

詳細構造をもつVRオブジェクトに対する観察者の形状認識特性を考慮した高現実感描画法

若月 大輔[†] 石井 郁夫[†] 高橋 章^{††} 今井 博英[†]
牧野 秀夫[†]

A High Reality Drawing Method for VR Objects with Details Structure in Consideration of Shape Recognition Characteristics of Observers

Daisuke WAKATSUKI[†], Ikuo ISHII[†], Akira TAKAHASHI^{††}, Hiroei IMAI[†], and Hideo MAKINO[†]

あらまし 本論文では、観察者の形状認識特性として、輪郭形状などの幾何学的手掛りと、表面の輝度変化などの光学的手掛りを考慮したVRオブジェクトの高現実感描画法について述べる。オブジェクトが存在する空間を立方体格子で再帰的に分割し、オブジェクトの表面や法線ベクトルデータをoctreeで階層化する。視点や光源に関する情報と階層化された形状データを用いた詳細度制御によって効率的なオブジェクト描画を行う。オブジェクトに固有の形状の複雑さや色などの特徴量を用いて詳細度制御を行う従来法と比較して、描画時の輪郭形状や輝度変化による形状認識特性を考慮した本方式では効率的な詳細度制御が可能であり、少ないデータ量で良好な描画結果が得られることを示す。

キーワード パーチャルリアリティ, VRオブジェクト描画, 形状認識, 詳細度制御, Octree

1. ま え が き

VRオブジェクトに接近していくと実物体と同様に次第に詳細な構造が見えてくるような高現実感表現は、VR表示技術の重要なアプローチの一つである。例えば実物体の形状を細部まで計測して得られたオブジェクトをVR空間に提示するような方法は、仮想博物館における遺物、美術品、昆虫や植物の展示や各種映像素材などとして多くの実用的用途が期待できる。しかし、詳細構造をもつVRオブジェクトは膨大なデータをもち、描画や伝送時の負荷が著しく増大する。このようなオブジェクトを表示するために、トライアングルストリップやディスプレイリストなどでポリゴン数を減らさずにデータ量を圧縮する方法[1]がある。しかし、オブジェクトがハードウェアの処理能力を上回

るデータ量をもつ場合や、観察距離が遠いときに表示装置の解像度よりも小さいポリゴンが描画される場合には効率的とはいえない。

そこで、膨大なオブジェクトデータの中から、観察者が正確な形状を認識するために必要なデータを抽出して提示する効率的な描画法が必要になる。LODやoctreeなどのオブジェクトの詳細度を階層化したモデルを用いて、観察距離や形状特徴を考慮して形状の詳細度を制御する方法[2],[3]が多数報告されている。また、オブジェクトの形状に加えて色彩やテクスチャなどの属性情報を考慮した方法[4]~[6]も提案されている。これらの方法ではオブジェクトに固有の特徴量をパラメータとして形状詳細度制御を実行するが、更に描画されるオブジェクト像から観察者が正確な形状を認識するための様々な特性を考慮すれば、より高現実感で効率的な描画が可能になる。

この観点では視点から見えないポリゴンを削減する方法[7],[8]や、観察者の奥行・空間弁別閾を考慮した方法[9]が報告されている。また、視点に応じてオブジェクトの表面ポリゴンがスクリーンに投影されると

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市

Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050 Igarashi 2-nocho, Niigata-shi, 950-2181 Japan

^{††} 長岡工業高等専門学校, 長岡市

Nagaoka National College of Technology, 888 Nishikataaki, Nagaoka-shi, 940-8532 Japan

きの誤差を考慮して形状詳細制御を行う方法 [10] ~ [12] が報告されている。しかし、現実感を高めるには、輪郭部分の形状だけでなく可視表面部分の陰影などの輝度変化を同時に扱う制御が必要である。本論文では描画されるオブジェクトの輪郭形状や表面の輝度変化などの観察者の形状認識特性を考慮した高現実感描画法を提案する。

スクリーンに投影されたオブジェクト像から観察者がその 3 次元形状を認識する手掛りとして、輪郭形状などの幾何学的手掛りと、表面の輝度変化などの光学的手掛りがある。観察者の視界に入る可視表面のみを対象にして、表面の法線ベクトルや視点及び光源を考慮し、描画時の輪郭形状や表面の輝度変化に対して局部的に適切な詳細度で形状を表現する。

本方式では、オブジェクト表面形状データとともに表面の法線ベクトルを階層的に扱う。階層化には単純で高速なアルゴリズムでオブジェクトを局部的に参照可能である octree を用いた。オブジェクト描画処理では、描画に必要なオブジェクト表面を抽出し、3 次元形状認識における幾何学的手掛りを考慮した輪郭形状詳細度制御と、光学的手掛りであるオブジェクト表面の輝度変化を考慮した輝度変化量詳細度制御を同時に適用した。その結果、詳細構造をもつ VR オブジェクトの高現実感表示を効率的に行うことが可能になった。

2. マルチスケール形状モデル

詳細度制御を行うマルチスケール形状モデルとして、図 1 (a) のように立方体空間を再帰的に 8 等分割した octree 構造を用いる。Octree の各ノードを octant と呼ぶ。根の octant をレベル値 $L = 0$ とし、図 1 (b) のように階層ごとにレベル値を与える。各階層では分割された空間の詳細度に適したオブジェクト表面パッチを生成する。観察者の形状認識特性に応じて描画に必要な詳細度の階層を局部的に選択することによって詳細度制御を行う。

Octant に表面形状を近似したパッチを生成する方法として、空間格子に等値面を生成する Marching-Cubes 法 [13] を応用した方法があるが、隣接する octant 間でレベル値が異なる場合に、レベル値が高い octant の詳細なパッチとレベル値が低い octant の粗いパッチの境界でパッチが不連続になり裂け目が生じることが知られている [2], [3]。そこで、レベル値の異なる隣接 octant 間でも不連続を生じないマルチスケールパッチ生成法 [14] を適用する。

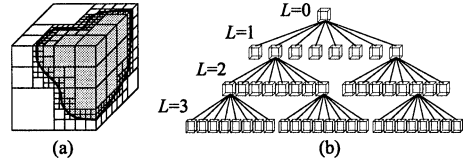


図 1 Octree
Fig. 1 Octree.

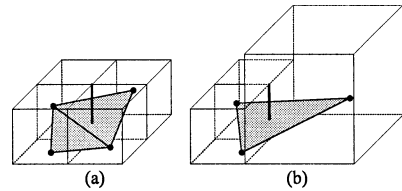


図 2 マルチスケールパッチ
Fig. 2 Multi-scale patches.

マルチスケールパッチ生成法では、各階層の各 octant ごとに以下のデータを与える。

- Octant に含まれるオブジェクト表面を最も良く近似する 1 個の代表頂点の座標値 v 。
- オブジェクト表面が octant のどの稜線と交差するかを示すフラグ $F_e(i)$, $i = 0 \sim 11$ 。

表示のために選択された octant について、図 2 (a) のようにオブジェクト表面が交差する稜線 (太線) に接する octant の代表頂点 (黒丸) 間を結ぶ表面ポリゴンを生成する。この方法では図 2 (b) のように隣接する octant のレベルが異なっていても不連続を生じることなくポリゴンを生成することができる。なお、レベル値を高くするほど、より詳細な形状を表現できるが、データ量と処理量が増大するので、最大レベル値 L_m を設ける。

3. 形状認識特性を考慮した詳細度制御

3.1 形状認識特性制御方式

先に筆者らは、オブジェクト形状を octree で階層化し、起伏などのオブジェクトの特徴量をパラメータとして局部的に詳細度制御を行う“形状特徴量制御方式” [15] を提案した。このようなオブジェクトに固有な特徴量を用いる方法に対して、観察者の視点や光源の情報を活用する方法として、形状簡略化近似による描画時のポリゴンの誤差を考慮する方法 [11], Phong の鏡面反射領域を抽出した詳細度制御 [12] などが提案されている。

本論文では、形状認識上重要な輪郭部分の誤差制御

に特化した輪郭形状詳細度制御と、鏡面反射領域だけでなく光源と法線ベクトルや反射率によって求まる輝度変化量を考慮した可視表面全体に対する輝度変化量詳細度制御を考え、これらを同時に適用することによって、より広範囲の形状認識特性を反映した詳細度制御を実現した。

3.2 法線ベクトルコーン

ある octant の代表頂点 v における法線ベクトル n を軸ベクトルとし、その octant に含まれるポリゴンの法線ベクトルと軸ベクトルとのなす角の最大値 θ を半頂角とするコーンを法線ベクトルコーン (n, θ) と呼ぶ [16]。Octree を葉 octant から出発し、根に向かって順に式 (1)、(2) よりその親の節 octant の法線ベクトルコーンを再帰的に求めることによって階層化する。

$$n = \text{normalize} \left(\sum_{i=0}^7 n_c(i) \right). \quad (1)$$

$$\theta = \max \left\{ \cos^{-1}(n \cdot n_c(i)) + \theta_c(i) \right\}, \quad i = 0 \cdots 7, 0 \leq \theta \leq \pi. \quad (2)$$

ここで、 $(n_c(i), \theta_c(i))$ は対象 octant に内包される八つの子 octant の法線ベクトルコーン、normalize は単位ベクトル化関数、max は最大値選択関数である。

3.3 輪郭形状詳細度制御

選択されたレベル値が低すぎると、スクリーン投影時の輪郭形状が粗く表示されて近似による形状誤差が認識されやすくなるので、輪郭形状詳細度制御により適切な詳細度のレベル値の octant を選択する。この選択基準として、図 3 のように各レベル値における形状近似誤差 ΔE に対する視角 φ を用いる。形状近似誤差とは、あるレベルの octant の近似面とその子孫にあたるレベル値 L_m の octant の近似面との間に生じる距離の誤差である。対象の octant の代表頂点座標値を v 、この octant の子孫のレベル値 L_m の

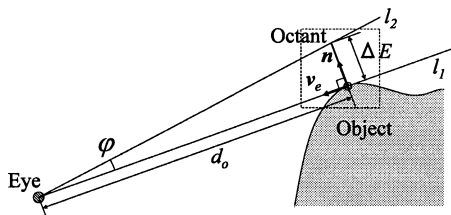


図 3 形状誤差の視角
Fig. 3 Visual angle of shape error.

octant の代表頂点座標値を $v_c(0) \sim v_c(k-1)$ (k : 子孫 octant の数) とした場合、軸ベクトル n 方向の形状誤差 ΔE を式 (3) で求める。

$$\Delta E = \max \{ n \cdot (v_c(i) - v) \} - \min \{ n \cdot (v_c(j) - v) \}, \quad i = 0 \cdots (k-1), j = 0 \cdots (k-1). \quad (3)$$

ここで、min は最小値選択関数である。

2. で示した形状データのほかに以下のデータを各 octant に追加する。

- 法線ベクトルコーンの軸ベクトル n 。
- 法線ベクトルコーンの範囲角 θ 。
- n 方向の形状誤差 ΔE 。

オブジェクト描画時の輪郭は表面の法線ベクトルと octant の代表頂点-視点間を結ぶ単位ベクトル (視点方向ベクトル) とのなす角が $\pi/2$ となる部分である。これを図 4 に示す視点方向ベクトル v_e と法線ベクトルコーン (n, θ) の関係から、 v_e と n のなす角 $\gamma = \cos^{-1}(v_e \cdot n)$ によって次のように判定する。

(a) $\gamma < (\pi/2 - \theta)$ ならば、輪郭部ではない描画される octant であり、3.4 の輝度変化量詳細度制御により詳細度を決定する。

(b) $(\pi/2 + \theta) < \gamma$ ならば、視点に対してオブジェクトの裏側に位置する描画されない octant であり、これ以上詳細化しない。

(c) $(\pi/2 - \theta) \leq \gamma \leq (\pi/2 + \theta)$ ならば、輪郭 octant であり、以下の方法で詳細度を決定する。

図 3 のように、観察距離 d_o に対象 octant が存在する場合、視点に対する ΔE の視角の正接 $\tan \varphi$ を式 (4) で求める。

$$\tan \varphi = \frac{\Delta E}{d_o}. \quad (4)$$

一方、スクリーン上で許容できる形状誤差の視角の正接 $\tan \varphi_t$ を、スクリーンへの投影像の形状許容誤

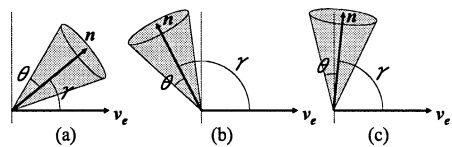


図 4 視点方向ベクトルと法線ベクトルコーンの状態分類
Fig. 4 Classification of conditions between normal vector and viewing vector.

差のしきい値 T_s とスクリーン-視点間の距離 d_s から式 (5) により求める。

$$\tan \varphi_t = \frac{T_s}{d_s} \quad (5)$$

更に、以下のような $\tan \varphi$ と $\tan \varphi_t$ の大小判定により適切な詳細度のレベル値を決定する。

- $\tan \varphi \leq \tan \varphi_t$ ならば、形状誤差の視角が許容範囲内なので、このレベル値を描画用を選択する。
- $\tan \varphi > \tan \varphi_t$ ならば、形状誤差の視角が許容範囲より大きいので、その子 octant について再帰的に同じ輪郭形状詳細度制度を実行する。

3.4 輝度変化量詳細度制御

スクリーン投影像の輪郭以外の表面形状は輝度変化状態により形状が認識される。輝度変化の誤差により形状の誤認識が発生しないように詳細度制御を行う。輝度変化量詳細度制御では、各 octant の代表頂点からの光源ベクトルと視線方向ベクトル並びに法線ベクトルコーンの関係からスクリーン上の輝度誤差を推定し、それが許容値を超えないように詳細度を制御する。

オブジェクト表面の輝度は、表面反射率、法線ベクトル、視点位置並びに光源位置によって決定される。ここでは反射モデルとして Lambert の拡散反射モデルと Phong の鏡面反射モデルを用いた。反射モデルは式 (6) で表される。

$$B = M_d L_d \cos \alpha + M_s L_s \cos^n \beta \quad (6)$$

ここで、 B は輝度値、 M_d 、 M_s はそれぞれ拡散、鏡面反射率、 L_d 、 L_s はそれぞれ拡散、鏡面光成分、 n はハイライト係数である。 α は光源方向ベクトルと表面の法線ベクトルのなす角、 β は光源方向ベクトルと視点方向ベクトルを合成した単位ベクトルと表面の法線ベクトルとのなす角である。

法線ベクトルコーンは octant 内の法線ベクトルの分布を表現しているため、法線ベクトルコーンに対する輝度の最大値と最小値の差を輝度変化量 ΔB として扱うことができる。 M_d 、 M_s 、 L_d 、 L_s 、 n はオブジェクトや光源に固有の値であるため、 ΔB は $\cos \alpha$ と $\cos^n \beta$ の変化量によって決定される。

光源方向ベクトル v_l と法線ベクトルコーンの幾何学的関係を図 5 のように分類する。拡散反射成分に関して v_l とコーン内のベクトルとのなす角から求まる $\cos \alpha$ の変化量を ΔC_α とすると、図 5 (a) ~ (d) の場合それぞれについて、

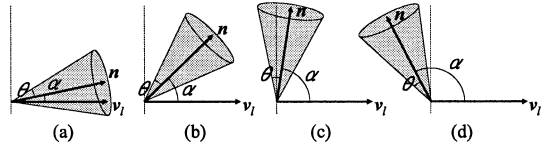


図 5 光源方向ベクトルと法線ベクトルコーンの状態の分類

Fig.5 Classification of conditions between normal vector and illuminant vector.

$$\Delta C_\alpha = \begin{cases} 1 - \cos(\alpha + \theta) & (a) \\ \cos(\alpha - \theta) - \cos(\alpha + \theta) & (b) \\ \cos(\alpha - \theta) & (c) \\ 0 & (d) \end{cases} \quad (7)$$

が得られる。鏡面反射成分についても同様に $\cos^n \beta$ の変化量 ΔC_β が求まる。

VR 空間に m 個存在する光源に対する $\cos \alpha$ と $\cos^n \beta$ の変化量を $\Delta C_\alpha(i)$ $\Delta C_\beta(i)$ 、 $i = 0 \sim (m-1)$ として、octant に含まれるパッチの輝度変化量 ΔB を式 (8) で求める。

$$\Delta B = M_d \sum_{i=0}^{m-1} L_d(i) \Delta C_\alpha(i) + M_s \sum_{i=0}^{m-1} L_s(i) \Delta C_\beta(i) \quad (8)$$

ここで、 $L_d(i)$ 、 $L_s(i)$ は各光源の拡散、鏡面光成分である。

マルチスケールパッチの輝度はコーンの軸ベクトルから決定される代表頂点の色を用いて内挿シェーディングが行われるため、 ΔB が大きい場合には輝度誤差が大きくなり形状の誤認識の可能性が高くなる。そこで、輝度誤差が ΔB に比例すると仮定して形状詳細度制御を行う。

また、選択されたレベル値が低いと表面形状が粗くなりシェーディングの内挿誤差が大きくなる。そこで、観察距離 d_o に位置する octant 格子の長さ l_p の 1 辺がスクリーンに投影されるとき長さ l_s を

$$l_s = \frac{d_s l_p (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_e)}{d_o} \quad (9)$$

で求め、シェーディング内挿誤差が l_s に比例すると仮定して形状詳細度制御を行う。ここで、 d_s は視点-スクリーン間の距離である。

ΔB と l_s に対する形状詳細度制御を同時に行うた

め、それらの積で得られるパラメータ

$$P_{bl} = \Delta B l_s \quad (10)$$

に対してしきい値 T_b を設けて、以下の方法で octant のレベル値を制御する。

- $P_{bl} \leq T_b$ ならば、許容できる輝度変化量であり、該当する octant のレベル値を描画用を選択する。
- $P_{bl} > T_b$ ならば、子 octant について再帰的に同じ輝度変化量詳細度制御を実行する。

3.5 詳細度制御処理の流れ

詳細度制御処理では、描画に用いる適切な詳細度の octant を選択し表面パッチ生成フラグ F_p を設定する。Octree の根 octant から順に以下の手順を実行する。

(1) octant が視界に含まれるかどうか判定する。視界の外部ならば $F_p = 0$ として親 octant に処理を戻す。内部または一部が干渉するならば (2) へ進む。Octant は立方体であるため容易に判定可能である。

(2) 輪郭形状詳細度制御を実行する。該当レベル値が描画用を選択されるならば (3) へ進む。されなければ $F_p = 0$ として子 octant について再帰的に (1) ~ (3) を呼び出す。

(3) 輝度変化量詳細度制御を実行する。該当レベル値が描画用を選択されるならば $F_p = 1$ を与え親 octant に処理を戻す。されなければ子 octant について再帰的に (3) を呼び出す。

本方式では、手順 (1) の視界外部や、手順 (2) の輪郭形状詳細度制御で視点から見えないオブジェクトの裏面に対する形状詳細度制御を省くため、不要な描画処理を大きく削減することができる。

オブジェクト描画処理では、 $F_p = 1$ の octant を octree の根から順に探索してマルチスケールパッチ生成法によってポリゴンを生成して描画する。選択されたレベル値は、輪郭形状詳細度制御と輝度変化量詳細度制御の誤差を許容するしきい値 T_s 、 T_b を同時に満たす適切な詳細度となる。

4. 実験・結果

4.1 実験環境と評価指標

本アルゴリズムを AT 互換機 (CPU : AthlonXP 1800+, Memory : 512MB, Graphics : GeForce2 Ultra, OS : Windows XP) に実装し特性を調べた。レンダリングには OpenGL を用いた。評価に用いる octree モデルは最大レベル値 8 とし、オブジェクト定義空間を 1 辺 256 の立方体とした。本文中の距離はこ

の値を基準として示す。評価対象オブジェクトデータには Stanford Computer Graphics Laboratory のサイトの “Bunny”, “Dragon”, “Happy Buddha” のポリゴンデータを octree モデルに変換 [15] したものをを用いた。変換の際に、2. で述べた octant の代表頂点には内包するオブジェクト表面の頂点またはポリゴンと octant 格子線の交点の平均座標値を与えた。

描画品質と処理時間について他の方式との比較により評価した。描画品質の評価指標として描画像の PSNR 及び主観評価を用いた。比較対象とする従来法として、形状特徴量制御方式 [15] (以下 SCVC 法—Shape Complexity Value Control Method—と呼ぶ)、投影形状誤差制御方式 [12] (PSEC 法—Projected Shape Error Control Method—と呼ぶ) を用いた。なお、以降では本方式を SRCC 法 (Shape Recognition Characteristics Control Method) と呼ぶ。

4.2 描画像の評価

図 6 に SRCC 法の観察距離 d_{obj} を変化させた場合の “Dragon” の簡略化描画像と生成されたポリゴンの様子を示す。図 7 に簡略化しない最高詳細度描画像を示す。図 6 の下段で示すように SRCC 法では輪郭及び表面の輝度変化に応じて詳細度制御を行い、少ないポリゴン数で最高詳細度に近い描画が可能である。 $d_{obj} = 500$ ではオブジェクトがほぼスクリーンいっぱいに表示される。SRCC 法では T_s と T_b によって描画状態が変化する。そこで、特に記述がない場合は $d_{obj} = 500$, $T_s = 0.5$, $T_b = 1.5$ とした。観察距離の連続的な変化に対するポリゴンの動的変化画像を紙面では表現できないが、局所的な詳細度制御を行うので観察距離の変化に対して滑らかにオブジェクトの大きさや詳細度が変化することを確認できた。

図 8 に SRCC 法による $d_{obj} = 500$ の “Bunny” と “Happy Buddha” の画像を示す。“Bunny” と “Happy Buddha” の最高詳細度の場合のポリゴン数はそれぞれ 238506, 226762 である。最高詳細度の描画像は省略するが、 $d_{obj} = 500$ では最高詳細度の描画像に対する描画品質は、図 6 と図 7 で示した “Dragon” の場合と同程度である。

描画像の画質を評価するために、“Bunny”, “Dragon”, “Happy Buddha” の各モデルを最高詳細度で描画した画像に対する、SRCC 法、SCVC 法及び PSEC 法による描画像の PSNR を求めた。輝度は 256 階調、各画像は “Bunny” が 798×764 ピクセル、“Dragon” が 852×604 ピクセル、“Happy Buddha”

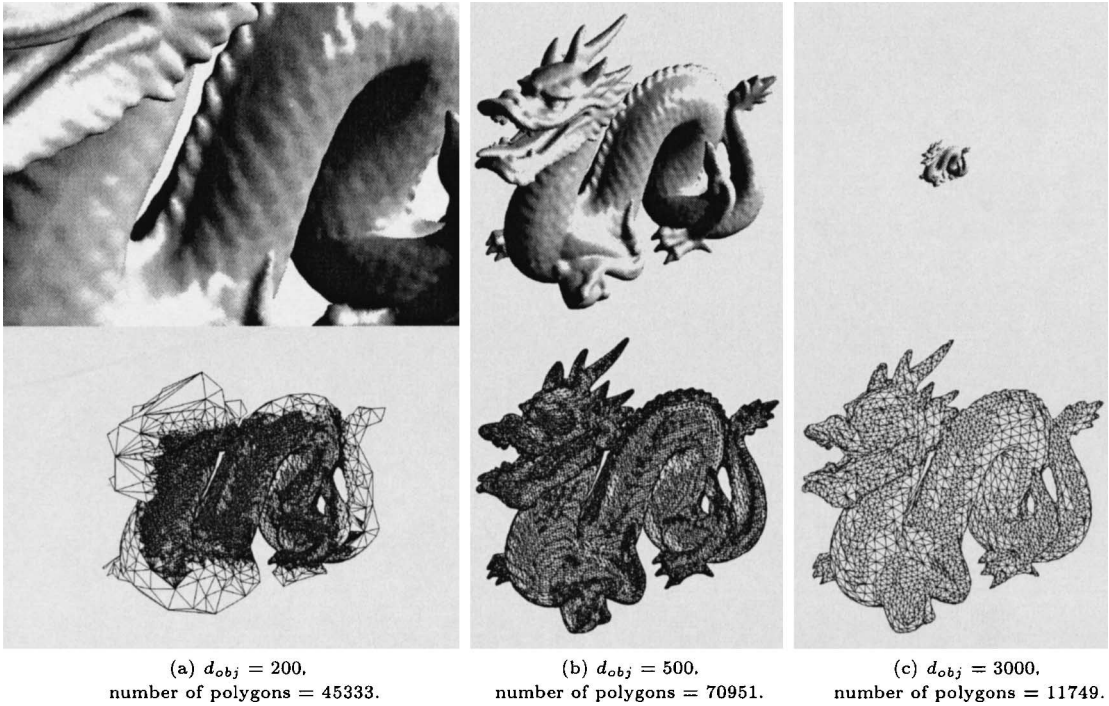


図 6 d_{obj} に対する SRCC の描画結果 (d_{obj} :Distance of eye-object)
 Fig. 6 Drawing results of SRCC corresponding to d_{obj} .

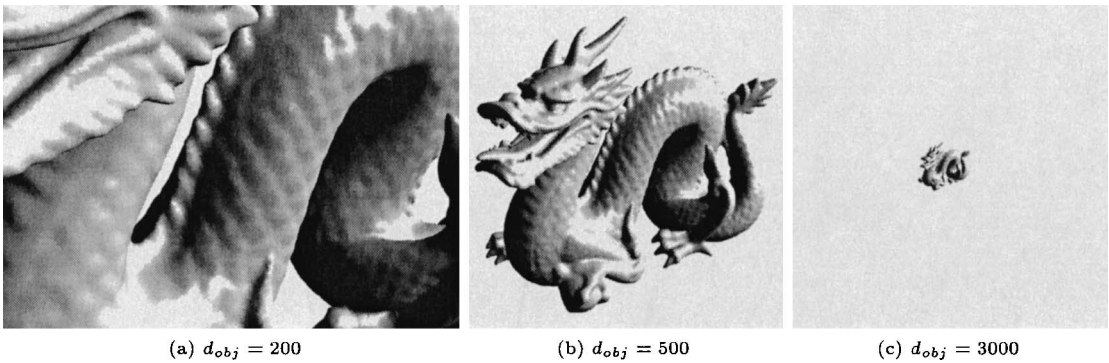


図 7 d_{obj} に対する最高詳細度の描画結果，ポリゴン数：306580
 Fig. 7 Drawing results of finest model corresponding to d_{obj} ,
 number of polygons = 306580.

が 338×826 ピクセルである．各制御法でポリゴン数がほぼ等しくなるようにしきい値を制御して描画した場合の PSNR を図 9 に示す．図中の矢印は図 6 (b) 及び図 8 (a), (b) の PSNR である．SRCC 法は他の 2 方式に対して高い PSNR が得られ，“Dragon” と “Happy Buddha” ではおよそ 10000 ポリゴン少なくとも同程度の PSNR が得られた．

次に，描画されるオブジェクト像の主観評価を行った．観察距離を 3000 から 0 まで 12 秒間で等速に視点がオブジェクトへ近づく動画を生成した．各制御方式では観察距離によってポリゴン数がほぼ等しくなるようにパラメータを設定した．20 代の健康者 10 名について，17 インチ SXGA の TFT 液晶ディスプレイ面から法線方向に 500 mm 離れた位置で動画を観察して

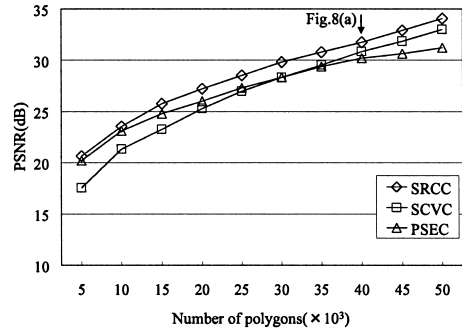


(a) "Bunny", number of polygons = 39761.

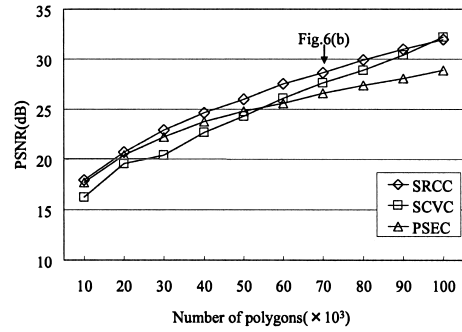


(b) "Happy Buddha", number of polygons = 66081.

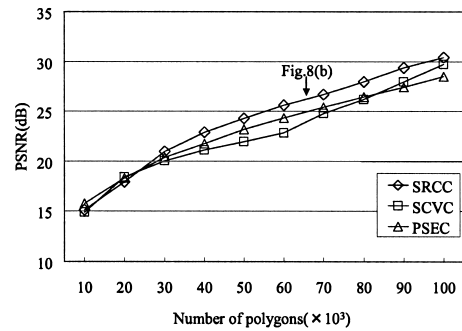
図 8 SRCC 法による描画結果
Fig. 8 Drawing results by SRCC.



(a) "Bunny"



(b) "Dragon"



(c) "Happy Buddha"

図 9 最高詳細度形状描画に対する各制御法の PSNR
Fig. 9 PSNR of each method against the finest model.

評価を受けた。最高詳細度形状に対する各方式の (1) 輪郭部分の形状変化の印象, (2) 表面の形状変化の印象, (3) 全体的な形状変化の印象, (4) 画質の印象, の四つの評価項目について, 5 点: 全く差がない, 4 点: わずかに差がある, 3 点: 差がある, 2 点: かなり差がある, 1 点: 非常に差がある, の 5 段階 [17] で評価した。各評価項目の点数の平均値を表 1 に示す。PSEC 法は "Bunny" のような先鋭な部分が少ない形状で全体的に評価が低い。SCVC 法では "Dragon" の規則

表 1 主観評価 ((1) 輪郭部分の形状変化の印象, (2) 表面の形状変化の印象, (3) 全体的な形状変化の印象, (4) 画質の印象)

Table 1 Subjective evaluation. ((1) Shape change of contour, (2) Shape change of front surface, (3) Overall shape change, (4) Overall quality of image)

Object	Method	(1)	(2)	(3)	(4)
"Bunny"	SRCC	4.6	4.0	4.1	4.1
	SCVC	4.7	3.2	3.4	3.6
	PSEC	3.7	2.5	2.5	2.7
"Dragon"	SRCC	4.5	3.6	4.1	4.0
	SCVC	4.4	2.1	2.8	2.8
	PSEC	4.4	3.1	3.4	3.5
"Happy Buddha"	SRCC	4.6	3.8	4.0	4.1
	SCVC	3.8	2.8	3.1	3.2
	PSEC	3.9	3.0	3.3	3.0

正しく並んだ鱗の微妙な凹凸をうまく表現できず形状変化及び画質の評価が低い。一方, SRCC 法では, ほぼすべての項目について 4 点以上となり, 他の方法よりも現実感の高い描画が可能であることが明らかになった。

4.3 SRCC 法特有の機能

SRCC 法では輪郭形状誤差のしきい値 T_s と輝度変化量誤差のしきい値 T_b を独立に制御することができる。図 10 にそれらを変化させた場合の描画結果を示す。 T_s が小さいほど輪郭部分の形状が詳細に描画され, T_b が小さいほど表面の輝度変化が詳細に描画される。(a)~(b) 間で T_s のみの変化, (a)~(c) 間で T_b のみの変化, (a)~(d) 間で T_s と T_b を同時に変えたときの変化を比較できる。図 12(a'), (d') と図 14(a''), (d'') はそれぞれ図 10(a), (d) とほぼ等しいポリゴン数の SCVC 法と PSEC 法による描画結果であるが, 鱗の鮮明さなどから SRCC 法の方が描画品質が高いことが確認できる。

図 11, 図 13, 図 15 はそれぞれ図 10(a), 図 12(a'), 図 14(a'') で生成されたポリゴンを示す。図 13 の SCVC 法では起伏が比較的小さい鱗の部分などが簡略化されてしまう。図 15 の PSEC 法では輪郭及びハイライト部分が詳細化されているが, 拡散反射を考慮していないため影となる部分で冗長なポリゴンが生成される。これらに対して図 11 の SRCC 法では輪郭及び輝度変化に従って適切な詳細度のポリゴンが生成される。

SRCC 法では視点及び光源位置より生成されるポリゴンの詳細度が局部的に変化する。その様子を図 16~

図 18 に示す。光源の位置によって細かな起伏, ハイライトの輪郭や明暗の境目周辺の輝度変化の大きな部分が詳細に, 影になる部分は粗く表示される。図 18 のように視点移動し輪郭が変化すると, それに応じて輪郭部分が詳細化される。

4.4 処理時間

図 10(a), (d) と図 12(a'), (d'), 図 14(a''), (d'') の描画処理時間を表 2 に示す。octant のレベル値選択処理で SRCC 法は SCVC 法や PSEC 法よりも処理時間を要するが, この処理が描画処理全体に占める割合は小さく, 全体の処理時間への影響は少ない。

図 19 に SRCC 法での観察距離 d_{obj} の変化に対する "Dragon" の octant 選択, パッチ生成及び描画に要する時間とポリゴン数の変化を示す。図中の矢印で示した観察距離は図 6(a)~(c) の場合である。連続的な観察距離の変化に応じてポリゴン数が滑らかに変更される。 $d_{obj} = 500$ では図 6(b) のようにオブジェクトがほぼスクリーンいっぱいに表示される。 $d_{obj} < 500$ では図 6(a) のように視界に入らない部分の処理が省略されるので, d_{obj} が小さくなるに従ってポリゴン数及び処理時間が減少する。図中の破線で示す最高詳細度のポリゴンモデル (ポリゴン数: 306580) の表示処理時間は観察距離によらず一定であるが, SRCC 法は詳細度制御によって観察距離が遠くなるほど表示処理時間が減少するため, 詳細構造をもつ VR オブジェクトを効率的に表示することができる。

5. む す び

詳細構造をもつデータ量の多い VR オブジェクトを, 観察者の形状認識特性を考慮した詳細度制御によって効率的に描画できる高現実感描画法を提案した。

本方式では観察者の形状認識特性を考慮した詳細度制御の方法として, 輪郭形状詳細度制御と輝度変化量詳細度制御を適用した。これらの実現のために, オブジェクトの表面形状と, 表面の起伏状態を表す法線ベクトルコーン及び法線ベクトル方向の形状誤差を octree に組み込んで階層化した。

本方式の特性を明らかにするために, 最高詳細度形状に対する本方式と形状特徴量制御方式や投影形状誤差制御方式の間でポリゴン数, 描画速度, 表示画像の質, 及び主観的な描画像の評価について比較を行った。その結果, 本方式は形状特徴量制御方式や投影形状誤差制御方式と比較して, 少ないポリゴン数でより良好な描画結果が得られることが明らかになった。また,

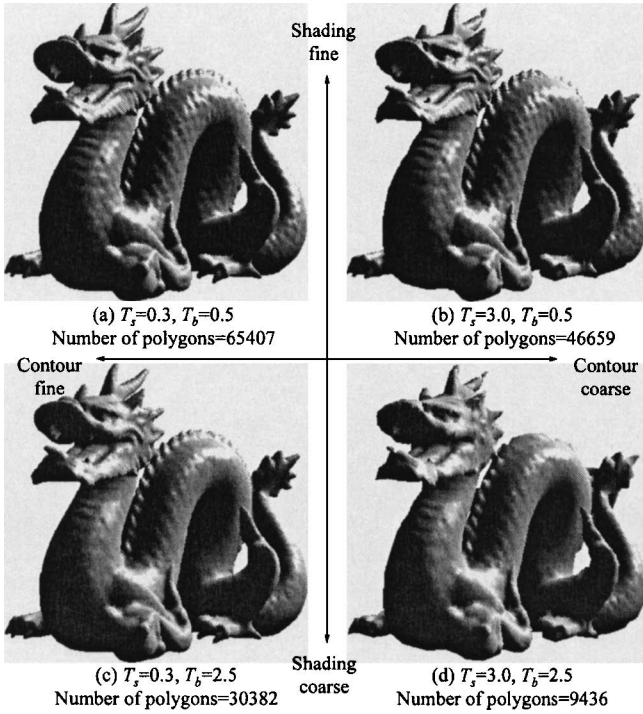


図 10 SRCC 法の詳細度変化
Fig. 10 Fineness change of SRCC.

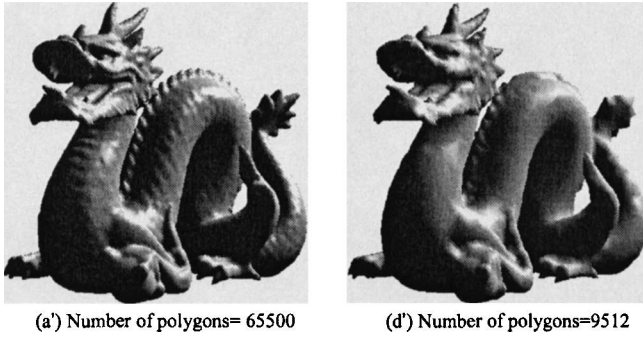


図 12 SCVC 法の詳細度変化
Fig. 12 Fineness change of SCVC.

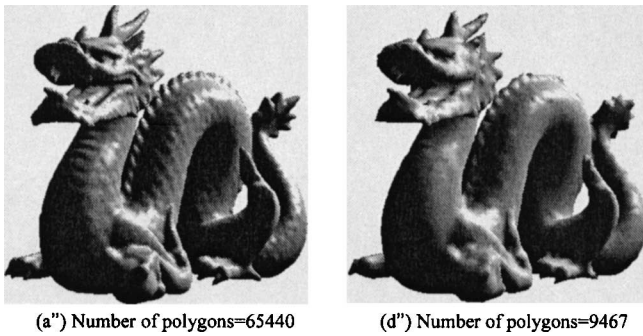


図 14 PSEC 法の詳細度変化
Fig. 14 Fineness change of PSEC.

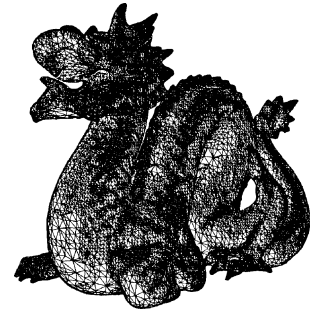


図 11 図 10 (a) で生成されたポリゴン
Fig. 11 Polygons generated in Fig. 10 (a).



図 13 図 12 (a') で生成されたポリゴン
Fig. 13 Polygons generated in Fig. 12 (a').

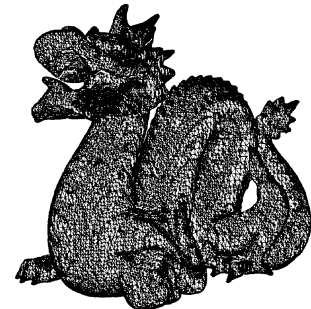


図 15 図 14 (a'') で生成されたポリゴン
Fig. 15 Polygons generated in Fig. 14 (a'').

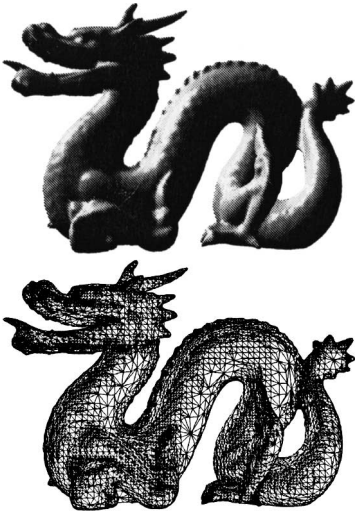


図 16 光源を左上に配置
Fig. 16 Illuminated from the upper left position.

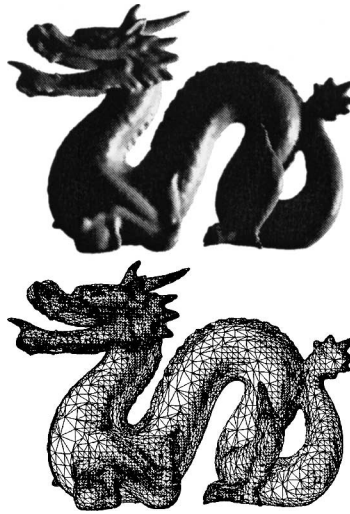


図 17 光源を右に配置
Fig. 17 Illuminated from the right position.

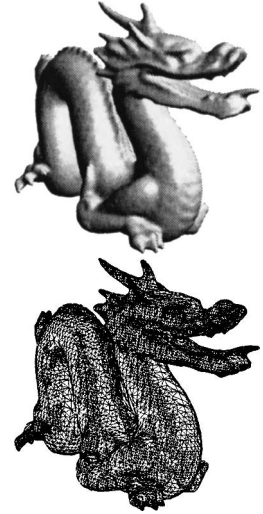


図 18 図 16 の状態を左後から観察
Fig. 18 Observing Fig. 16 from the left rear position.

表 2 描画処理時間 (ms)
Table 2 Processing time of drawing (ms).

	Octant-choice	Patch-formation	Rendering	Total
Fig 10 (a)	56	118	66	240
Fig 12 (a')	31	119	66	216
Fig 14 (a'')	26	119	66	211
Fig 10 (d)	11	17	10	38
Fig 12 (d')	6	17	10	33
Fig 14 (d'')	5	17	10	32

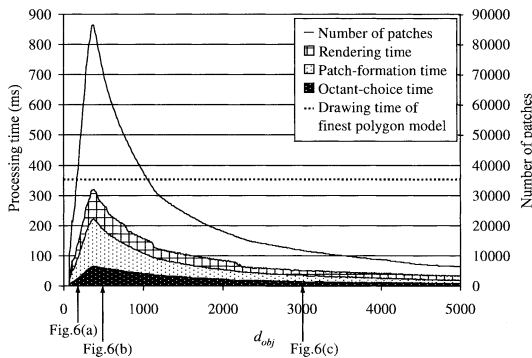


図 19 d_{obj} に対する描画処理時間とポリゴン数の変化 (SRCC)

Fig. 19 Processing time of drawing and number of polygons corresponding to d_{obj} . (SRCC)

本方式では、輪郭形状の誤差と輝度変化量のしきい値によってオブジェクト表示の質を制御することができること、視点や光源の移動に伴いオブジェクトの輪郭や表面を適切な詳細度に制御できることを示した。

更に効率的な詳細度制御のために他の形状認識特性パラメータの導入や、パラメータ導出法の改善に関する検討が今後の課題である。

文 献

- [1] G. Taubin, J. Rossignac, "Geometric compression through topological surgery," ACM Trans. Graphics, vol.17, no.2, pp.84-115, 1998.
- [2] T. He, L. Hong, A. Varshney, and S. Wang, "Controlled topology simplification," IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, vol.2, no.2, pp.171-183, June 1996.
- [3] S. Wang, M. Sato, and H. Kawarada, "Multiresolution model construction from scattered range data by hierarchical cube based segmentation," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E80-D, no.8, pp.780-787, Aug. 1997.
- [4] H. Hoppe, "Progressive meshes," Proc. SIGGRAPH'96 Computer Graphics, pp.99-108, 1996.
- [5] M. Garland and P.S. Heckbert, "Simplifying surfaces with color and texture using quadric error metrics," Proc. IEEE Visualization'98, pp.263-269, 1998.
- [6] J. Cohen, M. Olano, and D. Manocha, "Appearance-preserving simplification," Proc. SIGGRAPH'98 Computer Graphics, pp.115-122, 1998.
- [7] J. El-Sana, N. Sokolovsky, and C.T. Silva, "Integrating occlusion culling with view-dependent rendering," Proc. IEEE Visualization 2001, pp.371-378,

2001.

- [8] W.V. Baxter III, A. Sud, N.K. Govindaraju, and D. Manocha, "GigaWalk: Interactive walkthrough of complex environments," UNC-CH Technical Report TR02-013, University of North Carolina at Chapel Hill, 2002.
- [9] 田中弘美, 李 相善, 松本 卓, 金子昇治, "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," 情処学論, vol.40, no.3, pp.931-938, 1999.
- [10] H. Hoppe, "New quadric metric for simplifying meshes with appearance attributes," Proc. IEEE Visualization '99, pp.59-66, 1999.
- [11] D. Luebke, C. Erikson, "View-dependent simplification of arbitrary polygonal environments," Proc. SIGGRAPH'97 Computer Graphics, pp.199-208, 1997.
- [12] J.C. Xia, J. El-Sana, and A. Varshney, "Adaptive real-time level-of-detail-based rendering for polygonal models," IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, vol.3, no.2, pp.171-183, 1997.
- [13] W.E. Lorensen and H.E. Cline, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm," Proc. SIGGRAPH'87 Computer Graphics, pp.163-169, July 1987.
- [14] 若月大輔, 石井郁夫, 今井博英, 高橋 章, 牧野秀夫, "Octree を用いた形状詳細度制御のためのマルチスケールパッチ生成法," ヒューマンインターフェース学会研究報告集, vol.4, no.3, pp.31-36, 2002.
- [15] 若月大輔, 石井郁夫, 今井博英, 高橋 章, 牧野秀夫, "視距離の変化に対応した高現実感レンダリングのためのマルチスケールモデリング法," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.6, no.4, pp.281-289, 2001.
- [16] D.E. Johnson and E. Cohen, "Spatialized normal cone hierarchies," Proc. 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics, pp.129-134, 2001.
- [17] 三宅洋一, 画像の主観評価, デジタルカラー画像の解析・評価, pp.81-88, 東京大学出版会, 東京, 2000.

(平成 14 年 7 月 12 日受付, 12 月 12 日再受付,
15 年 3 月 13 日最終原稿受付)



若月 大輔 (学生員)

1998 新潟大・工・情報卒. 2000 同大学院自然科学研究科博士前期課程了. 2003 同大学院自然科学研究科博士後期課程了. 現在, 同大法学部法政コミュニケーション学科助手. 人工現実感に関する研究を行っている. 工博. 日本 VR 学会会員.



石井 郁夫 (正員)

1963 新潟大・工・電気卒. 同大助手, 助教授を経て, 現在, 同大大学院自然科学研究科教授. 人工現実感, ロボットビジョン, 画像処理, マルチメディア通信などの研究に従事. 工博. 情報処理学会, 日本 VR 学会, 日本 ME 学会各会員.



高橋 章 (正員)

1991 新潟大・工・情報卒. 1993 同大学院工学研究科修士課程了. 1996 同大学院自然科学研究科博士課程了. 同年長岡高専・電子制御工学科・助手を経て 2000 講師, 現在に至る. コンピュータビジョン, 人工現実感などの研究を行っている. 工博.



今井 博英 (正員)

1993 新潟大・工・情報卒. 1995 同大学院工学研究科修士課程了. 1998 同大学院自然科学研究科博士後期課程了. 現在, 同大学院自然科学研究科助手. ネットワークシステムの性能評価, 共有仮想環境の研究に従事. 工博.



牧野 秀夫 (正員)

1976 新潟大・工・電子卒. 1978 同大学院修士課程了. 同年情報工学科勤務. 1990 助教授. 1995 教授, 現在に至る. この間, 1983 年より 1 年間, 北大・応電研, 1989 年より 1 年間カナダ・トロント大学医学部において研究に従事. 主に福祉・医療情報機器の研究を行っている. 工博. 日本 ME 学会, 電気学会, IEEE 各会員. 日本心臓ペースング学会評議員. 日本地理情報システム学会理事.