

池田地質環境班
早稲田大学理工学部建築学科教授 前田寿朗



機軸計設置風景

バイオン寺院での機軸計測定

私たちがバイオン寺院で機軸計測定を行ったのは、2003年8月と2004年9月の2回で、それぞれ2、3週間の行程です。私自身アジアの国に行くのは初めてであり、数名の学生を連れての長期測定も初めてでしたので、いろいろなノウハウが得られた貴重な経験でした。特に、多くの機軸計を機内持ち込みで何とか運搬し、現場の中で機軸計を設置しかつ観光客を誘導し、測定時の30分間程度は不動で遺跡の静寂に身を委ねた経験は、すべてのメンバーにとって良思い出になったことと思います。

機軸計というのは、いろいろな原因によって地盤が揺れている現象を、潮の満ち引き、波浪、工事、工場、交通、歩行等の、ありとあらゆる振動源から生じているものです。そのため、自分の好みに合わせて対象となる構造物を揺らす際にはいますが、構造物を揺らすための機軸計を使用する必要もなく、機軸計と呼ばれる計測器を振えていけば、どこでもすぐに測定することができます。



機軸計設置風景

ができます。写真に示すのは、現地ワーカーの人たちにお願した塔頂縁での計測器設置ですが、場所作業での身の動きのみならず、好奇心を持って測定を手伝ってもらえたので、特に2年目は手廻りでの機軸計設置、移動、搬取等を任せることができました。

私たちのミッションは、バイオン寺院の崩壊要因の推定ならびに修復計画に役立ちような測定を行うことにあります。建築物の構造を専門とする私たちが扱っているのは力学的な要因ですが、その中でも数割は生じている劣化もあれば、何かしらの要因に応じて短期間で振動的に生じた劣化の蓄積もあると聞かれます。後述に関して、カンボジアは地震国ではなく地盤沈下の恐ろしい国なので、周囲の強風による圧力のみによるみや移動の可能性を検討対象とし、バイオン寺院およびアラサートスラアでの機軸計測定を行いました。

これらの遺跡構造物は、モルタル等を介し、砂岩やラテライトを積み重ねただけの構造といわれる測器設置形式で作られています。普段、鉄筋コンクリート構造や鉄骨構造を心配している私たちにあっては、まさかこのような不連続な空積み構造物のような振動特性を持っているかが興味の対象となりました。バイオン寺院は高さ40mにも達する中央主塔と付属する中央副塔、ならびに敷地内で副塔により結ばれた敷地にも交差副塔から構成されています。測定結果、中央主塔は通常の建築物と同様な振動形で揺れますが、同様な高さの建造物に比べると、非常に早く揺動し、砂岩が密度が高まっている影響が現れます。

図に示すような、着眼

ISAバイオン測量班
東京大学大学院情報科学専攻教授 池内克史



図2 バイオン遺跡用の3Dデジタルモデルデータ
大きい場合当然一回の3D画像に入りきれないため、各方向から3D画像を得ることを繰り返して行

我々の研究室は、大規模文化財の3Dデジタルアーカイブ化のための手法を開発している。大規模文化財を効率よく計測できるハードウェアの開発、大規模形状データを処理できるソフトウェアの開発、文化財の色を太陽光の影響を受けずに効率よく対象に貼り付けるソフトウェアの開発などが主な研究テーマである。このプロジェクトは、本来技術開発が目的であるが、その技術の応用対象として、3Dモデル共同でバイオン遺跡の3Dデジタル化に取り組んでいる。

バイオン遺跡は3つの点で非常に魅力的な対象である。まず第一にその巨大さ。これまでに我々が対象としてきたものは、奈良や鎌倉の大仏といったせいせい10m程度の大きさであった。バイオン遺跡は一边が100mもあり、データ量が幾億に膨大になる。一般に、文化財を3Dデジタル化するためにはレーザレンジセンサという測定装置で、2Dのデジタル写像に対応する、3Dデジタル画像を得る。2Dの写像が画像の各点の色を保存するのにに対し、画像の各点でその点までの距離が保存されている。レーザレンジセンサを用いて、写像を撮るように、3Dデジタル画像を撮る。対象が

く必要がある。この処理のためには、全ての3D画像セットを計測機のメモリの上に載せる必要がある。バイオン寺院のような膨大なデータセットでは、一台の計測機にはデータが乗り切れない。さらに、サイズ面だけでなく処理速度でも留意を要する必要がある。ソフトウェア技術者として、バイオン遺跡を素材にソフトウェアの高度化を研究することは、非常に興味深い。

第二の魅力は、その複雑な構造にある。40mにも達する中央塔、多くの尊頭、石版で隠されているペディメント、非常に詳細な浮き彫りなど、通常のセンサでは測定できないものが多く存在する。

先に述べたように、3Dデジタル化のためには、レーザレンジセンサと呼ばれる測定装置を用いる。



図2 バイオン遺跡の3Dデジタルモデルデータ
その構造の複雑さのため通常の市販のレーザレンジセンサでは測定できない部分が多く存在する。そのため、継続

ほとんどのレンジセンサをバイオン遺跡用に当研究室で開発した。

まず、第一のものは図に示す高所から計測可能な気球搭載型のセンサ。これにより中央塔の上端などを測定可能となった。また、バイオン寺院には、壁と壁に挟まれた狭い部に美しいペディメントが隠されている。これまで正確な写真すら存在しなかったと聞く。鏡を使って鏡映りを覗き込む形で計測できるセンサを構築し、今回初めてそれらの正確な3Dデータを得た。構造解析には、回廊全体の3Dデータを得ることも重要である。伸縮式のレール上を自走し

著者略歴

1943年 大塚町に生まれる
1970年 東京大学大学院工学部建築学科修士課程修了
1974年 了了工学博士
1979年 マリテック・セツツ・エイト大人
1986年 工知能研究所 助手
1986年 東京大学大学院工学部建築学科修士課程修了
1986年 東京大学大学院工学部建築学科博士課程修了
1986年 東京大学 生産技術情報センター 教授
2003年 JSAと共同でバイオン寺院で3Dデジタル化。

ながら進行方向に距離を測定するセンサも開発した。

第三の魅力は、大きな規模でありながら細部に多くの浮き彫りがあり、173もの尊頭があるといった階層的なデータ構成である。このような対象をインターネットを用いて展示する際、全体と細部の表示、拡大をどのように行うのかといったソフトウェア工学的にチャレンジングな問題を多く解決する必要がある。

それ自身が魅力的であるバイオン遺跡。さらに、これの3Dデジタル化を考えた場合、多くの技術課題を克服しバイオン遺跡。我々のグループは、これらの技術課題を克服することで、ソフトウェア・ハードウェアの技術水準を高める。これと同時にバイオン遺跡全体の3Dデジタル化を進め、これにより、バイオン遺跡の正確な状況の保存、正確な断面図・立面図の作成、これらを用いた修復工事の計画の際の修復計画への活用、さらには、このデータにもとづくWEBシステムの構築を通してこの素晴らしい美術品をインターネットで簡単に観しめるように努力してゆこうと考えている。

業法というコンピュータによる計算手法を用いて測定結果をシミュレーションすると、通常の砂岩に対して用いられている測定の十分の一以下にしないと測定と同様な結果が得られず、単に砂岩が連続しているモデルでは扱えないことがわかりました。測定可能なすべての副塔の測定を行った結果、回廊が付属する方向では振動数が10%程度高く、他の方向に出で測ざが付加されて早く揺動することがわかりました。また、過去に修復が行われた塔は、未修復の回廊塔に対して振動数が低くなり、修復が必要と判断される効果を示さないこともわかりました。

ラテライトという多孔質の石で作られたアラサートスラアの強度の測定から、付風構造と修復の影響について同様な結果が得られています。2004年に行った風速の測定では、残念ながら強風が吹かなかったため強風時の揺動レベルは不明のままですが、幸積み組構造の力学モデルの構築を通して、強風の影響についても解明していきたいと考えています。

著者略歴

1957年 東京都新橋区生まれ
1979年 早稲田大学理工学部建築学科卒業
1981年 早稲田大学大学院工学部建築学科修士課程修了
1984年 同大学大学院工学部建築学科博士課程修了
1984年 同大学大学院工学部建築学科博士課程修了
1984年 大塚建設株式会社社員
1989年 マリテック・セツツ・エイト大人
1993年 早稲田大学博士(工学)
1996年 大塚建設株式会社
2000年 早稲田大学理工学部建築学科教授
2005年 早稲田大学理工学部建築学科教授

地盤地質探検班 前田寿朗

早稲田大学理工学部建築学科教授



有線要素法探検モデル

バイオン寺院での微動測定

私たちがバイオン寺院で微動測定を行ったのは、2003年8月と2004年9月の2回で、それぞれ2-3週間の行程です。私自身アジアの国に行くのは初めてであり、数名の学生を連れての長期測定も初めてでしたので、いろいろなノウハウが得られた貴重な経験でした。特に、多くの微動計を機内持ち込みで何とか運搬し、到着時の30分間程度は不動で遺跡の静寂に身を委ねた経験は、すべてのメンバーにとって良い思い出になったことと思います。

微動というのは、いろいろな原因によって地盤が揺れている現象で、潮の満ち引き、波浪、工事、工場、交通、歩行等の、ありとあらゆる活動から生じているものです。そのため、自分の好みに合わせて対象となる構造物をあらかじめ選んではいけません。必要もなく、微動計と呼ばれる計測器を携えていけば、どこでもすぐに測定することが

ができます。写真に示すのは、現地ワーカーの人たちにお願した微動計での計測器設置ですが、高所作業での身の軽さのみならず、好奇心を持って測定を手伝ってもらえたので、特に2年目には正確な微動計の設置、移動、撤収等を任せることができました。

私たちのミッションは、バイオン寺院の崩壊原因の推定ならびに修復計画に役立つような測定を行うことにあります。建築物の構造を専門とする私たちが扱うのは力学的要因ですが、その中でも常時少しずつ生じている劣化もあれば、何かしらの原因に応じて短期間で暴発的に生じた劣化の著積もあると思われます。後者に関して、カンボジアは地震国ではなく、地盤緩衝の話も聞かないので、雨降の線に当たる石積みのゆるみや移動の可能性を崩壊対象とし、バイオン寺院およびアラカートスプラでの微動測定を行いました。

これらの遺跡構造物は、モルタル等を介さず、砂岩やラテライトを積み重ねるだけの空積みといわれる線積造形式で作られています。普段、鉄筋コンクリート構造や鉄骨構造を熟知している私たちにとっては、まさかのような不連続な空積み積層がどのような振動特性を持っているかが興味の対象となりました。バイオン寺院は高さ40

メートルにも達する中央主塔と付属する中央副塔、ならびに敷地内で同様に結ばれた数十にも及ぶ副塔から構成されています。測定の結果、中央主塔は通常の建築物と同様な振動形で揺れますが、同様な高さの建築物に比較すると2倍程度早く振動し、砂岩が高密度に積み重ねられている影響が見られます。



図1 バイオン遺跡用に開発された点群計測型レーザレンジセンサ

我々の研究室は、大規模文化財の3Dデジタルアーカイブ化のための手法を開発している。大規模文化財を効率よく計測できるハードウェアの開発、大規模形状データを処理できるソフトウェアの開発、文化財の色を太陽光の影響を受けない効率よく対策に盛り付けるソフトウェアの開発などが主な研究テーマである。このプロジェクトは、本来技術開発が目的であるが、その技術の応用対象としてJSAと共同でバイオン遺跡の3Dデジタル化に取り組んでいる。

バイオン遺跡は3つの点で非常に魅力的な対象である。まず第一にその巨大さ。これまで我々が対象としてきたものは、奈良や鎌倉の大仏といったせいぜい10m程度の大きさであった。バイオン遺跡は辺りが1000mもあり、データ量が簡単に膨大になる。一般に、文化財を3Dデジタル化する際にはレーザレンジセンサという測定装置で、2Dのアジタル写真に対応する、3Dデジタル画像を得る。2Dの写真が画像の各点の色を保存するのにに対し、画像の各点でその点までの距離が保存されている。レーザレンジセンサを用いて、写真を取るように、3Dデジタル画像を作る。対象が

く必要がある。この処理のためには、全ての3D画像セットを計算機のメモリの上に載せる必要がある。バイオン寺院のような膨大なデータセットでは、一台の計算機にはデータが乗り切れない。さらに、サイズ面だけでなく処理速度でも留意を要する必要がある。ソフトウェア技術者として、バイオン遺跡を素材にソフトウェアの高度化を研究する今回は、非常に興味深い。

第二の魅力は、その複雑な構造にある。40mにも達する中央塔、多くの尊像、石版で隠されているペディメント、非常に詳細な彫り彫りなど、通常のセンサでは測定できないものが多く存在する。

先にも述べたが、3Dデジタル化のためには、レーザレンジセンサと呼ばれる測定装置を用いる。

バイオン遺跡はその構造の複雑さのため通常の市販のレーザレンジセンサでは測定不可能な部分が多く存在する。そのため、3種類のレーザレンジセンサをバイオン遺跡用に当研究室で開発した。

まず、第一のものは図に示す高所から計測可能な気球搭載型のセンサ。これにより中央塔の上層などが測定可能となった。また、バイオン寺院には、壁と壁に挟まれた状態に美しいペディメントが隠されている。これまで正確な写真すら存在しなかったと聞く。鏡を使って微動計を覗き込む形で計測できるセンサを開発し、今回初めてそれらの正確な3Dデータを得た。構造解析には、回廊全体の3Dデータを導くことも重要である。伸縮式のレール上を自走し

著者略歴

1957年 東京府新習志野区生まれ
1979年 早稲田大学理工学部建築学科卒業
1981年 同大学大学院理工学研究科修士課程修了
1984年 同大学大学院理工学研究科博士課程修了
1984年 日本建設株式会社技術研究所入社
1989年 マリナコンピュータセンター(株)入社
1993年 早稲田大学博士(工学)
2000年 大成建設株式会社取締役
2004年 早稲田大学理工学部建築学科教授
2005年 早稲田大学理工学部建築学科教授

著者略歴

1949年 大分県に生まれる
1970年 東京大学大学院工学系研究科卒業
1970年 大分県立工業専門学校卒業
1978年-1982年 マリナコンピュータセンター(株)入社
1982年-1988年 工学研究所 所長
1988年-1996年 同大学大学院理工学研究科教授
1988年-1996年 同大学大学院理工学研究科教授
1996年-2003年 同大学大学院理工学研究科教授
2003年 JSAと共同でバイオン寺院の3Dデジタル化

ながら進行方向に距離を測定するセンサも開発した。

第三の魅力は、大きな規模でありながら細部に多くの装飾彫りがあり、173もの尊像があるという階層的なデータ構成である。このような対象をインターネットを用いて展示する際、全体と細部の表示、転送をどのように行うのかといったソフトウェア工学的にチャレンジングな問題を多く解決する必要がある。

それ自身が魅力的であるバイオン遺跡。さらに、これの3Dデジタル化を考えた場合、多くの技術課題を含むバイオン遺跡。我々のグループは、これらの技術課題を克服することで、ソフトウェア・ハードウェアの技術連携を目標とす。これと同時にバイオン遺跡全体の3Dデジタル化を完成することにより、バイオン遺跡の正確な状況の保存、正確な平面図・立面図の作成、これらを用いた緊急修復や劣化の際の修復計画への利活用、さらには、このデータにもとづくWEBシステムの構築を通してこの素晴らしい美術品をインターネットで簡単に観測できるように努力してゆこうと考えている。

遺跡救済チーム報告29

JSAバイオン測量班

東京大学大学院情報学環教授 池内克史



図1 バイオン遺跡用に開発された気球搭載型レーザーセンサー

大きい場合、当然一回の3D画像には入りきれない。このため、各方向から3D画像を得、これらを統合して行

我々の研究室は、大規模文化財の3Dデジタルアーカイブ化のための手法を開発している。大規模文化財を効率よく計測できるハードウェアの開発、大規模形状データを処理できるソフトウェアの開発、文化財の色を太陽光の影響を受けずに効率よく対象に貼り付けるソフトウェアの開発などが主な研究テーマである。このプロジェクトは、本来技術開発が目的であるが、その技術の応用対象としてJSAと共同でバイオン遺跡の3Dデジタル化に取り組んでいる。バイオン遺跡は3つの点で非常に魅力的な対象である。まず第一にその巨大さ。これまで我々が対象としてきたものは、奈良や鎌倉の大仏といったせいぜい10m程度の大きさであった。バイオン遺跡は一辺が100mもあり、データ量が極端に膨大になる。一般に、文化財を3Dデジタル化するためにはレーザーセンサーという測定装置で、2Dのデジタル写真に対応する、3Dデジタル画像を得る。2Dの写真が画像の各点の色を保存するのに対し、画像の各点でその点までの距離が保存されている。レーザーセンサーを用いて、写真を撮るように、3Dデジタル画像を撮る。対象が



図2 バイオン遺跡の3Dデジタルデータ

装置を用いる。バイオン遺跡はその構造の複雑さのため通常の市販のレーザーセンサーでは測定不可能な部分が多く存在する。そのため、3種類の

く必要がある。この処理のためには、全ての3D画像セットを計算機のメモリの上に載せる必要がある。バイオン寺院のような膨大なデータセットでは、一台の計算機にはデータが乗り切れない。さらに、サイズ面だけでなく処理速度でも知恵を絞る必要がある。ソフトウェア技術者として、バイオン遺跡を素材にソフトウェアの高度化を研究することは、非常に興味深い。第二の魅力は、その複雑な構成にある。40mにも達する中央棟、多くの尊顔、石板で隠されているペディメント、非常に詳細な浮き彫りなど、通常のセンサーでは測定できないものが多く存在する。先にも述べたが、3Dデジタル化のためには、レーザーセンサーと呼ばれる測定

ほどのレーザーセンサーをバイオン遺跡用に当研究室で開発した。まず、第一のものは図に示す高所から計測可能な気球搭載型のセンサー。これにより中央棟の上部などが測定可能となった。また、バイオン寺院には、壁と壁に挟まれた狭隘部に美しいペディメントが隠されている。これまで正確な写真すら存在しなかったと聞く。鏡を使って狭隘部を覗き込む形で計測できるセンサーを構築し、今回初めてそれらの正確な3Dデータを得た。構造解析には、回廊全体の3Dデータを得ることも重要である。伸縮式のレール上を自走し

著者略歴

- 1949年 大阪府に生まれる
- 1978年 東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了、工学博士
- 1978年～1980年 マサチューセッツ工科大人工知能研究所 助手
- 1980年～1986年 通産省工技院電子技術総合研究所 研究官/主任研究官
- 1986年～1996年 カーネギーメロン大学計算機科学部研究准教授/研究教授
- 1996年～東京大学 生産技術研究所/大学院情報学環教授
- 2003年～JSAと共同でバイオン寺院の3Dデジタル化



ながら進行方向に距離を測定するセンサーを開発した。

第三の魅力は、大きな規模でありながら細部に多くの浮き彫りがあり、173もの尊顔があるといった階層的なデータ構成である。このような対象をインターネットを用いて展示する際、全体と細部の表示・転送をどのように行うのかといったソフトウェア工学的にチャレンジングな問題を多く解決する必要がある。

それ自体が魅力的であるバイオン遺跡。さらに、これの3Dデジタル化を考えた場合、多くの技術課題を含むバイオン遺跡。我々のグループは、これらの技術課題を克服することで、ソフトウェア・ハードウェアの技術進歩を目指す。これと同時にバイオン遺跡全体の3Dデジタル化を完成することにより、バイオン遺跡の正確な状況の保存、正確な平面図・立面図の作成、これらを用いた予期せぬ破壊や崩落の際の修復計画への利活用、さらには、このデータにもとづくWEBシステムの構築を通してこの素晴らしい美術品をインターネットで簡便に親しめるように努力してゆこうと考えている。