遺跡は一般に「往時の姿」が完全な形で残っていることは稀である。ソンマ遺跡もこの例外ではない。ソンマ遺跡では、パブリック考古学を提唱する松田らにより積極的に遺跡の一般公開が行われている。これに合わせて、来訪者にヘッドマウントディスプレイ(HMD)等を用いて、現場の遺跡を目で見ながら、その上に往時の姿をCGで重ね合わせて体感する方式(図3(b))を導入した。

技術的課題は、現風景とCGの間で物体位置(幾何学的整合性)や影を整合させる点(光学的整合性)である。位置については磁気センサを用いた。

筆者らのシステムの特徴は、光学的整合性にある。予め光の当たり方によってできる影をいくつか計算しておき、それを重ね合わせて表現することで実時間で陰影が生成できるシステムとした¹⁰⁾。CGモデルについては、実際に計測した3次元形状のほか、原形を留めていない箇所については文献等に基づいて作成されたCG(現地アルタイル社より提供)を用いた。パブリックデーでは大きな反響があり、手法の有効性が確認できた。画像理解による位置計算の精緻化や、CGデータの最適な組合せなどは今後の課題である。

5. むすび

ポンベイ、ソンマ遺跡での幾何学的、光学的モデリングと提示技術に関する取組みについて紹介した。本研究の一部は科研費(16089101)また他の一部は文科省知的資産プロジェクトならびにデジタルミュージアムプロジェクトの助成を受けた。

(2010年3月5日受付)

[文献]

- 1) 池内, 倉爪, 西野, 佐川, 大石, 高瀬: "The Great Buddha Project", 日本VR学論, 7, 1, pp.103-114 (Jan. 2002)
- 2) K. Ikeuchi, D. Miyazaki (Eds): "Digitally Archiving Cultural Objects", Springer (Jan. 2008)
- 3) 増田, 山田, 朽津, 池内: "3次元計測データによるフゴッペ洞窟内の自然光入射のシミュレーション", 日本VR学会論文誌, 10, 1, pp.81-90 (Mar. 2005)
- 4) T. Masuda, S. Imazu, S. Auethavekiat, T. Furuya, K. Kawakami, K. Ikeuchi: "Shape Difference Visualization for Ancient Bronze mirrors through 3D Range Images", J. of Visualization and Computer Animation, 14, 4, pp.183-196 (Sep. 2003)
- 5) 鎌倉, 大石, 高松, 池内: "3次元モデルによるバイオン寺院尊顔の解析と制作背景の考察", 映像学誌, 61, 4, pp.502-507 (Apr. 2007)
- 6) A. Banno, T. Masuda, T. Oishi, K. Ikeuchi: "Flying Laser Range Sensor for Large-Scale Site-Modeling and Its Applications in Bayon Digital Archival Project", IJCV, 78, 2-3, pp.207-222 (July 2008)
- 7) 大石, 中澤, 池内: "インデックス画像を用いた複数距離画像の高速同時位置あわせ", 信学論, J89-D, 3, pp.513-521 (Mar. 2006)
- 8) R. Sagawa, K. Nishino, K. Ikeuchi: "Adaptively Merging Large-Scale Range Data with Reflectance Properties", PAML, 27, 3, pp.392-405 (Mar. 2005)
- 9) "Pompei: Pitture e Mosaici", Istituto della Enciclopedia Italiana, Rome (1990-2003)
- 10) 角田, 大石, 池内: "影付け平面を用いた複合現実感における高速陰影表現手法", 映像学誌, 62, 5, pp.788-795 (May 2008)



小野 晋太郎 2001年, 東京大学工学部卒業。2006年, 同大学院情報理工修士課程修了。現在, 同大生産技術研究所特任助教。文化遺産のデジタル保存のほか, 特に車載カメラによるセンシング, 時空間画像解析, 運転シミュレーション, ITS(高度交通システム)などに関する研究に従事。博士(情報理工学)。



川上 玲 2003年, 東京大学工学部電子情報工卒業。2008年, 同大学院博士課程修了。現在, 同大生産技術研究所特任助教。色恒常性, スペクトル解析, コンピュータビジョンにおける光学的解析と応用に関する研究に従事。博士(情報理工学)。



大石 岳史 1999年, 慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。2005年, 東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士課程修了。同年, 東京大学生産技術研究所特任助手, 2006年, 特任助教を経て, 2007年より, 東京大学大学院情報学環特任講師。実物体の形状モデリングの研究に従事。博士(学際情報学)。



池内 克史 1973年, 京都大学工学部機械工学科卒業。1978年, 東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。MIT人工知能研究所, 電総研, CMU計算機科学部を経て, 1996年より, 東京大学生産技術研究所教授。2000年より, 同大学情報学環兼任。人間の視覚機能, 明るさ解析, 物体認識, 文化財のデジタル保存などの研究に従事。工学博士。正会員。