

前二子古墳の三次元デジタル保存

東京大学生産技術研究所第3部池内研究室

1. はじめに

東京大学池内研究室では、鎌倉大仏や奈良大仏、あるいは唐招提寺金堂などの国宝級歴史的建造物や、人間国宝の卓越した技といった後世に伝えるべき貴重な文化遺産を、近年のエレクトロニクス技術の急激な発達により利用可能となった三次元高精度距離センサや高分解能テレビカメラ等を用いて観測し、その三次元形状や見え、あるいは動きなどの時系列データをデジタルデータとして半永久的に保存する技術を研究・開発している^(1,2)。

現在、このような文化遺産のデジタル保存の重要性が一般に広く認識され、実際に一部ではデジタル化が試みられている。しかしこれらの作業の多くはオペレータの手作業により行われているため、一対象のコンテンツ化に多くの時間と労力、多額の費用が必要となっている。このコンテンツ化作業が自動化できれば、より多くの文化遺産を、短期間に安価にデジタルコンテンツ化することが可能となる。そこで我々は、文化遺産のデジタル化作業の自動化手法を確立することを目指し、

- ・距離センサやテレビカメラからの部分情報を統合して建造物などの文化財の全体的な三次元形状を得る幾何情報取得の研究
- ・色・艶といった文化財の表面反射特性等を得る光学情報取得の研究
- ・複合的な見えを生成する文化財建造物や周辺状況の光学条件をモデル化する環境情報取得の研究
- ・建造物等の文化財に限らず、人間国宝のような匠の技の保存も目指す時系列情報取得の研究

の4要素について研究を進めており、そのためのセンサー系、処理アルゴリズムの開発、およびデジタルコンテンツのパッケージ化に関する研究を行っている。

今回前橋市前二子古墳の修復工事に関しては、特に、最初の幾何情報取得に力を入れた。というのも、修復前の形状については、従来は写真等の二次元情報しか残すことができなかったのに対し、今回はレーザセンサという道具を用いることで、古墳内石室の詳細な三次元形状の取得を可能にしているためである。

修復前の計測は、平成14（2002）年の7月に行い、修復後の計測は平成16（2004）年9月に行った。

なお、本研究室では、幾何情報取得以外にも、光学情報取得、環境情報取得、時系列情報取得の研究を行っている。本報告では、これらについても、現在までの研究成果を概要することとし、今後三次元データを発展利用する1つの方向性として参考にしていただければ幸いである。

2. 幾何情報取得

レーザセンサは三次元計測できるツールであるが、それはちょうど写真をとるのと同じで、センサを設置した位置から見える物体の形状しか計測することができない。したがって、例えば、写真で人物を撮った場合、その人物の後にどんな物体があるか、あるいは、その人物の背中がどうなっているか、伺うことはできない。レーザセンサにおいても同様であり、レーザセンサからの光が届かない部分については、まったく情報を取得することができない。したがって、必然的に複数の情報を重ね合わせて全体として1つの統合的なデータとする必要がある。二次元的に考えれば、いわゆるパノラマ写真がこれに相当する技術であるが、レーザによる三次元計測の場合は、これよりは複雑である。このため、幾何情報の取得には、次に示す3つのステップが必要となる。

1. レーザセンサによる多数の視点からの三次元形状取得
2. これらの距離データを適切に位置合わせする（座標を合わせる）
3. 最後に重なりを調節して全体として統合し1つのポリゴンデータとする

以下で、各項について詳しく述べる。なお、本研究室では、位置合わせと統合に関してそれぞれ新しいアルゴリズムを開発した。その概要については該当箇所の説明する。

2. 1 レーザセンサによる三次元形状取得

レーザセンサには多くの種類があり、要求される精度やセンサの性能に応じて適切に選ぶ必要がある。今回の前橋市前二子古墳内石室の場合、洞窟の形状であるので、少なくとも天井、左右はきちんと計測する必要がある。しかしながら、多くのレーザセンサは、ちょうどカメラと同じように、センサ設置位置から適当な狭い視野（例えば上下60度左右60度など）しか取得することができない。視野が狭くても例えば十分遠方から物体を捉えることができれば計測は比較的容易であるが、石室内部には限られたスペースしかなく、側壁までには十分な距離を確保することができない。その結果、通常のセンサを用いると非常に多数の（狭いエリアの）三次元データを取得せざるを得ず、効率が悪い上に、後に位置合わせのところで述べるように、誤差の蓄積により正しい位置合わせができない可能性がでてくる。

そこで、本研究室では、Z+Fセンサという、周囲360度上下±60度程度の計測が可能なセンサを利用することにした。図1に、通常のセンサの計測範囲とZ+Fセンサの計測範囲を示す（緑部分がセンサ位置、黄色い部分が計測可能エリア）。

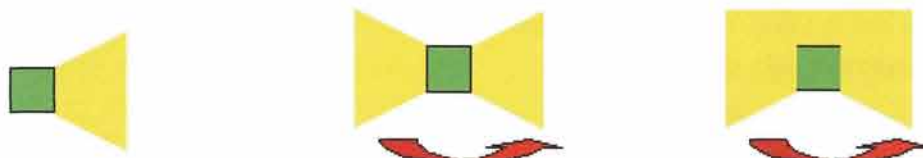


図1 計測範囲の比較（左：従来センサ、中：Z+Fセンサ、右：新Z+Fセンサ）

なお、Z+Fセンサは、この姿勢のまま計測するとセンサの上部の天井と床が抜けるので、実際に計測するときには水平姿勢のものと、センサを寝かせて石室内を輪切りにするような形で計測するような姿勢のものをを用いた。また、2004年の計測では、Z+Fセンサの新バージョンを利用し、図1右のように、左右360度、上下に関しても天頂から120度程度の範囲が一気に計測できるものを利用して効率を上げることができた。

さらに、修復前の前二子古墳内石室の場合、途中にはらみ出し部分があるため、センサを石室の下部に設置した場合、はらみ出し部分の上側に隠される部分が計測できない。また、センサを上部に設置すれば、今度ははらみ出し部分が下側を隠すことになり、計測データの欠損が生ずる。次の図2左は、センサを石室の真中の高さあたりに設置し

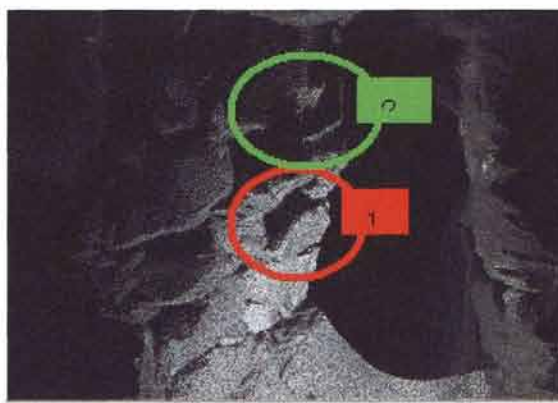
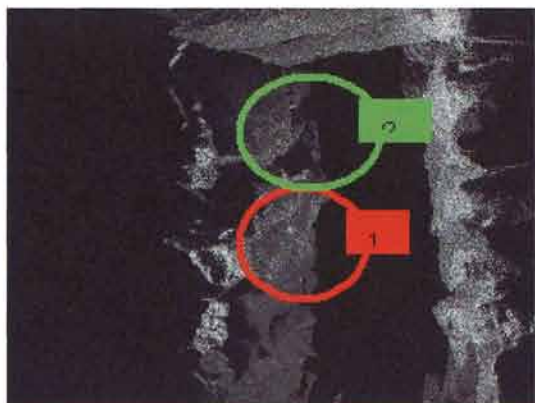


図2 レーザセンサによる計測（左：センサ高中、右：センサ高低）

た場合に取得したデータ3つを位置合わせしたものであり、同図右はセンサを石室下部に設置した場合に取得したデータを2つ位置合わせしたものである。図中1と書いた部分は、上図では計測されているが、下図では計測できていない部分である。これは石がはらみ出しているために、下からの計測では、その石が邪魔になり計測できなかった部分である。また2と印のある部分は、どちらの計測でも欠損が生じている。これはセンサをほぼ天井部分か、それよりも上部に設置しないと計測できない部分であり、どうしても計測できなかった部分である。

なお、修復後についてはこうしたはらみ出し部分がなくなっており、三次元計測するのには比較的恵まれた環境であった。

次の図3に実際の単独の計測距離データ例を示す。上2つがセンサを寝かせてとった計測データであり、下2つは、センサを立てて計測したデータ例である。白い部分がデータが計測できた場所である。それぞれの位置から計測されたデータは、ちょうど写真をとるように、石に隠れた裏側は計測できていないが、逆にセンサの光がたまたま届いた、石の隙間や遠方の門石などをとらえていることがわかる。複数のデータを位置合わせしたこのようなデータの場合、重複部分には多くの計測データ点があるために明るくなる。また、同じ密度で計測しても遠方になると解像度の関係から計測点の密度が高まるため明るく見えることになる。いずれにせよ、これらの画像から単独の計測では石室のごく一部しか計測できず、多数の計測を行うことの必然性がわかりいただけたと思う。そして、これら複数の計測結果をちょうど複数の写真からパノラマ写真を作るように各パーツをきっちりと合わせる作業が必要になる。これは次で述べる位置合わせと呼ばれており、計測する際はそのステップのことも計算に入れながら行わなければならない。

例えば、複数の写真から1枚のパノラマ写真を作るには、

1. それぞれの位置関係を指定すること
2. 隣り合ったコマ同士である程度の「のりしろ」があること

の2点をみたます画像を用意する必要があり、その上でパノラマ画像生成ソフトにゆだねなければいけない。三次元計測の場合も同様である。詳細は次で述べるが、手動で大まかに合わせ、計算機を利用して厳密に合わせる。その際十

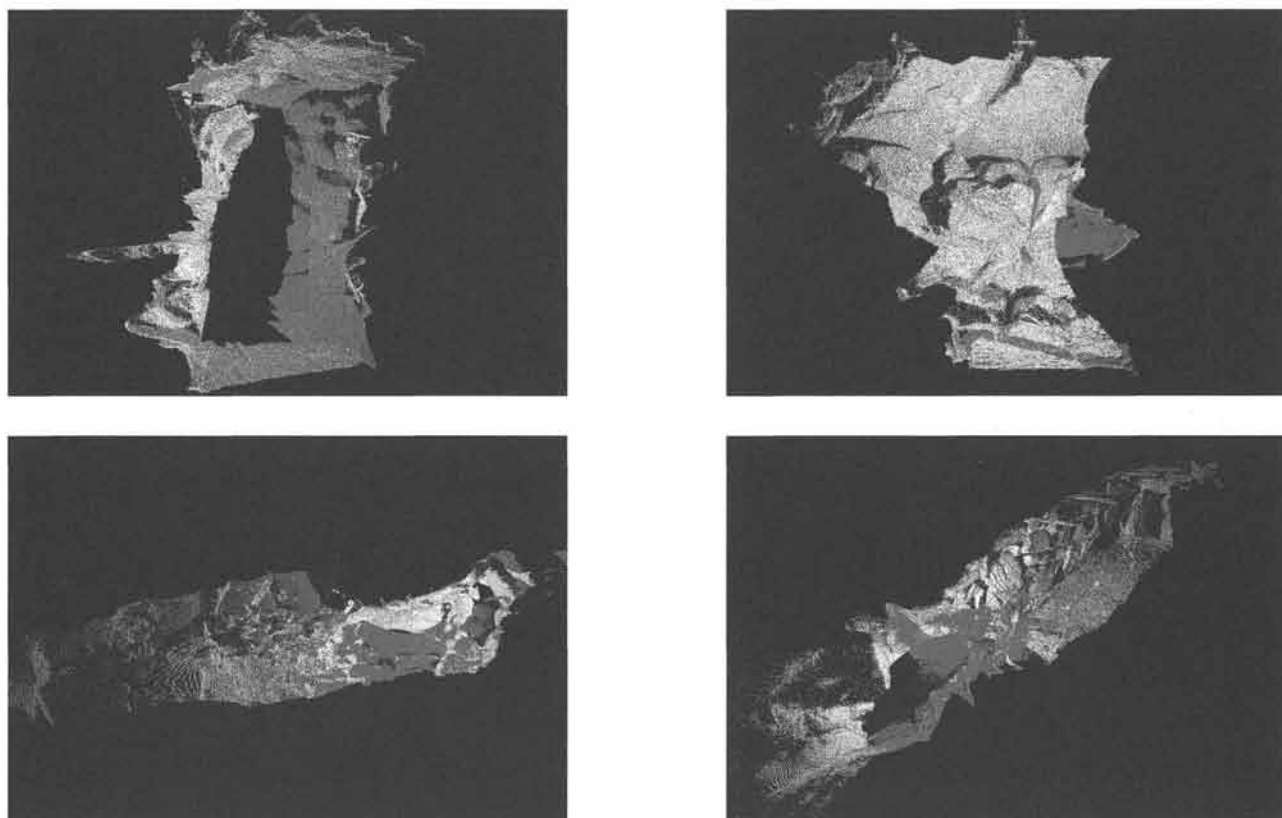


図3 距離データ例（上：センサを寝かせて計測、下：センサを立てて計測）

分な「のりしろ」がないと隣同士がきちんと張りつかないのみならず、計測距離データを単独で取り出した場合の位置関係も把握できなくなる。そこで計測を行う際には、これらの「のりしろ」を十分取りながら行う必要がある。なお、計測距離データに対して、線と面をはりポリゴンとして表現したものをメッシュという。以下では、計測距離データそのままではなく、メッシュ化されたものに対して処理を行うものとする。

2. 2 位置合わせ

位置合わせ問題とは、複数枚の距離データが与えられたとき、これから各データの視点の相対位置関係を求めるものである。この位置合わせ問題に関して、これまで ICP をはじめとする各種の手法が提案されてきた⁽³⁾。しかしこれらは、2-3 枚の距離データといった比較的小規模のデータを対象としていた。我々が対象とする文化財では、時には100枚を超えるデータを扱う必要がある。このため、アルゴリズムは高速である必要がある。さらに、通常の ICP ではペアワイズに位置合わせを行うため、多くの距離画像をつなぎ合わせてゆくためには、位置合わせ操作を繰り返すを行う必要がある。このため、多数のデータを処理するため操作を繰り返して行くと、徐々に誤差が蓄積するという問題があった。これらの問題を解決するために、我々（大石、池内）は、高速に全ての距離画像を同時に位置合わせするアルゴリズムを開発した⁽⁴⁾。

本手法では、Neugebauer のアルゴリズム⁽⁵⁾の拡張となっている。距離情報間の対応として平行移動などにもロバストな点とメッシュ上の対応を用いる。また、2 枚の距離画像を順次位置合わせする手法では誤差の蓄積がおこるため複数枚同時位置合わせも基本的な戦略として用いている。さらに、高速性のため、通常の位置合わせ手法で多くの時間を必要とする対応点探索に、少ない計算量で位置合わせする事が可能なアルゴリズムを開発した。この対応点探索に、OpenGL によるハードウェアアクセラレーションを用いることができるように改善した。

表 1 に結果を示す。左から順に Neugebauer アルゴリズム、提案アルゴリズムを示す。約1000倍の改善が見られている。

表 1 アルゴリズムの実行結果

| 対応点 | Neugebauer (ms) | 提案手法 (ms) |
|--------|-----------------|-----------|
| 248650 | 約 5 時間 | 2381 |
| 66237 | 1238359 | 556 |
| 10355 | 28891 | 81 |
| 2451 | 297 | 24 |

上記のアルゴリズムは、高速性を重視した。このため、外乱に弱いという性格がある。そのため、かなり慎重に初期位置を与える必要がある。さらに、屋内と違い屋外では、しばしば太陽光などの強いノイズ源も存在する。このため、我々（西野、池内）は、ノイズに頑健に位置合わせをおこなうための手法を提案し開発した^(6,7)。

本手法は、特に位置あわせの精度と入力データに含まれるノイズに対する頑健性に重点を置き、ロバスト推定の一環であるM推定量を誤差関数として用いた。特に、関数の連続性に重視し、ローレンツ関数を使用した。探索方法は、1 次微分の誤差も考慮し、黄金分割を利用した共役勾配法を用いた。

このアルゴリズムも、先に述べたアルゴリズムと同様、全ての距離画像を同時に位置合わせできるように、誤差関数の最小化を通して同時位置合わせを行っている。

位置合わせ誤差は、通常の ICP と同様最近傍点同士で評価する。この対応点探索を効率良くかつ正確におこなうべく、2 分木の拡張である、KD-Tree データ構造を用いて点のデータセットを表現した。さらに、ロバストに最近傍点が求まるようレーザー反射輝度や輝度値などの三次元点の付加的属性値の誤差尺度への導入をおこなった。その結果、従来手法では位置合わせ精度の出ない状況でも、正確に位置合わせをおこなえるようになった。

2. 3 距離情報の統合

レンジセンサによって取得した距離データを統合して観測対象全体のモデルを生成する必要がある。上記の位置合わせ結果より得られるのは、座標系が一致したデータ点の集合となる。これらの各データ点は誤差を含んでいるため、複数のデータに共通して表われる部分では、どこが正しい点であるかわからない；すなわち、右から計測した場合の点の位置と左から計測した場合の点の位置が微妙に異なるためどちらを信用したらいいかわからない、という問題が発生する。別の言い方をすれば、計測点群により多数の三角形で計測物体を近似できるが、これらの三角形の位置が誤差によりびったり重なることがないため、もっとも妥当と思われる共通の三角形面を探す必要がある。我々(佐川、山崎、西野、池内)は体積表現法を用いて距離画像を統合する手法を開発している^(8,9)。この体積表現法は、空間をセルに分割する。各セル内で、近傍に存在する点の状況から面がはれた場合のその面からこのセルまでの推定距離を計算し、符号付距離場を得る。この符号付き距離場の中で、ゼロ点を結んでゆくことにより面表現を得る。

文化遺産には巨大でかつ形状が複雑なものがある。さらにたとえば奈良の大仏の計測では、100枚といったように精密に測定するため、巨大なデータ量を扱う必要がある。このため、

1. PC クラスタを用いた並列計算
2. 適応的な解像度による統合処理

という2つのアプローチによる手法を開発し、それらのモデルの生成を可能にした。さらに、色やレーザレンジセンサの反射率といった付加的な情報についても合致をとる手法を開発し、拡散反射成分のみからなる光学情報を持ち、光学情報のエッジを保存したモデルを生成することが可能になった。

3. 前二子古墳の計測

今回の修復事業において、我々は修復前と修復後の2回(予備計測も含めると4回)の計測を行った。2節の冒頭でも述べたが、修復前は水平360度、上下±60度のZ+Fセンサを、修復後は水平360度上下天頂より150度という新Z+Fセンサを利用した。

3. 1 修復前計測とその結果

平成14(2002)年7月に5日間かけて計測を行った。2節で述べたように、センサの計測範囲の制約とはらみ出し部分による隠れのために、Z+Fセンサを立てて計測したり、寝かせて計測したりして、多数の距離画像を取得する必要があった。図3に示したのは、この修復前計測時のサンプルデータである。次の図4に計測風景を示す。

これらを位置合わせすることで修復前の前二子古墳石室の三次元計測ができた。次の図5にデータを位置合わせし

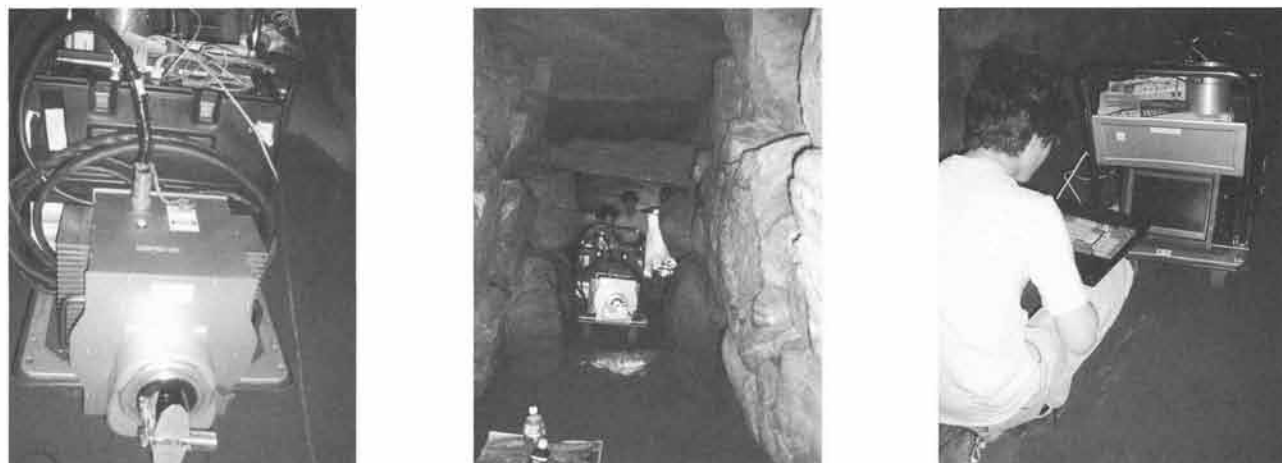
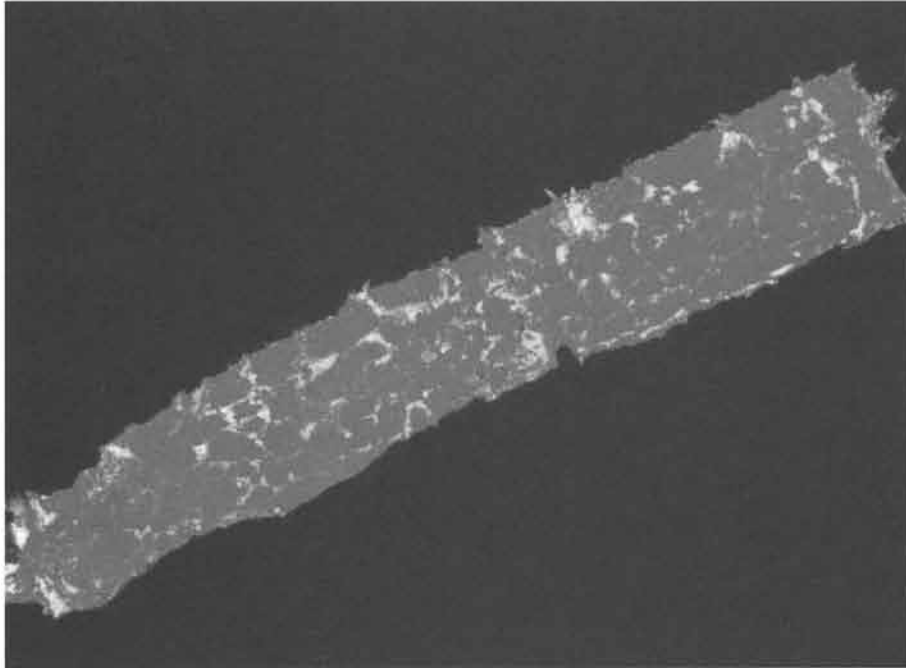


図4 修復前計測の様子(左:使用センサ、中:計測中、右:機器操作)

た結果の図を示す。

さらに、10月には、石室上部の葺石の計測も行った。これは5枚の距離データからなり、センサの性質から屋外で



左が入口、右が玄室、くぼみが玄門



図5 修復前の位置合わせが済んだメッシュデータ（上：全体、下：入口から玄室を望む）

はノイズが残るものの、位置合わせが済んだ葺石の様子を図6に示す。古墳下側から5回計測しただけであるので、右図に示すように残念ながら古墳上部からしか見えない側のデータに若干の欠損が見られる。なお、色の濃さは、計測データの密度の違い（重なりがあったり、センサに近いと濃くなる）によるものである。

3. 2 修復後計測とその結果

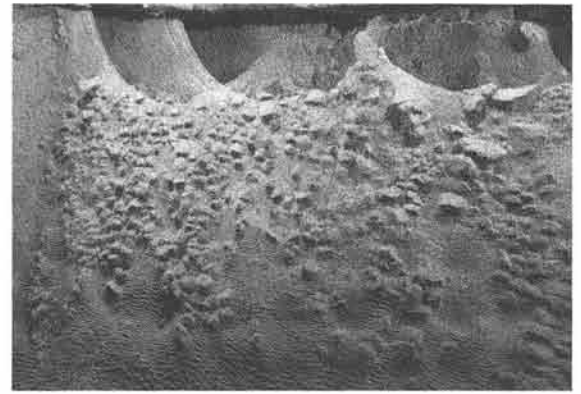
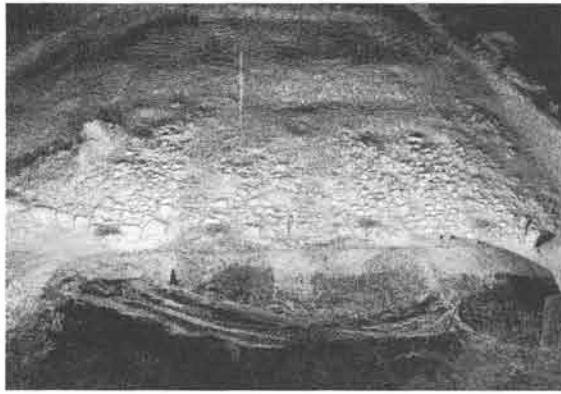


図6 修復工事開始直後に露出した葺石の様子（左：石室入口から、右：下側が墳頂方向）

最後に、前二子古墳修復後の平成16（2004）年9月に、修復後の石室の計測を行った。今回は新Z + Fセンサを利用した。図7に新センサで計測した距離データの例を示す。

この図からわかる通り、新センサを利用すると、センサ下部以外は一度に計測ができる。さらに、修復後ははらみ

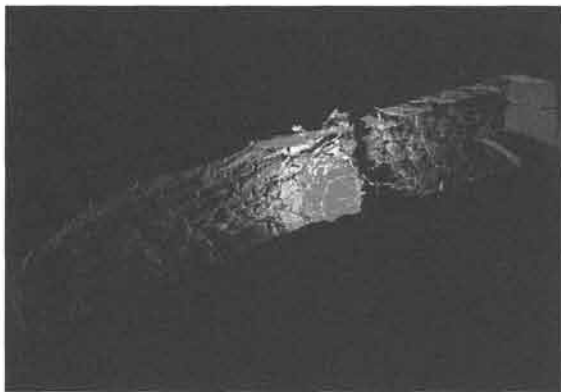


図7 新Z + Fセンサによる計測距離データの例

出し部分がないために、センサを上下に移動せずとも一度の計測で隠れがなく、広範囲が計測可能である。これらのデータを位置合わせした最終結果を図8に示す。

4. まとめ

本章では、文化遺産デジタル保存の研究の一環として東京大学池内研究室が行ってきた4つの技術開発、すなわち、幾何情報取得、光学情報取得、環境情報取得、時系列情報取得のうち、幾何情報取得技術を利用して、前二子古墳の三次元デジタル計測を行った記録について述べた。今回の計測では、修復前と修復後の2回にわたって計測することで、両者の比較ができるとともに、現存しない修復前の状態を三次元的にデジタル保存することができた。また、今後、こうした三次元デジタルデータを公開することで、実際に現地を訪れなくとも古墳の内部を歩くことができたり、また、修復される前の石室内部を、仮想空間として提供することで、安全にかつ遠方から修復前石室の中を歩くことができたりするようになる。

こうした社会的文化的に大きな応用も考えられる。

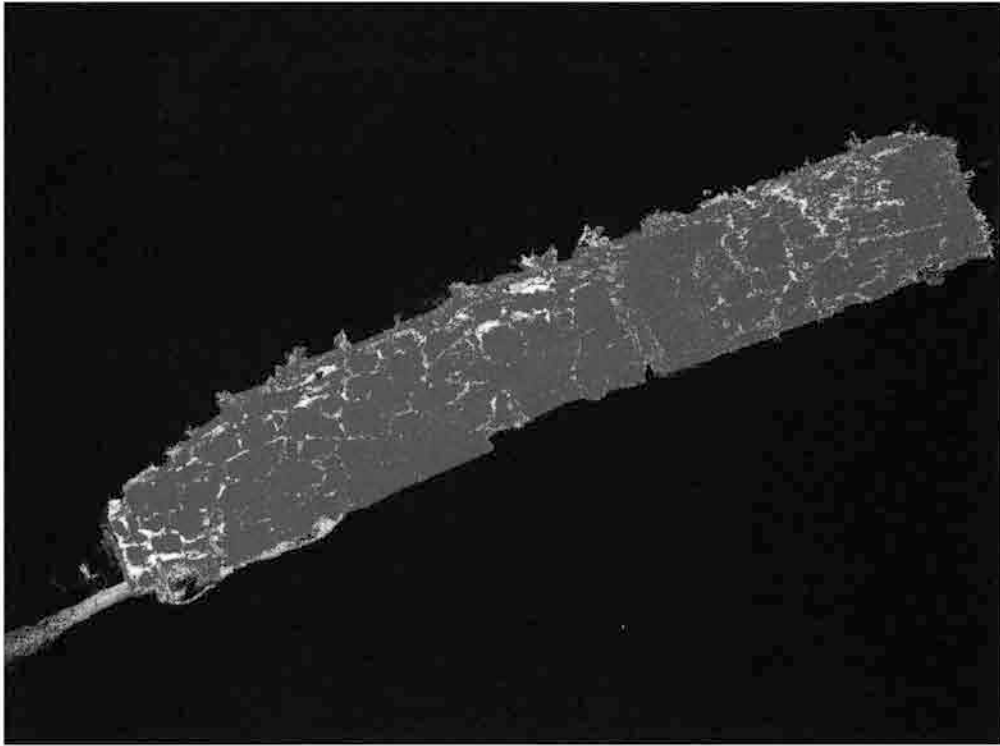


図8 修復後の計測距離データの位置合わせ結果（下図中央は計測センサ機器）

池内克史、影沢政隆、長谷川仁則、佐川立昌、増田智仁、猪狩壮文、上原康彦、小野晋太郎、山田陽介、園田展人、
崎田健二、富樫政徳

参考文献

- (1) K. Ikeuchi, Y. Sato, Modeling-from-reality, Kluwer Academic, Nov 2001.
- (2) D. Miyazaki, T. Ooishi, T. Nishikawa, R. Sagawa, K. Nishino, T. Tomomatsu, Y. Takase, K. Ikeuchi, “The Great Buddha Project: Modelling Cultural Heritage through Observation” Prof. Of 6th VSMM, 2000.
- (3) P.J. Besl and N. D. McKay, “A Method for Registration of 3-D Shapes,” IEEE TPAMI, 14(2) : 239-256, Feb.,1992.
- (4) 大石岳史 「文化財のデジタル保存と復元」東京大学大学院学際情報学府修士論文、2002。
- (5) P. J. Neugebauer, “Reconstruction of Real-World Objects via Simultaneous Registration and Robust Combination of Multiple Range Images,” Int. J. Shape Modeling, 3(1&2) : 71-90, 1997.
- (6) K. Nishino, K. Ikeuchi, “Robust Simultaneous Registration of Multiple Range Images,” 5th ACCV, pp.454-461, Jan., 2002.
- (7) 西野 恒、池内克史 「大規模距離画像群の頑健な同時位置合わせ」信学論、DII
- (8) R. Sagawa, K. Nishino, K. Ikeuchi, “Robust and Adaptive Integration of Multiple Range Images with Photometric Attribute,” CVPR, Vol. 2, pp.172-179, 2001.
- (9) 佐川立昌、西野 恒、倉爪 亮、池内克史 「大規模観測対象のための幾何形状および光学情報の統合システム」情報処理学会 画像の理解・認識シンポジウム (MIRU2002), 2002.