

考古遺物用高精細 3 次元デジタルアーカイブシステムの試作

今井重晃、糊田寿夫	ミノルタ株式会社高槻研究所
佐藤宏介、多井堅一郎	大阪大学大学院基礎工学研究科
塚本敏夫、村田忠繁、川本耕三	(財)元興寺文化財研究所 保存科学センター
伴 好弘	神戸大学総合情報処理センター
藤沢典彦	大谷女子大学文学部
小林謙一	奈良国立文化財研究所 埋蔵文化財センター
難波洋三	京都国立博物館
古谷 毅	東京国立博物館

(概要)

主に考古遺物を対象にし、著者らが製作した高精度 3 次元デジタルアーカイブシステムの概要を紹介する。レーザ方式の 3 次元計測装置を移動台車上に設置し、遺物を周回するように計測することで対象の全周形状データを得るものである。このシステムを用いて約 200mm から 500mm 程度の異なるサイズの銅鐸の計測を行い、その工程、および得られたデータの評価結果を示す。

また、得られたデータより今後のシステムの考古学的研究の方向を検討し、欠陥部位の可視化についてこの結果を示す。

Prototyping of A High-Definition Digital Archiving System for Archaeological Properties

Toshio Norita, Shigeaki Imai (Minolta Co.,Ltd.), Kosuke Sato, Ken'ichiro Oh'i(Osaka University), Toshio Tsukamoto, Tadashige Murata, Kozo Kawamoto(Gangoji Archaeological Properties Research Institute), Yoshihiro Ban(kobe University), Norihiko Fujisawa(Ohtani Women's University), Ken'ichi Kobayashi (Nara National Cultural Properties Research Institute), Tozo Namba(Kyoto National Museum), Tusyoshi Furutani(Tokyo National Museum)

This paper introduces a newly developed high-definition digital archiving system which is specialized to archaeological properties. The system is able to obtain the high-definition entire three-dimensional data of an archaeological property by manually rounding an accurate 3D laser rangefinder on a mobile table. This system was used to measure several archaeological properties made of bronze. This paper introduces the process and the result of this measurement using this system.

1. はじめに

考古学の研究は、出土した遺物の型式学的研究が基本となっている。したがって、遺物の持っている情報を最大限に引き出し、その資料的価値を残していくことはたいへん重要である。しかし、膨大な出土量を抱え、保管、保存処理に対して迅速な対応をとることが難しい現状では劣化、経時変化とともに遺物の資料的価値を失っていくものも多い。

こうした埋蔵文化財は資料的価値を失わないうちに一刻も早く保存することが大きな課題である。しかし、現在の保存処理レベルでは処理中の変形を完全に防ぐことが難しいものもある。したがって、より高い精度での記録保存方法と比較研究方法の開発が望まれる。

著者らは、保存処理・修復の立場から、変形する遺物の新しい記録保存方法として非接触の3次元形状計測装置を用いた形状データのデジタル保存法、及び研究への応用の可能性についても先行研究[1-5]を重ねている。その結果、基本的な形状データの記録保存に有効であることが確認された。

本稿では、こうした考古遺物を対象にした高精細3次元デジタルアーカイブシステムを12・13年度にかけて実施中の試作研究の一部として構築中[6]であり、その設計の概要とそのシステムでの計測3次元データの結果について紹介する。

2. 考古遺物用高精細3次元デジタルアーカイブシステムの要求仕様[7]

3次元デジタルアーカイブシステムとしては、高精細、高精度な形状計測を対象物全面に渡って行うのが望ましい。しかし、この場合データ量が極めて膨大となり、大型コンピュータならともかく汎用PCでは作業できない、あるいは処理が遅いという問題が予想される。そこで、以下の要求仕様としてまとめ、この仕様に基づき設計された。

1. 大型遺物は考古学上興味のある一部のみを高精度で計測する
2. 小領域を高精度で、遺物全体は全周を低精度で計測する
3. 高さ20～100cm程度の対象遺物を計測できる自由度を持つ（銅鐸を想定）
4. 銅鏡、銅鐸や瓦の同範分析が可能なこと（文様検出可能、曲面比較可能）
5. 遺物は静止させたまま計測できること
6. 非接触計測であること
7. 形状だけでなく、表面カラーテクスチャも同時に計測する
8. 完全自動ではなく、人手はある程度介してもよい
9. 出張計測を想定し、一般車に搭載移動可能で操作性／移動性のよい構造である

3. システム構成

考古遺物の形状データのデジタル保存に際しての問題点は遺物が多種多様で複雑な形状であることと、遺物の種類毎に必要とされる精度が違う。また、ひとつの遺物においても部位ごとに必要とされる精度が違う点である。この課題に対して部分的に精度を必要とする遺物に対しては粗取り用と細部取り用のセンサを併用する。粗取りした後、より詳細なデータを必要とする部位、データが取れなかった部位及び固定されたセンサでは死角となる部位などをデータ確認しながら任意の位置に移動して分割測定する。このような複合計測システムを目指す。

2.で示した要求仕様に基づきの設計されたシステムイメージは図1に示すような構成である。レーザ方式の非接触3次元計測装置、ホストコンピュータを移動台車上に配置し、遺物を周回するように任意の複数視点から3次元計測することで対象の全周囲形状データを得るものである。本システムでは非接触3次元計測装置ミノルタ製 VIVID900[8]を採用し、1視点、1ショットのデータとして約2.5秒で640×480点の3次元データ、カラー画像データの取得が可能である。また、レンズ交換可能で WIDE($f=8\text{mm}$), MIDDLE($f=14\text{mm}$), TELE($f=25\text{mm}$)の3種が選択可能で、同じ視点から WIDE レンズで粗取りから TELE レンズで細部取りが可能である。なお、0.6m 位置の対象を計測した場合、TELE レンズ装着時 X: $\pm 0.22\text{mm}$, Y: $\pm 0.16\text{mm}$, Z: Z 基準面に対し $\pm 0.19\text{mm}$ の精度で、WIDE レンズ装着時の X: $\pm 0.70\text{mm}$, Y: $\pm 0.52\text{mm}$, Z: Z 基準面に対し $\pm 0.64\text{mm}$ の精度で3次元デジタルサイズが可能である。

こうして得られた異なる視点からの何枚もの3次元データを統合すれば、対象の全周囲の3次元デジタルアーカイブを完了するわけだが、この統合をすべて手作業で行うのは極めて工数がかかり、大変な作業となる。

そこで、本システムではこの統合作業の半自動化を計った。VIVID900 の視点情報を磁気センサを用いて、割り出すことで異なる視点からの3次元データを自動的に統合しようとするシステムである。

この非接触3次元計測装置近傍と測定対象近傍には磁気式の3次元位置・姿勢検出センサが配置される。このセンサとして、ポヒマス社製の FASTRAK[9]を用いた。本センサはトランスミッタと呼ばれる3軸方向に逐次方向を変えた磁界発生装置とその磁界を3軸方向に巻かれたコイルで受けるレシーバの組からなる。このセンサは1トランスミッタに対して、4レシーバを接続可能で、4センサを接続した場合、30Hz の測定周期で各レシーバの3次元的位置、姿勢を示す3軸の回転角を最大距離305cm の範囲まで出力する。精度は距離が離れると低下することになるが、760mm 以下の距離にある場合、その精度はXYZ位置で0.8mm、回転角については 0.15° の精度を持つ。この角度誤差は、760mm 位置で2mm 程度の位置誤差に相当する。

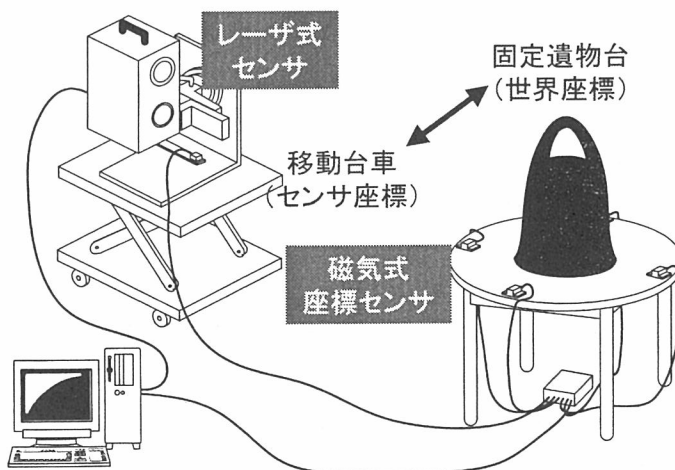


図1. アーカイブシステムイメージ

この3次元位置・姿勢検出センサの出力に基づき各視点、各ショットの視線情報が算出可能となる。この視線情報に基づき各ショットで得られたセンサ座標系の3次元情報をワールド座標系の3次元情報に再構成することにより、測定対象物の全周囲3次元データを得ることができる。

このシステムイメージから詳細設計を行った。台車上にPCが配置され、台車は530mm上下動が可能である。この上下動のみでは200~800mmのサイズに対応不能なため、VIVID900の固定個所を上下600mm移動可能とした。この固定個所に回転バイスを固定し、回転バイスにVIVID900とポヒマスセンサのトランスミッタを一体にしたブロックを設置する。回転バイスによりVIVID900は±約30°の俯角を与えることが可能である。また、VIVID900はレーザ式センサはXY方向視野と対象物の関係が自由にXY軸が自由に設定可能なように90°変更設置可能とした。

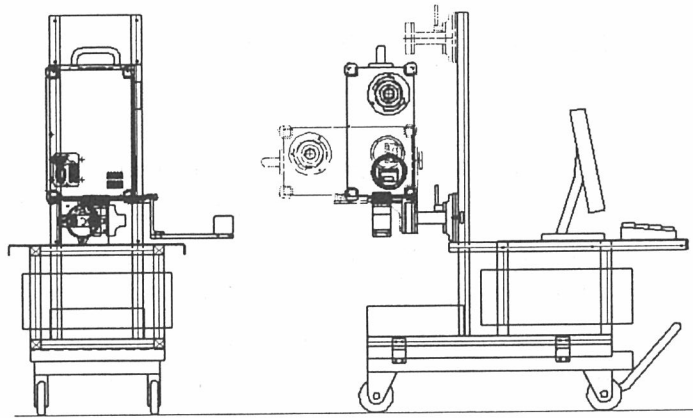


図2. システム構成図

4. システムのキャリブレーション

各視点から得られた3次元情報を統合するには、3次元デジタイザの視点位置、姿勢を算出する必要があります。このために設置されたポヒマスセンサの出力をVIVID900の位置・姿勢の情報に変換するには、VIVIDおよび世界座標・レーザ間の関係が既知でなければなりません。VIVID・トランスミッタ間の位置・姿勢は取り付け毎に変わる可能性があります。また、ポヒマスレーザの設置は測定対象の大きさによっても変化することになります。

これらを求めるために設置された環境毎にシステムのキャリブレーションを行う必要があります。

4.1. キャリブレーションの原理

計測テーブルに立方体をおき、仮に立方体の一つの頂点を世界座標の原点に、頂点から伸びる各稜線をXYZ各軸とする。VIVID900で頂点付近を計測し、3つの平面から、頂点と各軸を計算する。これらは、VIVID900の座標系から見た世界座標系となるから、これらより、 C_{vw} が求まる。

Polhemusセンサの出力から、各レーザ毎の C_{tr} が求まる。世界座標での計測点の座標を P_w 、VIVIDでの座標を P_v とすると

$$P_w = C_{vw} P_v$$

$$= C_{rv} C_{tr} C_{vt} P_v$$

立方体の上部4隅を計測し、コスト関数E

$$E = \sum_i |P_{wi} - C_{rv} C_{tr} C_{vt} P_{vi}|$$

が最小となる C_{vt} , C_{rv} を共役勾配法を使って求める。

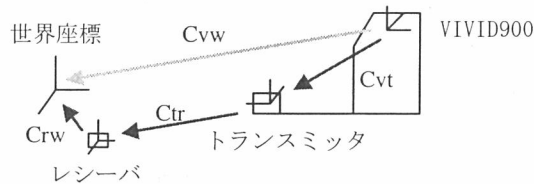


図3. キャリブレーションで求める変換

4.2. キャリブレーションの実工程

組立、測定対象の邪魔にならないようにポヒマスセンサのレシーバを測定テーブルに配置が終わるとシステムのキャリブレーションを実施する。測定対象の設置、入力に先立ち、キャリブレーション用キューブ(立方体)を測定対象の設置する位置に配置し、このキューブの上部の4頂点を左回りに計測してキャリブレーションを行う。キューブの大きさは測定対象の大きさに応じたものが、望ましいと考え、現在、一辺、120mm のものと 180mm のもの、2 種類用意した。4 頂点を用いてキャリブレーションを行うのは、測定対象の全周囲の形状データを収集するために、システムはこれを周回するように動き入力することになる。これと同じような環境を再現して、こうした環境でキャリブレーションしておいたほうがデータの信頼性、精度は増すと考えた。

VIVID のファインダ画面に立方体の3面が入るように台車の位置と VIVID900 の傾きを調節する。“Release 1st. Shot” ボタンをクリックし、VIVID による計測と Polhemus センサ出力値の取り込みが行われる。この動作をキューブの4頂点について行い、この4回のデータをもとにレシーバの位置、姿勢、トランスミッタ-VIVID の位置、姿勢の算出を行う。このレシーバの位置、姿勢、トランスミッタ-VIVID の位置、姿勢の算出結果、およびそれぞれのショットのポヒマスセンサによるトランスミッタ位置、姿勢に基づき視点を算出し、以後の測定データはそれぞれの視点から VIVID で得た3次元データが投影されることで世界座標上へのデータとして変換可能となる。

これら一連の装置搬入から組立、設置、キャリブレーションまでの作業過程で約1時間程度の準備で計測可能な状態となる。

5. 実計測

キャリブレーションを終えると、キューブを除いて測定対象を設置する。実際の銅鐸での測定の模様を写真1に、測定されたデータ例を図2、3、4に示す。計測は対象物を中心に約1.5m程度の円周を描くように周回し、4方向から粗取りデータの入力を行い、テレレンズに交換して細部取りをまた同じような位置で周回するように希望の拡大部分、あるいは対象全面について計測を行う。

通常、出張という形で計測を実施することになるので、後でのデータ欠落があるとチェックしたくとも出来ないため細部取りについても全面的なデータ入力を行っている。粗取り、細部取り全面で高さ400mm程度の銅鐸で入力所要時間は約40分から1時間程度であった。

図4の例は対象から600mm程度の距離でテレレンズで入力された細部取りの例で、高さ400mm程度の銅鐸の片面を12ショットで詳細3次元データ入力を行った。灰色で示された領域が1ショットでの3次元データであり、約30万点のデータからなる。12枚のショットは後で精密な位置合わせを行う際に必要なあわせしろとなる重複部分を持ちながら入力されている。

この例では、位置・姿勢センサからの視点情報に基づく3次元データの位置再構成を行ったデータで、ほぼ良好な位置（mm程度の位置ずれ量）に投影されている。これらのデータの重複部分をさらにソフト的に評価し、位置合わせを行うことでより高精度な位置合わせが実現できる。

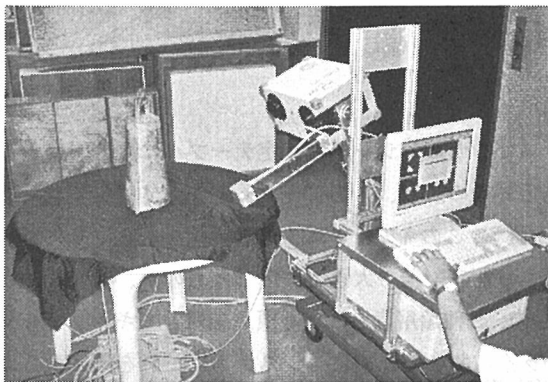


写真1. アーカイブの状態

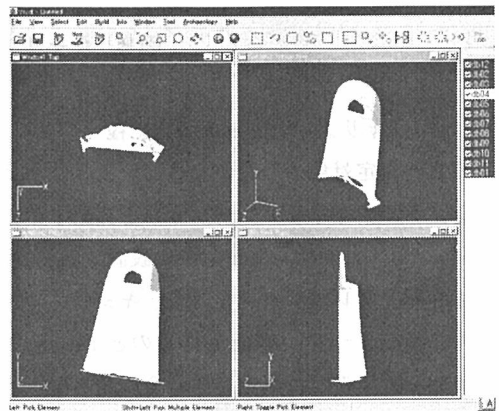


図4. 計測データ例（銅鐸片面12ショット）

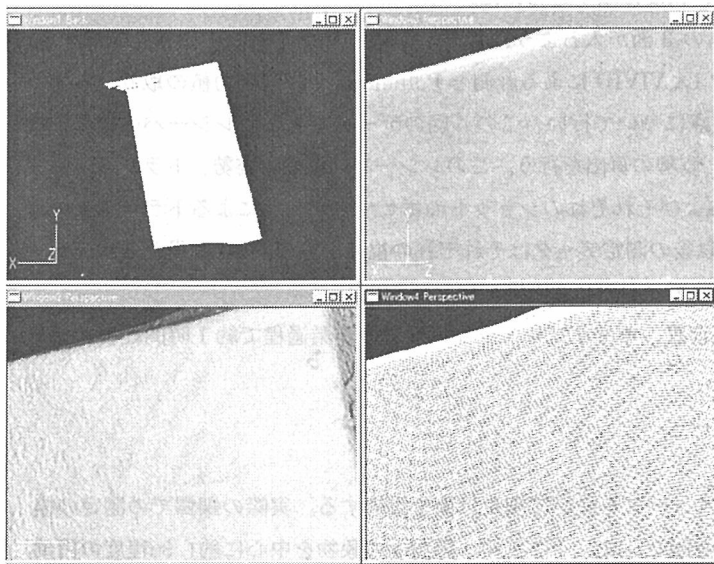


図5. 銅鐸文様部分の3次元データ

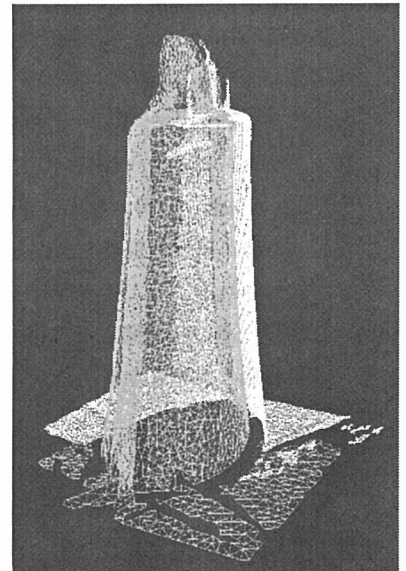


図6. 粗取りデータ例

図5にはこの細部取りデータで銅鐸の肩部分にある文様部分の3次元形状データである。

図左上面がワンショットの約30万点のデータである。70mm四方程度の視野となっている。他の3面はその一部を拡大表示した表示で、右上はカラー画像のマッピング画像、左下は3次元形状のシェーディング画像、右下はワイヤフレーム表示となっている。mm以下(約0.2~0.4mm程度の凹凸)のハッチング状文様がシェーディング画像、ワイヤフレーム表示の3次元データから判別可能である。このデータを計測用ソフトにかけることで、文様部分の断面形状、ピッチ、傾斜、なまり具合などが測定できると考えられる。

図6には粗取り時のデータ例を示す。4方向から入力された粗データが世界座標系に変換されている。この場合、4方向からのデータが最も一致していない部分で1cm程度の誤差を持ってしまっている。粗取りの場合、細部取りに比較して、平行移動量、回転移動量ともが大きくなる。このため、ポヒマスセンサの異なるレーザでの出力を用いることになり、レーザ毎の特性の違いで位置あわせ誤差が大きくなったり、同じレーザ出力でも誤差は大きくなりがちである。

この場合、位置合わせ誤差が大きすぎたり、特徴的部位がなかったりした場合、自動位置合わせソフトで高精度な位置合わせができない場合も現状ではありうる。最悪の場合、それぞれのデータに対して重複部分の対応点を3箇所、マニュアル操作で指定することで、初期的な位置合わせを行い、その近傍で誤差最小となる精密位置合わせを行う。

6. 問題点と対応

位置合わせ誤差が生じている。これには大きくわけて2つの原因が考えられる。

まず、1つ目はキャリブレーションが十分でない点、もうひとつは銅鐸など金属製の測定対象である場合、測定対象によりポヒマスセンサの位置姿勢情報に空間的歪みが生じる点の2つが挙げられる。

第1の点については、以下の対応がある。

- 1) ショット数、位置の増加
 - キューブ以外の標準対象とし、ショット数、入力位置、姿勢を増すことで安定性を増す。
- 2) キャリブレーション標準対象のサイズを可変
 - 実測定環境に近い環境でキャリブレーションを行えるようにする。
- 3) キャリブレーションと実測定のノウハウの蓄積(計測時の位置、姿勢など)

第2の点については、設計当初、ポヒマスレーザを4個配置し、最近のレーザの出力を用いることでこの問題をさけるよう考えた。しかし、予想以上に銅鐸の肉厚が厚いことや酸化の程度の軽いことなどでポヒマストランスミッタの発生する磁界に歪を生じているようで、以下の対応を考える。

- 測定対象を設置し、まわりを囲むように配置できるキャリブレーション標準対象を設置する。

以上、2点について対応を行い、安定した環境で計測を行えるようになっても、完全な位置合わせを保証できるものでない。そこでやはりソフト的な位置合わせを強化する必要があると考える。そこでマニュアル操作での位置合わせと同じことを自動化すればよい。ある程度の初期位置までは現状の方法で到達している。位置合わせを行おうとするこの初期位置の2ショットの重複部分を自動的に抜き出し、この重複部分内で3次元形状、あるいはカラー画像から特徴となる点を複数個抽出し、それら

特徴点の対応を行うことでより成功確率の高い位置合わせ可能となる。これらを改善し、より高い精度、高い自動化成功確率でデジタルアーカイブを実現することが可能となる。

7. 今後の取組と課題

現在システムが構築が完了したので、上記の技術面での課題に取り組む一方で、出張ベースで銅鐸の計測を予定している。この銅鐸計測については考古学的価値の高い同範の銅鐸を中心に計測を実施する方針である。これらの同範銅鐸の3次元デジタルアーカイブを手始めに銅鐸についての3次元データベースの構築を目指す。

この同範銅鐸の測定により全体形状と文様の一致度、傷の経緯から形状についての定量的同範の確認を行う。また、数多く同範のものが出土している銅鐸の同一文様部分におけるなまり具合の変動を定量的に評価を行う。この評価により、銅鐸鑄造1回あたりによる文様部分の劣化度を導き出す。この劣化度の算出により同一鑄型、石型での銅鐸鑄造個数の推定など考古学的価値のある推定がされる。

また、銅鐸の傷部分への着目したいと考える。傷付近の膨らみ、へこみ具合を定量的に評価することで同範銅鐸における型傷の修復方法について推定が可能となる

また、本システムの遺物測定以外の応用、例えば石室、遺構など大型環境測定への応用の可能性などの検討も今後の取組課題である。

参考文献

- 1) 塚本敏夫他、「三次元形状計測を用いた考古遺物の形状比較法の研究」、文部省科学研究費補助金重点領域研究「人文科学とコンピュータ 1995 年度研究成果報告書」、pp. 573～582 (1996)。
- 2) 増澤文武他、「三次元形状計測による文化財のデータ保存システム構築と応用—考古学分野を中心として」、平成 7～8 年度文部省科学研究費補助金基盤研究成果報告書(1997)。
- 3) 増澤文武他、「文化財の 3 次元デジタルアーカイブとデータ活用法の調査研究」、平成 11 年度文部省科学研究費補助金基盤研究成果報告書(1999)。
- 4) 佐藤宏介、「立体形状の類似性から検索可能な出土品 3D データベース」、文部省科学研究費補助金重点領域研究「人文科学とコンピュータ 1998 年度研究成果報告書」(1999)。
- 5) 佐藤宏介、「ホトメトリック能動照明に基づく超高品質三次元物体デジタル記録法の研究」、平成 11～12 年度文部省科学研究費補助金基盤研究(2000)。
- 6) 塚本敏夫他、「考古遺物用三次元形状計測システムとデータ活用の研究」、平成 12～13 年度文部省科学研究費補助金基盤研究(2000)。
- 7) 佐藤宏介、塚本敏夫ら、「考古遺物用高精細三次元デジタルアーカイブシステムの設計」、情報処理学会人文科学とコンピュータシンポジウム「じんもんこん 2000」, pp. 247-254 (2000)。
- 8) <http://www.minolta-rio.com/vivid/>
- 9) <http://www.polhemus.com/ftakds.htm>