

# 3次元モデル解析によるカンボジアバイヨン寺院尊顔 制作背景に関する考察

鎌倉真音\* 大石岳史\*\* 高松淳\*\* 池内克史\*\*\*

\*東京大学大学院学際情報学府 \*東京大学生産技術研究所 \*\*\*東京大学大学院情報学環

\*\*\*東京大学 池内研究室 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所  
E-mail: {mawo, oishi, j-taka, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**あらまし** 歴史的な建造物や文化遺産から取得した3次元モデルは、現状を永久に保存できること、修復作業のガイドラインに使用できることなど非常に有用性が高い。また、このような3次元モデルを用いた形状の比較や様々な手法による分類などは考古学にとっても有益であるとされている。大小52の塔からなるバイヨン寺院は、カンボジアアンコール遺跡群の代表的な寺院のひとつであり、塔の東西南北に尊顔が刻まれているというユニークな特徴を有する。日本国政府アンコール遺跡救済チーム(JSA)の調査によると、尊顔は全部で173現存し、デーヴァ(男神)、デヴァター(女神)、アシュラ(悪魔)の3種類に分類できると言われている。また、多数の職人で形成されたグループが複数存在し、同一のグループによって制作された尊顔は類似していると言われている。本論文では、レーザレンジセンサを用いた計測により取得した尊顔の3次元形状モデルを用いて、定量的な尊顔の分類・分析を行う。そして、この分析から尊顔の制作背景を考察する。

**キーワード** 文化遺産 デジタルアーカイブ 3次元モデル

## Study on Distribution of Bayon Faces Worker's Group Using 3D Models Analysis

Mawo KAMAKURA\* Takeshi OISHI\*\* Jun TAKAMATSU\*\* Katsushi IKEUCHI\*\*\*

\*Graduate school of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

\*\*Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

\*\*Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

\* \*\* \*\*\* Ikeuchi Lab., The University of Tokyo 4-6-1 Komaba, Meguro, Tokyo, 153-8501

E-mail: [mawo, oishi, j-taka, ki]@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** Digital 3D models of historic buildings or cultural heritage objects are useful for preservation. Not only can we store them permanently, but the models can supply a clear guideline for the restoration process. 3D models also provide sufficient information about geometrical characteristics that may help archaeologists to inspect and classify the objects. The Bayon temple, which consists of 52 towers, is one of the representative buildings of the Angkor monuments in Cambodia. It is famous for its towers with four faces at the four cardinal points. According to research by Japanese government team for Safeguarding Angkor (JSA), the faces can be classified into three groups, Deva, Devata, and Asura, based on subjective criteria. In this paper, we explore a more objective way to classify the faces by using measured 3D geometrical models by a laser range sensor.

**Keyword** Cultural heritage, Digital archive, 3D models

### 1. はじめに

近年、計算機の処理能力の飛躍的向上と共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 Project[3]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。その結果として、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。



図1 左: バイヨン寺院、右: バイヨン寺院尊顔  
Fig.1 left: Bayon Temple, right: Bayon face

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)[5]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[6]。

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の美術史チームは、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[6]。具体的な顔の特徴は、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、アシュラ(悪魔)は顎のエラがはった四角い顔である(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、寺院の内側に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。

しかし、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。さらに、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、1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。たとえば、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、制作者がひとつひと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。また、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。

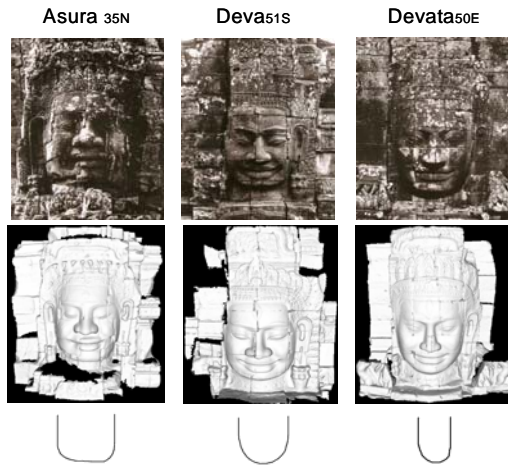


図2 バイヨン寺院尊顔の3分類  
Fig.2 pictures, 3D models and shapes line of 3 types of Bayon faces.

### 3. 分析手法

本章では計測によって取得した尊顔の3次元モデルを用いて分類・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次元モデルの大きさや向きの正規化処理をし、距離画像を生成する。そして、得られた距離画像を用いて、線形判別解析、階層クラスター解析などの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

レーザーレンジセンサー Cyrax2500[7]，Vivid910[8]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)。対象全体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。そのため得られた複数の部分形状データはそれぞれ異なる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[9]を行う。また、計測データ中のノイズ除去処理[10]を行い、尊顔の3次元モデルが生成される(図4)。



図3 レーザレンジセンサーによる計測  
Fig.3 picture of laser range sensor.

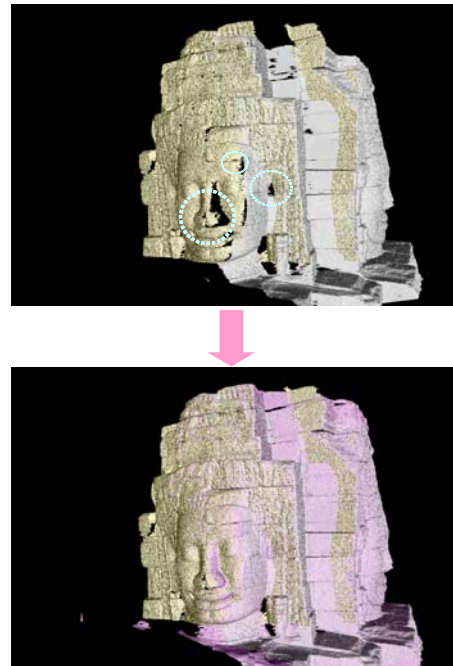


図4 3次元モデル作成  
Fig.4 Outline of making 3D models.

#### 3-2 正規化処理

本手法ではまず、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。顔認識システムはまず顔を含む映像から色情報などを利用して自動的に顔領域を検出する。次に、装置が有する顔データベースとの比較を容易にするため、自動検出した顔画像の大きさ、向きをデータベースと統一する。画像サイズ中の顔の大小や向きの差異をなくすこと、顔以外のデータが入ることによる影響を最低限に抑えることで認識率の向上が見込まれる[11]。

本論文では、まず基準となる尊顔形状モデル(以下基準モデルとする)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、前述の顔認識の前処理によく用いられ、表情変化等の影響を受けにくいとされる点である。基準モデルの特徴点を  $(x_1, x_2, x_3)$  として、正規化する対象モ



デルの特徴点を  $(y_{1i}, y_{2i}, y_{3i})$  とする. これらの 2 点間の 2 乗距離の平均が最小となるように, 回転行列  $R$ , 並進行列  $t$ , 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 problem[12] であり, 以下のよう  
に求めた[13].

2 乗距離の平均は,

$$e^2(R, t, c) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|y_i - (cRx_i + t)\|^2 \quad (1)$$

となり, 以下の方程式を用いて変換パラメータ  $(R, t, c)$  を最小化する.

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

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

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

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

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum \|y_i - \mu_y\|^2 \quad (6)$$

ここで,  $\mu_x$  と  $\mu_y$  は  $x_i$  と  $y_i$  のベクトル  $USV^T$ , は  $x_i$  と  $y_i$  の共分散行列の特異値分解を表し (4) 式の  $S$  は以下のように決まる.

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

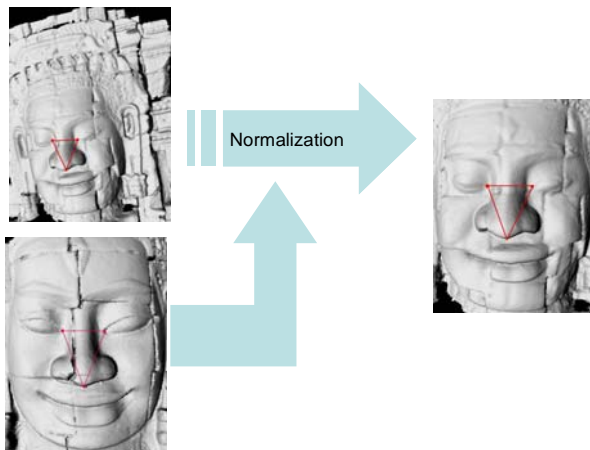


図5 大きさ・向き正規化処理

左上:対象モデル,左下:標準モデル,右:正規化された対象顔  
Fig.5 Outline of normalization method.

また, 求めた移動行列から図 6 に示すような縮尺・方向が一定な距離画像が得られる.

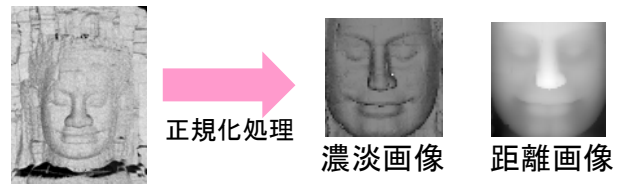


図6 濃淡画像・距離画像作成

Fig.6 Examples of shade image and depth image.

### 3-3 線形判別解析

$R^m$  というサンプル空間上に,  $G_1, G_2$  という 2 つのクラスがあり, それを判別するためにスカラー関数  $f(\mathbf{x})$  を用いることを考える. ある点  $P$  において, もし  $f(\mathbf{x}) > 0$  なら点  $P$  は  $G_1$  クラスに,  $f(\mathbf{x}) < 0$  なら点  $P$  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  $f(\mathbf{x}) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{x} + d$  を分類関数として用いる. この理由はサンプル数があまり多くないためである. 関数の次元やパラメータは小さい方がオーバーフィットの問題を防ぐことから好まれる. 関数のパラメータである  $\mathbf{n}$  は, クラス内分散を  $S_B$ , クラス間分散を  $S_T$  とすると,  $S_B/S_T$  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,  $d = -1/2(\mathbf{n} \cdot (\bar{\mathbf{x}}^{(1)} + \bar{\mathbf{x}}^{(2)}))$  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いる. 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 階層クラスター解析

クラスター解析は, サンプル間の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ー解析を用いる. この解析では (1) 個々のサンプルがそれぞれ 1 つのクラスターを形成している状態から始め, (2) 距離に応じて選ばれた 2 つのクラスターを 1 つのクラスターに統合し, (3) すべてのサンプルが 1 つのクラスターに統合されるまで (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, クラスター間の距離の計算にはウォード法を用いた.

## 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い, すべての尊顔を判別した. 線形判別関数は 2 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) を判別する関数の 2 つ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2つの線形判別関数の超平面の法線である  $\mathbf{n}$  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、プロットした(図8)。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(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(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。

図7に可視化した図を示す。この2つの画像は、3種類の顔の変形について可視化した図である。左側はデヴァターからデーヴァ、右側はデーヴァからアシュラの変化について表し、黒い部分は変化に伴って形状が膨らむ領域、白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。



図7 2クラス間差異の可視化  
左:デヴァター→デーヴァ、右:デーヴァ→アシュラ  
Fig.7 Visualization of differences between two classes.  
left: Devata→Deva, right: Deva→Asura

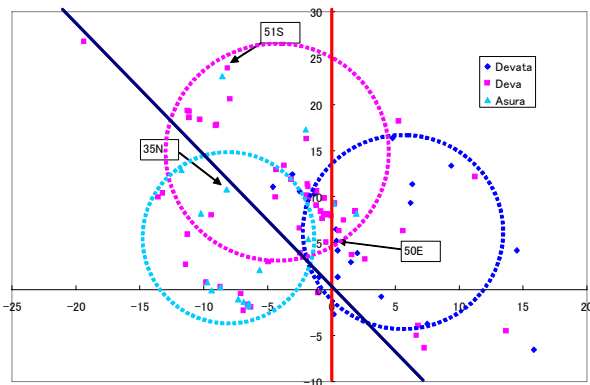


図8 線形判別解析結果  
Fig.8 Result of linear discriminant analysis.

#### 4-2 階層クラスター解析結果

次に階層クラスター解析の結果として、図9にデンドログラムを示す。これは類似度の高い顔同士を順に結んでいき、顔の3つのタイプごとに色分けして可視化した図である。これを見ると、同じ色同士が固まっている傾向が伺え、アシュラにはばらつきがあるが、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。そして、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ことがわかる。

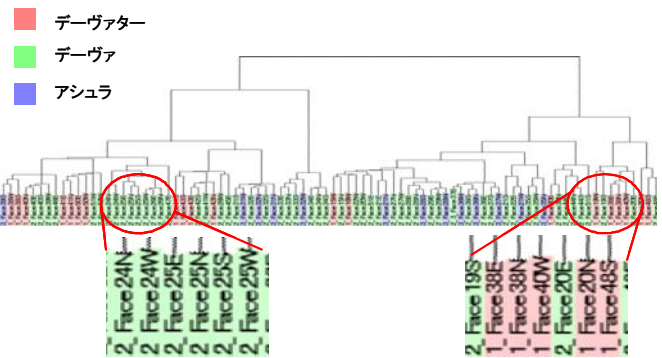


図9 階層クラスター解析によるデンドログラム  
Fig.9 dendrogram obtained by hierarchical cluster analysis.

また、図10はPCA(主成分分析)を用いて4096次元のデータをユークリッド距離により、2次元に圧縮し、各クラスターにそれぞれ固有の色を付けてプロットした図である。図の端の方にばらついているクラスがあるが、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。このクラスター結果と線形判別解析を用いて、図11のような尊顔の差を表した図を作ることができる。この図のGroup10, Group9, Group2はデーヴァ、アシュラ、デヴァターの代表的な尊顔を含んだクラスターとなっている。他の類似度の高いクラスターをたどっていくとGroup1はデーヴァ、デヴァター、アシュラの3種類の中間的な顔の特徴となっていることがわかる。

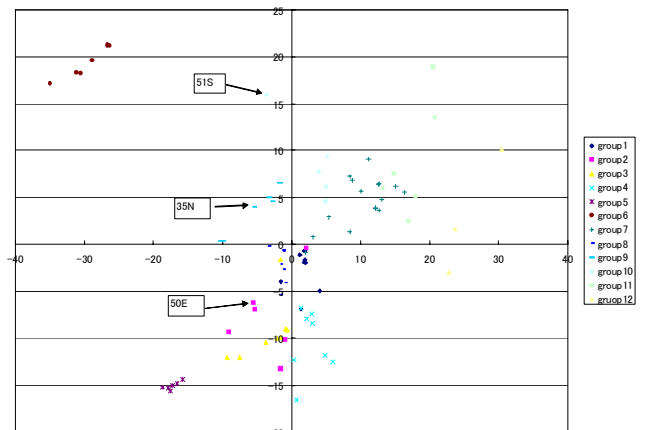


図10 階層クラスター解析結果(散布図)  
Fig.10 scatter diagram of HCA.

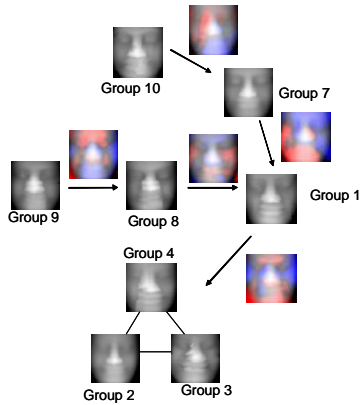


図11 クラスタ間差異の可視化  
Fig.11 Visualization of the clusters and their differences.

## 5. 尊顔制作背景の考察

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される。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は、1つの塔の4面について同一のグループによる制作が推測され、さらにそのグループが複数塔の制作を受け持った可能性も大きいとされる。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。

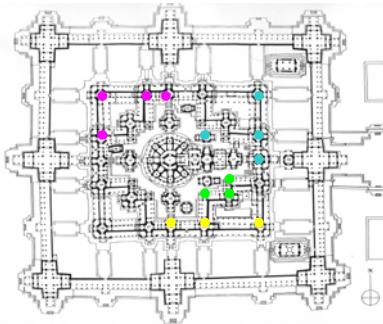


図12 類似尊顔の配置  
Fig.12 location of similar Bayon faces in map.

## 6. 結論

本論文では、3次元モデルを用いたバイヨン寺院尊顔の解析結果を示した。線形判別による解析では、判別基準はJSAの主観的評価方法に近くなることがわかった。

また、階層クラスタ解析では、「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される」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地域を担当し、尊顔を制作していたことが推測された。また、本研究を通じて、3次元形状モデルの分類・分析からバイヨン寺院建造当時の尊顔の制作状況を知る可能性がうかがえた。

## 7. 謝辞

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(日本政府アンコール遺跡救済チーム)の協力のもとで行った。

## 参考文献

- [1] KMarc Levoy et.al, "The Digital Michelangelo Project:3D Scanning of Large Statues", In Proceedings of SIGGRAPH2000
- [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), Oct 2003.
- [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, pages 334-343, November 2004.
- [5] <http://www.angkor-jsa.org/>
- [6] 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.
- [7] <http://cyra.com>
- [8]<http://konicaminolta.com/products/instruments/vivid/vivid910.html>
- [9] 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
- [10] Ryusuke Sagawa, Takeshi Oishi, Atsushi Nakazawa, Ryo Kurazume, Katsushi Ikeuchi, "Iterative Refinement of Range Images with Anisotropic Error Distribution," Proc. of IEEE/RISJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.79-85, 2002.
- [11] 赤松 茂 "コンピュータによる顔の認識—サーベイ—" 信学論, Vol.J80-A, No.8, pp.1215-1230 (1997.8) & 信学論, Vol.J80-D-II, No.8, pp.2031-2046 (1997.8)
- [12] Berthold.K.P.Horn, "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions", Journal of the Optical Society of America A, vol.5, no.7, pp.1127-1135, 1987.
- [13] Shinji Umeyama, "Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.13, no.4, April 1991.