

簡易3次元モデルの解析による石窟寺院のVR復元

正司 哲朗† 村山 健二† 岡田 至弘† 百済康義 ††

† 龍谷大学 理工学研究科電子情報学専攻

†† 龍谷大学文学部仏教学科

〒 520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

Tel. 077-543-7418

E-mail: shoji@mail433.elec.ryukoku.ac.jp

概要

デジタルアーカイブでのコンテンツの作成において、すでに消失している対象に対してのVR復元の一手法について述べる。石窟寺院を対象として、平面図、2次元画像の解析を行うことによって得られる簡易3次元モデルをもとにVR復元を行う。次に、VR復元された石窟寺院を臨場感を高めて呈示するために3次元立体表示を行う。これにより、石窟寺院内の壁画画像アーカイブにアクセスするためのユーザインタフェースとして有効であることを示す。

Virtual Reconstruction Based On Simplified 3-D Model - 3-D Modeling for No.9 Bazeklik Temple -

Tetsuo Shoji† Kenji Murayama† Yoshihiro Okada† Kougi Kudara††

†Faculty of Science and Technology

School of Ryukoku University

Ryukoku University

††Faculty of Letters

Ryukoku University

1-5 Yokotani, Seta, Otsu, Shiga, 520-2194, Japan

Tel. 077-543-7418

E-mail: shoji@mail433.elec.ryukoku.ac.jp

Abstract

In this paper, we describe a virtual reconstruction method for a non-existent object. Our approach consists of the following steps: First, we generate simplified 3-D model by analyzing a floor plan and 2-D images, and we reconstruct virtual Bazeklik Temple based on simplified 3-D model. Next, we present reconstructed Bazeklik Temple by using stereo display. Finally, we show that the reconstructed virtual Bazeklik Temple is able to use as user interface to access to archived images.

1 はじめに

デジタルアーカイブには、コンテンツの作成、配信、整理の各段階における技術的課題が存在する。

デジタルコンテンツ作成には、高品位画像の入力 [1] や 3次元形状計測 [2] の技術が必要である。

コンテンツを公開する場合には、著作権や不正コピーを防ぐために、電子透かし [3][4]・暗号 [5] などのセキュリティ技術が必要となってくる。

コンテンツの整理に関しては、コンテンツに対する付加情報として、メタデータ生成やコンテンツ検索などの要素を含む大規模なデータベースシステムの構築 [6] が必要とされる。

本研究では、デジタルアーカイブのコンテンツ作成を目的とした VR 復元の一手法を示す。デジタルアーカイブの対象として、現存する対象と消失した対象とに分類した場合、前者に対しての 3次元計測は、レンジファインダの性能向上により、精密な 3次元幾何情報の取得が可能となってきた [7]。

しかしながら、消失した対象に関しては、現存する資料や専門家の知識を基に仮想的に復元しなければならない [8]。本研究では、消失した対象に対するコンテンツ作成を目的とし、対象として、敦煌の西北のトルファン地区にあるベゼクリク第9号窟寺の VR 復元を行う。

図1に本研究の概要を示す。本稿では、蓄積された多数の画像群に対して、利用者が、画像にアクセスするためのインターフェースとして、VR 復元を行うことを目的とする。従来では、2次元的に配置された画像群に対して、アクセスする方法が主流であったが、2次元的に配置された画像群では、各画像間の関連や位置関係を直感的に把握することは難しい。

そこで、画像群を VR 復元した 3次元空間に配置することにより、直感的に画像間の関連や位置関係を把握しやすいインターフェース

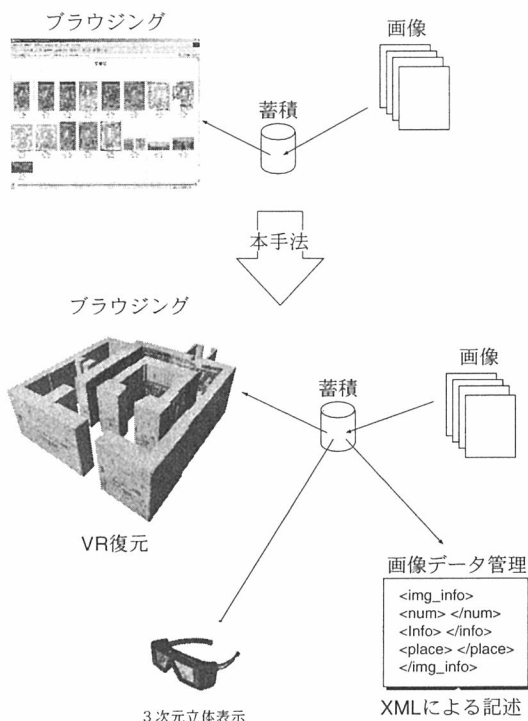


図 1: VR 復元の概要

を提案する。また、インターフェースとは別に、画像検索が利用可能となるように、各画像に関して、XML による画像記述を行う。

2 ベゼクリク第9号窟寺

ここでは、VR 復元の対象となるベゼクリク第9号窟寺について述べる。ベゼクリクとは、ウイグル語で「飾りのある所」という意味である。この窟寺内には、誓願図と呼ばれる壁画が描かれていた。ドイツのル・コックが、1905年に、完全に砂に埋もれていたベゼクリク第9号窟寺から砂をかき出して、無傷の壁画を発見した。彼は、壁画を切り取ってドイツに送り、ベルリンの民族学博物館に復元して展示していたが、建物に固定していた壁画は、第2次世界大戦に空襲のために失わ

れた。

第9号窟寺の誓願図は、ル・コックによって、1913年にカラー版で図版出版されている。他の石窟寺院（例えば、4号窟寺）にも同じような配置で誓願図が描かれており、現地のイスラム教徒によって損傷を受けていたが、それらの壁画の幾つかは、イギリスのスタイン、ロシアのオルデンブルグ、大谷探検隊によっても、現地から持ち出され、その多くは図版として公刊されている。

誓願図は、中央に巨大な仏像を描き、その左右の下方には供養者や礼拝者を配置し、上方には比丘や天部を描く特徴がある。誓願図の配置は、修行者や参詣者は、廻廊を右回りするので、廻廊の左右に描かれた誓願図中央の仏は、それらの人の進行方向を向いている。

一方、第9号窟寺の内部構造は、ドームを頂く中堂（内陣）、それをとりまく廻廊（外陣）、その奥にある小室（かまぼこ形天井の洞窟）と、南側の側堂から成っており、素材は、日乾煉瓦造と岩窟で作られている。ル・コックが1905年に訪れたときには、ドームも落ち、壁画の多くは砂に埋もれていた。

ベゼクリク第9号窟寺について、以下のことがわかっている。

- 窟寺内での誓願画の位置
- 窟寺の高さは、約3m
- 窟寺内の廻廊の幅は、約1m
- 窟寺内は、日乾煉瓦で構成
- 倒壊後に作成された平面図
- 誓願図の図版（誓願図自体は、すでに消失）

本研究では、これらの情報をもとに、誓願図にアクセスするためのインターフェースとして、窟寺全体の大まかな構造をVR復元する方法について、以下に述べる。

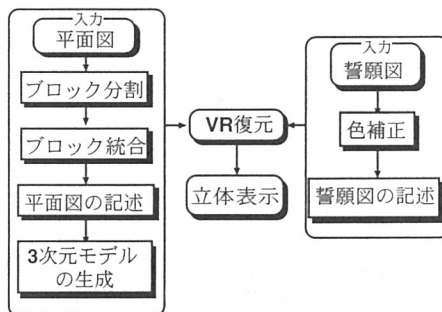


図2: VR復元の手順



(a) 原画像

(b) 色補正の結果

図3: 誓願図

3 ベゼクリク第9号窟寺のVR復元

VR復元処理の流れを図2に示す。

3.1 誓願図の色補正

ここでは、まず誓願図の色補正を行う。なぜなら、誓願図は、照明位置などの違いによりそれぞれの明るさや色味が異なっているためである。このような明るさや色味の異なる誓願図を連続的に配置すると、各誓願図の繋ぎ目で不連続性が生じ、連続的に配置された誓願図に対して違和感を与えやすくなる。このような誓願図の連結部分での不連続性を低減させるために、それぞれの画像が同様な色彩で表現されるように色補正を行う方法が考えられる。色の中でも、特に白は明るさの基



図 4: 誓願図

準にも用いることができ、様々な色を表現する上で重要な存在である。

本研究では、誓願図に撮影されているカラーチャートの白に着目して、各誓願図の色補正を行う。色補正には、誓願図に含まれているカラーチャートの白を用いる。目標値とするカラーチャートの白の値を r_w, g_w, b_w とし、誓願図のカラーチャートの白領域における平均値を $r_{ave}, g_{ave}, b_{ave}$ とする。色補正のために必要な R, G, B それぞれの変換係数を f_r, f_g, f_b とするとき、式(1)(2)(3)を用いて補正を行う。

$$f_r = \frac{r_w}{r_{ave}} \quad (1)$$

$$f_g = \frac{g_w}{g_{ave}} \quad (2)$$

$$f_b = \frac{b_w}{b_{ave}} \quad (3)$$

得られた係数 f_r, f_g, f_b を、対応する画像の画素に対して乗じることで白の補正を行う。図3(a)を元にして、色補正した結果を図3(b)に示す。

3.2 XMLによる誓願図の記述

画像の内容記述に関する研究は、盛んに行われており、XMLによる画像の内容記述は方法も提案されている[9]。

本研究でも、各誓願図のデータの管理につ

```
<誓願図>
<場所>ベゼクリク第9号窟寺</場所>
<図版番号>26</図版番号>
<銘文>
私はウツラ(最勝)という婆羅門青年であった。両足
尊カーシュヤバ(迦葉仏)のもとに、ナンディパーラ
(喜護)のこたばを聞いてから、出家する決心をした。
</銘文>
<Image>image/26.jpg</Image>
</誓願図>
```

図 5: XMLによる記述

いては、タグをメタデータとして用いることができるXML(eXtensibleMarkup Language)を用いて記述する。本稿で用いるメタデータは、

- タイトル: 誓願図
- 場所: ベゼクリク第9号窟寺
- 図版番号: Chotscho[12]の図版番号
- 銘文: 誓願図の主題
- Image: 誓願図の画像格納場所

とする。

これをXML形式で変換すると、図5のようになる。

XMLにより記述した誓願図は、データ検索のアプリケーションには役立つ。しかし、誓願図の配置関係は、メタデータだけでは、直感的に分かりづらい。そこで、XMLによる誓願図の記述とは別に、ベゼクリク第9号窟寺をVR復元することによって、その中に誓願図をアーカイブし、誓願図にアクセスするためのインタフェースとして用いる。これにより、画像の配置関係が直感的に分かりやすいものとなる。

次に、平面図からVR復元する方法について述べる。

3.3 平面図の解析

ここでは、平面図の構造解析方法について述べる。

ベゼクリク第9号窟寺のVR復元をするにあたり、まず、図6に示す平面図から3次元モデルを生成する。しかし、平面図から得られる情報は、復元対象の位置関係(位相情報)のみであり、正確な3次元モデルの生成は難しいため、簡易モデルの生成を行うものとする。

まず、入力となる平面図の2値化画像を生成する。この平面図から、対象の幾何モデルを生成するために、特徴点を抽出し、各特徴点間の接続関係を記述する必要がある。

構造解析方法として、従来からエッジ検出方法[10]や特徴点抽出方法[11]が様々提案されている。しかしながら、エッジ検出方法では、画像のノイズに弱く、平面図によっては、エッジが途切れてしまう場合がある。また、特徴点を自動的に検出する方法には、マスクパターンを適用するのが、一般的であるが、誤検出する可能性がある。コーナのような必要な特徴点を検出することができない場合がある。

そこで、平面図の特徴を大局的に捉えるために、ブロック分割を行うことにより、平面図の記述を行う。

平面図のブロック分割は、以下の方法により行う。

- Step1:** 平面図の傾きを補正する。
- Step2:** 図6の平面図を $m \times n$ にブロック分割する。
- Step3:** 式(4)により、各ブロック内の輝度値の平均値 ave を求める。

$$ave = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} P(i, j) \quad (4)$$

ただし、 $P(i, j)$ は、 (i, j) における画素値とする。

平均値 ave が、閾値 th より小さければ、建物部分の領域として、そのブロック位

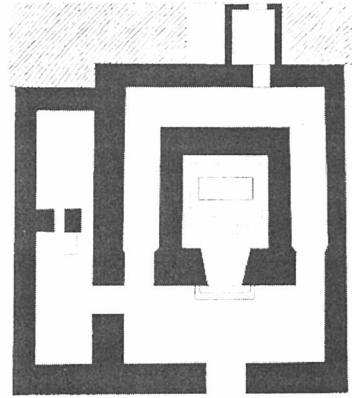


図6: ベゼクリク第9号窟寺の平面図

置を記述し、大きければ、領域外とみなしブロック位置を記述しない。

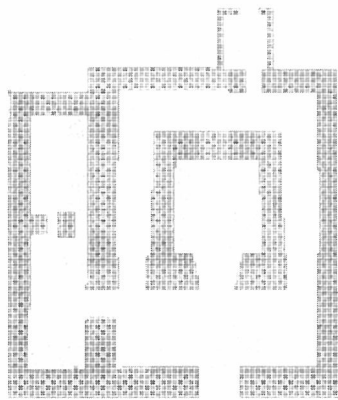
次に、 $m \times n$ のサイズに、等分割された平面図のブロックを統合し、ブロック数を削減する。これは、等分割にブロック分割されたモデルをそのまま3次元モデルとして生成した場合には、ポリゴン数が多くなり、計算機上でレンダリング速度が遅くなる。そこで、隣り合うブロックを統合して、対象となる建物の形状を保ちつつ、ブロック数を削減する。

平面図をブロック分割した結果を図7(a)に示す。この図は、平面図の解像度が 620×715 、ブロックサイズが、 5×5 、閾値 $th = 2.0$ における分割結果である。

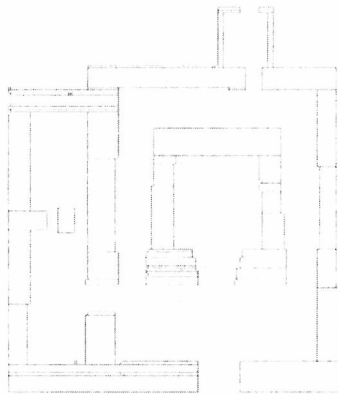
ブロックを統合した結果を図7(b)に示す。表1は、ブロックの統合前と統合後のブロック数を示している。表に示すように、統合することにより、ブロック数が削減されていることが分かる。

表1: ブロック統合結果

	ブロック数
統合前	482
統合後	62



(a) ブロック分割



(b) ブロック統合

図 7: 平面図の記述結果

3.4 3次元モデルの生成

次に、記述された平面図の簡易モデルを用いて、高さ情報を加えることにより、3次元モデルを生成する。高さ情報は、VR復元の対象となる第9号窟寺の廻廊が1m幅で、高さが3mであることから、平面図の縮尺比をもとにして、高さを計算する。図8に3次元モデルの生成結果を示す。

最後に、色補正された図版をテクスチャとして、生成された3次元モデルにマッピングを行う。このときの窟寺内の誓願図の位置は、

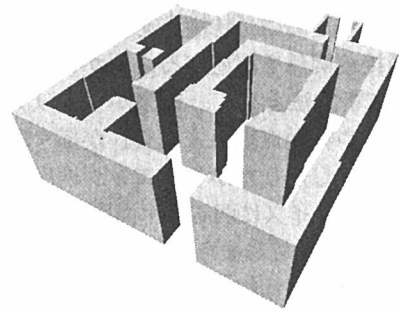
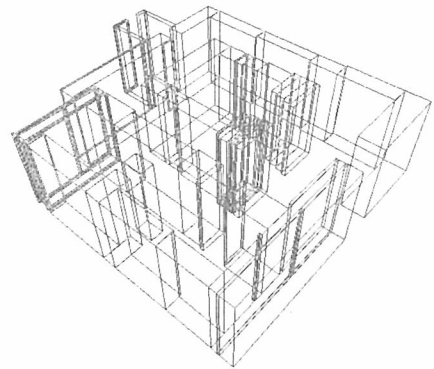


図 8: 3次元モデルの生成結果

文献 [12] に記載されているものを適用する。また、壁の煉瓦テクスチャは、現存する類似の石窟寺院の画像から取得する。誓願画と煉瓦をテクスチャマッピングして、VR復元した結果を図9に示す。

4 おわりに

本研究では、現存する図版と平面図を用いて、ベゼクリク第9号窟寺を例に挙げて、消失したコンテンツのVR復元の一手法を示した。これにより、誓願図の画像群にアクセスするためのインタフェースとして、VR復元した窟寺を利用することが可能となった。

しかし、誓願図の記述に関しては、本稿では、メタデータとして、誓願図についての外部情報のみを用いた。外部情報のみのメタデー

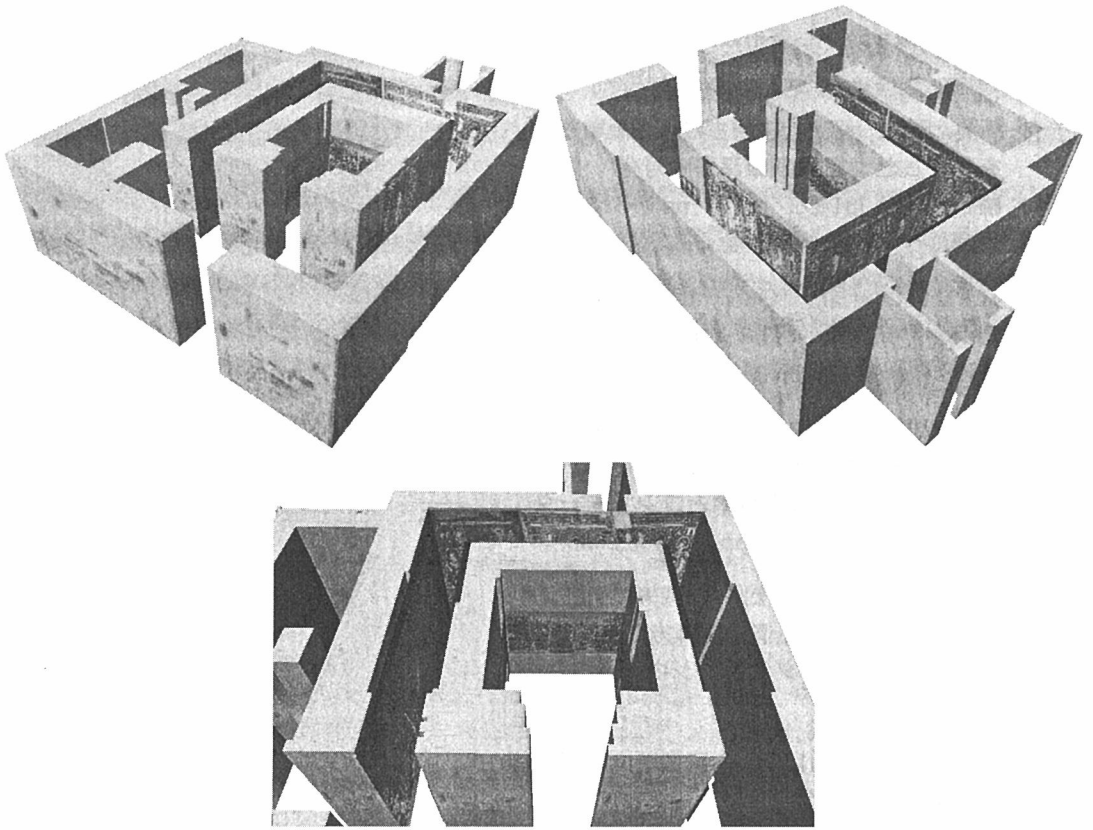


図9: ベゼクリク第9号窟のVR復元結果

タでは、画像中の色特徴などは記述されていないため、多数の画像から構図が似ている画像を検索することが難しい。今後は、外部情報のみではなく、画像特徴量も利用した記述方法についても検討していく。

また、VR復元した対象には、まだまだ、実空間のような臨場感が得られないのが現状である。これについては、デジタル化された3次元空間に対して、臨場感を高めていく必要がある。そのためには、人間の奥行知覚などを考慮にいたった空間の表現方法が考えられる。また、光源の制御や表面の質感表現について、さらに研究を進めていく。

参考文献

- [1] 王, 池上, 神谷, 旭, 岡田, 田中, 安部, “貴重文化財における高品位コンテンツの開発-大谷探検隊シルクロード収集品のWWWコンテンツ化”, 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, pp.239-246, 2000.
- [2] 佐藤, 塚本, 村田ら, “考古遺物用高精細三次元デジタルアーカイブシステム的设计”, 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, pp.247-254, 2000.
- [3] 岩村, 桜井, 今井, “配布者の不正に対して安全な電子透かしシステム”, 信学論A,

Vol.J83-A,No.7,pp.883-891,2000.

- [4] 村井, “電子透かし技術の最新動向”, 情報処理, 40 巻 2 号, pp.178-183, 1999.
- [5] 新見, 野田, 河口, “複雑さによる領域分割を利用した大容量画像深層暗号化”, 信学論DII, Vol.J81-D2, No.6, pp.1132-1140, 1998.
- [6] M.Flickner et.al.: “Query by Image and Video Content: The QBIC System”, IEEE Computer, pp.23-32, 1995.
- [7] 井村, 田畑, 金谷, 黒田, 眞鍋, 大城, 千原, “異種計測手法の統合による亀形石のデジタル保存”, 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, pp.131-138,2000.
- [8] 稲垣, 村田, 石田, 松原, “滅失建築文化遺産のVR復元と色情報制御方式”, 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, pp.123-130,2000.
- [9] 谷口, 八村, “XMLによる画像の内容記述と検索”, 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, pp.81-88,2000.
- [10] J.F.Canny, “A computational approach to edge detection”, IEEE trans. PAMI, 8(6), pp.679-698, 1986.
- [11] S.M.Steven and M.Brady, “SUSAN - a new approach to low level image processing”, Int'l J. Comput. Vision, 23(1), pp.45-78, 1997.
- [12] A von Le Coq, “Chotscho”, Berlin, Tafel 17-29 (Temple Nr.9, Bazaklik), 1913.