

バーチャルミュージアムシステムのための 画像情報を用いた3次元物体モデリング

田中 弘美† 李 相善†
松本 卓† 金子 昇治††

バーチャルリアリティは新しい3次元メディア表現技術として社会的に大きな関心を集めている。さらに最近の急速なインターネットの普及から、ネットワークを介しながらも、臨場感を持って意のままに対話的に展示物を観賞、操作、体験することができるバーチャルミュージアムの実現が期待されている。本論文では、実体(モノ)を観測した多視点の距離、カラー、X線画像から、複雑な3次元形状、表面テクスチャ(模様)、光反射特性、内部構造を高精度にかつ高圧縮して記述し、その結果を人間の視覚特性に応じて、あるいはネットワーク回線の速度に応じて、効率的にかつプログレッシブに解像度を变化させて表示することが可能な、階層的な多重解像度3次元物体CGモデルの生成法について述べる。モノに忠実な3次元物体CGモデルを得ることにより、「任意の照明環境」における「任意の視点」からのCG立体画像を生成することが可能になり、バーチャルミュージアム空間の照明環境を自在に設定して、モノの複雑な形状、色、模様や光沢の様々な変化の様を、さらに、本来不可視な内部構造をも任意の視点から観賞することが可能になる。

Image-based 3D Object Modeling for Virtual Museum System

HIROMI T. TANAKA,† SANG-SUN LEE,† TAKASHI MATSUMOTO†
and SHOJI KANEKO††

Virtual Reality technology provides a new methodology for human interface with realistic sensation, and has been received growing attention in the fields of human interface, computer graphics and computer vision. Reality of the virtual space is realized by generating photorealistic views in real time with computer graphic technology. One of key issues for the real time view generation problem is how to represent and display the 3D virtual space efficiently with adapting human vision sensitivity. In this paper, we propose a novel and efficient approach for hierarchical modeling of 3D objects from multi-mode real images of range, color and Xray observing the objects, with which shape, texture, reflectance and internal structure are effectively described in multi-resolutions. Arbitrary views of the objects under arbitrary lighting conditions are then efficiently generated with sufficient accuracy by selecting the appropriate level of the model based on the distance between the observer and the object.

1. ま え が き

バーチャルリアリティは新しい3次元メディア表現技術として社会的に大きな関心を集めている。さらに最近の急速なインターネットの普及から、ネットワークを介しながらも、臨場感を持って意のままに対話的に展示物を観賞、操作、体験することができる「時間と空間の壁」を越えるバーチャルミュージアムの実現が期待されている。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と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/仮想環境を効率的に生成・表示し、さらにネットワークを介して公開し共有するためには、環境を構成するそれぞれの展示物の複雑な3次元形状や、表面の模様、質感等を高精度にかつ高圧縮して記述し、さらに人間の視覚特性に応じて、あるいはネットワーク回線の速度に応じて効率的に表示が可能な3次元物体CGモデルが必要である。従来のCADを用いたモデリング法は、既知形状の単純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多大な人手を要する。そのため、実体(モノ)の3次元CGモデルを観測画像データか

† 立命館大学理工学部情報学科

Computer Vision Labo. of Computer Science, Ritsumeikan University

†† 三菱電機株式会社

MITSUBISHI electric corporation

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、レンジファインダによる3次元形状計測技術の進展が著しく、物体の3次元形状を非接触で計測した距離データが容易に獲得されるようになった。さらに最近では、レンジファインダの小型化・高速化が実現し、形状と同時に表面の色輝度(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¹⁾。美術館や博物館においても、モノの3次元形状の「記録・保存」データ獲得のためにレンジファインダが普及してきている。

そこで本論文では、モノを多視点から観測した距離画像、カラー画像、X線画像から、その3次元形状、表面テクスチャ(模様)、光反射特性、内部構造を高精度にかつ簡潔に記述し、さらに人間の視覚特性に応じて、あるいはネットワーク回線の速度に応じて、効率的にかつプログレッシブに解像度を変化させて表示することが可能な階層的な多重解像度3次元物体CGモデルの生成法について述べる。

本研究の特色は、微分幾何学に基づく視点変化に不変な形状特徴や、照明条件変化に不変な表面反射特性を画像より抽出し、それらの不変特徴を用いて任意形状物体を可変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。またその結果として、遺跡から発掘された「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、観賞できるバーチャルミュージアム環境をインターネット上に提供すること」が可能になる。

図1に全体システムの構成図を示す。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特徴の抽出/解析手法を基に、CGのレンダリング機能や仮想空間記述言語VRML(Virtual Reality Modeling Language)の多段階表示機能(LOD: Level Of Details)を有効に生かすための3次元物体CGモデルを生成する処理過程を示している。以下本論文では図1に示す処理順序に従って、2章において入力画像の特徴および領域抽出と、特徴解析に基づく階層的な多重解像度3次元物体モデリングについて、3章において視覚特性分析に基づく可変解像度3次元物体表示について、4章において装束や衣装等の布物体の質感表現のための異方性反射特性モデリングについて、5章においてモノの学術資料として分析に重要な実測図の自動生成と、X線画像を用いる内部構造の可視化について述べる。

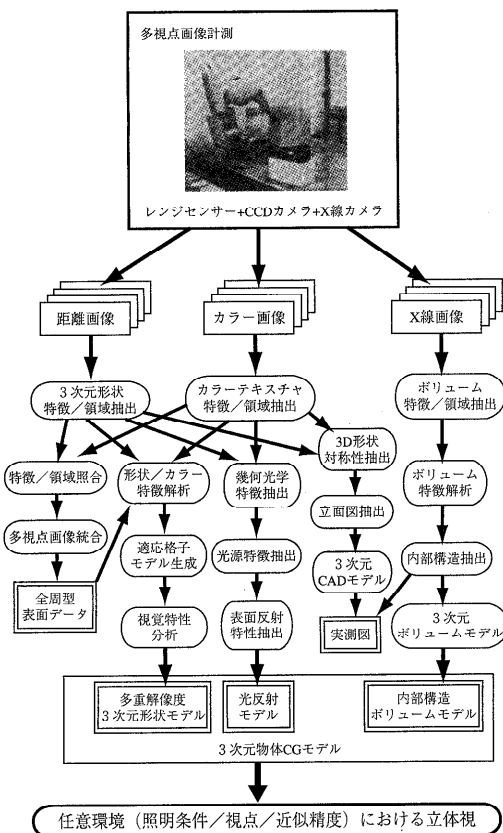


図1 全体システム構成図

Fig. 1 Overview of 3D object modeling system.

2. 距離・カラー画像からの階層的な多重解像度3次元物体モデリング

モノを観測した入力画像の、画素値やその1次微分、2次微分値の不連続点から画像の局所特徴を抽出し、その特徴の変化に応じて入力画像を適応的にサンプリングし、階層的かつ多重解像度3次元物体CGモデルを自動生成する方法を述べる。

2.1 画像特徴および領域抽出

距離画像からは微分幾何学に基づく法線やガウス曲率、平均曲率、主曲率と主方向等の様々な3次元曲率特徴が抽出される。これらの幾何特徴は観察方向に不変な曲面本来の凹凸形状を表す特長を持つ。また、カラー画像からは人間の色知覚特性と対応したGodlove色差等が抽出され、色の差異や一様性を評価するために用いられる。

さらに、これらの画像特徴が一樣な領域やその境界線から画像の大局的な特徴を抽出ことができ、多視点画像間の比較、照合、さらに統合処理等の高次処

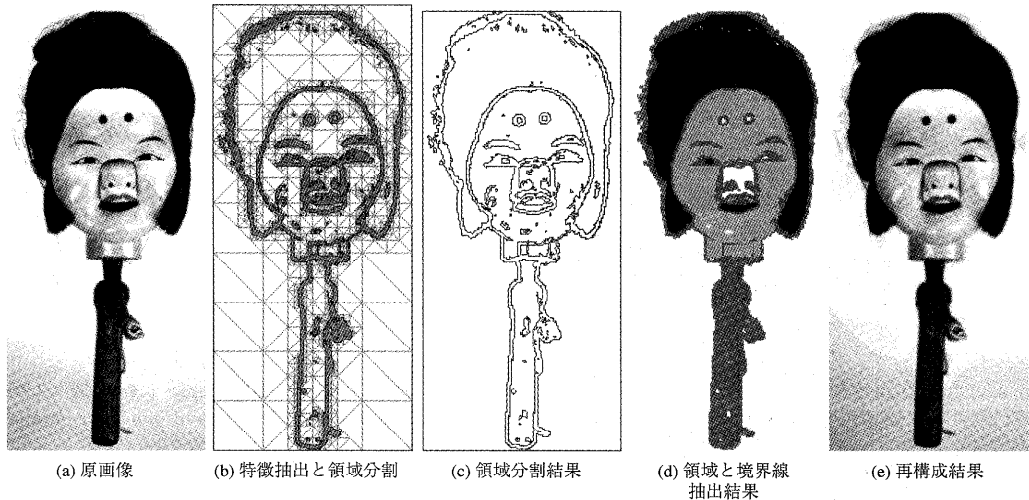


図2 適応格子を用いた画像特徴抽出と領域分割
Fig. 2 Features and regions extraction with adaptive meshes.

理の入力として有効に用いられる²⁾。

本研究では、画像の階層的分離・統合により並列に領域を抽出する手法を考案した³⁾。2.2節で述べる適応格子法に基づいて画像特徴の不連続性を再帰的に探索し、その結果を統合して画像に含まれるすべての領域を同時に抽出する並列領域分割手法であり、探索された不連続性に整合した領域境界を高精度に抽出することが可能である。

図2に適応格子を用いる並列領域分割の抽出結果を示す。図2(a)のカラー画像から抽出した特徴点の分布を図2(b)に示す。また、これらの特徴点を境界線とした領域抽出の結果を図2(c)に、3つの主要な領域とその境界線を図2(d)に示す。各領域を構成する三角小領域集合をグーロシェーディングを用いて復元した結果を図2(e)に示す。

2.2 適応格子を用いる階層的三角パッチモデル生成

画像から抽出した物体表面点の法線、3次元曲率、色差等の画像特徴に基づき、図3に示す適応格子を用いて、サンプリングされた表面点集合から階層的3次元物体モデルを生成する^{4),5)}。まず物体の3次元形状は、距離画像から適応格子法を用いてサンプリングされた表面点集合を用いて小三角形平面(三角パッチ)集合で初期近似される。次に3次元曲率等の画像特徴の変化の大きい領域では、新たに格子点間の中間点でサンプリングされた表面点を用いて多数の小三角パッチ集合に細分割される。したがって、表面全体は、格子点において視線の変化に不変な本来の形状や色の複雑さに適応的にサンプリングされた表面点と格子状の連結関係を用いて、全表面で均一で高精度の階層的な

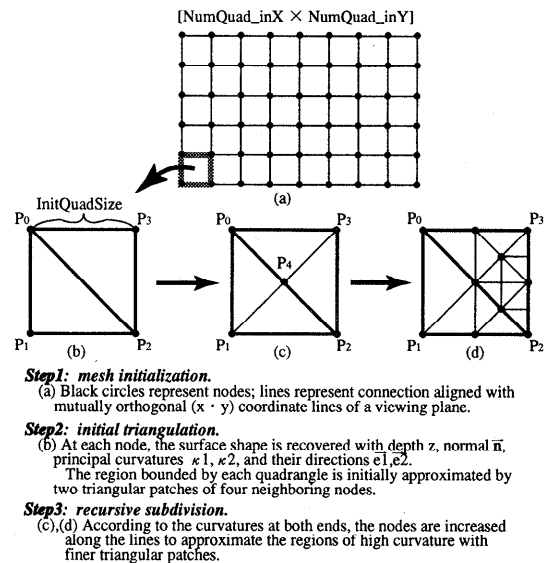


図3 適応格子生成法
Fig. 3 Adaptive mesh generation.

多重解像度三角パッチモデルとして生成される。また、表示においては各格子点で算出された法線をCGのレンダリングパラメータとして用いることにより、実際に計測された本来の形状を忠実に効果的に可視化することが可能になる。

図4に、日本人形を全周から観測した全周型距離・カラー画像を入力とし、3次元曲率や色変化度に応じて適応的に画像をサンプリングし生成した3次元物体CGモデルを示す。



図4 全周型距離・カラー画像からの適応的3次元物体モデリング

Fig. 4 Adaptive 3D object modeling from cylindrical range and color images.

3. 視覚特性に基づく可変精度3次元物体表示

リアリティが高く臨場感を与える3次元空間を効率的に表示するためには、人間の奥行きに対する視覚特性を考慮することが重要である。仮想空間において遠くにある物体形状を、観察者と物体間の距離（視距離）と視覚特性に基づき、形状を適切に簡略化して表示することにより、知覚される品質を維持したまま物体表示速度を向上させることが可能になる。そこで本研究では、適応格子法を用いて生成された階層的な多重解像度3次元物体モデルの各解像度を、奥行きおよび空間知覚の感度に基づいて自動的に選択することにより、視距離に応じて解像度レベルを滑らかに切り替えて表示する方法を考案した⁶⁾。

3.1 奥行き弁別閾と空間弁別閾

本手法では奥行き方向の凹凸形状の簡略化基準として、ある視距離における奥行き差異を知覚できる最小

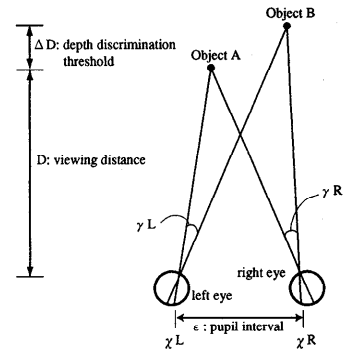


図5 視差による奥行き弁別閾(長田⁷⁾ p.650:図1より引用)

Fig. 5 Viewing distance and binocular parallax.

の範囲である奥行き弁別閾⁷⁾を用いる。奥行き弁別閾は、視距離の増加に対し非線形性を示すことが報告されている⁸⁾が、従来の提案手法では考慮されていない⁹⁾。

図5に示すように、両眼視差 $\Delta\theta$ を視距離 D および、 $D + \Delta D$ のそれぞれの点A、Bを見たときの左右眼の視線方向のずれ角度 γ_L 、 γ_R の差とすると、奥行き弁別閾 ΔD は次式のように D の非線形増加関数として表される。

$$\Delta D = \frac{\Delta\theta D^2}{\varepsilon - \Delta\theta D} \quad (1)$$

ただし、 $\Delta\theta = \gamma_R - \gamma_L$ 、 $\varepsilon (= x_R - x_L)$ は両眼の瞳孔間隔とする。

奥行き弁別閾の定義から、ある視距離 D において、奥行き弁別閾 ΔD の値より小さい奥行き方向の凹凸は知覚されないため、3次元物体モデルの ΔD 以下の大きさを持つ三角パッチ（本研究では、 ΔD を直径とする円の面積より小さい三角パッチとする）は省略可能と考えられる。そこで各解像度レベル i の三角パッチサイズから奥行き弁別閾 ΔD を算出し、さらに ΔD_i と視距離 D_i を対応付けることにより、各解像度レベルが有効な表示範囲を決定することが可能になる。

仮想空間では物体は任意の3次元方向から観察されるために、奥行き方向の凹凸形状とともに物体の輪郭の凹凸形状、つまり空間方向の視覚特性を考慮する必要がある。そこで空間方向の視覚特性として空間周波数特性¹⁰⁾を用いる。図6に示すように、単位視野角で知覚される最小の縞間隔、つまり縞の明暗変化を表す空間正弦波パターン¹⁰⁾の1/2周期 ΔS を空間弁別閾とし、物体形状簡略化の基準として用いる。したがって、 ΔS の値より小さい輪郭の凹凸形状は知覚されないため、 ΔS 以下の大きさの三角パッチを省略可能と考える。

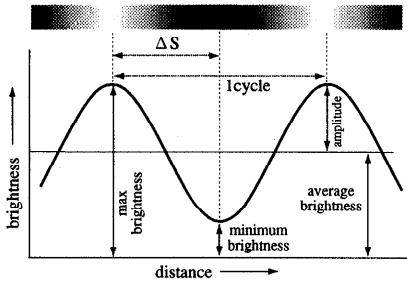


図6 空間正弦波パターン (大山ら¹⁰⁾ p.560より引用)
Fig. 6 Spatial sinusoidal pattern.

表1 各解像度レベルの有効限界視距離 $D(m)$
Table 1 Effective distance range $D(m)$ in each level.

解像度 Lv	パッチ数	min_size	$D(m)$
レベル 0	975	24.24	5.66
レベル 1	1885	17.14	4.23
レベル 2	3621	12.12	3.18
レベル 3	5821	8.56	2.51
レベル 4	7968	6.06	2.33
レベル 5	9374	4.28	1.99
レベル 6	9389	3.28	1.85

min_size : 最小三角パッチサイズ (単位 mm)

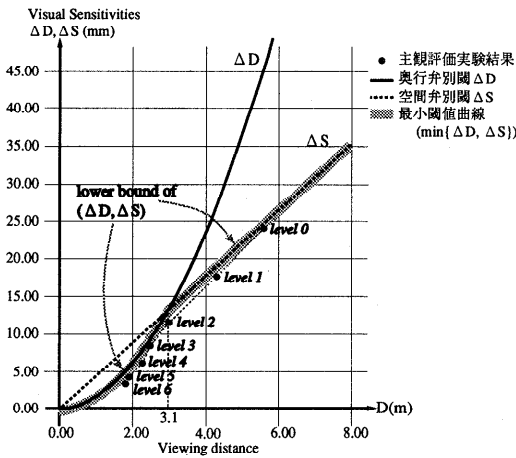


図7 視距離と各視覚特性の関係
Fig. 7 Experimental result on visual sensitivities.

3.2 3次元空間視覚特性に基づく3次元物体表示

本手法では奥行きおよび空間方向すべての3次元空間視覚特性を満たすために、視距離に対応する奥行き弁別閾と空間弁別閾を比較してより小さい弁別閾値をその視距離における物体形状簡略化基準として用いることとする。図7に視距離 D に対する視覚特性 ΔD と ΔS の関係を示す。したがって、視距離 3.1 m までは奥行き弁別閾 ΔD 、それ以上の距離では空間弁別閾 ΔS が形状簡略化基準として選択され、図7に示す最小弁別閾値グラフとして抽出することができる。

次に、最小弁別閾値グラフを用いて、解像度レベル i の最小三角パッチサイズと、視距離 D_i における奥行きおよび空間視覚特性を同時に満たす解像度レベルを対応付けることにより、レベル切替え視距離を決定する。表1に示すレベル切替え視距離の選択結果を、図8に示すようにVRMLのLOD機能の視距離設定パラメータとして用いる。図9に示す7階層解像度レベルのお面モデルを用いて主観評価実験を行った。その結果から図7に示すように、主観評価結果と最小閾

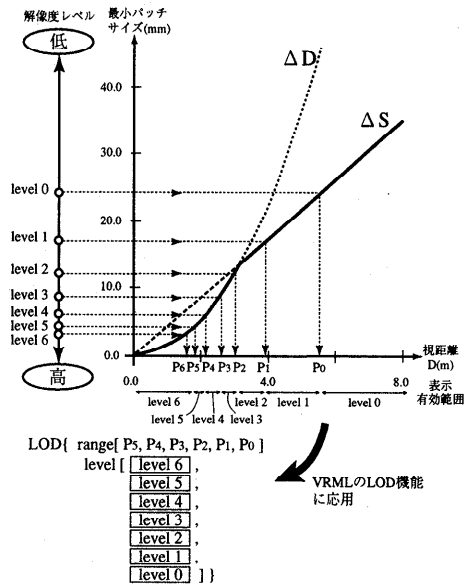


図8 解像度レベルの選択とLOD機能切替距離の設定
Fig. 8 Multi resolution levels for LOD.

値グラフとの相関性から本手法の有効性を確認した。

4. 布質感表現のための異方性反射モデリング

博物館の所蔵する資料には、装束や衣装等の様々な布地物体が存在する。材質に固有の布地物体の光沢や質感は独特であり、その織り構造と繊維の光の透過性により異方性反射を起こす。これを忠実に表現することがCGやCVにおける課題である。

布の異方性反射を表現するために、繊維の束である単糸を楕円柱として近似する方法が提案されている¹¹⁾が、膨大な計算コストを必要とする。しかし布地物体は、シルクや綿等の素材の違いによりその繊維の断面形状もそれぞれ異なる。そこで本研究では、この繊維の断面形状の違いにより布の光沢の相違が現れることに着目し、繊維の断面形状と織り方向を布構造として記述し素材固有の光沢の違いを表現する布の異方性光

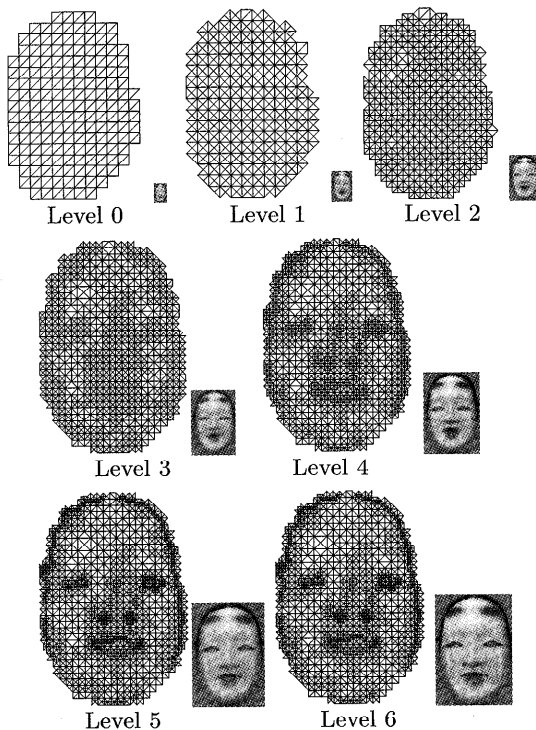
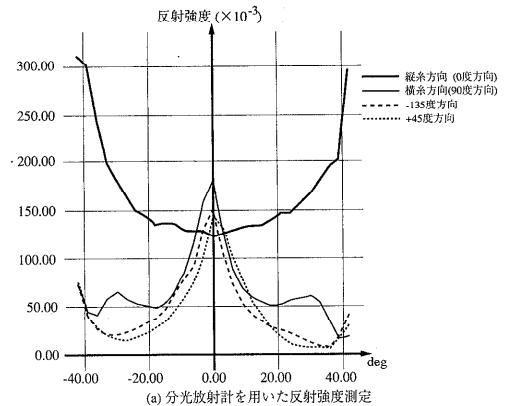


図9 階層的3次元物体モデルの表示

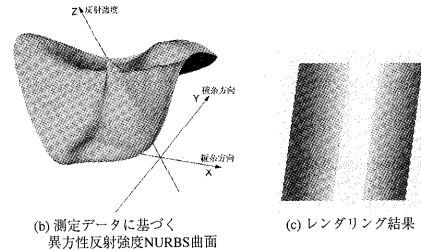
Fig. 9 Display of multi-resolution 3D object model.

反射特性を抽出する方法を検討した^{12),13)}.

まず、対象織布として繊維断面が三角形を持つシルクライクなポリエステル製のサテン生地を用い、高分解能カラーカメラと分光放射計を用いて多視点から表面反射光強度を測定した。測定にはLeaf DSC-2K, 解像度2048×2048, RGB値各14ビットの高分解能カラーカメラを使用し、光源にはVideo Light 1500 (L2731), 100v, 500wのハロゲンランプを使用した。光源方向、視線方向と織布の織り方向の3方向間の相対関係の違いによる反射強度を測定するために、光源とカメラを固定し、資料台を水平方向と垂直方向に回転させた。水平方向に45度ごとに4回回転し、各水平回転ごとに垂直方向に3度ごと回転し、反射光強度を測定した。図10(a)に示すように、縦糸、横糸、+45度、+135度の4方向の反射強度曲線を抽出した。図10(b), (c)に得られた4方向の反射強度曲線間を補間するNURBS曲面より生成した対象織布の異方性反射特性モデルとレンダリング結果を示す。織布の繊維の断面形状を三角形として推定した理論値と比較・評価することにより、その有効性を確かめた¹⁴⁾。



(a) 分光放射計を用いた反射強度測定



(b) 測定データに基づく異方性反射強度NURBS曲面

(c) レンダリング結果

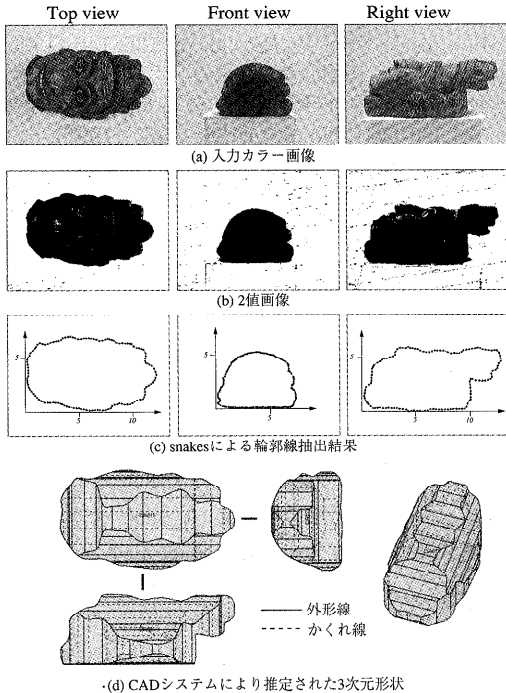
図10 反射特性解析に基づく異方性反射モデリング
Fig. 10 Reflection model for cloth objects.

5. 実測図の自動生成

モノを研究の対象として分析的な視点から調査・研究を行うためには、実測図の作成がきわめて有効とされている。実測図とは、「立体であるモノ」の素材・形態・構造等にかかわる情報を製図法により「平面的な図形」に置き換えたものであり、資料の外形・構造・寸法・材質等の外形情報と内部構造の情報を同一図面に表現できる特長を持つ¹⁵⁾。しかし同時に、平面図で記述されるために一見して外観の全体像がつかみにくく、また作成者の主観や製図技術が実測図の精度に影響を及ぼす。そこで本研究では、観測画像データから客観的な実測図を自動生成し、さらにモノの外形情報と内部構造情報を任意の3次元方向から可視化することを可能にする方法を考案した¹⁶⁾。

本手法は、能動視覚¹⁷⁾アプローチに基づいており、モノの安定姿勢の観測により形状記述・復元に重要な観測視点を自動的に選択し、獲得された多視点カラー画像からモノの投影図や立面図を生成し、さらに動的輪郭モデル¹⁸⁾を用いて抽出された境界線情報をCADシステムに入力し、3次元形状を推定する。

図11に、能動視覚システムを用いて自動獲得されたお面の立面図(三面図)、すなわちTop, Front (=Rear), Right (=Left) から観測した二値化画像



(d) CADシステムにより推定された3次元形状

図 11 能動視覚に基づく実測図自動生成

Fig. 11 Automatic construction of measured drawings.

と輪郭形状, CAD システムにより推定された3次元形状を示す。

さらに, モノの内部構造や繊維を観測した X 線画像を分析・分類し, 3次元ボリュームモデルを生成することにより, 本来不可視な内部情報を任意方向から可視化することを実現した¹⁹⁾。図 12 に, 木製の水筒の距離・カラー・X 線画像から抽出した3次元内部構造ボリュームモデルのレンダリング結果を示す。

6. まとめ

バーチャルミュージアムはその特長を生かし展示物とその文化的背景の理解を, 見学者の意図に沿って対話的に深めることのできる3次元環境として提供する必要がある。以上の3次元物体モデリングの研究を基に, VRML を用いて, 見学者が展示物により興味を抱くような資料情報やフィールドワークのビデオ映像を3次元的にかつ階層的に配置し提供したバーチャルミュージアムシステムをインターネット上に試作した²⁰⁾。本システムの特徴は, 1) すべての資料情報のシンボリックなモノを展示物とすることにより, 興味の対象との容易な「出会い」を支援する, 2) 非接触観測画像データから多重解像度可視化のため階層的な3次元物体モデルを自動生成する, 3) VRML の LOD 機

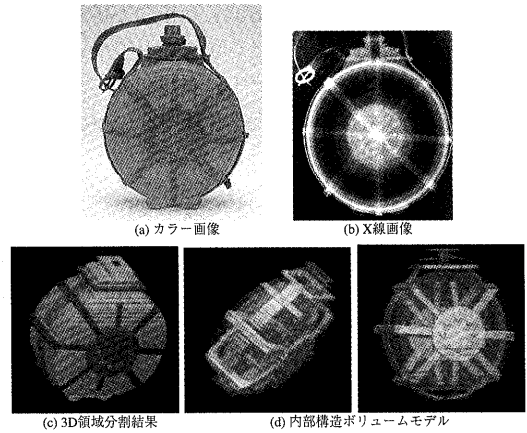


図 12 X 線画像を用いた内部構造モデリング

Fig. 12 Volume object modeling from X-ray image.

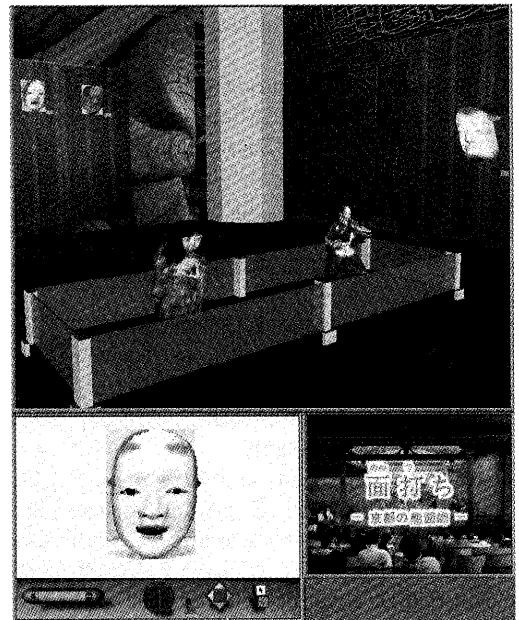


図 13 バーチャルミュージアム試作システム

Fig. 13 Prototype system of virtual museum.

能を用いて人間の視覚特性に応じてモノを可変解像度に表示する, ことである。図 13 は試作システムの表示例であり, 上部に情報のシンボルである能面等が展示されたミュージアム空間を, 下左部に任意の視点・照明条件下のモノの立体視画像, 下右部にその製作過程のビデオ映像の関連資料を提供している。

今後は, 高速グラフィックワークステーションを用いて, 内部構造ボリュームモデルや能装束表現のための異方性反射モデルの実装を図り, 試作システムの改良を進める予定である。

謝辞 本研究は文部省科学研究費(重点領域研究

「人文科学とコンピュータ」B02)の援助を得て行われた。貴重な資料をご提供いただきました国立民族学博物館宇治谷恵氏、森田恒之博士、有益なアドバイスをいただいた奈良先端大学院大学佐藤宏介先生に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 服部数幸, 佐藤幸男: スキャン式符号化法による小型高速レンジファインダ, 信学論, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1528-1535 (1993).
- 2) 千秋久子, 田中弘美: 球面相関を用いる距離・カラー画像の統合, 信学秋季全大 D-416, p.419 (1996).
- 3) 李 相善, 田中弘美: 適応メッシュを用いた画像の並列領域分割, MIRU'98 講演論文集 II, pp.137-142 (1998).
- 4) 田中弘美, 岸野文郎: 曲面再構成のための適応格子生成法, 信学論, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1691-1703 (1993).
- 5) Tanaka, H.T.: Accuracy-Based Sampling and Reconstruction with Adaptive Meshes for Parallel Hierarchical Triangulation, *Int. J. of CVIU*, Vol.61, No.3, pp.335-350 (1995).
- 6) 金子昇治, 松本 卓, 田中弘美: 奥行きおよび空間知覚特性に基づく階層的3次元物体モデルの生成・表示, MIRU'98 講演論文集 II, pp.441-447 (1998).
- 7) 長田昌次郎: 視覚の奥行き距離情報とその奥行き感度, テレビ誌, Vol.31, No.8, pp.649-655 (1977).
- 8) 長田昌次郎: 奥行き信号分離(NS)式立体画像装置と両眼立体視特性の測定, ME 誌, Vol.20, No.3, pp.16-23 (1982).
- 9) Wang, S., Sato, M. and Kawarada, H.: Multiresolution Model Construction from Scattered Range Data by Hierarchical Cube-based Segmentation, *IEICE TRANS. INF.& SYST.*, Vol.E80-D, No.8, pp.780-787 (1997).
- 10) 大山 正, 今井省吾, 和気典二: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房 (1994).
- 11) 木元宏次, 大野義夫: 拡張3次元テクスチャを用いた布地物体の質感表示, 信学論, Vol.J75-D-II, No.4, pp.706-713 (1992).
- 12) 高木元太郎, 田中弘美: 布の光反射モデルのための表面反射特性の測定と検討, 信学春季全大 (1997).
- 13) 小林里美, 田中弘美: 距離・カラー画像を用いた表面反射特性の推定, 信学秋季全大 D-399, p.402 (1996).
- 14) 宇佐美賢子, 田中弘美: 反射光解析に基づく布の異方性反射モデル生成, 信学春季全大 (1999).
- 15) 名久井芳枝: 実測図のすすめ, 一芦舎 (1986).
- 16) 田中士郎, 安部慶喜, 田中弘美: 能動視覚に基づく実測図自動生成, 信学春季全大 (1999).

- 17) Nishimura, K. and Tanaka, H.T.: Active Shape Interring Based on the Symmetry in Stable Poses, *Proc. ICPR '96*, pp.136-140 (1996).
- 18) 上田恭敬, 田中弘美: 領域のトポロジカルな構造抽出のための符号付き動的輪郭モデル, 信学論, Vol.J80-D-II, No.6, pp.1398-1405 (1997).
- 19) 李 相善, 内田順平, 細田泰弘, 田中弘美: X線画像を用いる内部構造ボリュームモデル, 信学春季全大 (1999).
- 20) 西脇孝志, 梶原誠悟, 田中弘美: 距離・カラー画像からの実世界ベース仮想博物館システムの試作, 1996 信学春季全大 (1996).

(平成10年9月7日受付)

(平成11年1月8日採録)



田中 弘美 (正会員)

昭和50年お茶の水女子大学理学部物理学科卒業。昭和50~53年(株)富士通勤務。昭和56年米国ロチェスター大学大学院コンピュータサイエンス学科修士課程修了。昭和63年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。昭和63~平成6年ATR通信システム研究所客員研究員。平成6年立命館大学理工学部情報学科教授。CV, CG, VR, 画像通信の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



李 相善 (学生会員)

昭和58年韓国ソウル大自然科学卒。昭和60~平成3年韓国科学技術院勤務。平成4年韓国(株)ハンディソフト勤務。平成8年より立命館大学大学院博士課程在学中。領域分割の研究に従事。



松本 卓

平成10年立命館大学理工学部情報学科卒業。現在, 同大学大学院博士前期課程在学中。3次元物体モデリングの研究に従事。



金子 昇治

平成8年立命館大学理工学部情報学科卒業。平成10年同大学大学院博士課程前期修了。同年三菱電機(株)に入社。在学中, 3次元モデルの効率生成・表示に関する研究に従事。