

# 文化財の3次元デジタルアーカイブのための 地域情報ネットワークシステムのデータ転送手法に関する検討 — ネットワークシステム用の分光画像データの圧縮手法 —

Study on The Data Transfer Method of Regional Information Network System for  
3 Dimensional Digital Archive of The Cultural Properties:  
Data Compression Method of Multi-Spectral Image for Network System

望月宏祐\* 田中法博\*\*  
Kosuke MOCHIZUKI Norihiro TANAKA

## 概要

本論文では地域の文化財情報の記録・発信のために3次元デジタルアーカイブ技術に基づいて地域情報ネットワークシステムの開発に向けた検討と提案を行う。本研究ではスマートフォン等を使うことで地域の人々の手によって容易に地域の文化財情報を計測し、それをネットワークサーバ上で統合するための仕組みを提案する。また、3次元デジタルアーカイブした情報を、インターネット等で一般の人々に公開するためには、その情報をどのように手元のPC等で表現するのか、あるいは、膨大なデータをどのようにユーザの手元のコンピュータに転送するのかという点が問題となる。そこで地域情報ネットワークシステムの全体構想を述べた上で、本稿では大規模な分光画像転送に適したデータ圧縮が可能なデータ転送方式について提案する。ただし、本論文ではシステムの試作段階であるため、研究室内の閉じたネットワーク環境下で3D デジタルアーカイブデータ公開用のサーバを構築する。この結果、分光画像の画質劣化を抑えながらも約4.9%のサイズに圧縮して転送できることがわかった。

キーワード：Computer Graphics、デジタルアーカイブ、スマートフォン、地域情報ネットワークシステム、データ転送

## 1. はじめに

文化財は、地域社会にとっては、その地域の文化を具現化したものの一つであるため、その地域にとって重要な財産である。本論文は、情報システムを活用し、その文化財情報を地域内で記録・発信するための統合的な情報ネットワークシステムの設計方法を検討する。

様々な要因で文化財が劣化したり破損したりすること、さらにはその文化財の滅失により永久にその文化財が失われるということが社会的に大きな問題となっている。文化財は、文化を様々な形で表現したものであるが、破損や滅失を防ぐための対策が極めて重要な課題である。しかしながら、文化財を物理的に保護・保存したり、劣化破損した文化財を修

\*長野大学非常勤講師

\*\*企業情報学部教授

復したりしていくことには、コストや社会情勢等の様々な要因から十分な対応ができていないのが現状である。つまり、今、まさにこの瞬間においても、世界に目を向ければ次々と文化財が傷み失われているということ認識しなければならない。

文化財の保護や修復の活動に加えて文化財をデジタルデータとして記録するデジタルアーカイブ研究が近年盛んになってきている。この研究は、文化財の実物ではなく文化財をデジタル情報として記録し、それを後世に向けて半永久的に残していこうというものである。

これまで文化財をデジタルアーカイブする取り組みは数多くなされているが、その文化財データを地域で有効に活用するための仕組みとしては、多くはインターネット上で Web ページや SNS などを用いて公開するという手法が一般的で、それらを大きく超えるものは少ない。これらの方法では、主に写真や動画のインターネット公開に留まっている。しかしながら、これらのコンテンツでは撮影時の環境に鑑賞条件が固定されるという問題が残る。一部のコンテンツには、QuickTime VR 等を用いて周囲から対象を見渡すことができるものも存在するが、その自由度は限定的で、たとえば、自分が見たいと考えている視点や任意のシーン内で鑑賞するということができない。

さらに複雑なシステムであれば、一般の専門知識を持たないユーザに対して、ユーザに負担をかけないユーザインタフェイスの構築も重要な課題となる。

以上のような課題に対して本研究では、これまで光沢や陰影などの3次元的な色変化までを含めて高精度に文化財をデジタルアーカイブする手法を提案してきた。また、文化財のデジタル展示システムを開発し、そこでは子供から高齢者まで操作できるユーザインタフェイスの開発を行った。このシステムは実際の博物館で使用され、その実用性を示すことができた[1]。

本論文では我々が提案したこれまでの3次元デジタルアーカイブに関する研究成果[2、3]を活かした地域情報ネットワークシステムの開発に向けた検討と提案を行う。本研究ではスマートフォン等を使って容易に地域の人々の手によって地域の文化財情報を計測し、あるいは高度な計測機器を持つ場合などは高精度に対象を計測する。そして、それらをネットワークサーバ上で統合するための仕組みを提案す

る。3次元デジタルアーカイブした情報を、インターネット等で一般の人々に公開するためには、その情報をどのように手元のPC等で表現するのか、あるいは、膨大なデータをどのようにユーザの手元のコンピュータに転送するのかという点が問題となる。そこで本研究では、地域情報ネットワークシステムの全体構想を述べた上で、そこで大規模な分光画像転送を行うためのデータ転送方式について提案する。ただし、本論文では研究室内の閉じたネットワーク環境下で3Dデジタルアーカイブデータ公開用のサーバを構築する。この結果、分光画像の画質劣化を抑えながらも約4.9%のサイズに圧縮して転送できることがわかった。

## 2. デジタルアーカイブに関する従来法と本研究で提案する3次元デジタルアーカイブ手法

従来のデジタルアーカイブ手法では写真撮影や動画撮影に基づくものが多かった[4]。これらの手法の問題は撮影した写真や動画が撮影時の環境に完全に固定されてしまう点である。たとえば、違う角度から鑑賞したいとか、撮影時と異なったシーンの中で対象を鑑賞したいといったことはこれらの方法では不可能となる。

この問題に対して3次元コンピュータグラフィックス(3D CG)技術に基づいた文化財のデジタルアーカイブ技術が提案されてきている。3D CG であれば、自由な視点、自由な照明方向で対象を鑑賞可能である。Levoy らのミケランジェロプロジェクト[5]や池内らの大仏プロジェクト[6]はよく知られている。しかしながら、これらの手法にも文化財の色再現に関して問題が残る。たとえば、撮影するカメラが変わると計測対象の色が異なるという問題が生じる。これは撮影した画像はカメラの感度特性の影響を受けるからである。さらにシーンを照明する光源の種類の変化など、照明環境の変化に対して適切な色再現ができないという課題が残る。

以上の課題に対して本研究では、これまで分光情報と光反射モデルに基づいたデジタルアーカイブ手法を提案してきた[1-3]。本研究で提案する手法は、単に対象を写真や動画として記録するのではなく撮影した画像から分光反射率や反射モデルパラメータ等の対象物体の物理特性を推定し、その物理特性情報をデジタルアーカイブするものである。

この手法の利点は文化財のデジタルアーカイブを

従来法のように Red Green Blue (RGB)の三原色に基づくのではなく、分光情報に基づいた手法を開発することでカメラの感度特性や照明光源の影響を取り除くことが可能となったことである。また、光反射モデルに基づいた手法を開発することで文化財の陰影や光沢といった3次元的な色の変化に対しても高精度にデジタルアーカイブすることが可能となった。また、デジタルアーカイブの対象をシーン全体に広げることでシーンの照明環境を記録し、自由なシーン照明環境で対象の文化財をCG再現することが可能となった[7]。さらに対象物体の記録上有利な点として、複数の計測系で記録した情報を統合して1つの完成したデジタルアーカイブ情報を構築できることである。

このように高度なデジタルアーカイブが可能になってきているが、次に我々が考えるべき課題は、こういったデジタルアーカイブしたデータの活用方法である。高精度なデジタルアーカイブ技術は、そのデータの活用にも高度な技術が必要となるが、一般の利用者に高い技術レベルを求めては、そのデータを広く用いることが難しくなる。本研究では、これまでデジタルアーカイブしたデータを子供から高齢者まで容易に鑑賞できる文化財用のデジタル展示システムを開発した。このシステムは実際の博物館で展示を行い、多くの来館者に使用してもらった結

果、そのユーザインタフェースの有効性を示すことができた[1]。

### 3. 地域情報ネットワークシステムの試作

本システムでデジタルアーカイブする対象は2種類ある。一つ目は日本刀などの直接対象となる文化財である[3]。二つ目は文化財をCG再現するときのシーンの照明情報である[7]。これらはいずれも地域の文化財記録には重要な対象となる。

この2種類のデータの組み合わせの変更はリアルタイムで可能である。つまり、文化財とそれを再現するシーンの組み合わせは任意に組み合わせが可能となる。これらの情報をデジタルアーカイブし、外部に情報発信するために図1に示すように文化財情報のデジタルアーカイブを目的とした地域情報ネットワークを構築する。ただし、現時点ではこのシステムは地域全体に開かれたものではなく、研究室内の閉じたネットワークでプロトタイプとして構築している。現時点では、このシステムはプロトタイプであるためネットワークの構造を単純化している。実際に運用する場合には、ネットワークの構造も多段化したり仮想構造化したりして実用可能になるようにする。本システムは一般ユーザから提供された情報を統合し、3次元デジタルアーカイブデータにまとめ、その情報を再度外部に向けて発信できる。

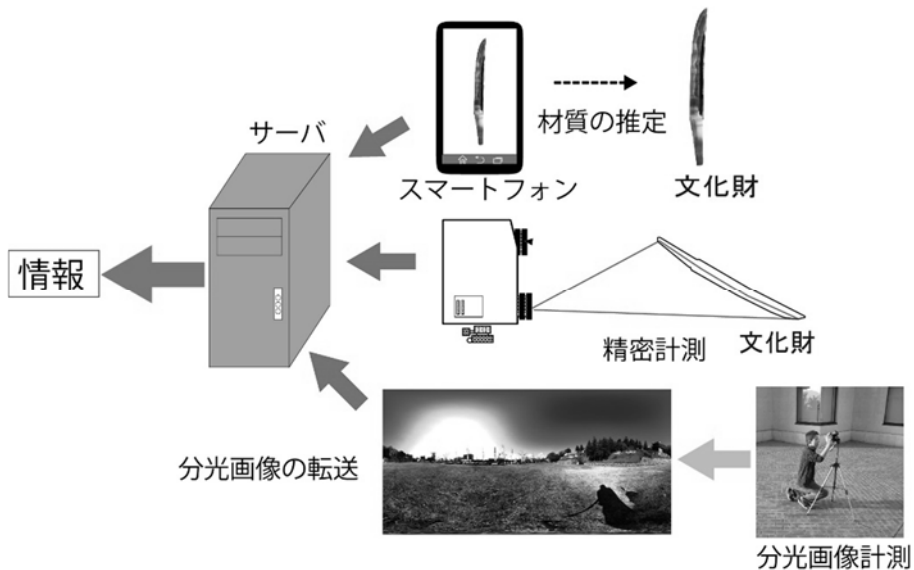


図1. 本研究で提案する文化財用地域情報ネットワークシステムの概略図

本研究で構築するネットワークシステムは、地域の文化財をデジタルアーカイブするために2つの重要な特徴を持っている。まず、一つ目の特徴としてスマートフォンとの連携ができることが挙げられる。スマートフォンは現在多くの人々が持つ多機能携帯電話であるが、実際にはデジタルカメラとネットワーク機能を持った携帯コンピュータと考えることができる。この特性を活かして、スマートフォンを誰もが使えるデジタルアーカイブ用の計測機として考えることができる。特に本研究では、これまでスマートフォンのカメラを用いて物体の材質推定ができる手法[8]を開発しており、単純に写真を撮影するのではなく対象の材質を高精度に推定することが可能となっている。二つ目の特徴としては、本研究の手法は、情報を反射特性として記録するため複数の計測機器で計測した情報を後から合成し統合することができることである。

#### 4. デジタルアーカイブデータの転送手法

##### 4.1. 分光画像用のデータ圧縮アルゴリズム

デジタルアーカイブデータにおいて転送負荷が高いのは分光情報である。本研究で提案するネットワークシステムに提案手法を実装する上で、最も大きな課題は転送するデータ量である。本研究では照明情報を記録する分光画像は、たとえば縦3000画素×横6000画素程度の大きさになるが、通常の8bit画像とはことなり、各画素32bitの浮動小数点型のデータを持ち、分光情報は蛍光灯などのスパイクな分光分布も記録できるように61次元情報として記録している。そうすると、この分光画像は4.4GBの容量に達することになる。照明情報だけで4.4GBものデータを転送することは現実的ではない。そこで何らかのデータ圧縮が必要となる。分光画像を圧縮する手法としては、分光分布の統計的性質を用いて行う手法がある[9]。分光画像に含まれる分光情報(分光分布)は文献[10-12]によれば、有限個の基底関数の線形結合で表すことができる。本研究ではこれらの知見に基づいて分光分布の圧縮を行いデータ転送に適したデータストリームを作る。

まず分光分布 $I(\lambda)$ は $n$ 個の基底関数 $B_k(\lambda)$ から次の式で記述する。

$$I(\lambda) = w_k B_k(\lambda) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

ここで $w_k$ は基底関数の重み係数である。本研究では分光分布を400nm から700nm までの可視波長域に

ついて5nm 間隔でサンプリングして61次元データとして扱う。基底関数を $61 \times 1$ の行列 $\mathbf{b}_k$ とする。各画素の分光分布を $61 \times 1$ の行列 $\mathbf{i}$ で示すと(1)式から次の式のように書き換えることができる。

$$\mathbf{i} = w_k \mathbf{b}_k \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

このとき基底関数行列 $\mathbf{b}_k$ がわかっているならば、分光画像の各画素に記録するデータを分光分布 $\mathbf{i}$ の要素は直接的な分光データから $w_k$ を要素として置き換えた場合でも等価と考えることができる。この場合において、分光画像上の分光分布に統計的な偏りから、基底関数の寄与率が一定でなければ、その統計的な偏りを利用して基底関数の数 $n$ を減らすことができる。つまり、基底関数の数 $n$ の数が少数であっても元の情報を十分に復元できるのであれば、データ量を減少させることができる。このことは $\mathbf{i}$ の要素数が減ることでデータ量の削減が可能となる。文献[10-12]に用いられている手法は、分光反射率に限定したものであるが同一シーン内の画像の色は偏りを持って分布し、その偏りによって照明光源を安定して分類できることが示されている[7]。このように照明光分布まで含めて分光情報で計算することにより相互反射も含めた複雑な反射も再現できるようになる[13]。

本研究で提案する手法は対象となる一枚の分光画像から、分光分布の偏りを求めて基底関数を獲得する。このとき圧縮する分光画像の画素数を $m$ とすると分光分布の集合を $m \times 61$ の行列 $\mathbf{A}$ で表す。行列 $\mathbf{A}$ に対して主成分分析を行い、得られた $k$ 番目の主成分ベクトルは $61 \times 1$ の行列 $\mathbf{b}_k$ とする。このとき $j$ 番目の画素の分光分布を $61 \times 1$ の行列 $\mathbf{i}_j$ で示すと(1)式から次の式のように書き換える。

$$\mathbf{i}_j = w_{j,k} \mathbf{b}_k \quad (j = 1, 2, \dots, m) (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

このとき $\mathbf{b}_k$ は一枚の画像内で一意に決まる関数であるが、 $w_{j,k}$ は画素ごとに異なる値である。基底関数の数が $n=61$ であれば情報の損失はなく、分光分布データは100%の情報が復元できるが分光分布データの量は削減されない。データ量の削減(圧縮)は $n$ の数を $n < 61$ と減らすことで可能となる。本研究では主成分分析によって基底関数を求めた。基底関数は主成分ベクトルであることから、その累積寄与率が1.0になれば復号時に100%の情報が復元できるため可逆圧縮と考えることができる。また、 $n < 61$ にした場合、累積寄与率が1.0未満であれば、復号時には完全には元の分光分布が復元できないので非可逆

圧縮となる。この手法では、データの復元率は累積寄与率となる。そして、使用した基底関数の数を $a$ とすれば圧縮率は $a/n$ となる。

このときの復号にかかるコストは各画素において(3)式を計算するため、掛け算と足し算をそれぞれ61回計算するのみである。現在のGPUを用いれば、復号はほぼリアルタイムで可能となる。圧縮の方は全ての画素の分光情報に対して主成分分析をかける必要がある。そのため、画素数 $m$ の画像に対しては、 $m \times 61$ 次元の行列に主成分分析をかける処理が必要となる。

## 4.2. データ転送と文化財のCG再現

本提案システムでは事前にユーザ側のコンピュータにクライアントソフトウェアを転送し、そのソフトウェアがサーバと通信し、そのデータに基づいて文化財をCG再現する(図2)。

データ転送はサーバ側から、デジタルアーカイブした文化財の形状情報、反射モデルパラメータ、分光反射率、そしてシーン照明を記録した全方位分光画像の圧縮データとその分光画像に対応する基底関数を転送する。

## 5. 実験

まず本研究の手法を用いて地域の文化財とシーン情報のデジタルアーカイブを行った。本論文で提案する地域情報ネットワークシステムは現時点では、まだ研究室内で実現されている閉じたシステムであるため、実行結果は実際に外部ネットワークに公開されるものではなくシミュレーション結果である。使用したサーバの環境としてOSはFreeBSD 10.0R、CPUはIntel Core i7-4930K、メモリ32GBである。

デジタルアーカイブの例として用いた文化財は、長野県坂城町の刀匠である宮入小左衛門行平氏の習作である。ここでは文献[1]のデジタルアーカイブデータを使用した。また日本刀の反射特性の定量化はできていないため、いくつかの仮定のもとで反射特性を定義している。デジタルアーカイブしたデータの容量は日本刀の形状データが4.4MB、日本刀の反射特性データが40MBである。また、別途シーン照明のデジタルアーカイブを行った。計測したシーンは上田城跡となる。上田城跡は屋外シーンであるので太陽光が支配的なシーンとなる。図3が実際に本実験で用いた全方位分光画像である(文献[7]の

データを使用)。主にこの上田城跡のシーン照明を計測した分光画像が巨大なデータとなるためデータ圧縮を行った。計測データから作成した全方位画像は縦3000画素×横6000画素であり、各画素61次元の浮動小数点を持つ。データ量は約4.4GBとなる。この全方位分光画像を主成分分析したところ第3主成分までの累積寄与率が1.000となることがわかった。この結果、0.1%未満の誤差ではほぼ理論的に情報の欠落がなく可逆圧縮に近い状態となり、圧縮率は $3/61 \approx 4.9\%$ となった。これにより全方位分光画像が215.6MBまで圧縮できた。このことによりネットワーク帯域を大幅に削減することができた。以上のデジタルアーカイブ情報を用いて宮入小左衛門行平氏の習作の日本刀をCG再現した結果が図4となる。ここでは宮入刀匠の日本刀と上田城跡という2つの坂城町と上田市の2つの地域の重要な文化財を対象としてデジタルアーカイブした結果を示した。

## 6. まとめ

3次元デジタルアーカイブに関する技術に基づいた地域情報ネットワークシステムの開発に向けた検討と提案を行った。地域情報ネットワークシステムの全体構想を述べた上で、本研究では地域の人々の手によって地域の文化財情報を計測し、それをネットワークサーバ上で統合するための仕組みを提案した。また、膨大なデジタルアーカイブデータをユーザのコンピュータに転送するためのデータ圧縮手法とともにデータ通信手法を提案した。本論文では研究室内の閉じたネットワーク環境下でのシミュレーション結果ではあるが、3Dデジタルアーカイブデータ用のサーバを構築した。この結果、分光画像の画質劣化を抑えながらも約4.9%のサイズに圧縮して転送できることがわかった。本論文では、実際のシーン照明環境を計測した分光画像を圧縮しデータ転送ができることがわかったが、対象となる文化財である日本刀については、その独特の光沢部分等の反射特性の定量化が不十分であるという課題が残る。今後は日本刀の反射特性情報の定量化を行い、本システムでデジタルアーカイブデータを提供できるようにしたい。

参考文献

[1] 田中法博、望月宏祐、宮下朋也、村田良二、鈴木卓治:分光情報に基づいた文化財展示システムの開発、国立歴史民俗博物館研究報告、第189集 pp.143-165, 2015.

[2] 田中法博、禹在勇、更科友啓、望月宏祐:分光的な光反射計測に基づいた物体の表面反射特性推定、日本感性工学会論文誌、Vol.8, No.3, pp.943-950, 2009.

[3] N. Tanaka and K. Mochizuki: A digital archive method based on multispectral imaging with goniometric multiband camera, Bulletin of Japanese Society for the Science of Design, Vol. 61, No. 3, 10 pages (採録決定).

[4] A. Ide, K. Manabe, H. Shimizu, M. Sunaga, K. Fujiwara, T. Aoki and H. Yasuda: Technology for Digitalizing Pictorial Data of Japanese Swords.,Hawaii International Conference on System Sciences-2005(IEEE) pp.102-108, 2005.

[5] M. Levoy: The Digital Michelangelo Project. In Proc.SIGGRAPH 2000, pp.131-144, 2000.

[6] 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学会論文誌、 Vol.7, No.1, pp.103-113, 2002.

[7] 田中法博、望月宏祐: RGB カメラによる全方位分光画像計測とIBLへの応用、画像電子学会誌、Vol.42, No.4, pp.466-476, 2013.

[8] 望月宏祐、田中法博: スマートフォンとネットワークサーバーを用いたユビキタスな分光画像計測システム、長野大学紀要、Vol.36, No.1, pp. 35-41, 2014.

[9] 望月宏祐、田中法博、林一成、禹在勇、富永昌治: 分光画像圧縮に基づいた分光ベースレンダリングの高精細化、日本感性工学会論文誌、Vol.9, No.2, pp.301-309, 2010.

[10] J. Cohen: Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips Psychonomical Science, Vol.1, pp.369-370, 1964.

[11] L. T. Maloney: Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters, J. of Optical Society of America A, Vol. 10, pp.1673-1683, 1986.

[12] M. J. Vrhel, R. Gershon and L. S. Iwan: Measurement and analysis of object reflectance spectra, Color Research and Application., Vol.19, pp.4-9, 1994.

[13] 望月宏祐、田中法博、戸谷重幸、森川英明、三浦幹彦: 分光レイトレーシング法に基づいた相互反射の色再現手法、日本デザイン学会誌「デザイン学研究」、Vol.60, No.1, pp.11-20, 2013.

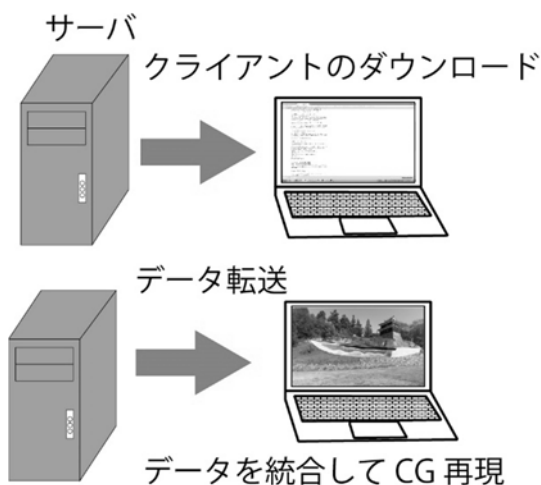


図2. クライアント側での実行環境



図3. 上田城跡のシーン照明の計測結果 (田中、望月: 画像電子学会誌 Vol.42, No.4, p.473から引用)



図4. 宮入小左衛門行平氏の習作を上田城跡のシーン照明環境下でCG再現した結果