

# 彫刻文化財における三次元デジタルアーカイブとその活用手法

山田 修<sup>\*1</sup>

岡村印刷工業株式会社 文化財総研

高宮 洋子<sup>\*2</sup>

東京藝術大学大学院 美術研究科

彫刻文化財において、レーザースキャナによる三次元デジタル化とそのデータの活用が積極的に行われている。しかし彫刻文化財の三次元デジタルアーカイブは画像のような二次元のデジタルアーカイブよりその仕様が複雑であり、現在においても漠然としたまま定まっていないため、単にデジタル化するだけでなく、その仕様を確立していくことが強く求められる。本稿では実際に教育、研究や保存修復の現場で行われている事例から、三次元デジタルアーカイブの構築、運用について考察した。

## Application Technique for 3D Digital Archives of Cultural Properties in Sculpture

Osamu Yamada<sup>\*1</sup>

Research Institute of Cultural Properties  
Okamura Printing Industries. Co. Ltd

Yoko Takamiya<sup>\*2</sup>

Graduate School of Fine Arts  
Tokyo National University of Fine Arts and Music

The laser scanner has enabled 3D digitalization of cultural properties of sculpture and 3D digital data has been positively used. However, as the specification of 3D digital archives of sculpture is more complex than 2D digital archives like images and it is not decided vaguely now, the establishment of the specification is strongly requested. In this paper, the authors consider the construction and operation of 3D digital archives by introducing the case actually practiced in the fields of education, research and restoration.

### 1. はじめに

近年文化財におけるデジタル化は急激に進められており、その技術も着実に発達してきている。特に彫刻文化財といった立体形状を極めて客観的なデジタル情報として記録することが可能になったことで、文化財調査の効率化を図るだけでなく、従来手間取った数値算出や現実に見ることは不可能な表現もコンピュータ上で容易に行うことができるようになった。

これらのデータの取得や表示技術が格段と進歩していく一方で、これらのデータを三次元のデジタルアーカイブとして管理、活用していくための仕様や活用方法の点では未だ課題を残しているといわざるを得ない。

2004年より、東京藝術大学大学院美術研究科文化財保存学保存修復彫刻研究室（以下、彫刻研究室）では、従来の彫刻文化財の調査活動に加え、レーザースキャナによる三次元デジタルデータの取得に取り組んでおり、現在までに仏像を中心に50躯以上の彫刻文化財のデータをアーカイブ化している。

本稿では、現在彫刻研究室で行っているアーカイブにおける手法や仕様について解説し、実際の利用、運用に関する成果や問題点について

考察していく。

### 2. 三次元デジタル化の流れ

#### 2.1. 三次元デジタル化

物体を三次元でデジタル化する技術はもはや各種存在し、その各々に異なる長所、短所があるが、彫刻研究室では通常行われる文化財調査の一環として合理性を持つことを前提に、下記のような観点から、レーザースキャナの技術を選定している。

**可搬性** 通常調査においては安置、所蔵されている場所に出向いて作業する場合はほとんどであるため、機材自体を簡便に持ち込み、移動できることが必須である。

**安全性** 計測作業は非接触で行い、レーザースキャナは極めて微弱なものであるため、物理的、化学的影響はないに等しい。

**効率性** 事前に作業の段取りをしておけば、破損調査や写真撮影等の複数の作業を同時進行することができるため、時間効率の良い作業が可能となる。

外形情報の取得を目的とした場合、このように非接触、短時間、高精度で複雑な立体形状を三次元によるデジタルデータとして記録できるという点では、現段階においてレーザースキャナ

<sup>\*1</sup> 岡村印刷工業株式会社 文化財総研

Research Institute of Cultural Properties, Okamura Printing Industries. Co. Ltd

<sup>\*2</sup> 東京藝術大学大学院 美術研究科

Graduate School of Fine Arts, Tokyo National University of Fine Arts and Music

よるデジタル化は現実には最も有効な記録方法のひとつである。

## 2.2. レーザー計測

レーザー計測はレーザー光が反射する特性を利用して、対象物の立体形状を三次元データとして取得する技術である。発射したレーザー光が対象物に反射して戻ってくるのが前提条件になるため、データの取得可能範囲はレーザー発射部、受光部から共に見えがかる部分になる。従って対象物の表面を全て計測するためには、複数の位置や角度から計測を行う必要がある。

所有者、管理者の許可の上で、事前調査により対象物の脆弱性を判断し、安全性が確認できれば、十分に薄用紙や布で養生した回転台に像を載せ、レーザースキャナの位置を固定し回転台を随時回転させながら、計測作業を行う。像の移動が困難な場合、安全が確認できる範囲で機器自体を移動しながら計測を行う。なお1躯にかかる計測時間は座高約90cmの三尺坐像で2時間から3時間程度である。

## 2.3. 計測データ

取得したデータは点群データと呼ばれる三次元の位置座標値を持つ点の集まりであり、実寸値で記録される。

光の特性上、レーザー光を吸収しやすい黒色のものや全反射する鏡面状のものは、正常にデータを取得することが困難な場合が多い。そのため黒漆や金箔が残っている部分は、レーザー光の強度を調節することによって、できるだけデータが欠損するのを回避する。また同時にCCDにより色情報(RGB値)も取得するが、そのときの光源などの環境条件によってその値は大きく左右されるため、あくまで参考程度の情報として記録している。

細かい欠損箇所はみられるものの、像全体の形状データは取得することができており、信頼性、合理性における範囲内でデータの編集を行い、デジタルアーカイブ化を行った。

# 3. デジタルアーカイブとして

## 3.1. アーカイブ化の流れ

アーカイブという役割を担っていくためには、膨大な情報量が含まれる取得したデータを、どのような形式で保存し、また実際にどのように使用していくかが肝になる。現在三次元データの記録及び表現における仕様については漠然とした目安はあるものの、特に明確な基準がないのが現状である。ここで一度アーカイブとしての役割を精査し、彫刻文化財において必要と考えられる情報とその保存形態について考えていきたい。

著者らが実際に行っているアーカイブ化の作業の流れは図1の通りである。

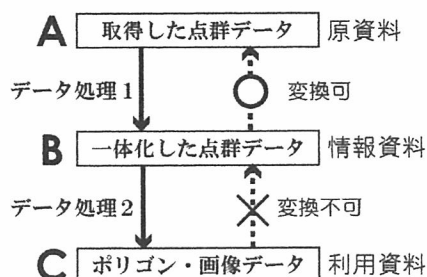


図1 アーカイブ化の流れ

データの形態は大きく三つのカテゴリ A, B, Cに分けられ、特に A と B, B と C にみられる相関関係が重要になる。

原資料に相当する計測データ A は、ノイズ等不要情報の除去や位置合わせ等の「データ処理1」を行うことにより一体化した点群データ B になるが、ファイルの保存形式は異なるものの、その中に含まれる必要な情報量としてみたときには、B から A への変換も実質上可能になることである。

一方 B に「データ処理2」を加えた結果、ポリゴンデータや画像データである C になるが、ここでは目的に対する利便性を重視し、想定された使用目的を十分に満たせる範囲内で情報量を削減しているため、C から B への変換は成り立たない。B は A と実質同等以上の情報量を有し、また処理方法に応じて C のような利便性の高いデータにも変換できるため、非常に実用性の高いアーカイブといえる。

原則として A, B, C の三種類の資料をアーカイブの対象とし、また「データ処理1」、「データ処理2」の内容を追跡できるアプリケーションのデータやその旨を記載したドキュメントも併せて保存している。

## 3-2 データ構造, データ処理

通常計測データには立体の再構成に必要な幾何情報(XYZ値)やその属性となる光学情報(RGB値)、また陰影表現に必要な法線を決定する視点位置(計測地点)情報と移動・回転情報が含まれている。データの変換を行ってもこれらの情報を如何に保持していくかが、実物に対する正確な再現性の重要なポイントになる。

原資料となる A は通常特定のアプリケーションに依存する独自の Binary 形式であり、データ処理を加えた後、ASCII 形式の点群やポリゴンといった汎用形式への変換を行うのが普通である。特に特定のアプリケーションに依存した独自の Binary 形式だと、今後そのアプリケーションの開発状況によっては、使用できなくなる可能性が出てくる。

そのため、B のデータ構造はできるだけ単純で、高い汎用性を持たせ、データ処理の開発へ

の対応がしやすいものが好ましい。「データ処理1」を加えた後 B は、XYZ の幾何情報、RGB 値、法線を決定するために必要となる視点位置、移動・回転行列をそれぞれの計測ごとに分かれたものを連続してひとつの ASCII データとして記述している(図2)。このようにしておくことによって、もし原資料 A が将来的に使用できない事態になったとしても、B がその代用になることも可能である。

```

367 点の配列
789
0.304070 -6.694470 9.177802
0.999998 0.001978 -0.000118
-0.001977 0.999969 0.007680
0.000133 -0.007680 0.999970
0.999978 0.001978 -0.000118 0
-0.001977 0.999969 0.007680 0
0.000133 -0.007680 0.999971 0
-0.304070 -6.694470 9.177802 1
31.442734 155.541367 -833.064575 0.176486 45.24 18
32.201187 155.454697 -832.598022 0.180392 46.24 18
32.951370 -155.333176 -831.944031 0.152941 39.21 17
:
:
0 0 0 0.500000 0 0 0
0 0 0 0.500000 0 0 0
0 0 0 0.500000 0 0 0
:
:
480
352
4.479490 -43.244164 -93.953228
0.999892 -0.005561 0.013591
0.006311 0.977336 -0.211531
-0.012107 0.211621 0.977277
0.999892 -0.005561 0.013591 0
0.028311 0.977336 -0.211531 0
-0.012107 0.211621 0.977277 0
4.479490 -43.244164 -93.953228 1
38.309586 171.413369 -767.946411 0.219673 58.79 22
39.013718 -171.360428 -767.706909 0.220329 57.26 20
37.719650 -171.316879 -767.510620 0.227466 58.26 19
:
:

```

計測一回目分

視点位置、移動・回転行列

座標、輝度、色 (XYZIRGB)

計測二回目分

図2 カテゴリBの構造(ASCII)

C は B に目的に応じた「データ処理2」を加えることによって、汎用性の高いポリゴンデータや正面図、側面図等の正投影の画像といった使用頻度が高い基礎資料として有効なものへと変換される。また断面図のように C から更に加工することで派生していくデータもある。

### 3.3. デジタルアーカイブとしての仕様

今回の最終的なアーカイブデータの仕様は下記のような形式としている。またその中で A における計測回数、B における点数、表面積に対する点数、ファイルサイズ数、C におけるポリゴン数、表面積に対するポリゴン数、画像データの原寸における解像度を斜体で示す。これらの数値は経験上妥当と考えられる値となっているが、今後同様の作業を行うにあたっての基準値になりうるものである。

#### A 原資料

計測データ(図3)・・・cdm形式<sup>(1)</sup>

#### B 情報資料

一体化した点群データ(図4)

・・・ptx形式<sup>(2)</sup>

点数: 約10,000,000~15,000,000 (point)

約20~25 (point/mm<sup>2</sup>)

サイズ: 約0.7~1 (GB)

#### C 利用資料

ポリゴンデータ・・・Wavefront OBJ形式(図5)

(ポリゴン数を変えて3種類)

ポリゴン数: 約1,000,000~1,500,000 (polygon)

約2~3 (polygon/mm<sup>2</sup>)

画像データ・・・Microsoft Windows BMP形式

(実寸大、正投影図六面)(図6)

解像度: 約100~200 (dpi)

#### ※ 附加資料

アプリケーション(Cのポリゴンデータを簡易閲覧するためのビューア)、アプリケーションデータ、ログなどのドキュメント等

また、任意位置での断面図、法量<sup>(3)</sup>等の情報は模刻していく中で必要に応じて作成していく。

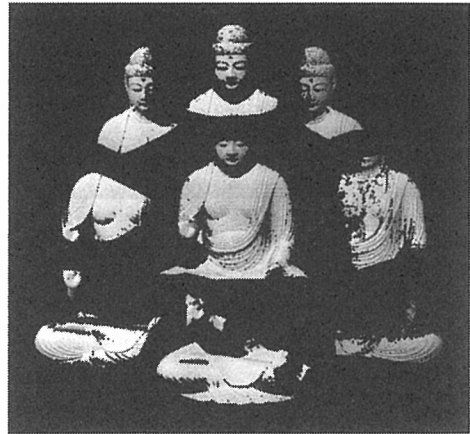


図3 計測データ

各々のデータが相対座標で記録される。

(茨城県西念寺 阿弥陀如来坐像 図4, 5, 6, 10, 13も同様)

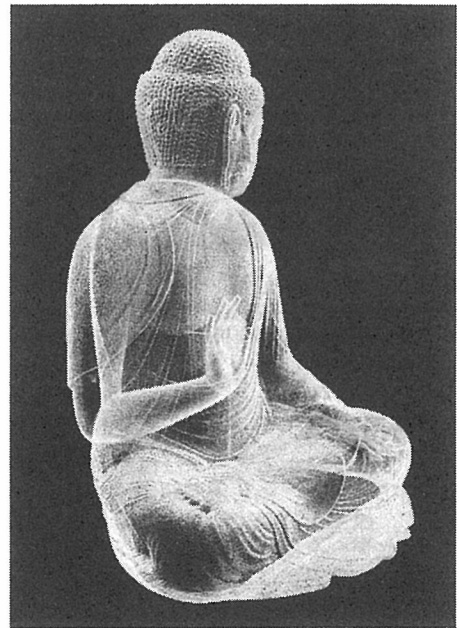


図4 カテゴリBのデータ表示

点による単純な表示のため、背面部分も表示される。

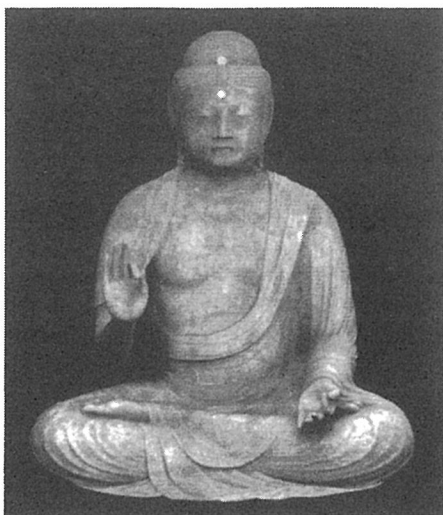


図5 ポリゴンデータ  
テクスチャマッピング後、光源（スポットライト）等の設定を加えてレンダリングしたもの。



図6 正投影図（正面）  
計算により見え隠れ部分の点群データを消去し、各々の点に含まれる方線情報を利用し軸方向の無限遠光源で点描によるシェーディング表示している。

#### 4. 活用事例

このような三次元データは信仰への配慮等、道義的に許され、権利上問題が生じない場合に限って、様々な分野で活用されることが望ましい。またデータは目的に応じた処理を施すことによって、現実には不可能な表現をコンピュータ上で可能にするだけでなく、造型機、切削機を使用することにより実際に立体での出力も可能である。

このような利点を応用して、今までに文化財の保存修復に関連する各種作業を行っており、ここではそのような利用方法について紹介していく。

##### 4.1. 模刻制作

模刻制作は立体造形を学ぶ方法として、技法や創造の学習と同時に、文化財の保存事業としても行われてきた。通常作業は原本から遠く離れた場所で行われ、特別な調査を除いては写真や既往の研究成果から行うことになる。

三次元データによって、必要となる客観的数値情報が容易に得ることができるようになり、少なくとも原本とを実際には見ることでできない角度からの観察を可能にするなど、飛躍的な進歩を与えてくれた。それによって正確かつ効率的な模刻制作を進めることが可能となり、立体に対する感覚や技術に対する理解を深めることができるようになった。

作業の進め方は人によって様々であるが、基本的な方法としては、正投影図6面（前後左右上下）を原寸大に出力したものや、正中における断面図などを基礎資料として、木取り・荒取り・中彫り・仕上げへと工程を進めていく。必要に応じてモニタ上でポリゴンデータを表示し、求めたい距離を算出したり、見たい角度で立体を確認することで、データとの整合性を検証する（図7）。また三次元データのみでは実像の印象を捉えることは難しく、立体感覚を把握するために事前に塑像や模型の制作を通常行っている（図8）[1]。

また教育という視点からは多少それるが、現在ではデジタルデータから立体を制作する技術は多種存在しており、作業自体を機械による自動化することによって、原本に限りなく近づける方法もある。例えばNC切削により仕上げに近い部分まで制作し、最終仕上げを手作業とすることで、限られた時間の中で完成度を高めるという点では有効な手法ともいえる（図9）。



図7 断面の型板

スチレンボードで作成した型板を使用して形を調整。

（奈良国立博物館委託・東大寺 彌勒佛坐像 図8も同様）



図8 スチレンボードによる簡易立体模型



図9 左：NC切削による中彫り（テスト）  
右：仕上げ後  
（東京国立博物館委託・醍醐寺 聖観音菩薩立像）

#### 4-2 様式研究

三次元データを加工することによって作成される立面図、断面図等を様式研究の基礎資料として利用することによって、地域や時代特性、作家や工房、制作年代を特定する研究に役立っている。

既往研究の検証を行っていくと共にこれらのデータから導き出された数値から新たな規則性、法則性の考察を行うことで、実際に今までに定朝様式の研究[2]や慶派の作者同定の研究[3]で一定の成果を収めている（図10）。

また立面図や断面図から抽出した線を比較、検討することによって、平等院鳳凰堂・本尊阿彌陀如来坐像の台座蓮弁の設計における技法の仮説を立てた（図11）[4]。

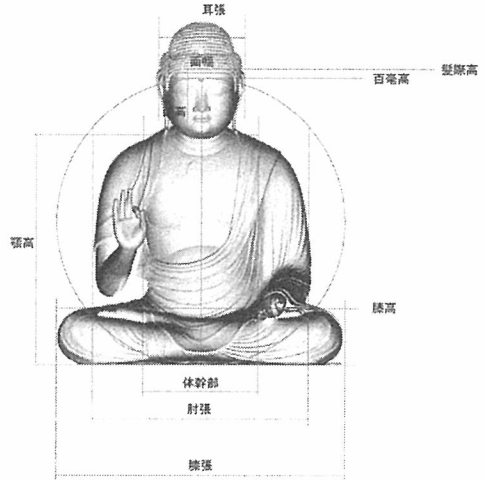


図10 白毫高に準拠した図

定朝様式において部位の寸法は、従来髪際高が基準だと考えられていたが、データを用いた検討の結果、白毫高に準拠していた可能性を示した。

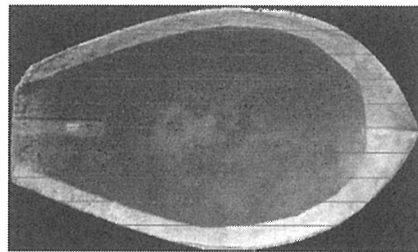


図11 蓮弁における50mm間隔の連続断面線  
上：切断位置 中：連続断面線 下：重ね合わせ  
（平等院 阿彌陀如来坐像台座蓮弁）

#### 4-3 展示・公開

修復後の姿をコンピュータ上でシミュレーションすることで、オリジナルの像には物理的な影響を与えることなく復元の試みを行う事が可能であり、また解体修理の様子など、複雑な構造を示すのにもアニメーションなどによって、明確に表現することができる（図12）[5]。

文化財自体の価値、修復作業自体の位置付けや重要性、またそこに込められた新知見などの情報を如何にわかりやすく伝え、表現するといったインタープリテーションとしての役割としても大変重要である（図13）[6]。

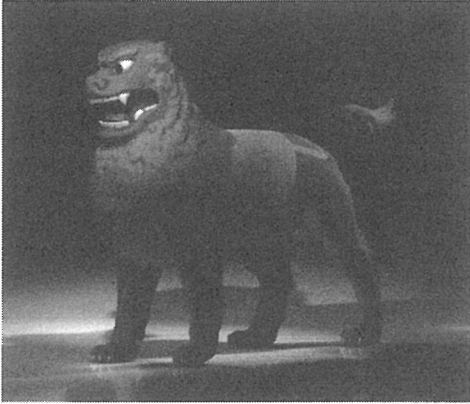


図12 形状・彩色の復元的試作

現在獅子像は顔面、胴、四肢先端、尾の部分に欠失しており、その復元制作を行い、併せて彩色の再現も行った。造像当初の彩色については、時代性と表現の共通性から唐時代の壁画の作例を参考にし、群青と緑青を基本にした彩色案をCG上で再現した。また研究の参考資料として金箔地による彩色案も制作している。

(向源寺獅子像 復元：土屋仁応)



図13 調査研究・修復報告会用映像

像を解体前、解体後、修理後の三段階でデジタル化を行い、調査研究の成果や一連の修復作業の工程をCGによる映像で解説し、成果発表会で上映した。

## 5. まとめ

デジタル化することで、記録作業としての役割は差し当たり果たすことはできる。しかし恒久的に繰り返し使用することができる記録にするためには、今後も最適な形式を模索し、後世への明確な情報伝達手段として標準化に向けて取り組んでいく必要がある。そして文化財としての尊厳を守りつつ、所有者、管理者の意向を踏まえた上で管理、運営できる体制が強く求められる。

データを模刻等の実際に作業に有効活用していくためには、データに込められた情報量が多い分だけ、経験に裏打ちされた技術、感性が必

要になってくる。また一方で、データを活用することによってそのような技術、感性の効率的な習得訓練にもなりうるかもしれない。文化財の保存修復の視点といった本来の趣旨から反れずにデジタルデータを利活用することで、今まで困難であった作業の効率化となる接点を探求していくことが今後の重要なポイントになると思われる。

## 参考文献

- [1] 東京藝術大学大学院美術研究科文化財保存学保存修復彫刻研究室：年報 2005, pp.18-26, 2006.
- [2] 東京藝術大学大学院美術研究科文化財保存学保存修復彫刻研究室：平等院および浄瑠璃寺阿弥陀像を中心に3Dデジタルデータによる定朝様式の比較研究, 平成18年度文化財保護・芸術助成振興財団補助金による業績報告書, 2007.
- [3] 高宮洋子：浄瑠璃寺灌頂堂大日如来坐像修理報告2, 文化財保存修復学会 第29回大会研究発表要旨集, P091, 2007年6月16~17日, 静岡市民文化会館
- [4] 山田修：平等院阿弥陀如来坐像台座蓮弁にみられる線の特徴—レーザー計測による三次元デジタルデータを用いた考察—, 平等院紀要 鳳翔学叢 第3輯, pp.172-159, 2007.
- [5] 東京藝術大学大学院美術研究科文化財保存学保存修復彫刻研究室：年報 2006, pp.12-13, 2007.
- [6] 東京藝術大学大学院美術研究科文化財保存学保存修復彫刻研究室：西念寺阿弥陀如来坐像調査研究および修理報告書, 2007.

## 注

- (1) VIVID910 における計測時に保存されるデータ形式。
- (2) 現在のところこの記述方法は Leica Geosystems 社の ptx 形式に従っている。そのため今回の B データには輝度をダミーとして付加している。
- (3) 坐像の場合原則として、像高、髪際高、百毫高、像地付～顎頂点、顎高、膝高、頂～顎、面長、膝張、臂張、体幹部幅、耳張、面幅、像奥、膝前矧目最大幅、腹奥、胸奥、面奥を算出。