

距離・カラー画像からの適応的3次元物体モデリング

田中弘美

E-mail : hiromi@cs.ritsumeai.ac.jp

立命館大学 理工学部 情報学科

〒525 滋賀県草津市野路町1916

リアリティが高く臨場感を与える仮想空間環境を効率的に生成・表示するためには、環境を構成する対象物体の形状や表面テクスチャーを高精度に保存し、かつ、人間の視覚特性に応じて効率的に可変解像度表示が可能な3次元物体モデル(3次元CGモデル)が必要である。本稿では、仮想空間内の構成物体の3次元CGモデルを、それらを非接触で計測した画像データから自動的に効率的に生成する方法を紹介する。形状やテクスチャー特徴の抽出/解析手法を基にCGの描画機能を有効に生かすための適応的データサンプリングや形状やテクスチャー表現法について述べる。本研究の特色は、微分幾何学に基づいて、視点の変化に不変な物体表面特徴を画像より抽出し、その不変特徴を用いて3次元任意形状物体を可変精度表示するために多重解像度CGモデルを自動生成することである。またその結果を、美術品等の計測が困難な物体を非接触で観測した画像データに適用し、3次元CGモデルを自動生成した実験結果を示す。

Adaptive 3D Object Modeling from Range and Color Images

Hiromi T. Tanaka

Computer Science Department, Ritsumeikan University,

1916 Noji, Kusatsu, Shiga, 525 Japan

The objective of this work is to reconstruct a polyhedral representation of 3D objects from image data that can adapt to the intrinsic surface shape and color and that might be used as accurate CAD models. In this paper, we present an adaptive mesh model for hierarchical triangulation of 3D objects. We have developed an adaptive mesh generation algorithm that recursively bisects mesh elements by increasing the number of mesh nodes according to surface curvatures. The recursive subdivision based on such a viewpoint invariant feature yields the hierarchical surface triangulation that is intrinsic to the surface, and satisfies the absolute accuracy criterion, because nodes are generated as many times as required until the entire surface has been approximated with an arbitrarily specified threshold. The algorithm has been successfully applied to adaptive sampling and reconstruction of both the range and color images of Japanese antique dolls with fine grained color-texture.

1 まえがき

3次元仮想空間技術は、臨場感を提供する新しいヒューマンインターフェイス技術として社会的に大きな注目を集めている。臨場感を与える技術の中心は、コンピュータ内に3次元仮想空間を構築し、近年飛躍的に発展を遂げたコンピュータグラフィックス(CG)の描画機能を用いて視覚的に提示する方法である。

リアリティが高く臨場感を与える仮想空間(環境)を効率的に生成・表示するためには、環境を構成する対象物体の形状や表面テクスチャーを高精度に保存し、かつ、人間の視覚特性に応じて効率的に変解像度表示が可能な3次元物体モデル(3次元CGモデル)が必要である。従来のCADを用いたモデリング法では形状が既知の単純な物体しか扱えないため、複雑な任意形状の物体のモデリングには人手を介することが避けられない。そのため、実在する任意形状の複雑な表面模様のある物体の3次元CGモデルを観測画像データから自動的に生成する方法が必要とされている。

また近年は3次元形状計測技術の進展が著しく、物体の3次元形状を直接計測した距離データが容易に獲得されるようになり、特にレーザレンジファインダーから得られる高精度で密な距離画像は、入力距離画像を曲面として表現し微分幾何学[1]に基づいた3次元形状解析の研究が活発化している[2-10]。さらに最近ではレンジファインダーの小型化高速化が実現し、物体形状と同時に表面の輝度(カラー)情報も高精度に高速に獲得できるようになってきた[11]。

そこで本稿では、仮想空間内の構成物体の3次元CGモデルを、それらを非接触で計測した距離とカラー画像データから自動的に生成する方法について述べる。コンピュータビジョン(CV)分野で蓄積された形状やテクスチャー特徴の抽出/解析手法を基に、CGの描画機能を有効に生かすための適応的データサンプリングや形状やテクスチャー表現法について述べる。またその結果を遺跡から発掘された遺物や美術品等の計測が困難な物体のモデリングに適用し、それらを非接触で観測した距離画像とカラー画像データを用いて3次元CGモデルを自動生成し、仮想空間に陳列展示した仮想博物館システムを構築することを目的としている。

本研究の特色は、微分幾何学に基づいて、視点の変化に不変な物体表面特徴を画像より抽出し、それらの変換特徴を用いて3次元任意形状物体を変換精度表示するための多

重解像度CGモデルを自動生成することである。物体の多重解像度CGモデルを得ることにより、観測者の視点・視線および視覚特性に基づいて動的に、効率的な可変精度の仮想空間を生成・表示することが可能になる。またその結果として、「貴重な遺物や美術品を、臨場感を持って、意のままにインタラクティブに操作し観賞できる仮想博物館環境をインターネット上に提供すること」を実現することを目指している。

以下本稿では、適応格子生成法[9,10]を用いた3次元物体モデリングと可視化と、距離画像から抽出した3次元曲率を用いて、物体の階層的三角パッチ表現(多重解像度CGモデル)を生成する方法を述べる。本適応格子生成法は、濃淡、カラー画像等の一般画像に適用でき、画像の画素値、その一次微分、二次微分などの画像の幾何学的特徴に応じた、適応的画像圧縮及び復元に適用できる。

2 適応格子生成法を用いた3次元物体モデリングと可視化

適応格子を用いて、曲面の凹凸形状及びその複雑さに応じて適応的に3D形状を復元し、得られた曲面の適応的格子表現(階層的三角パッチ表現)を用いて効率的で忠実な可視化を実現する方法を述べる。

2.1 適応格子表現を用いた3次元物体の可視化

図1(b)に示すように、各格子要素を境界とする曲面領域は、格子要素を分割した2個の小三角平面(三角パッチ)で初期近似される。更に、図1(d)に示すように3D曲率の高い領域では、新たに生成された格子点を用いて多数の小三角パッチ集合に細分割される。

従って、曲面全体は、本来形状に適応的に生成された格子点とその連結関係を用いて、全表面上で均一で高精度の三角パッチ集合として表現され、一般のグラフィックシステムの描画機能を用いて可視化できる。更に、各格子点で復元された法線を曲面レンダリングに用いることにより、実際に計測された本来形状を忠実に効果的に可視化できる。

3 適応格子生成アルゴリズム

初期格子は、表示画面上のX、Y方向にそったそれぞれ($NumQuad.inX \times NumQuad.inY$)個の正方格子要素の

2次元配列として与えられる。初期格子の分割は、各格子要素を単位としてそれぞれ独立に、各格子要素の近傍格子要素内の形状変化に基づいて行なわれる。

アルゴリズムは、1) 格子(面)と各格子要素のデータ構造の初期化、及び、2) 格子要素分割手続き (*Divide_Triangle*) の再帰的呼びだし、から構成される。

以下に、適応格子生成アルゴリズムの概略を示す。

Procedure Adaptive_Mesh_Generation
(Mesh[NumQuads_inX][NumQuad_inY], Acc_Thresh)
begin

For each of [NumQuads_inX][NumQuads_inY] do
begin

- step 1: (* Mesh Initialization *)
Initialize each mesh element with locally observed surface properties;
- step 2: (* Initail Triangulation *)
Divide each mesh element into two root triangles, $Rt[0]$ and $Rt[1]$;
- step 3: (* Parallel Recursive Subdivision of Root-Triangles *)
Divide_Triangle($Rt[0]$, *Acc_Thresh*);
Divide_Triangle($Rt[1]$, *Acc_Thresh*);

end

end

3.1 格子点の初期化とデータ構造

初期格子は $[NumQuad_{inX}, NumQuad_{inY}]$ の正方格子要素の2次元配列で、各要素はそれぞれ4個の二進木構造(のルートノード)から構成される。各二進木は、格子要素のそれぞれ4個のルート三角形(を境界とする曲面領域)内の凹凸形状の階層構造を表す。

まず、各格子要素は *InitQuadSize* 間隔に反時計回りに配置された4格子点(p_0, p_1, p_2, p_3)と、それらの中心点に生成された p_4 を用いて初期化される。(*Init_Quadrilateral*)

各格子要素は、図1(c)に示すように、格子要素の4辺をそれぞれ基辺とする4個のルート三角形 $Tri[i], i = 0, 1, 2, 3$ に分割され初期化される。ただし、各ルート三角形の第三点は格子要素の中心点 p_4 とする。(*Set_Root_Triangle*) 次に、ルート三角形の分割回数 K_i をルート三角形の各3格子点の3D曲率値に基づいて設定し、ルート三角形を左右2個の子三角形に再帰的に K_i 回分割し、 K_i 階層の二進木構造を形成する

図2は、隣接する2個の格子要素 $Q_d(i_0, j_0), Q_d(i_0, j_0+1)$ が、その境界線に沿って曲率が高い場合に、 $Q_d(i_0, j_0)$ の

$Tri[2]$ と $Q_d(i_0, j_0+1)$ の $Tri[0]$ が、再帰的に3回分割され、3階層の二進木構造が形成された過程を示す。英字昇順に子三角形の生成過程を示す。

3.2 再帰的格子二分画法

親三角形の分割は、親三角形を境界とする曲面領域とその近傍の凹凸の変化に基づいて決定される (*Neighbor_Require_for_Subdivision*)[9,10]。

親三角形の現在の再帰深度、基辺長、左辺長(=右辺長)をそれぞれ、 $n(=CurrentDepth)$ 、 $l_n(=InitQuadSize * (1/\sqrt{2})^n)$ 、 $l_{n+1}(=InitQuadSize * (1/\sqrt{2})^{n+1})$ とする。親三角形の分割が決定された場合は、基辺の中点に新格子点 M が生成され、親三角形の左辺及び右辺を基辺とした2個の子三角形に二分される。子三角形の再帰深度、基辺長、左辺長(=右辺長)は、 $n+1$ 、 $l_{n+1}(=InitQuadSize * (1/\sqrt{2})^{n+1})$ 、 $l_{n+2}(=InitQuadSize * (1/\sqrt{2})^{n+2})$ である。更に、それぞれの左右子三角形を親三角形とし、再帰的に格子二分が繰り返される。

格子分割アルゴリズムの概略を以下に示す。

Procedure Divide_Triangle(T_p, Acc_Thresh)
begin

- step 1: (*Collect subdivision requests from neighbors for handling discontinuities *)
If *Neighbor_Require_for_Subdivision*(T_p, Acc_Thresh) then require for subdivision of T_p ;
- step 2: (* Neighbors require for subdivision of T_p *)
Divide a parent triangle T_p into T_l and T_r and process them independently *)
step 2.1: Initialize T_l and T_r using the parent nodes (P_0, P_1, P_2) of T_p and M ;
- step 2.2: (* Recursive Subdivision of T_l and T_r *)
Divide_Triangle(T_l, Acc_Thresh);
Divide_Triangle(T_r, Acc_Thresh);

end

4 実験

適応格子生成アルゴリズムをC言語で作成し、Iris4D-320VGX 上で行なった実験結果を示す。本実験には、Cyberware 社の3次元ディジタイザにより獲得された円筒型の距離・カラー画像を用いた。図3、図4、図5に2次元カラー画像と日本人形を撮影した距離・カラー画像を用いた2例の実験結果を示す。

5 結論

対象物体を非接触で計測した距離とカラー画像データから、形状・テクスチャー変化に適応した3次元CGモデルを自動的に生成する方法について述べた。適応格子生成法を用いて画素値の変化に応じて適応的にサンプリングしたデータ点から、形状や表面テクスチャーを高精度に保存しかつ任意の精度で可変解像度表示が可能な3次元CGモデルを生成し、効率的な可視化を実現した。本適応格子生成法は、距離・カラー画像に限らず一般画像にも適用可能であり、その画素値や一次微分、二次微分及びその不連続性にじた適応的画像圧縮及び復元(生成)が可能である。実距離画像を用いた実験結果を通して、本手法の有効性を確認した。

6 参考文献

1. do Carmo M.P.: *Differential Geometry of Curves and Surfaces*, Prentice Hall (1976).
2. Besl P., Jain R.: "Segmentation through Variable-Order Surface Fitting", *IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence*, Vol.PAMI-10, pp.167-191 (March 1988).
3. Brady M., Ponce J., Yuille A., Asada H.: "Describing Surfaces", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol.32, pp.1-28 (1985).
4. Jan T., Medioni G., Nevatia R.: "Surface Segmentation and Description from Curvature Features", *Proc. 1987 Image Understanding Workshop*, pp.351-359, Los Angeles CA (Feb. 1987).
5. Terzopoulos D.: "The computation of visible-surface representations", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(4):417-438(1988).
6. Terzopoulos D., Vasilescu M.: "Sampling and Reconstruction with Adaptive Meshes," *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition '91*, pp.70-75 (1991).
7. Tanaka H.T., Kishino F.: "Surface Reconstruction Model for Realistic Visualization", *Trans. IEICE*, Vol.E76, No.4, pp.494-500(April 1993) (電子情報通信学会英文論文誌 1993年4月).
8. 田中弘美:"3次元曲率を用いた顔の同定-顔の3次元特徴抽出", *信学論 D-II*, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1595-1603,(1993)
9. 田中弘美:"曲面再構成のための適応格子生成法 三角パッチ表現の並列生成アルゴリズム", *信学論 D-II*, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1691-1703 (1993)
10. Tanaka H.T.,: "Accuracy-based sampling and reconstruction with adaptive meshes for parallel hierarchical triangulation", *International Journal of Computer Vision and Image Understanding(CVIU)*, Vol.61, No.3, pp.335-350(May 1995)
11. 末永康仁、渡部保日児:"3D形状と輝度(色)の同時計測が可能なるスキャナとその顔画像入力への応用", *情処 CV 研究会* 67-5 (1990).

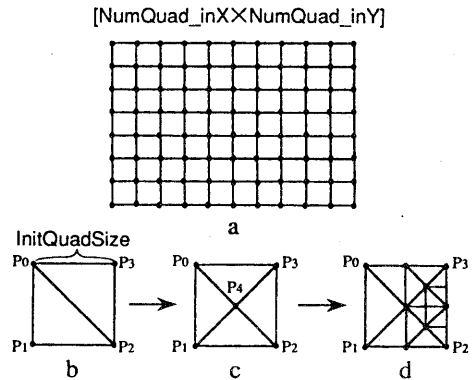


FIG. Adaptive mesh generation. Step 1: mesh initialization. (a) Black circles represent nodes; lines represent connections aligned with mutually orthogonal (x-y) coordinate lines of a viewing plane. Step 2: initial triangulation. (b) At each node, the surface shape is recovered with depth z, normal n, principal curvatures κ_1, κ_2 , and their directions \vec{e}_1, \vec{e}_2 . The region bounded by each quadrangle is initially approximated by two triangular patches of four neighboring nodes. Step 3: recursive subdivision. (c, d) According to the curvatures at both ends, the nodes are increased along the lines to approximate the regions of high curvature with finer triangular patches.

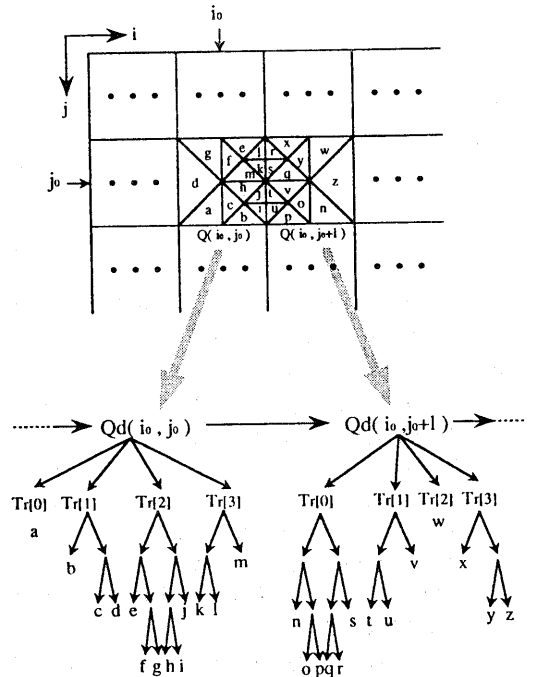


FIG. Binary subdivision tree structure.

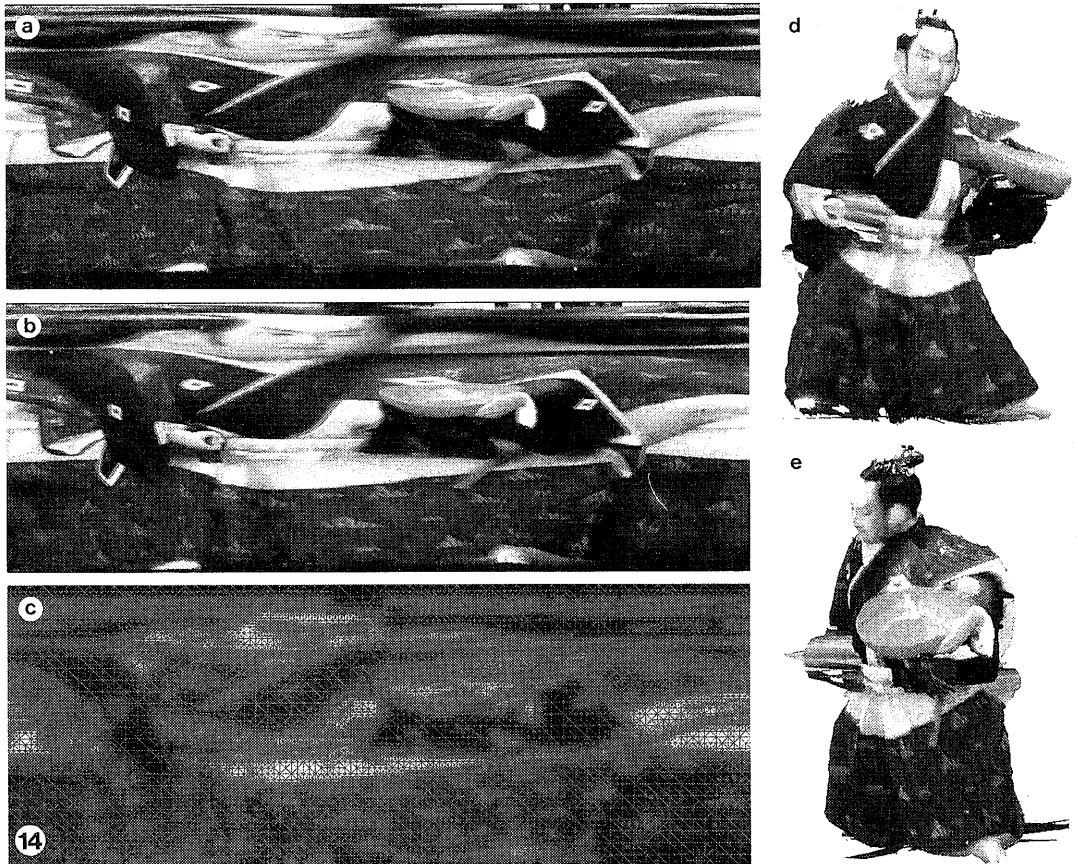
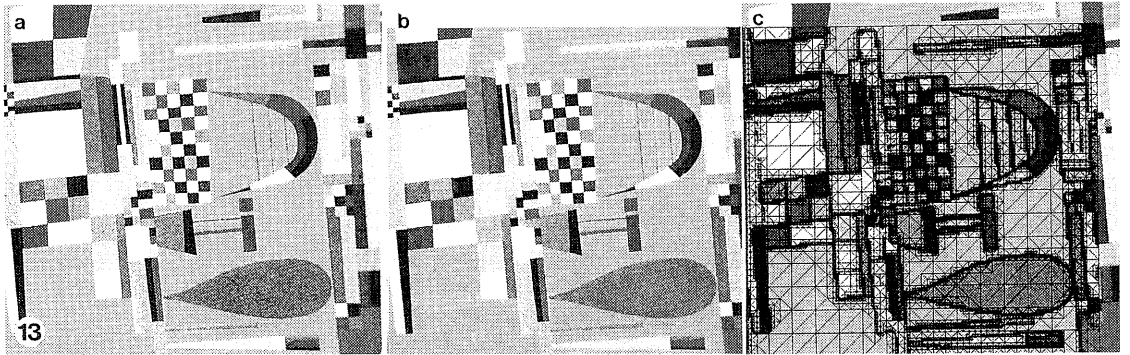


FIG. 3. Adaptive sampling and reconstruction of color image: (a) original color image; (b) reconstructed color image using Gouraud shading; (c) adaptive mesh (compression rate 15.6%).

FIG. 4. Adaptive sampling and reconstruction of samurai: (a) original color image; (b) reconstructed image using Gouraud shading; (c) adaptive mesh (compression rate 10.98%); (d) front view; (e) side view (compression rate 2.1%).

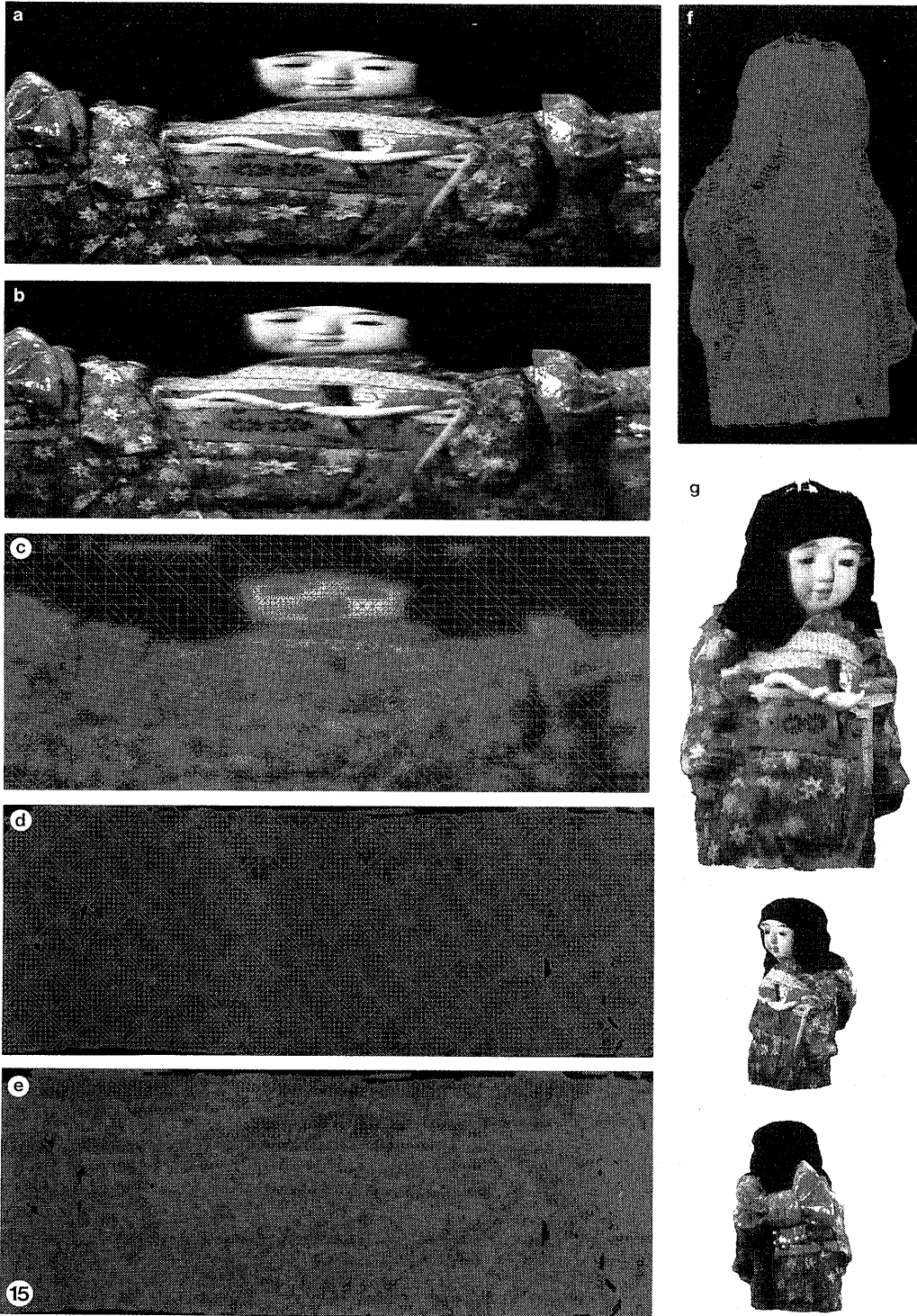


FIG. 5. Adaptive sampling and reconstruction of Japanese antique doll: (a) original color image; (b) reconstructed image; (c) adaptive mesh (compression rate 12.3%); (d) adaptive mesh on range image, 16-hedron approximation (compression rate 2.3%); (e) adaptive mesh on range image, 72-hedron approximation (compression rate 16.2%); (f) front view of 3D adaptive mesh; (g) front view of Japanese antique doll.