

立面図を用いたキジル石窟の3次元形状モデルの生成

正司 哲朗† 岡田 至弘†

†龍谷大学 理工学研究科電子情報学専攻
〒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

あらまし 立面図と実画像を用いて、石窟の3次元形状モデルを生成する手法を提案する。機械・機構部品などの精密な立面図(三面図)から3次元形状モデルを生成する手法は、これまで多く研究されている。ここで扱う立面図は、遺跡や遺構などの概略・表示として利用される簡易図法であり、正確に描かれたものではない。そのため、正確な稜線や頂点情報に基づく従来法を用いて、3次元形状モデルを生成することは困難である。そこで、本研究では、立面図(正面、平面、側面図)をそれぞれ1つの領域として扱い、視体積交差法を適用することにより、3次元形状モデルを生成する。次に、石窟内を撮影した壁画をテクスチャとして、3次元形状モデルにマッピングする方法について述べ、具体的な適用事例として、キジル石窟の3次元形状モデルの生成を試み、その有効性を示す。

3-D Modeling for Kizil Cave by the Orthographical Views

Tetsuo Shoji† Yoshihiro Okada†
†Faculty of Science and Technology
School of 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, using the orthographical views and real images, we propose a method to reconstruct 3-D model for virtual reality archaeology. Virtual reality archaeology is a new field that combines archeology and computer graphics to reconstruct archeological sites. Our approach consists of the following steps: First, we treat the orthographical views (front view, top view, side view) as faces. And, we reconstruct 3-D model from these views based on volumetric intersection method. Secondly, we describe a method of mapping images onto the reconstructed 3-D model. Finally, we reconstruct 3-D model of Kizil Cave with textures, by using these orthographical views and real images, and have confirmed its effectiveness.

1 まえがき

近年、計算機の飛躍的な3次元表示能力の向上により、3次元コンピュータグラフィックスを利用した応用分野がますます広がっている。その1つに、3次元CGを用いた仮想考古学(Virtual Reality Archaeology)[1]分野の研究が進められている。従来、考古学者間の遺跡や遺構等に関する情報を伝達する手段として、文書、画像、スケッチ等が用いられてきた。しかし、このよ

うな2次元的な情報では、直感的に理解することは難しいものである。仮想考古学の発展は、遺跡や遺構に関する新たな発見や認識を学者間で共有したり、研究者と一般の人との共有な空間を可能とするものである。また、仮想考古学は、対象となる遺跡や遺物等に新たな知見を与えることが可能となる。例えば、光源と遺跡との配置関係における、光源の位置や種類の影響の評価を行うことが可能となる。

以上のことを実現するためには、遺跡、遺構の3次元形状モデルを生成する必要がある。しかし、広域な遺跡、遺構の3次元形状モデルを既存の3次元CG作成ツールを用いて生成するには、多大な労力と製作コストを必要とする。そのため、簡易に、3次元形状モデルを生成する手法の確立が必要不可欠である。

最近では、実画像から3次元形状モデルを生成する方法の1つとして、レンジファインダなどの3次元距離・形状計測装置を用いて3次元形状モデルを生成するものがある[2]。しかし、この方法では、機動性、撮影環境、対象物体の大きさの点においての制限を考慮する必要がある。

そこで、本研究では、遺跡や遺構の概略・表示として利用される立面図(正・平・側面図)を用いて、キジル石窟の3次元形状モデルを生成する方法について述べる。次に、キジル石窟の壁画を撮影した実画像を用いて、立面図から生成された3次元形状モデルを補正し、テクスチャをマッピングする方法について述べる。

立面図から3次元形状モデルを生成する代表的な方法としては、大きく2つの手法に分類される。1つ目の手法は、タブレットを用いて対話的に人が三面図を描きながら、逐次的に3次元形状モデルを生成する方法[3]である。他の手法は、三面図の稜線や頂点を用いて、自動的に3次元形状モデルを生成する方法[4]である。これらの研究で対象としている三面図は、機械・機構などの精密なものであり、2次元CADにより生成されたものである。しかし、本研究で扱う立面図は、遺跡や遺構の概略表記として利用されるものであり、正確に描かれたものではない。そのため、正確な稜線や頂点情報に基づく従来法では、3次元モデルを生成することは困難である。

そこで、本研究では、建築物や遺跡の立面図(正面、平面、側面図)をそれぞれ1つの領域(対象物体のシルエット)として扱い、Shape from Silhouette手法[5]を立面図に適用することにより、3次元形状モデルを生成する。これにより、2次元CADによって生成された建築物の立面図や、手書きで描かれた石窟の立面図に対しても、3次元形状モデルの生成が可能であることを示す。

次に、立面図から生成した3次元形状モデルに実画像をテクスチャとしてマッピングする方法について述べる。一般的には、2枚以上の実画像があれば、画像間の対応点を求めることにより3次元情報を取得することが可能である[6][7]。この3次元情報を用いて、立

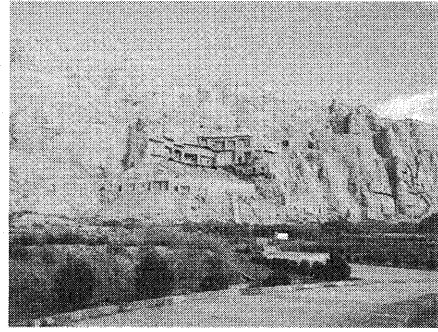


図1: 現在のキジル石窟

面図から生成した3次元形状モデルにテクスチャマッピングすることができる。しかし、本研究で用いる実画像は、カメラパラメータが未知であり、対応点が存在しない2枚の実画像をテクスチャとして用いるため、3次元情報を取得することが難しい。また、立面図から生成した3次元形状モデルの精度は、立面図の精度に依存するため、必ずしも実空間の対象と形状が一致するとは限らない。

そこで、本研究では、対話的な処理によって、3次元形状モデルを補正することにより、3次元形状モデルにテクスチャマッピングを行う。以下にその処理の概要について述べる。

まず、立面図から生成した3次元形状モデルを2次元画像に投影する。次に、3次元形状モデルに対して、3次元幾何変換を行い、実画像と比較しながら、おおまかな形状マッチングを行う。さらに、3次元形状モデルの微調整を対話的に行う。最後に、補正された3次元形状モデルに実画像をテクスチャとしてマッピングする。

以下、第2章では、本研究で対象とするキジル石窟について述べ、第3章では、キジル石窟の立面図から3次元形状モデルを生成する方法について述べる。第4章では、実画像と3次元形状モデルを用いて、対話的な処理に基づき、テクスチャマッピングする方法について述べ、本手法の有効性を確認する。

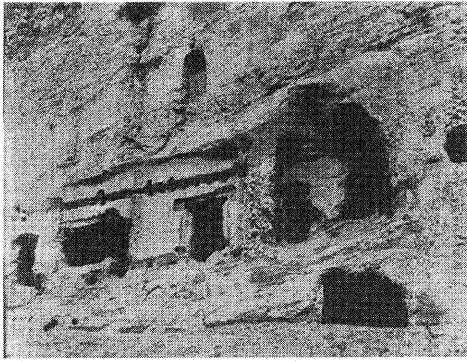


図 2: キジル石窟 (1903 年当時)

2 キジル石窟

図 1 に示すキジル石窟は、新疆ウイグル自治区庫車郊外のムザルト川の北岸にあって、南に面して続く断崖に、東西約 2 キロメートルにわたって多くの石窟が存在する。キジル石窟は、新疆の三大文化遺跡の 1 つと言われ、3 世紀から 9 世紀ごろまで造営され、石窟の総数は、237 窟あり、石窟の半数以上は、僧の住居や瞑想などに使われた僧房窟であるが、壁画や彫像で飾られた礼拝用の祠堂窟も 50 以上存在する。

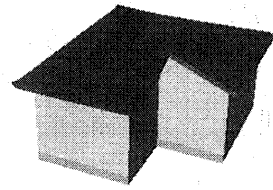
キジル石窟の調査は、1903 年のドイツ隊の A. グリュンヴェーデルと、大谷探検隊の渡辺哲信、堀賢雄の調査をはじめとし、各国の探検隊がその後続いた。図 2 は、大谷探検隊が 1903 年に撮影したキジル石窟である。

3 立面図を用いた視体積交差法に基づく 3 次元モデルの生成

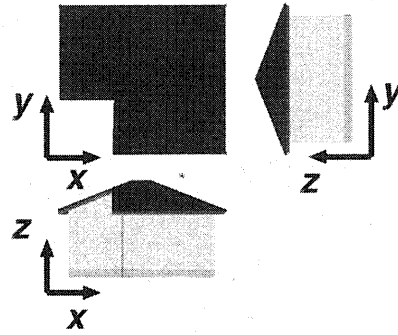
ここでは、立面図から 3 次元形状モデルを生成する方法について述べる。

3.1 前処理

3 次元形状モデルを生成する前処理として、まず、図 3(b) に示す立面図を 2 値化する (ここでは、対象領域を白とする)。次に、1 枚の立面図に、正面図、側面図、平面図が描かれているために、これを 3 枚の画像 (正面画像、側面画像、平面図画像) に分離する。それには、



(a) 3 次元モデル



(b) 立面図

図 3: 立面図

図 4 に示すように、画像の x 軸、 y 軸に対して、それぞれ白画素の分布を調べ、画像の x 軸、 y 軸に対する各ヒストグラムにおいて、谷となる点を対象領域の境界として、立面図の分離を行う。

3.2 視体積交差法

上記で、分離された正面図、側面図、平面図の 3 枚の画像に対して、視体積交差法を用いて 3 次元形状モデルの生成を行う。

視体積交差法 [5] は、図 5 に示すように、実空間内に複数設置したカメラで撮影した画像から物体のシルエットを抽出し、あらかじめカメラキャリブレーションにより求まるカメラパラメータを用いて、空間に逆投影し、シルエットの交わりを計算することによって、3 次元形状モデルを求める手法である。

本研究で使用する立面図 (正・平・側面図) は、画像面に垂直な軸に沿って投影する正射影図法によるもの

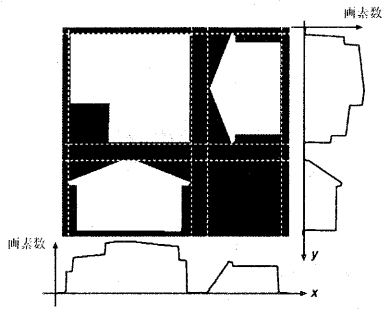


図 4: 立面図の分割

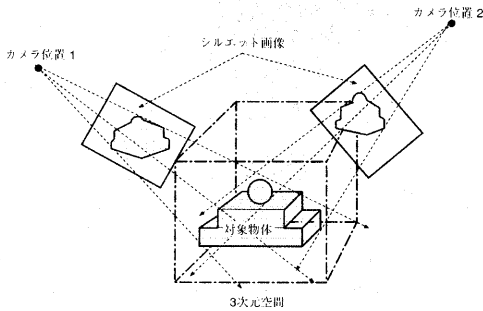


図 5: 視体積交差法

であり、奥行情報のみが失われる。このため、視体積交差法を用いて、3次元形状モデルを生成する場合に、必要とされるカメラパラメータを求めめる必要がない。

3.3 3次元モデルの生成

以下に立面図から3次元形状モデルを生成する手順を述べる。

1. 形状を構成する3次元空間 (Voxel 空間) を立方体格子に分割。
2. 各ボクセルに対して、正射影による逆投影を行い、立面図上におけるシルエットの存在有無の判定。
3. 最終的に存在するボクセル集合を3次元形状モデルとみなす。
4. 内部のボクセルを削除し、3次元形状のサーフェスモデルを生成する。

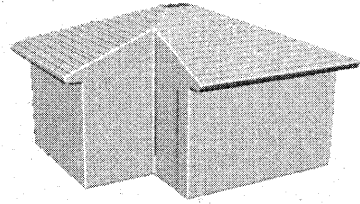


図 6: 3次元形状モデルの生成結果

ただし、2. で使用するシルエット画像は、立面図から生成したものである。また、4. の処理は、3次元形状の表面にテクスチャマッピングを行うための前処理である。テクスチャマッピング方法については、次章で述べる。

本手法により生成した3次元形状モデルを図6に示す。生成した形状モデルの精度は、図3(a)と図6の3次元形状モデルの辺の長さを比較することにより評価した。その結果、平均誤差率は、1.63%となった。

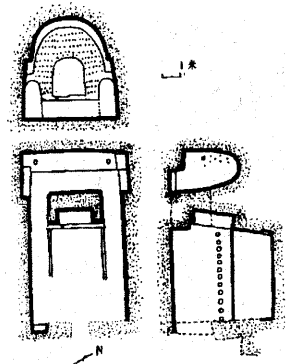
3.4 立面図を用いたキジル石窟の3次元モデリング

ここでは、キジル石窟の手書き立面図を基にして、3次元形状モデルを生成する方法について述べる。ただし、実験は、表1に示す計算機環境で行うものとする。まず、入力として用いる立面図(図7(a)、画像サイズは、433×562)は、文献[8]から引用したものである。次に、立面図からヒストグラムを用いて、3枚の画像(正面図画像、平面図画像、側面図画像)に分割する。さらに、各画像に対して、輪郭抽出を行ったあと、輪郭形状を基にして、シルエット画像を生成する。最後に、シルエット画像を用いて、視体積交差法に基づき、生成した3次元形状モデルを図7(b)に示す。

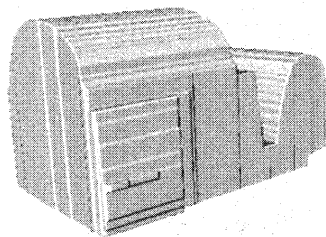
以上の結果から、手書きで描かれた立面図から3次

表 1: 開発環境

CPU	PentiumIII Xeon 1.0GHz
メモリ	512MB
OS	Windows2000
開発環境	VisualC++6.0, OpenGL



(a) キジル 8 号窟の立面図



(b) 3次元モデル生成結果

図 7: キジル第 8 石窟の 3次元モデル生成結果

元形状モデルを生成するにあたり、本手法が有効であることが確認された。

4 3次元モデルへのテクスチャマッピング

ここでは、立面図から得られた 3次元形状モデルに、キジル石窟の壁画をテクスチャとして、マッピングする方法について述べる。

立面図から生成した 3次元形状モデルは、必ずしも実際の対象と一致するとは限らない。実画像をテクスチャとして生成した 3次元形状モデルにマッピングするためには、実画像から 3次元情報を取得し、立面図から生成した 3次元形状モデルを得られた 3次元情報で補正する必要がある。

しかし、本研究で用いる実画像は、対応点が求めら

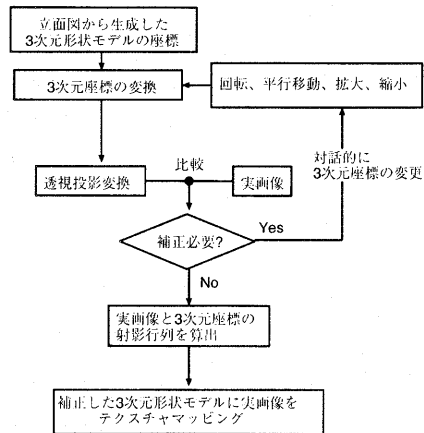


図 8: 対話的な補正処理によるテクスチャマッピング

れない画像であり、またカメラパラメータが未知なものである。このような画像から 3次元情報を取得することが困難である。

そこで、本研究では、立面図から生成した 3次元形状モデルを 2次元画像に投影し、実画像と比較しながら、対話的に 3次元形状モデルを補正し、壁画のテクスチャマッピングを行う。図 8 に処理概要を示し、以下に各方法について述べる。

4.1 3次元形状モデルの対話的な補正処理

立面図から生成した 3次元形状モデルを 2次元画像に投影する方法は、以下の通りである。ただし、3次元形状モデルから 2次元画像への投影には、3次元グラフィックスライブラリの 1つである OpenGL[9] の関数を用いている。

1. 透視投影変換の設定

実画像の撮影したカメラは、透視投影カメラモデルであると仮定し、立面図から生成した 3次元モデルから 2次元画像への投影は透視投影とする。透視投影変換は、OpenGL の `gluPerspective` 関数を用いた。この関数は、縦方向の画角、縦横比、クリップ面の距離を指定することができる。

2. カメラ位置と方向の設定

撮影された実画像のカメラ位置が未知であり、また 1枚からの画像からでは、カメラ位置を推定す

ることは難しい。そこで、本研究では、視点を1点に固定し、対話的に3次元形状モデルを3次元幾何変換させることにより、撮影された実画像との形状マッチングを行う。モデル変換方法は、次のとおりである。

3. モデルの変換

生成した3次元形状モデルの3次元座標を対話的に変換しながら、2次元画像へ投影し、実画像との形状マッチングを行う。そのための変換パラメータは、平行移動 T 、スケーリング変換 S 、および回転変換 R である。具体的には、変換前の3次元座標を (X, Y, Z) とし、変換後の3次元座標を (X', Y', Z') とすると、次のように 4×4 の行列で表され、

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

平行移動の場合、 4×4 の行列は、

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

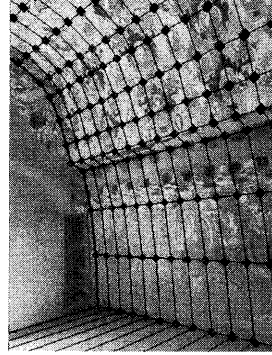
で表せる。また、スケーリング変換の場合、 4×4 の行列は、

$$S = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

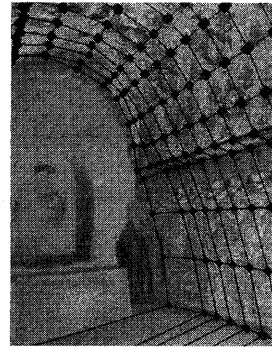
で表せる。さらに、回転変換では、 x 軸回りの回転変換を R_x 、 y 軸回りの回転変換を R_y 、 z 軸回りの回転変換を R_z とすると次のように表される。

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$



(a) キジル第8号窟の壁画 1



(b) キジル第8号窟の壁画 2

図9: 対話的に補正された3次元形状モデル

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

4. 3次元形状モデルの微調整

上述の方法により、実画像と3次元形状モデルとの大まかな形状マッチングを行い、最後に、3次元形状モデルの微調整を対話的に行う。

上記の方法により、対話的に補正した3次元形状モデルを図9に示す。ただし、図中では、補正した3次元形状モデルをワイヤーモデルで表現している。

4.2 射影行列

対話的に補正された3次元形状モデルに対して、テクスチャマッピングを行うために、補正された3次元形状モデルの3次元座標と実画像の2次元座標の関係を求める必要がある。ここでは、射影行列を求めることにより、2次元座標と3次元座標の関係を求める。それには、射影行列を

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1^T & p_{14} \\ P_2^T & p_{24} \\ P_3^T & p_{34} \end{bmatrix} \quad (7)$$

とし、補正された3次元形状モデルの3次元座標を M 、それを2次元画像に投影した点の2次元座標を m とする。ここで、

$$m = [u, v, 1]^T, M = [X, Y, Z, 1]^T \quad (8)$$

とすると、次の関係が成り立つ。

$$sm = PM \quad (9)$$

射影行列 P の算出は、立面図から生成される3次元形状モデルにおける3次元座標点 M と、その点を2次元画像に投影した点の座標 m を与え、6点以上の対応する点を用いて、式(10)から得られた解を初期値として、対応する点を用いて、式(10)の C を最小にする評価関数を非線形最小2乗法によって解くことが可能である。

$$C = \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_1^T M_i + p_{14}}{p_3^T M_i + p_{34}} - u_i \right)^2 + \left(\frac{p_2^T M_i + p_{24}}{p_3^T M_i + p_{34}} - v_i \right)^2 \quad (10)$$

4.3 実験結果

前節で述べた方法により、キジル第8号窟石窟の3次元形状モデルに壁画をテクスチャとして、マッピングした結果を図10に示す。ただし、図中で、テクスチャマッピングがされていない領域は、本研究で使用した画像内に、3次元形状モデルに対応する壁画が撮影されていないためである。

5 おわりに

本稿では、立面図に、視体積交差法を適用し、キジル石窟の3次元形状モデルを生成する手法について述

べた。また、対話処理に基づいて、実画像から立面図から生成した3次元形状モデルを補正し、3次元形状モデルにテクスチャマッピングを行う方法について述べ、その有効性を確認した。今後は、対話的な処理により、実画像を用いて3次元形状モデルを補正しているが、この処理を自動化する方法について、検討をすすめていく。

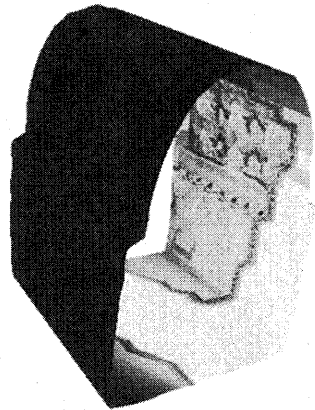
参考文献

- [1] Dennis R. Holloway, "Native American Virtual Reality Archaeology: An Architect's Perspective", VIRTUAL REALITY IN ARCHAEOLOGY, Archeo Press, London, England, 2000, spring.
- [2] 佐藤, 塚本, 村田ら, "考古遺物用高精度三次元デジタルアーカイブシステムの設計", 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] Kalay Y. E., "Worldview: An Integrated Geometric Modeling/Drafting System", IEEE CG & A, pp.36-46, 1987.
- [4] 田村, 狩野, 西原, "省略のある板金三面図からの3次元モデルの復元", 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.4, pp.771-778, 1997.
- [5] P.Srivasan, P.Liang, and S.Hackwood, "Computational geometric method in volumetric intersections for 3D reconstruction", Pattern Recognition, 23(8), pp.843-857, 1990.
- [6] Stan Birchfield, Carlo Tomasi, "Depth Discontinuities by Pixel-to-Pixel Stereo", Processing of the IEEE International Conference of Computer Vision, 1998.
- [7] 杉本 典子, 徐 剛, "弱中心射影画像からオイラー角を利用しモーション復元の線形アルゴリズム", 電子情報通信学会論文誌 DII, Vol.J81-DII, No.4, pp.681-688, 1998.
- [8] 新疆亀茲石窟研究所編著, "克孜爾石窟内容総録", 新疆美術攝影出版社, 2000.6.

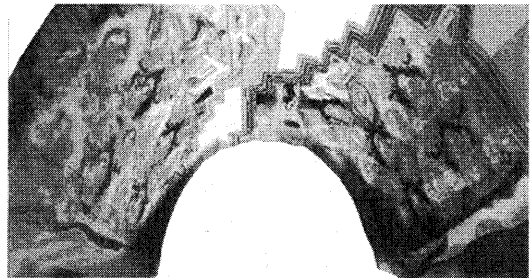
- [9] Jackie Neider, Tom Davis, Mason Woo,
“OpenGL Programming Guide(日本語版)
The Official Reference Document for OpenGL,
Release 1”, アジソンウェスレイ, 1993.



(a) 壁画 1



(b) 壁画 2



(c) 天井

図 10: キジル第 8 号窟のテクスチャマッピング結果(断面図)