3次元モデルによるバイヨン寺院尊顔の解析と制作背景の考察

3D Shape Analysis of Bayon Faces to Reveal Their Historical Background

鎌倉 真音[†], 大石 岳史^{††}, 高松 淳^{††}, 池内 克史^{†††}Mawo Kamakura[†], Takeshi Oishi^{††}, Jun Takamatsu^{††} and Katsushi Ikeuchi^{†††}

Abstract Digital 3D models of historic buildings or cultural heritage objects are useful for preservation. Such models can not only be stored permanently, but also supply us with clear guidelines for the restoration process. 3D models also provide sufficient information about geometrical characteristics that are useful for inspecting and classifying objects. The Bayon temple, which consists of 52 towers, is one of the most well-known buildings of the Angkor monument in Cambodia. The temple is famous for its towers which have four faces at the four cardinal points. According to research performed by the Japanese government team for Safeguarding Angkor (JSA), the faces can be classified into three groups, Deva, Devata, and Asura, based on subjective criteria. We demonstrate a more objective way to classify the faces using measured 3D geometrical models created by a laser range sensor.

キーワード：文化遺産、デジタルアーカイブ、3次元モデル、バイヨン寺院尊顔

1. ま え が き

近年、計算機の処理能力の飛躍的向上とともに、コンピュータビジョンの技術は進展している。特に、実物体を計測し、3次元モデルに変換することは、コンピュータビジョンの良く知られた応用例であり、レーザレンジセンサなどを用いて、美術品や文化遺産の3次元形状を自動的に取得する研究が盛んに行われている^{1) 2)}。

我々は、これらの技術を開発するとともに、大規模な文化遺産のデジタル保存に取り組んでいる。これまでGreat Buddha Project³⁾では、鎌倉大仏、奈良大仏を対象として、大規模文化遺産をモデル化するための技術開発を行ってきた。この技術を用いて飛鳥大仏、タイのアチャナ仏などのデジタル保存を行った。

現在我々は、さらに大規模かつ複雑な対象として、カンボジアアンコール遺跡・バイヨン寺院デジタル保存プロジェクトを遂行している⁴⁾。バイヨン寺院は12世紀に建

造され、アンコールトムの中央に位置する。140m × 160m四方で最大塔の高さが約45mの大規模な遺跡であり、尊顔の刻まれた四面塔で有名である(図1)。我々は、バイヨン寺院デジタル保存プロジェクトを2003年より開始し、現在までに4回の計測ミッションを行った。遺跡全体のモデル化に加え、すべての尊顔をモデル化してライブラリーの作成を行っている。

この尊顔がどのような意図を持って制作されたかを知することは、寺院造営の目的などの歴史的背景を明確にする上で重要であると考えられる。バイヨン寺院には52の四面塔があるとされ、そのそれぞれに刻まれた尊顔は、現在、破壊や崩壊を免れているもので173あるとされている。日本国政府アンコール遺跡救済チーム(JSA)の研究によれば、これらの尊顔はデーヴァ、デヴァター、アシュラの3種類に分類できるとされている。そして、これらの尊顔は主観的な評価によっていくつかの特徴を基に分類がなされている⁵⁾。

本論文は、計測によって取得した3次元モデルを用いて、より客観的な尊顔の分類を行った。その目的は、(1) JSAの調査結果を科学的な観点から再考察すること、(2) 人間の主観的な評価のみでは得られなかった新たな知見を得ることである。

2. バイヨン寺院尊顔

JSA 美術史チームは、バイヨン寺院造営の目的を探るべく、寺院の大きな特徴である四面塔に刻まれた尊顔について調査を行った。それによると、バイヨン寺院の尊顔は、主

2006年9月1日受付、2006年12月4日採録

[†] 東京大学大学院 学際情報学府

(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, TEL: 03-5452-6242)

^{††} 東京大学 生産技術研究所

(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, TEL: 03-5452-6242)

^{†††} 東京大学 情報学環

(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, TEL: 03-5452-6242)

[†] Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, University of Tokyo

(4-6-1 Komaba, Meguro-ku Tokyo, 153-8505 Japan)

^{††} Institute of Industrial Science, University of Tokyo

(4-6-1 Komaba, Meguro-ku Tokyo, 153-8505 Japan)

^{†††} Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo

(4-6-1 Komaba, Meguro-ku Tokyo, 153-8505 Japan)

図 1 左:バイヨン寺院、右:バイヨン寺院尊顔
Left:Bayon temple, Right:Bayon face.

図 2 バイヨン寺院尊顔の 3 分類
3D models and shapes line of 3 types of Bayon faces.

に顔の輪郭の違いに基づき、デーヴァ、デヴァター、アシュラの 3 タイプに分類できるとされる⁵⁾。具体的な顔の特徴は、アシュラ（悪魔）は顎のエラがはった四角い顔、デーヴァ（男神）は比較的穏やかな表情をした丸顔、デヴァター（女神）は顔立ちがきつい細長い丸顔である。（図 2）。この 3 タイプの顔のうち、デーヴァ型が多数を占めている。

また、これらの顔の各塔への配置には厳密ではないものの規則性があることも判明している。寺院から外側に向いているのはアシュラ、寺院の内側を向いているのはデーヴァ、さらに、本尊とされる寺院中央の中央塔を讃嘆するように向いているのはデヴァターである。これは、守門神であるアシュラとデーヴァ、主神に近侍する女神デヴァターという守護神の表象として位置づけられたものと考えられている。

ただし、風化や破壊、崩壊などの影響以外に、制作に際しての分業や制作者各人の技術的な差異などの影響により判別が難しいものが多数あるとされる。四面塔各面の尊顔の制作状況に着目すると、完成度の高いものもあるが、全体として未完成のものもかなり多い。また、当時短期間で

制作するために、複数グループによる分業制が採用されていたが、一つの四面塔は同一のグループで制作された可能性が大きいとされる。例えば、顔の輪郭や表情にはおおむね一定の性格的な差異は認められるが、制作者が一つ一つの尊顔について厳密に 3 タイプに識別できるように自覚しながら、制作に当たったとは思えない箇所も多々ある。特殊な例として顔の左右を別々のグループで制作したと思われるものもある。

3. 分析手法

本章では、計測によって取得した尊顔の 3 次元モデルを用いた分類・分析について述べる。まず、3 次元モデルを取得する手法について簡単に述べる。次に、3 次元モデルを大きさや向きに関して正規化し、距離画像を生成する方法について述べる。そして、得られた距離画像を用いて、線形判別解析、階層クラスタ解析といった統計的手法によって分類する手法について説明する。

3.1 3 次元モデル取得

レーザレンジセンサ Cyrax2500⁶⁾、Vivid910⁷⁾ を用いて、バイヨン寺院尊顔の 3 次元形状計測を行う（図 3）。対象を余すことなく計測するためには、複数の位置・方向から計測を行う必要がある。得られた複数の部分形状データはそれぞれ異なった座標系で記述されている。そこで次にこれらの座標を統一する位置合わせ処理⁸⁾を行う。また、計測データ中のノイズ除去処理⁹⁾を行い、尊顔の 3 次元モデルが生成される（図 4）。

3.2 正規化処理

本手法では、ある適当な尊顔モデルを基準の顔としてすべての尊顔モデルの大きさ・向きをそれに統一する正規化処理を行う（図 5）。正規化処理は、顔認識の技術でも用いられる必要不可欠な前処理である。画像中の顔の大小や向きの差異をなくすことで認識率の向上することが知られている¹⁰⁾。

本論文では、まず基準となる尊顔形状モデル（以下基準

図 3 レーザレンジセンサによる計測
Picture of laser range sensor.

図 4 3次元モデル作成
Outline of making 3D models.

モデルとする)を正対する視点からレンダリングを行う。その際、画像領域内全体に尊顔が表示されるようにする。JSAの調査では、顔の輪郭に注目して分類しているため、顔の輪郭を画像領域内で最大になるよう調整した。この基準モデルを画像内に正対させる移動行列を M_{ref} で表す。

次に、すべての尊顔モデルが基準モデルと同様に表示される視点の位置姿勢の行列 $M_{tar,i} (i = 1, \dots, N)$ を求める。 N は分類に使用した尊顔の個数である。まず尊顔(以下対象モデルとする)ごとに両目頭と鼻下点の特徴点3点の座標を取り出す。この3点とは、表情変化等の影響を受けにく

図 5 大きさ・向きの正規化処理
Outline of normalization method.

図 6 濃淡画像・距離画像作成
Make shade images and depth images.

いとされる点である。基準モデルの特徴点を $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3)$ 、正規化する対象モデルの特徴点を $(\mathbf{y}_{1i}, \mathbf{y}_{2i}, \mathbf{y}_{3i})$ とする。これらの2点間の距離の2乗平均が最小となるように、回転行列 R 、並進ベクトル $\mathbf{t}$ 、拡大縮小変数 c を求め、そこから行列 $M_{tar,i}$ を求める。この問題は absolute orientation problem¹¹⁾ であり、以下のように求めた¹²⁾。距離の2乗の平均は、

$$e^2(R, \mathbf{t}, c) = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \|\mathbf{y}_{ji} - (cR\mathbf{x}_j + \mathbf{t})\|^2 \quad (1)$$

となり、以下の式を用いて変換パラメータ $(R, \mathbf{t}, c)$ を最小化する。

$$R = USV^T \quad (2)$$

$$\mathbf{t} = \mu_y - cR\mu_x \quad (3)$$

$$c = \frac{1}{\sigma_x^2} \text{tr}(DS) \quad (4)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum \|\mathbf{x}_j - \mu_x\|^2 \quad (5)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum \|\mathbf{y}_{ji} - \mu_y\|^2 \quad (6)$$

ここで、 μ_x 、 μ_y は $\mathbf{x}_j$ 、 $\mathbf{y}_{ji}$ の平均を、 UDV^T は $\mathbf{x}_i$ と $\mathbf{y}_{ji}$ の共分散行列の特異値分解を表し、式(4)の S は以下のように決定される。

$$S = \begin{cases} I & (\det(\sum_{xy}) \geq 0) \\ \text{diag}(1, 1, \dots, 1, -1) & (\det(\sum_{xy}) < 0) \end{cases} \quad (7)$$

また、求めた行列から(図6)に示すような縮尺・方向が一定な距離画像が得られる。

3.3 線形判別解析

サンプル空間 R^m 上のクラス G_1, G_2 を、スカラー関数 $f(\mathbf{x})$ を用いて判別することを考える。ある点 $\mathbf{P}$ において、もし $f(\mathbf{P}) > 0$ なら点 $\mathbf{P}$ は G_1 クラスに、 $f(\mathbf{P}) < 0$ なら点 $\mathbf{P}$ は G_2 クラスに属すると判断する。

本論文では、超平面つまり $f(\mathbf{x}) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{x} + d$ を判別関数として用いる。この理由は、サンプル数に対して、関数の次元やパラメータ数を小さくすることにより、過学習の問題を防ぐためである。関数のパラメータである $\mathbf{n}$ は、クラス内共分散 S_B 、クラス間共分散 S_T に対し、 $\mathbf{n}^T S_B \mathbf{n} / \mathbf{n}^T S_T \mathbf{n}$ を最大化する。つまり、各クラス間のデータが最も散らばっている方向より決定される。また d は $\bar{\mathbf{x}}^{(1)}$ 、 $\bar{\mathbf{x}}^{(2)}$ をそれぞれクラス G_1, G_2 に属する要素の平均とすると、 $d = -1/2(\mathbf{n} \cdot (\bar{\mathbf{x}}^{(1)} + \bar{\mathbf{x}}^{(2)}))$ により決定される。線形判別関数の値は、点と超平面との間の距離を表しており、この距離によって属するクラスを決定する。つまり、距離を決定づける主要因である $\mathbf{n}$ を用いて、2 クラス間の差異を可視化することができる。

3.4 階層クラスタ解析

クラスタ解析では、サンプル間の相違に基づく距離によってサンプルの分類を行う。本論文では、統合型の階層クラスタ解析を用いる。この解析では (1) 個々のサンプルがそれぞれ一つのクラスタを形成している状態から始め、(2) 距離に応じて選ばれた二つのクラスタを一つのクラスタに統合し、(3) すべてのサンプルが1つのクラスタに統合されるまで (2) を繰り返す。この解析により各サンプルの近さを表すデンドログラムを作成することができる。今回は、各サンプル間の距離尺度としてユークリッド距離を、また、クラスタ間の距離の計算にはワード法を用いた。

4. 分析結果

4.1 線形判別解析結果

JSA による分類をもとに線形判別解析を行った。線形判別関数は二つのクラスを判別するためのものであるため、今回は、デヴァター（女神）とデーヴァ（男神）を判別する関数、およびデーヴァとアシュラ（悪魔）を判別する二つの関数を用いて解析を行った。

分類結果をよりわかりやすくするために、二つの線形判別関数の超平面の法線を基底とする2次元平面にすべての尊顔のベクトルの点を射影し、散布図を作成した（図7）。この射影平面上では、判別超平面は直線として現れる。Y軸がデヴァター（女神）とデーヴァ（男神）を判別する平面を表し、Y軸の右側が女性神の領域、左側が男性神の領域を示す。さらに、X軸とY軸をまたぐ斜線がデーヴァ（男神）とアシュラ（悪魔）を判別する平面を表し、斜線の上側が神の領域、下側が悪魔の領域を示す。このとき、ほとんどのデヴァターがY軸の右側に、またデーヴァが斜線の上側に存在している。

さらに、デーヴァ、デヴァター、アシュラを判別する線形判

図7 線形判別解析結果
Result of linear discriminant analysis.

図8 線形判別解析の可視化
Visualization of differences between three classes.

別関数を求め、それらの関数の法線方向に基づき形状差異を可視化したものを図8に示す。上から左下はデヴァターからデーヴァ、左下から右下はデーヴァからアシュラ、上から右下はデヴァターからアシュラの変化について表し、赤い部分は変化に伴って形状が膨らむ領域、青い部分は形状が凹む領域を表している。この特徴的な領域はJSAの分類基準にほぼ合致している。

4.2 階層クラスタ解析結果

次に、階層クラスタ解析の結果得られたデンドログラムを図9に示す。尊顔のタイプに基づき色分けしてある。この図から、同じ色同士が同一のクラスタを形成する傾向が伺える。アシュラには多少のばらつきが見られるが、これは破損や欠損などにより、分析に使用できるデータが少ないためであると考えられる。また、同じ塔の4面の尊顔と位置的に近い塔の尊顔が同一クラスタを形成する傾向があることもわかる。

また、それぞれのデータを主成分分析（PCA）を用いて、2次元に圧縮して生成された散布図を図10に示す。各クラスタにそれぞれ固有の色を付けてプロットしてある。図の端

図 9 階層クラスタ解析によるデンドログラム
Dendrogram obtained by hieratical cluster analysis.

図 10 階層クラスタ解析結果（散布図）
Scatter diagram of HCA.

の方に孤立したクラスタがあるが、これは破損や欠損のある尊顔のデータがうまく分類できなかった結果を示している。このクラスタ解析の結果に基づき線形判別解析を用いて、尊顔の形状差異を可視化したものを図11に示す。この図の Group10, Group9, Group2 はデーヴァ, アシユラ, デヴァターの代表的な尊顔を含んだクラスタとなっている。他の類似度の高いクラスタをたどっていくと Group1 はデーヴァ, デヴァター, アシユラの 3 種類の中間的な顔の特徴となっていることがわかる。

5. 尊顔制作背景の考察

JSA の研究によると、バイヨン寺院は、多数の職人たちが短期間の内に、同時に制作した可能性が高いとされている。その中でも特に尊顔製作において、近隣の複数塔の 4 面は同一のグループにより制作された可能性が大きいとされる。尊顔はその顔の特徴により大きく 3 種類に分類されているが、グループそれぞれの持つ技術は異なり、すべての尊顔に対して同一のものが存在しないと考えられている。それと同時に、グループごとの技術に特徴があるため、同じ職人やグループが制作した尊顔は、類似度が高くなると

図 11 クラスタ間差異の可視化
Visualization of the clusters and their differences.

言われている。

「同じ塔の 4 面の尊顔と位置的に近い塔の尊顔でクラスが形成されている」という、階層クラスタ解析の結果は、同一グループが同じ塔や位置的に近い塔の尊顔を制作した可能性を示唆している。実際に、類似度が高いと推定された尊顔の配置を（図12）に示す。同じ色で示されている塔が類似度の高い尊顔のある塔を示している。この図の同じ色の分布に注目すると、位置的に近い塔の尊顔の類似度が高いことが明らかであり、また、JSA の職人のグループによる制作の説を裏付けることになる。

図 12 類似尊顔の配置
Location of similar Bayon faces in map.

6. む す び

本論文では、バイヨン寺院の歴史的背景を明らかにするために、計測により取得した尊顔の3次元モデルを用いて様々な解析を行った。JSAの調査結果を踏まえて行った線形判別解析では、尊顔がおおよそ3種類に分類できることがわかった。この分類のための判別基準を可視化することにより、JSAの主観的評価方法の正当性が明らかとなった。一方、JSAの調査結果と独立に行った階層クラスタ解析においても、3種類に分類できる傾向がみられた。このクラスタ間の差を可視化することで、3種類それぞれの代表的な特徴を表している尊顔が3種類にわかれていることが確認できた。また、この階層クラスタ解析の結果から、同じ塔の尊顔や位置的に近い尊顔は特に類似していることが明らかとなった。このことは、「尊顔は多数の職人で形成されるグループにより制作され、同一グループが制作した尊顔は類似している」というJSAの説を裏付けるとともに、同一グループがある特定の領域を担当し、尊顔を制作していたことが推測できる。このように、3次元モデルによる解析・考察により、バイヨン寺院建造当時の尊顔の制作状況を知る可能性をうかがうことができた。

最後に、本研究は、文部科学省科学技術振興調整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」の支援を受けて行った。また、本研究はJSA（日本国政府アンコール遺跡救済チーム）の協力のもとで行った。

〔文 献〕

- 1) K Marc Levoy et.al: "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues", In Proceedings of SIGGRAPH (2000)
- 2) <http://www.vihap3d.org/news.html>
- 3) Katsushi Ikeuchi, Atsushi Nakazawa, Kazuhide Hasegawa, Takeshi Oishi: "The Great Buddha Project: Modeling Cultural Heritage for VR Systems through Observation", The second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2003)
- 4) K. Ikeuchi, K. Hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi

and T. Masuda: "Bayon Digital Archival Project", In Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual System and Multimedia, pp. 334-343 (2004)

- 5) 朴亨國, 浅井和春: "バイヨンの四面塔に関する二・三の考察—彫刻史的アプローチによる—", アンコール遺跡調査報告書 1998, 中川武 (監修), pp.275-306, (財) 日本国際協力センター, 東京 (1998)
- 6) <http://www.leica-geosystems.com/jp/products/cyrax/>
- 7) <http://konicaminolta.jp/products/industrial/instrument/3d/vivid910/index.html>
- 8) T. Oishi, A. Nakazawa, R. Kurazume and K. Ikeuchi: "Fast Simultaneous Alignment of Multiple Range Images using Index Images", In Proc. 3D Digital Imaging and Modeling (2005)
- 9) Ryusuke Sagawa, Takeshi Oishi, Atsushi Nakazawa, Ryo Kurazume, Katsushi Ikeuchi: "Iterative Refinement of Range Images with Anisotropic Error Distribution", Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.79-85 (2002)
- 10) 赤松茂: "コンピュータによる顔の認識—サーベイ—" 信学論, J80-A, 8, pp.1215-1230 (1997.8), 信学論, J80-D-II, 8, pp.2031-2046 (1997)
- 11) Berthold.K.P.Horn: "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions", Journal of the Optical Society of America A, 5, 7, pp.1127-1135 (1987)
- 12) Shinji Umeyama: "Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13, 4, (1991)

かまくら ままき
鎌倉 真音 2004 年, 日本女子大学理学部数物科学科卒業。同年, 東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程入学。現在に至る。主として文化財のデジタルアーカイブ, 3次元形状解析に関する研究に従事。

おおいし たけし
大石 岳史 1999 年, 慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。2002 年, 東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程修了。2005 年, 東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士課程修了。現在, 東京大学生産技術研究所特任助手。博士 (学際情報学) 実物体の形状モデリングの研究に従事。

たかまつ じゅん
高松 淳 1999 年, 東京大学理学部情報科学科卒業。2001 年, 東京大学大学院工学系研究科情報科学専攻修士課程修了。2004 年, 同大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。情報理工学博士。主として3次元形状解析, 知能ロボットの動作獲得に関する研究に従事。

いけうち かつし
池内 克史 1973 年, 京都大学工学部機械工学科卒業。1978 年, 東京大学大学院工学系研究科情報科学専攻博士課程修了。MIT 人工知能研究所, 電総研, CMU 計算機科学科を経て, 1996 年より, 東京大学生産技術研究所教授。2000 年より, 東京大学大学院情報学環教授兼任。人間の視覚機能, 明るさ解析, 物体認識, 人間による組立て作業の自動認識などの研究に従事。