

アンコール遺跡・バイヨン寺院のデジタル化に成功

東京大学大学院 情報学環 (生産技術研究所) 池内研究室

東京都目黒区駒場 4 - 6 - 1 東京大学生産技術研究所 Ee409

TEL: 03-5452-6242, FAX: 03-5452-6244, Email: ki@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

概要

東京大学・池内研究室は、日本国政府アンコール遺跡救済チーム (Japanese Government Team for Safeguarding Angkor (JSA)、団長中川武早稲田大学教授) と協力し、アンコール遺跡内バイヨン寺院のデジタル化に成功した。

アンコール遺跡群は、9世紀から14世紀にかけてアンコール王朝が、現在のカンボジア・シェムリアップ近郊にクメール文化の粋をつくして築いたものである。なかでも、図1に示すアンコールトム・バイヨン寺院は、複雑で密実な3層のテラス構造、当時の三大宗派を統御した凡宗教的なモチーフと躍動感あふれる市民生活模様を表現した浮き彫りをもった2重の回廊、穏やかな微笑みをたたえた膨大な数の巨大な尊顔像など、建築学上非常にユニークな建築物としても知られている。また、この寺院は、長い年月を経た現在、崩壊の危機に瀕していることでも知られている。

池内研究室では、この160m×140m×45mの大規模石造建築物であるバイヨン寺院に対し、延べ1500人日を越える計測ミッションを行い、14600以上の方向から、新たに開発したレーザー距離センサーなどを用いて距離データを取得した。これら0.2TBを超える距離データを繋ぎ合わせる並列処理ソフトウェアを開発し、並列計算機の上で処理を行いバイヨン寺院全体のデジタルデータを得た。

本発表では、デジタル化に使用したハードやソフトを説明する。次に、得られたバイヨン寺院全体像、173の尊顔像、2重回廊内の浮き彫り像、32個のペディメント像を紹介する。デジタル化された対象としては、世界最大規模を誇っている。また、封印されたペディメントは、これまで写真すら存在しなかった。

一般に、こういった文化財のデジタル化は、1) デジタル化することで、今後の修復に際しての基礎データを提供する。また、最悪の事態が起こり、バイヨン寺院が倒壊した際にも、復元に対する強力な対応手段となる。2) デジタル空間での表現を用いて、文化財の各種の諸元の測定や、解析が文化財をいためることなく可能になる。3) 一般のユーザがインターネットやデジタルテレビ等の手段で家庭から容易に各種の文化財に接することができる。といった3つのメリットがある。

1. はじめに

我々の研究室では、近年発達が進んだ情報処理技術を用いて文化遺産をデジタル化する試みを行ってきた。この研究は、文化財科学的な面と情報学的な面の両面の意義があると考えている。

文化財科学的意義としては、現存する文化遺産の多くは劣化・天災・人災によって破壊・消滅の可能性があるため、デジタルデータ保存の重要性が挙げられる。また、得られたデジタルデータをコンピュータ処理することにより、人間の目では比較できないような差異を検出し、直接的に測定できないようなデータを得ることにより、文化財研究に新しい側面を提供できる。さらに、デジタルデータを利用し、コンピュータ合成により古の姿を再現することで、文化財の普及発展に寄与し得る。

情報学的意義としては、一般に画像処理による実物体のモデル化という技術分野に属するが、文化財は対象としてデジタル化する価値が高く、先進的な技術を開発する理由づけとなる。ことにバイヨンのような大規模で複雑な対象では、それ専用の特殊なセンサーを開発する必要があり、先端計測技術の進展に繋がる。さらに、非常に多量のデータを処理するソフトウェア開発といった情報学的課題も提供する。

我々は、これらの技術開発を行う際の対象としてカンボジアバイヨン寺院を選び、日本国政府アンコール遺跡救済チーム（JSA 団長 中川武早稲田大学教授）と協力し、この寺院のデジタルアーカイブプロジェクトを進めた。バイヨン寺院は 150m 四方の敷地に建てられた石造りの巨大な建造物であり、中央塔は、45m もの高さがある。2 重の回廊や 52 本の塔など、建築学的にも非常に複雑な構造物とされている。さらに中央棟の亀裂の拡大から崩壊の危機に瀕していることも知られている。

JSA は 1994 年より 10 年半の第一、第二フェーズにおいて、バイヨン北経蔵の部分解体再構築保存修復工事とバイヨン寺院全域の保存修復のためのマスタープランを策定した。これらをもとに本年 2 月より 5 年間の予定で、カンボジア政府アプサラ機構およびユネスコとの協力のもとに第三フェーズとしてさらにバイヨン寺院の保存修復工事を進めている。

バイヨン寺院は、大規模且つ複雑な構造のために、従来のセンサーでは計測できない領域が多く存在する。プロジェクトの重要な課題の一つは、このような領域を計測するためのセンサーのハードウェア開発であった。また、対象が大規模であるため、扱うデータ量が膨大となり、大規模データを扱うモデリングソフトウェア技術の開発も必要となった。

本発表では、このバイヨン寺院デジタルアーカイブプロジェクトに沿って、大規模文化遺産のモデリング手法や計測システムについて説明し、その後得られたデジタルデータについての結果を紹介する。

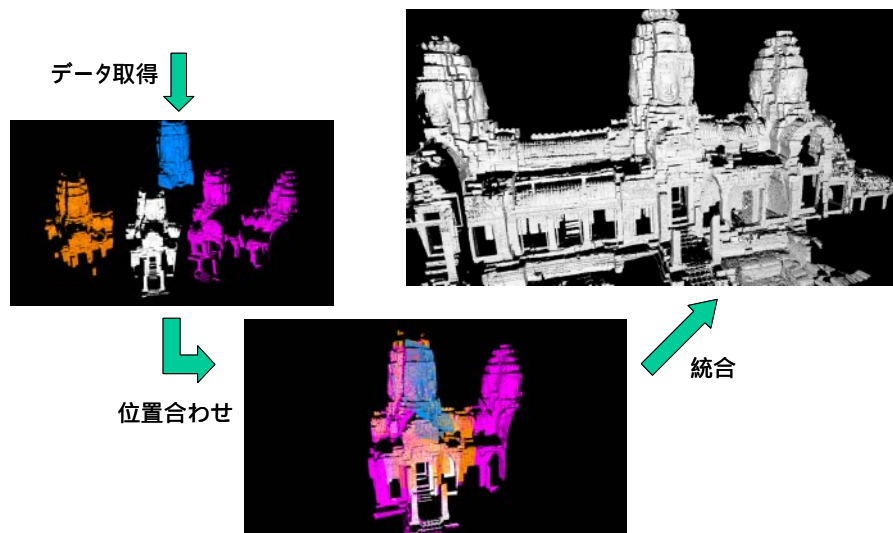


(図1 アンコールトム・バイヨン寺院)

2. バイヨン寺院全体のモデル化

データ獲得

一般にモデル化処理は、図2に示すようにデータ獲得、位置あわせ、統合といった3つのステップからなる。データは対象にレーザー光線を投影し、その反射時間から距離を測定する距離センサーで得られる。全体のモデル化では、対象の全ての方向からデータ獲得をする必要がある。対象が大規模になればなるほど測定回数が増加することになる。



(図2 デジタルデータ取得の3ステップ)

パイヨン寺院は、非常に大型でかつ複雑な建築物であり、周辺に足場を組み三脚で固定して測定するといった従来型のレーザーレンジセンサー計測法ではカバーしきれない場所が多々ある。また計測距離や画角制限のために、従来型センサーでは測定できないような狭隘部も多い。そこで、このような箇所を計測するために、気球センサー、木登りセンサーといった新規センサーを開発した。これらのセンサーの特徴は、センサーがデータ取得中に移動することである。このため、この動きをどのように推定するかという情報学的に興味深い問題を解決する必要があった。

気球センサー

地上据え置き型のセンサーによる計測では、大規模構造物の上部を計測することは難しい。大型のクレーンや足場を組む事によって、ある程度高い位置からの計測を行う事は可能であるが、観光客等の便宜も考えるとその設置場所には多くの制限がある。さらに、パイヨン寺院中央塔は、高さが45mもあり、足場による計測も現実的ではない。

この問題を解決するために、図3(a)に示すような空中から計測可能な気球型レーザーレンジセンサーを開発した。このセンサーは気球の下にレーザーレンジセンサーを吊り下げて、上空から計測を行うシステムである。図3(b-c)参照。気球は風などの外力により揺れるため、計測中のセンサーの移動にもなって、得られる距離データには歪みが生じてしまう。この歪みの影響を最小限に抑えるために、高速に計測可能なセンサーを設計・開発した。さらに得られたデータとセンサーに搭載された画像を比較することでセンサーの動きを推定し、これに基づき歪みを補正するアルゴリズムを開発することで、十分な精度の距離データを取得する事が可能となった。図3(d)にデータの補正の様子、ならびにそれを地上からのデータとマージした様子を示す。



(a) ハードウェア

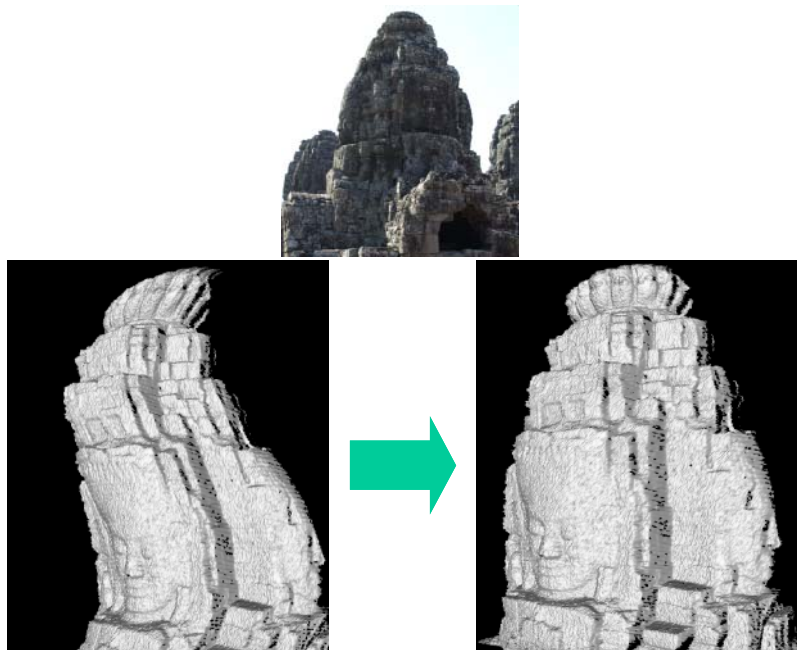


(b) 離陸時

(図3 気球センサー)



(c) 気球センサーとバイヨン寺院



(d) データ補正の様子
(図3 気球センサー)

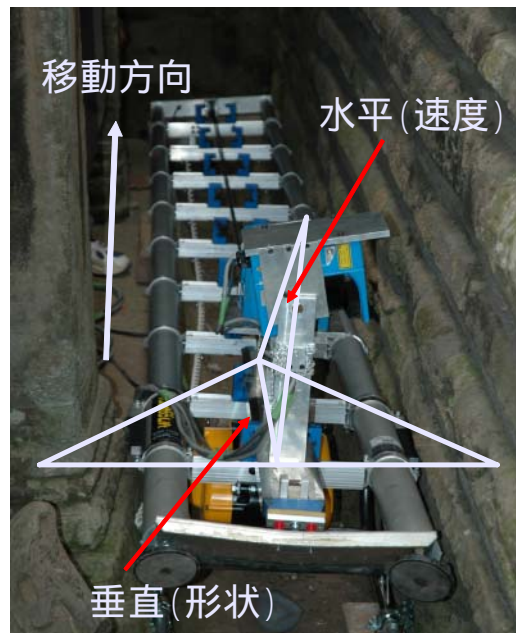
木登りセンサー

バイヨン寺院は、2重の回廊と3重のテラスなどの複雑な構造のため、多くの狭隘部が存在する。こういった場所は、市販のセンサーでは、距離が近すぎたり、測定角度が急すぎたりといった問題のため、十分な精度でデータが得られない。そこで、狭隘部測定のための移動式距離センサー（木登りセンサー）を開発した。木登りセンサーは、伸縮可能なはしごに取り付けたリフトに、2台のラインセンサーを搭載した構造をしている。図4（a-b）に示すように、ラインセンサーの1つは移動方向に垂直に、もう1つは水平になるように設置されている。木登りセンサーは、壁に立てかける或いは地面に置いた状態で計測を行う。リフトに搭載した2台のセンサーは、はしごに沿って移動しながら計測を行う。

このセンサーは、垂直スキャンから得られた頂点データと、水平スキャンから得られたセンサーの移動速度から形状データを求める。はしごに対して垂直方向のスキャンは、リフトの移動に従って周囲を走査するため形状データを含んでいる。ただし、正しい形状データを得るためにはセンサーの移動速度が必要である。水平スキャンから得られる時空間距離画像からはセンサーの移動速度が計算され、これを基に垂直スキャンから得られた頂点データを並べ直し、正しい形状データが求められる。図4（c）参照。

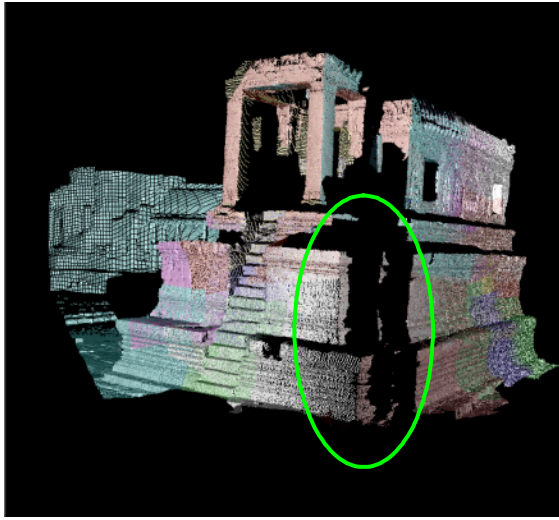


(a) 測距部

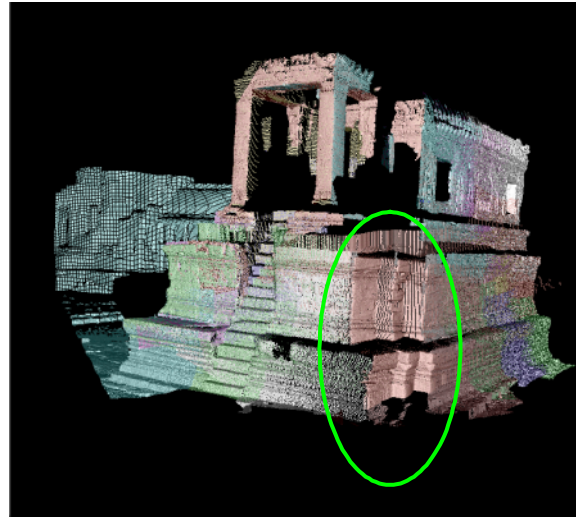


(b) 移動機構

(図4 木登りセンサー)



使用前



使用後

(c) 木登りセンサーデータ
(図4 木登りセンサー)

位置あわせ処理

バイヨン寺院の全体計測では、上に述べた新規開発のセンサーに加えて、従来型のセンサーであるCYRAXやZ+Fセンサーも併用し、14600枚以上の距離画像を100日を越える計測から得た。

これらの得られた部分データは、おのおののセンサー位置にもとづいた座標系で表されている。全体像をつくるために、おのおののデータの相対位置姿勢を求める位置合わせ処理を行う必要がある。

2つの重なり合う部分データの相対位置姿勢を推定する手法としては、2つの部分データ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手法が、以前から存在した。これらの処理を繰り返し行う事によって最適解を求める手法である。ただし、対象が大規模になると探索回数の増加から時間が非常にかかるという問題があった。そこで、バイヨン寺院のデータ像作成のため、2つのソフトウェアを新規開発した。

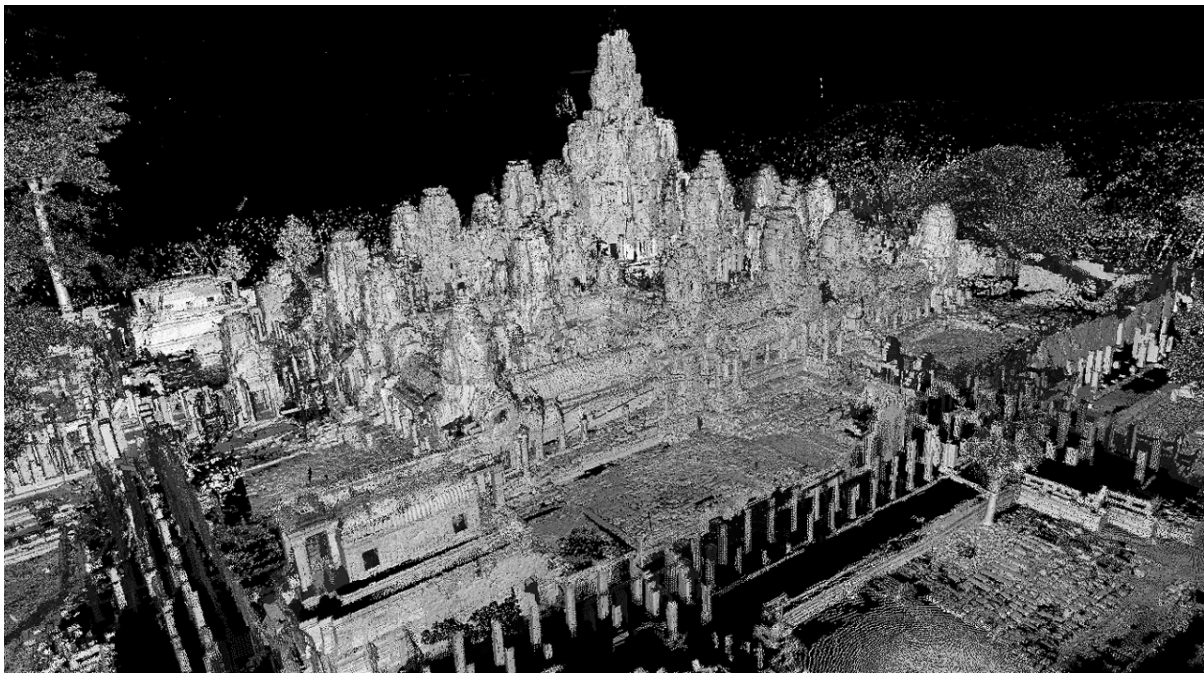
まず、第一のものは、高速性を目的としており、距離センサーの性質を利用することで測定方向のみ探索することにし、さらに、この処理をグラフィクスハードウェアで行えるようにアルゴリズムを改良した。このソフトウェアは、通常的位置合わせアルゴリズムに比して100倍程度高速な位置合わせアルゴリズムとなっている。これを、グラフィクスハードウェア内蔵のノートブックに実装し、毎日の計測が終了するごとに、現場でおのおののデータの位置合わせが行えるようになった。

第二のソフトウェアは、精密に位置合わせが行えるようにしたものである。2枚の位置合わせアルゴリズムを繰り返してゆくと、徐々に誤差が蓄積するという問題がある。特に、バイヨン全体像のように3000枚以上の距離画像を処理する場合にはこの問題が顕著となる。そこで、多数の部分モデルを同時に位置合わせする手法を開発した。多数の部分モデルを順次位置合わせするのではなく、全ての部分モ

デルの相対位置を同時に推定する。一方において、バイヨン全体像の場合、総データ量が非常に膨大で、1台のPCには載らない。そこで、計算時間やメモリ使用量を考慮しつつ、PCクラスタ等の分散メモリシステム上で並列に同時位置合わせする手法を開発した。この処理は、全体像のデータを大学に持ち帰ってから行った。

統合処理とその結果

位置合わせされた複数の部分モデルを統合して、1つの全体モデルを生成する。複数の部分モデルの間には重なり領域があるため、この領域を統合して1つのモデルに変換する必要がある。複数の部分モデルを1つのボクセル空間内に投影し、ボクセルからの符号付距離による陰関数表現する事によって統合を行う。大規模データを扱う際には使用するメモリ量が大きくなるため、並列化したボリュメトリックな統合手法を開発した。この手法により計算時間の問題も同時に解決する事が可能となった。図5にこれらの処理により得られたバイヨン寺院の全体デジタルデータを示す。これは、2005年12月までの測定結果であり、1700枚以上の距離画像から成り立っている。



(図5 デジタルバイヨン)

データの利活用

バイヨン寺院の平面図、立面図としては、50年前にフランスの修復チームが手計測により作成したものが現存するだけであった。今回のデジタルデータを利用しこれらを再作成することで、既存図面の精度を評価することができる。さらに、平面図や立面図のみならず、任意断面での形状も得られる。また今回の計測から、バイヨン寺院全体が、東西の軸から0.94度反時計回りに傾いていることも確認できた。

バイヨン寺院は、これまで10年間日本国政府アンコール遺跡救済チームが、保存修復作業を進め、第一・第二フェーズを終了した。これらの結果をもとに、マスタープランが作成され、第三フェーズの修復作業にはいる。この際、これらのデジタルデータが修復作業計画に有益であろうと期待されている。

第一・第二フェーズの調査からバイヨン中央塔の亀裂の拡大が確認された。最悪の事態が発生し、バイヨン中央塔が崩壊した際にも、これらのデジタルデータをもとに、再現することも可能となると思われる。

3. バイヨン寺院細部のモデル化

バイヨン寺院は、2重の回廊、3重のテラスといった全体形状の複雑さ以外にも、数々の魅力ある細部がある。52の塔の各4面に刻まれた微笑をたたえる尊顔、封印され一般の観光客の目にふれられないようにされた32個のペディメント(門飾り)、2重の回廊に刻まれた生活感あふれる浮き彫り像である。我々は、これらの細部に関してもデジタル化を行った。

尊顔のモデル化

バイヨン寺院には中央塔を含めて52本の塔があり、各塔には尊顔と呼ばれる神の顔が刻まれている。破損しているものも多いが、現在、全部で173の尊顔が確認されている。我々はこれら全ての尊顔をモデル化し、デジタルライブラリの作成を行った。デジタル化は主に、CYRAXセンサーをもちいて1つの尊顔につき3回から7回の計測を行った。また、尊顔上部に関しては、前出の気球センサーを用いてデータの補完を行った。図6に得られた尊顔ライブラリーを示す。

武蔵野美術大学の朴助教授の研究によれば、これら173の顔は、デーヴァ(男神)、デヴァター(女神)、アシュラ(悪魔)の3種類に分類できるのではないかとされている。我々は取得した尊顔3次元デジタルデータを用いて、これらの主観的評価について科学的な観点からの考察を行った。朴助教授らによる3種類の代表的な尊顔を基準に、教師付き統計的手法を用いることでこれを確認した。この解析の結果、デーヴァ、デヴァター、アシュラの3つのグループ化がクラスター分析で明確となった。

教師なしクラスター分析を行ったところ、同じ塔の4面と位置的に近い塔の尊顔でクラスターが形成されることが示された。もし、複数の尊顔制作職人チームでこれらの顔が制作されたとすると、同一チームが近隣の尊顔を制作した可能性を示唆している。



(a) 距離アーツのみ



(b) アソメナヤイさ

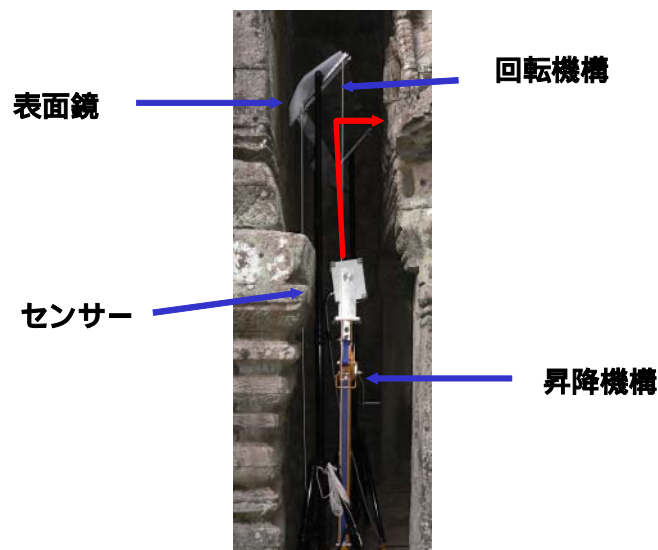
(図6 尊顔ライブラリー)

ペディメントのモデル化

バイヨン寺院のペディメント（門飾り）には、精細な文様が施されている。この文様が彫り込まれた当時は、ペディメントの前に十分な空間があったと考えられるが、増改築や意識的隠蔽の結果、現在は壁が眼前に迫り、一般には観察できない。特に、バイヨン寺院下部に存在する隠蔽された16個のペディメントには、完全な写真すら存在しなかった。

これらのペディメントは、眼前に壁がせまっているため奥行きもほとんどなく、さらに高所にあるため、センサーを正面に設置して計測する事は不可能である。そこで、図7に示すような鏡を用いて計測するセンサーを設計した。平らな表面反射鏡越しにレーザーレンジセンサーを用いて計測した場合、得られる形状データは左右反転しているだけである。つまり鏡越しに計測を行い、得られたデータを反転する事によって正しい形状データを得る事ができる。また鏡とセンサー間の距離を調節する事により、センサーから対象まで十分な距離を取る事ができ、計測距離の問題も解決する事ができる。このシステムは図7に示すように鏡部とレーザーレンジセンサー部の二つの部分からなっている。鏡は高さが調節可能な2台の三脚によって支えられており、支点を軸として回転させる事が可能である。レーザーレンジセンサーは高さや方向を調節可能なリフトに載せた状態で鏡の下に設置されている。鏡を計測対象の正面に斜めに設置し、高さや方向を調節しながら、鏡に映った対象をレーザーレンジセンサーによって計測する。

我々は、今回鏡センサーによって、図8に示すように32個全てのペディメントに施された文様の計測を行った。これらは、世界初の公開となる。



(図7 鏡センサー)



(図8 ペディメント)

回廊の浮き彫りのモデル化

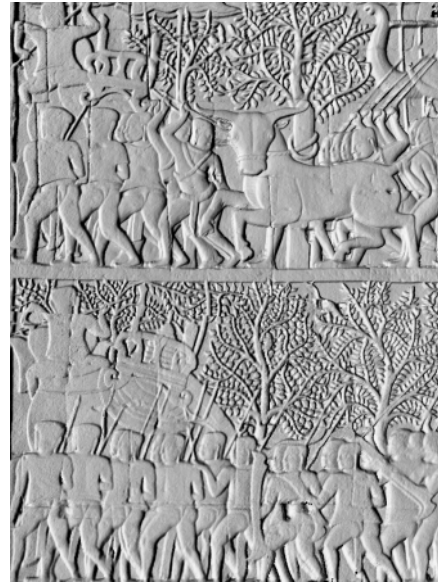
バイヨン寺院は2重の回廊からなっており、内回廊、外回廊に精細な浮彫りが刻まれている。これらの浮彫りはカンボジアに伝わる神話や、バイヨン寺院創建当時の人々の生活を表している。特に人々の生活を表した浮彫りは珍しく、考古学的資料として非常に貴重だとされている。

我々はこれまでに内回廊・外回廊のほぼ全面の浮彫りの計測を行った。この浮彫りの計測にはVivid910を用いた。図9は外回廊東南面に刻まれた浮彫りをモデル化した結果を示している。写真と比

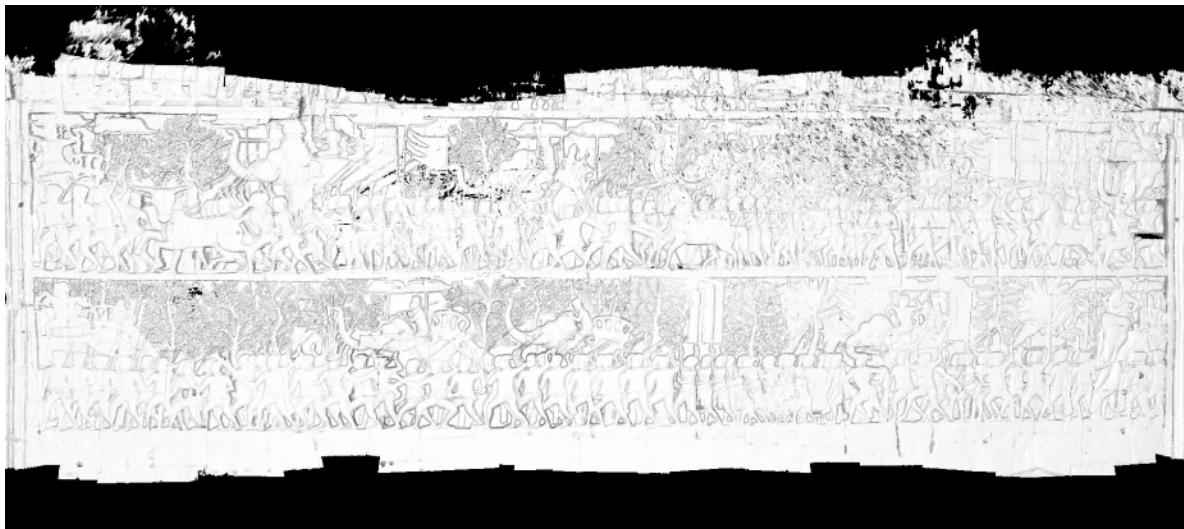
較しても、微細な形状までモデル化できている事が見て取れる。計測回数はこの部分のみでおよそ 100 回である。全体では約 3800 回の計測を行った。



(a) 写真



(b) デジタル像



(c) デジタル像

(図9 内回廊浮き彫り)

5. おわりに

本発表では、東京大学池内研究室が行っているカンボジアバイヨン寺院のデジタルアーカイブプロジェクトについて述べた。プロジェクトは、バイヨン寺院全体のモデル化と細部のモデル化に分けられる。今後は、得られたデジタルデータの保存修復作業へのさらなる利活用、得られたデジタルデータの解析の深化を考えている。これと並行し、大規模モデルの表示手法を開発し、取得したモデルをインターネットなどを通じて一般に公開する事も検討している。

本研究の一部は、文部科学省・科学技術試験研究委託費・リーディングプロジェクト「大型有形・無形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」、また他の一部は、科学技術振興機構・戦略的基礎研究事業「高度メディア社会の生活情報技術」の支援を受けた。さらに、日本国政府アンコール遺跡救済チームの協力も頂いた。関係諸団体に感謝の意を表す。