

視線情報を用いた階層型形状データの 高速レンダリング手法

大島 登志一[†] 山本 裕之[†] 田村 秀行[†]

本論文では、観察者の視線情報を利用した、3次元仮想空間との対話操作性を向上させる新しいレンダリング手法について述べる。本手法では、レンダリング処理に先立って、オブジェクトごとに階層的な形状モデルをあらかじめ作成しておく。レンダリング処理においては、まず観察者の視点位置および視線方向を計測し、観察者に対するオブジェクトの視覚的な重要度を表す「視力」を計算する。次に、視力の値に応じて階層型形状モデルから描画する階層を選択する。すなわち、視力が低い場合にはディテールが簡略化された階層が選択され、また、視力がより高い場合には、より詳細な階層が選択される。そして、選択された階層の形状モデルがレンダリングされる。視力を計算するための要因としては、中心視・周辺視、動態視力、そして融像の3つの視覚特性を考慮した。本論文では、視力モデルについて述べ、適応表示システムの実現例を示す。

Gaze-directed Realtime Rendering of Hierarchical Geometric Models

TOSHIKAZU OHSHIMA,[†] HIROYUKI YAMAMOTO[†]
and HIDEYUKI TAMURA[†]

This paper presents a new method of rendering for interacting with 3D virtual space with the use of gaze detection devices. In this method, hierarchical geometric models are constructed for each object prior to the rendering process. The rendering process first calculates the visual acuity, which represents the importance of an object for an observer considering his/her gaze direction. Second, the process selects a level from the set of hierarchical geometric models depending on the value of visual acuity. That is, a simpler level of detail is selected where the visual acuity is lower, and a more complicated level is used where it is higher. Then, the selected geometric models are rendered on the display. This paper examines three visual characteristics to calculate the visual acuity: the central/peripheral vision, the kinetic vision, and the fusional vision. The actual implementation and our testbed system are described, as well as the details of the visual acuity model.

1. はじめに

近年、3次元コンピュータグラフィクス技術の急速な進展は、高度に写実的な画像の合成を可能にした。たとえば、ラジオシティ法は、対象によっては実際の光景とほとんど区別できないほどの画像を生成することができる。しかし、現状のバーチャルリアリティ(VR)システムが生成する画像は、概して幾何形状モデルが粗く、レンダリング処理も写実性に乏しい。この理由は、VRアプリケーションにおいては、観察者が実時間で仮想空間と対話することが必要であるためである。現状の最高レベルにあるグラフィック専用機で

あっても、一定時間に描画できるポリゴン数には限界があり、対話操作の実時間性を確保するために、様々な手法が提案されている^{1)~10)}。ポリゴン数を効率良く削減しようとするこれらの手法は、主に以下の2種類に分類される。

(1) 可視性検査による描画候補の選択

この手法は、観察者の視点位置から遮蔽された物体のように、画像の内容に寄与しないポリゴンを除去するものである^{1),2)}。多くの場合、これによってポリゴン数を大幅に削減することができる。しかしながら、非常に複雑な物体が常に観察される場合には、この手法だけでは十分な効果が得られない。

(2) 形状の簡略化

この手法では、可視物体のディテール、すなわち、その形状を構成するポリゴン数を、各フレームにおいて

[†] キヤノン株式会社情報メディア研究所
Media Technology Laboratory, Canon Inc.

適応的に省略する。実際の実現形態としては、各物体を異なるレベルのディテール (LOD) に対応する複数の幾何形状モデルの階層構造によって表現する。すなわち、この階層型形状モデルの各 LOD は、異なる数のポリゴンから構成される。そして、各モデルについて LOD を適応的に選択することによって、描画する物体のポリゴン数を制御する^{3)~10)}。画面上の物体の大きさや物体から視点までの距離に基づいた LOD 選択アルゴリズムが報告されている^{7)~10)}。さらに、ポリゴンによって覆われる画素数によって LOD を選択する技法も報告されている⁵⁾。この手法は、可視物体が画面上で小さな領域を占める場合に効果的である。

以上のような手法では、観察者の人数、観察者の位置、表示装置の構成など、観察条件に関する前提条件は特に設けていない。したがって、これらの手法は、標準的な構成のグラフィックワークステーション (GWS) で利用することができる。

一方、本論文では、VR システムを対象として、以下のような条件を仮定する。まず、観察者を 1 名に限定し、広視野の立体画像を提示する。このような条件は VR システムでは一般的なものである¹¹⁾。さらに、その観察者の視点位置と注視方向とをリアルタイムに計測する装置を備える。また、フレームレートを安定させる技法⁶⁾に関しては触れず、描画時間をできるだけ短縮することに集中する。

これらの前提のもとで、本論文では、観察者の視線情報を利用して LOD を適応的に制御する新しい手法について述べる。本手法では、たとえばディスプレイ上の観察者が注目していない領域の物体は、簡略化された形状モデルを用いて描画される。このアプローチによれば、観察者に対して生成画像の画質を維持しつつ、描画処理の負荷を大幅に削減することができる。以下、まず 2 章では、観察者の視線で制御する適応的表示法の基本的な考え方について述べる。次に 3 章では、適応的表示アルゴリズムの詳細について説明する。そして 4 章で、適応表示システムの実現例と実験結果を示す。

2. 視線追跡を用いた適応的表示法

VR システムで立体画像の観察に使用されている液晶シャッター眼鏡やヘッドマウントディスプレイ (HMD) には、視線計測装置を組み込むことが可能である。したがって、視線計測技術を VR 用途に利用するという考えは実際的である。この章では、視線情報に基づいた新しい適応的表示手法について述べる。本手法の実際の処理手順については、次の章で説明する。

人間の視覚は、様々な特性を備えている。たとえば、広い視野を観察するとき、注視している視野の中心部に対応する網膜上の部位 (中心窩) では、高い解像度で詳細を知覚することができる。しかし、その一方で視野の周辺部では、解像度が低下する。この現象は、中心窩にあたる小さな領域を描画することに計算能力の大部分を集中することができることを示唆している¹³⁾。すなわち、周辺視野の画像を描画する場合には、解像度を低くするなど視覚的な情報を削減することによって、計算資源を節約することができる。パラメータを注意深く調整することにより、観察者は、画像全体が高解像度の場合と比較しても、画質の低下をほとんど識別できなくなる。特に、HMD や大画面表示装置などを用いて、観察者に広視野の画像を提示するような場合に顕著な効果が得られる。

このような方式を実現するためには、まず観察者に対する各物体の視覚的重要度を定量化する必要がある。そこで、人間の視覚特性に基づいて、この視覚的重要度を計算する。本論文では、これを「視力」と呼ぶことにする。より高い視力の条件下にある物体に対しては、より詳細な形状情報を含む幾何形状モデルを描画するように、階層型形状モデルの LOD を視力に基づいて制御する。また逆に、低い視力における物体に対しては、簡略化された形状モデルを描画するように LOD を選択する。

本手法では、人間の視覚における様々な特性の中から、以下に示す 3 種類を視力の要因として導入した。

(1) 中心視・周辺視

前述したように、人間の視力は、視野全域にわたって均一ではない。たとえば、ある物体を注視するとき、その物体に関しては詳細を認識できるが、その周囲の様子はぼんやりとしていて、はっきり知覚することができない。そこで、中心窩付近に結像する物体に対してのみ、高い視力を設定する。

(2) 動態視力

回転したり視野を横切るなど、物体が視野に対して相対的に運動しているとき、その詳細を認識しにくいという現象を体験する。この現象は、運動するパターンに対して視力が低下するという特性に基づくと考えられている。この特性を考慮して、視野の中で小さな角速度で運動する物体に対しては視力を高く設定し、より大きな角速度で運動する物体に対してはより低い視力を設定する。

なお、物体の運動は、視点位置および視線方向に対して相対的に計算するので、運動する特定の物体を追跡して注視するような場合には、その物体よりも静止

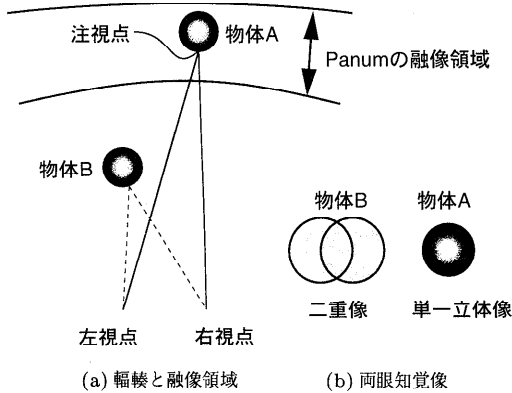


図1 融像領域
Fig.1 Fusional space.

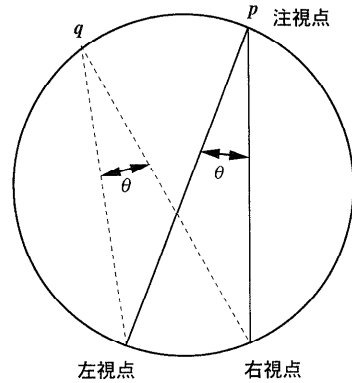


図2 Vieth-Müllerの理論的ホロプター円
Fig.2 Vieth-Müller's geometric horopter.

している他の物体に対する視力の方が低くなる。

(3) 融像

ここで論じる現象は、両眼視を前提としており、この様子を図1に示す。

いま、観察者がある物体(図1の物体A)を両眼で観察しているとすると、2つの眼で観察される物体の2つの像が一致するように、眼球が回転する。この眼球運動は、「輻輳運動」と呼ばれる。これによって、注視する物体は、奥行き感のある単一の立体像として知覚される。この現象は「融像」と呼ばれる。一方、注視点の前後にずれた位置に別の物体(図1の物体B)があるとき、その左右の像は、注視点における視差と異なる視差を生じるため対応点がずれて、実体感の乏しい二重像として知覚される。これは、日常的に無意識のうちに体験している現象である。

幾何学的には、図2に示すように、両眼位置と注視点とを通過する円周(Vieth-Müllerの理論的ホロプター円)上にある点における視差は、注視点における視差と一致する。したがって、ホロプター円上の物体は、左右の像が融合して単一像として知覚される。一方、ホロプター円を外れる物体は、二重像となる。実際には、ホロプター円の周辺に、ある程度のずれを許容する「Panumの融像領域」と呼ばれる領域が存在する。

このような現象を計算に入れ、融像領域を外れて単一立体像として知覚されない物体に対しては、視力を低く設定する。これによって、注視点より手前、および奥の物体が簡略化されることになる。この処理による効果は、メカニズムは異なるものの、結果として焦点距離を考慮した形状簡略化と似た効果となる。

3. 適応的表示法の実現

本手法では、各物体の描画に際して、まず、2章で述べた3種類の視覚特性に基づき、物体の視覚的重要度として定義した「視力」を算出する。そして、この視力に基づいて適応的にLODを選択する。本章では、各段階の処理について説明する。

3.1 視力の計算

「視力係数」というパラメータを導入することによって、前述した視力に関する3つの要因を分離して取り扱う。すなわち、1つの視力係数は、1つの視覚特性に基づいた視力に関するパラメータである。各物体について、以下のように3つの視力係数を求め、これらを総合して評価することにより視力を決定する。

(1) 中心視・周辺視に基づく視力係数

第1の視力係数として、中心視・周辺視による視力係数 k_1 を算出するための幾何学的な構成を図3に示す。同図に基づき、 k_1 を式(1)によってモデル化する。

$$k_1 = f(\theta) = \begin{cases} 1 & (0 \leq \theta \leq \alpha) \\ \exp\left(-\frac{\theta - \alpha}{c_1}\right) & (\alpha < \theta) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 θ は、視線方向ベクトルと、視点から物体の中心へ向かうベクトルとがなす角度である。そして、 c_1 は、減衰曲線の減衰率を調整する定数パラメータである。

また、式(1)では、図4のように角度 θ がパラメータ α より大きい場合に指数関数が適用される。ここで α は、図3に示すように、物体が視野内で占める領域の半径を見込む視野角である。これは、視線が同一物体上にある間、LODが切り替わらないようにするために導入している。もし、 α を0にすると、1つ

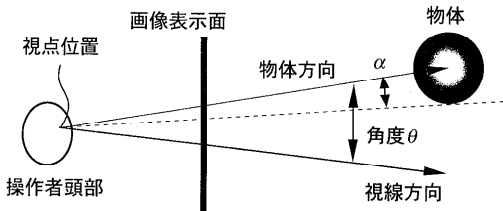


図3 視線方向と物体方向との角度

Fig. 3 Viewing geometry considering central/peripheral vision.

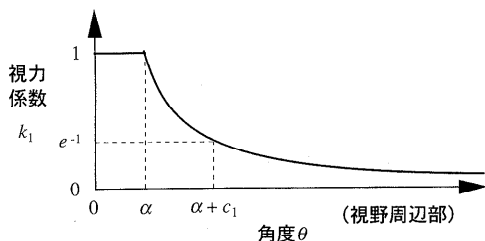


図4 視野による視力変化

Fig. 4 Visual acuity factor concerning central/peripheral vision.

の物体を注視しているにもかかわらず、視線方向のゆらぎにともなって、その物体の形状モデルが頻繁に切り替わり、観察者はちらつきを感じることになる。

後述の実験では、 c_1 を 6.2° に設定した。この値によると、物体が視軸から 10° 離れるとき、その物体に対する視力係数は 0.2 まで減衰する。

(2) 動態視力に基づく視力係数

第2の視力係数として、動態視力を考慮した視力係数 k_2 を式(2)のようにモデル化する。

$$k_2 = g(\Delta\phi) = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta\phi}{c_2} & (0 \leq \Delta\phi \leq c_2) \\ 0 & (c_2 < \Delta\phi) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\phi$ は、視野内で相対的に運動する物体上の代表点の、視点を原点とした角速度である。そして、 c_2 は、減衰曲線の勾配を調整する定数パラメータである。 $\Delta\phi$ は、以下の手順により求める。図5に示すように、物体をその平均半径を持つ球体で近似する。図5で物体上の位置ベクトル p は、時刻 $t = t_0$ における視点からの最近点であり、視野座標系に基づいて表現される。そして、単位時間後の時刻 $t = t_1$ において、視野座標系での物体の運動にともない、位置ベクトル p が p' に移動したとする。このとき、時刻 $t = t_1$ における角速度 $\Delta\phi$ を、 p と p' とがなす角度として決定する。後述の実験では、時間単位を秒にと

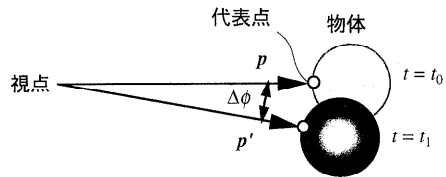


図5 視野内の点の移動

Fig. 5 Motion geometry considering kinetic vision.

り、 c_2 を試験的に 180° に設定した。

(3) 融像領域に基づく視力係数

第3の視力係数として、融像領域に基づく視力係数 k_3 を以下のようにモデル化する。実際の融像領域は、個人により異なるため、近似的な融像領域を仮定する。これは、左右視点と注視点により定まる Vieth-Müller の理論的ホロプター円を基準にして、ある幅を持って広がっている領域であるとする。そして、視力係数 k_3 を式(3)によって決定する。

$$k_3 = h(\Delta\psi) = \begin{cases} 1 & (0 \leq \Delta\psi \leq b) \\ \exp\left(-\frac{\Delta\psi - b}{c_3}\right) & (b < \Delta\psi) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)において、注視点における輻輳角 ψ_0 と、両眼から物体に対する角度 ψ との差 $\Delta\psi = |\psi - \psi_0|$ が閾値 b 以内であれば、その物体は融像領域内にあると判断する。このとき、視力係数 k_3 はつねに最高値 1 をとる。ここで b は、融像領域の幅を定めるパラメータである。そして、 $\Delta\psi$ が b より大きいときには、物体が融像領域から外れていると見なし、視力係数を低下させる。減衰関数としては指数関数を使用した。ここで、 c_3 は減衰率を調整するパラメータである。後述の実験では、 c_3 を試験的に 0.62° に設定した。また、 b は 0° に設定した。融像領域がある幅を持つとしながらも、 b をあえて 0 に設定した理由は、定性的な効果を強調して確認したいと考えたことによる。

(4) 視力係数の結合

以上で説明したように、各物体に対して、それぞれ 3つの視力係数を求める。各視力係数は、最も良好な観察条件で 1 をとり、観察者が知覚不可能な条件では 0 となる。このような 3つの視力係数を結合し、総合的な視力を決定する。そのためには、いくつかの方式が考えられる。第1の方式は、式(4)のように、最小の視力係数を選択して視力 a を求める方式である。

$$a = \min(k_1, k_2, k_3)a_0 \quad (4)$$

ここで、 a_0 は 4.1 節で説明される基準視力であり、システムのパフォーマンスを制御するグローバルなパラメータである。また、式(5)のように、視力係数の積

によって視力を求める方式も考えられる。

$$a = k_1 k_2 k_3 a_0 \quad (5)$$

3.2 LOD の選択

以上のようにして求めた視力 a に基づいて、階層的な幾何モデルから LOD を選択する。

最初に、式 (6) により、 r_{\min} を算出する。

$$r_{\min} = 2D \tan\left(\frac{1}{2a}\right) \quad (6)$$

ここで、 D は、視点から物体までの距離である。

そして、幾何モデルの階層から、 r_{\min} よりも小さなポリゴンを含まないような最も詳細な LOD を選択する。これは、以下のように記述される。 H_l は物体の階層型幾何モデル中のレベル l の LOD を表す。そして、 H_l に含まれるポリゴン q の大きさを、 q に属する辺の中で最も長い辺の長さ $r(q)$ によって定義する。そして、集合 $\{H_l | \forall q \in H_l, r(q) \geq r_{\min}\}$ から最も詳細なモデル H_l を選択する。ここで、「最も詳細なモデル」というのは、選択候補の中で最も多くのポリゴンから構成される幾何モデルを意味する。

各 LOD に対応する幾何モデルは、あらかじめ作成し主記憶上に展開しておく。そして、描画時に参照する記憶領域を上記の選択結果に応じて適宜変更することにより LOD の切り替えを実現する。システムの描画プロセスは、このように選択された LOD を逐次参照し、実時間で画像を生成する。

4. 実験

4.1 実験方法

表示装置として 70 インチ背面投影型ディスプレイを使用し、対角方向に 60° の視野となる位置を観察者の初期位置とした。このとき、画面から観察者までの距離は約 1.5 m である。グラフィックワークステーション (SiliconGraphics 社, IRIS Crimson/RealityEngine) によって 1280×1024 画素の画像を生成する。

この構成のもとで、システムの描画パフォーマンスの観点から、視角で 0.3° (真正面に 1.5 m 離れた上記表示画面上で 7.85 mm) より小さなポリゴンによるディテールを描画しないとすると、式 (4) と式 (5) の基準視力 a_0 は式 (7) によって決定することができる。

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2 \tan^{-1}\left(\frac{l}{2D}\right)} \\ &= \frac{1}{2 \tan^{-1}\left(\frac{7.85}{3000}\right)} \simeq 3.3 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 l は描画されるべき最小のポリゴンの大きさであり、 D は視点から画面までの距離である。

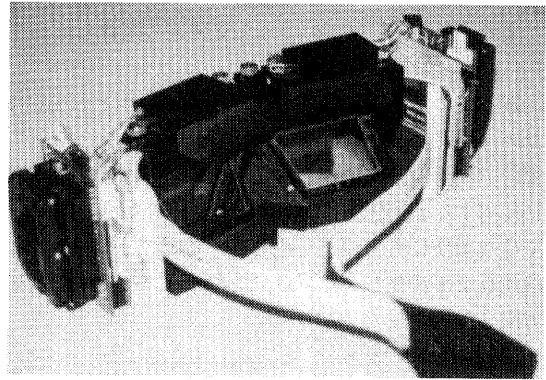


図6 視線入力装置付き液晶シャッタ眼鏡
Fig. 6 Gaze tracking eyewear.

視線方向を計測するために、視線計測機能を備えた立体視用眼鏡 (以下、視線計測眼鏡) を開発した。これは、図 6 に示すように、液晶シャッタ眼鏡 (Stereo Graphics 社, CrystalEyes) に眼球運動を追跡する視線計測装置を 2 つ組み込んだものである。各視線計測装置は、2 つの赤外線発光ダイオード (IRED) と、イメージセンサおよび光学系、そして演算ユニットから構成される。この装置は、IRED の角膜表面からの反射像と瞳孔の画像を解析することによって視線方向を導出する¹²⁾。さらに、表示装置画面に対して相対的な観察者の頭部の位置と姿勢とを取得するために、眼鏡に磁気センサタイプのヘッドトラッカ (Polhemus 社, Fastrak) を取り付けている。本機は、安定した精度を得るため現在調整中である。また、データ通信を含めた総合的なサンプリングレートは現状で 5~6 サンプル毎秒程度である。

視線計測眼鏡を実際に使用した結果については後述するが、ここではまず、本手法の効果を確認するために行った予備実験について述べる。

この実験では、超音波センサ型のヘッドトラッカが組み込まれた液晶シャッタ眼鏡 (StereoGraphics 社, CrystalEyesVR) を装着し、観察者の頭部正面方向を利き目の視線方向として代用した。また、利き目の視線と物体との交点を注視点とし、左右の視点と物体上の注視点とがなす角度を輻輳角とした。

視線跳躍への対応として、視線運動の角速度がある閾値 (実験では $180^\circ/\text{sec}$) 以上である期間は、視線が跳躍運動をしていると判断し、描画処理をスキップするようにした。すなわち、視線運動の角速度が閾値未満に復帰するまで表示画像を更新しない。これによって、視線を素早く移動したときの応答性が改善される。このような処理は、実際に視線計測を行う場合にも利

用できる。

また、その他、以下のような実装上の配慮を行った。

(1) 視線方向の安定化

観察者の頭部正面方向を視線方向の代用としているため、観察者が意識しない頭部のふらつきなどにより、視線方向が不安定になる。これをそのまま視力の計算に使用すると、頻繁に形状モデルの LOD が切り替わって生成画像にちらつきを生じる。そこで、検出した視線運動を平滑化しノイズ成分を除去することで、視線方向を安定させた。

(2) 注視カーソル

視線方向を頭部正面方向によって代用する方式では、実際の注視方向は頭部方向とは独立に移動できるので、実際の注視方向を誘導するために計算上の注視点位置を提示する必要がある。本システムでは、特に注視カーソルを3次元的に提示することによって、前述の融像領域による効果を高めるように配慮した。観察者が両眼でこの3次元カーソルを追跡することによって、実際の輻輳角と計算上の輻輳角とを一致させることができる。

注視カーソルを3次元的に描画しようとする場合、利き目の視線方向を優先している都合上、利き目からはつねに注視点が見えているが、他方の眼からは、視線移動中に注視点が他の物体に遮られる場合がある。しかし、輻輳を誘導するという目的から、注視点と物体との奥行き関係にかかわらず、注視カーソルを強制的に描画することにした。実際にこれによって、輻輳を連続して安定に誘導する効果があることを確認した。

4.2 階層型形状モデルの構築

実験システムでは、実物体の距離画像を用いて作成した階層型形状モデルを使用した。距離画像は、各画素が物体上の点の3次元情報を表す一種の画像である。全周型距離画像から階層型形状モデルを生成する手法が報告されている¹⁴⁾。

この手法は、距離画像を最適化された構造を持つポリゴン（三角パッチ）群に変換する。ポリゴンの大きさは、原形を維持するために、局所的な曲率に基づいて適応的に選択される。さらに、ポリゴンの最小サイズを変えて複数の幾何形状モデルを作成し、階層型形状モデルを構築する。このとき、より簡単な形状の LOD に対しては、ポリゴンの最小サイズをより大きく設定する。

これは、物体の3次元計測に基づいているので、複雑な形状も取り扱うことが可能である。図7に、石膏像の距離画像から得られた階層型形状モデルをワイヤフレーム表現で示す。実験で使用した階層型形状モデ

ルはすべて、この手法によって作成したものである。

詳細度の異なる形状モデルを生成するその他の手法として、progressive mesh¹⁵⁾などが報告されている。また、市販の形状モデル作成プログラムの中には、ポリゴン数を自動的に間引く機能や階層型形状データを生成する機能を持つものがある。さらに、国際標準の三次元仮想空間記述言語 VRML (Virtual Reality Modeling Language) に LOD 機能が含まれているなど、LOD に対する関心が増大しているため、今後より良い手法が開発されるものと思われる。

4.3 実験結果

紙面では動態視力による効果を示すことが困難であるため、ここでは、中心視・周辺視、および融像の視覚要因を考慮した表示結果を示す。各視覚要因の導入が画質と描画速度にどのように寄与するかを明らかにするため、まず各視覚要因を個別に適用して得られる結果を示す。

以下に示す図では、パッチ数が変化していることを強調するために、幾何モデルに単純な質感を与え、フラットシェーディングによってレンダリングしている。しかし、実際のアプリケーションでは、Gouraud シェーディングや Phong シェーディングなどのスムーズシェーディングとテクスチャマッピングを用いて、ポリゴンの減少を目立たなくすることができる。

(1) 中心視・周辺視

式(4)で k_2 と k_3 を 1.0 に固定する。この条件で、被験者に、詳細な LOD のみの画像と、本手法によって適応的に LOD を制御した画像とを交互に観察させ、画質を比較させる。図8に観察者がシーンを見回しているときの本手法による画像を示す。図8(a)は、観察者の注視点が左上の物体にあるときの画像を表す。図8(b)では、観察者の注視点が右下の物体に移動している。これらの表示例から、注視点付近の形状モデルは多くのポリゴンによって構成されていることが分かる。その一方で、注視点から離れた周辺の物体は、より粗い形状モデルによって表現されている。

この実験例では、本手法を適用することによって、描画レートが 230 ミリ秒/フレームから 50 ミリ秒/フレームとなり、5倍弱程度の描画速度が得られた。また、観察者が注視カーソルの部分を注視しているとき、周辺領域のポリゴン数の減少は、あまり認識されなかったことが確認された。

(2) 融像

式(4)で k_1 と k_2 を 1.0 に固定する。3つの階層型形状データを手前から奥に向かって距離を置いて並べる。被験者は、これを立体観察し、主観評価を行う。

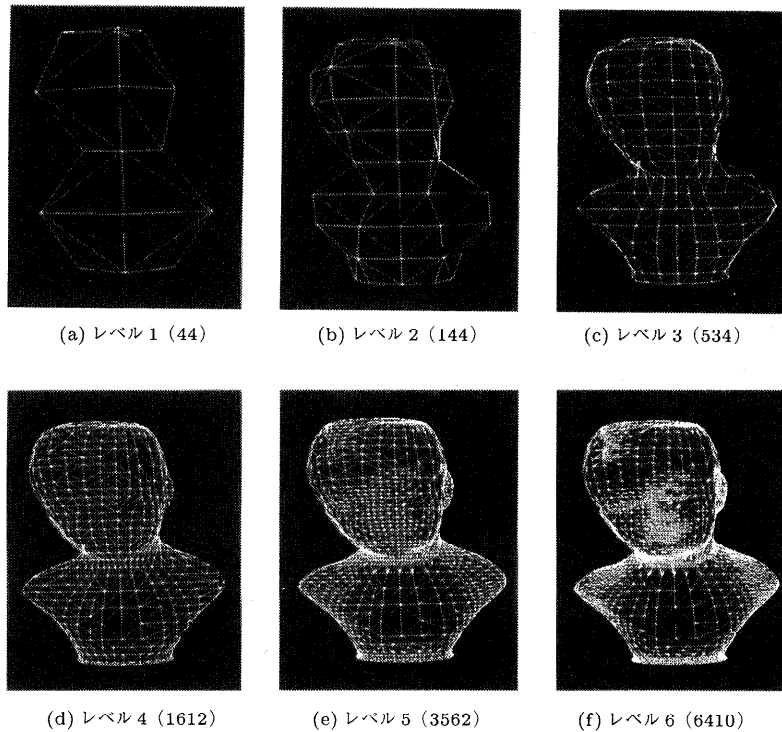


図7 階層型形状モデル（ポリゴン数）

Fig. 7 Hierarchical geometric models (with the number of polygons).

図9(a)は、手前の物体を注視しているときの立体画像を、注視点における視差の量だけ移動して、左右の画像の注視点が一致するように重ねた図である。これは立体視の知覚を簡単に模擬したものであり、注視点付近は単一像になり、その他の部分では二重像になっている。図9(b)では、奥の物体に注視点を移動している。これらの図から、注視点付近の単一像は詳細に描画され、注視点より手前あるいは奥の二重像は簡略化されていることが分かる。

この実験により、前述の中心視・周辺視による効果と同程度の描画速度の向上が得られた。また、立体視している観察者からは、本方式によるポリゴンの減少がほとんど気にならないという評価が得られた。

(3) 総合的な効果

視力を算出するために、式(4)および式(5)を用いて3つの視力係数を統合した。図10に、これら2つの方式を用いて得られる効果を示す。図10(a)は式(4)による結果を表し、図10(b)は式(5)による結果を表す。式(5)の方式は、式(4)よりも低いLODを選択する傾向があり、特に周辺視野の簡略化が顕著であることが分かる。

(4) 視線計測眼鏡の使用

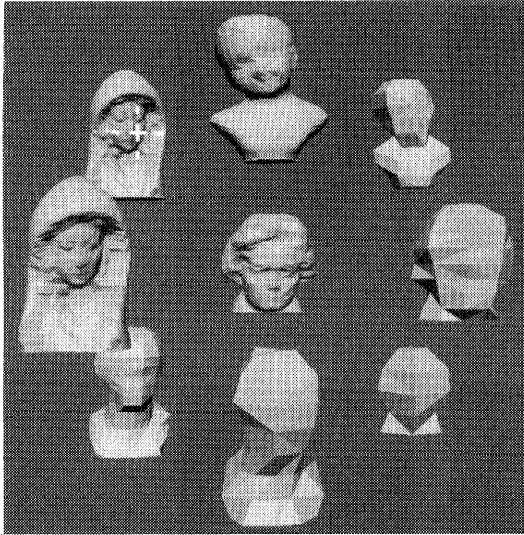
開発した視線計測眼鏡を実際に観察者が装着し、前記の実験と同様に実時間で画像を生成・提示した。

本視線計測眼鏡には両眼の視線を計測する機能があるが、調整の都合により、観察者の利き目側の視線計測機構のみ作動させた。また、この利き目側の視線と物体との交点を両眼の注視点と見なすことにより、もう一方の視線を模擬的に定めた。

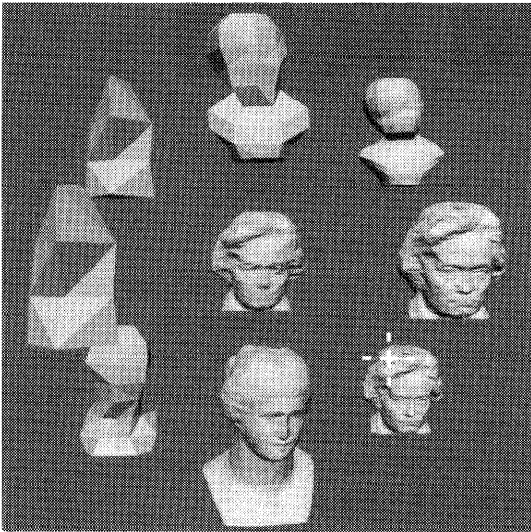
キャリブレーションを入念に行った後、観察者が視線を移動させると、実際の視線方向に少し遅れて注視カーソルが追従し、実際に注視している物体だけが詳細に描画された。その結果、応答の遅れが気になるものの、頭部正面方向に視線方向を拘束する前述の予備実験に比較してストレスが少なく、ポリゴンの減少をさほど感じないという主観評価を得ることができた。

また、視線の計測値が多少ずれても、式(1)により、注視点が物体上にあればその物体のLODは変化しないので、精度的に多少不安定でも実用上大きな問題にはならなかった。

総じて、実際に視線計測装置を使用した実験により、本適応的表示手法が有効に作用することを確認することができた。



(a) 左上の物体を注視



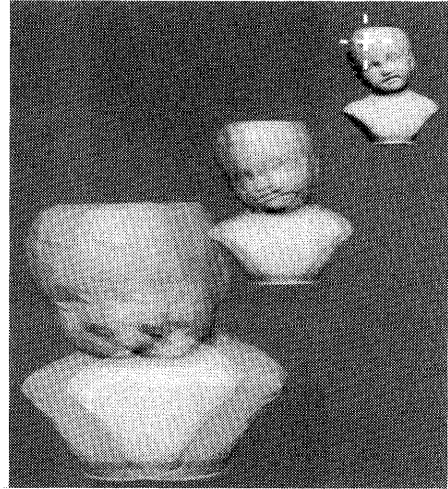
(b) 右下の物体を注視

図8 中心視・周辺視を考慮した画像

Fig. 8 Rendered images considering central/peripheral visual factor.

5. むすび

本論文では、特にVRでの応用を目的とした新しい適応的表示手法について述べた。本手法は、観察者の視線情報に基づいて、あらかじめ構築してある階層型形状モデルのLODを適応的に選択するものである。これにより、観察者が注目していない領域を簡略化した形状モデルによって描画する。その結果、視覚的に重要な領域の画質を維持しながら、描画速度の向上を



(a) 右側奥の物体を注視

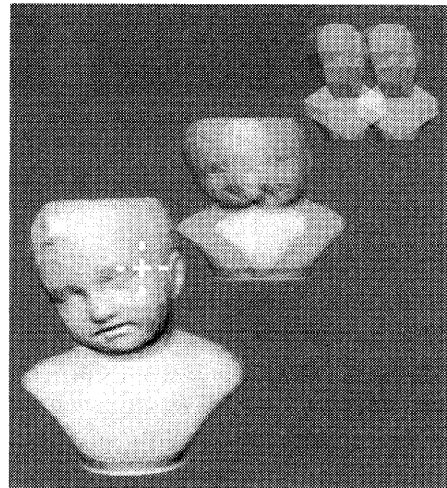


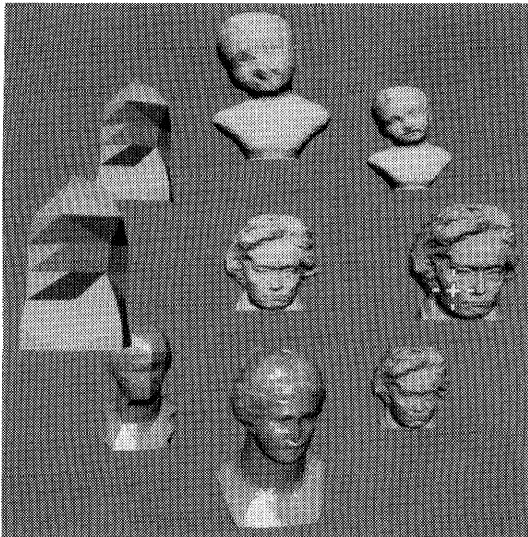
図9 融像を考慮したLODの選択

Fig. 9 Rendered images considering fusalional visual factor.

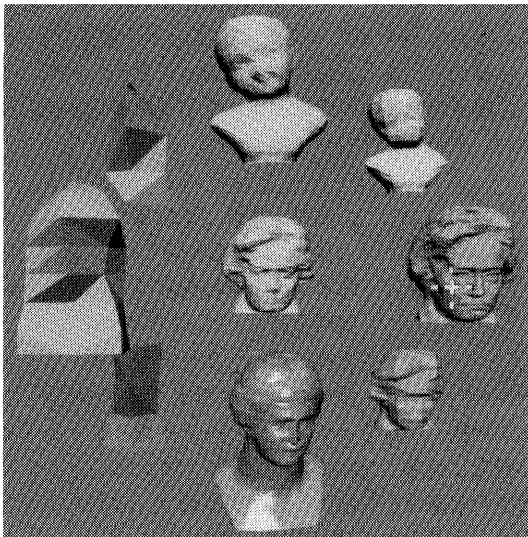
図ることが可能である。

本手法は、3つの視覚特性を活用している。これらは、「中心視・周辺視」、「動態視力」、「融像」である。生理学的知見に基づいて、これらを式(1)~(3)によりモデル化した。これらの計算モデルは、いくつかのパラメータを含んでおり、これらの値を主観的な観測により慎重に選択した。その結果、3つのモデルはそれぞれ期待どおりの効果を実現することを確認した。

また、3つの視力係数を結合し視力を決定する計算モデルとして、式(4)と式(5)による2つの方式を試みた。ポリゴンの削減率と画質とのバランスがこの計算モデルにより大きく左右されるので、本手法を実装



(a) 式 (4) による画像



(b) 式 (5) による画像

図 10 視力係数の統合

Fig. 10 Rendered images considering three visual factors.

するシステムの用途に合わせて、適切な計算モデルを検討する必要がある。

視線計測眼鏡を用いた実験では、実際に視線を計測することにより、本手法の有用性を確認することができた。今回開発した視線計測眼鏡は、民生用一眼レフカメラに搭載されている視線計測ユニットを流用しており、廉価で小型軽量の視線計測装置を実現している。本手法とこの視線計測眼鏡との組合せによって、VRシステムのパフォーマンスを向上させると期待できる。また、将来的にはHMDに視線計測装置を組み込んだ場合に関して検討したい考えである。

次の段階として、本表示方式を実用システムに適用し、定量的な評価を行いたいと考えている。このためには、パラメータの値や各計算モデルの妥当性、画質と対話応答性などを総合的に評価するための客観的な評価基準などについて研究を行う必要がある。

また、LODの切り替えに関して、以下のような改良点が考えられる。

(1) 本論文では、階層型形状モデルのLODを物体単位で切り替えている。しかしながら、単一の大きな物体では、局所的にポリゴン数を調整した方がより効果的であると思われる。このような場合、単純には、1つの物体を複数のより小さな物体部分に分割して構成し、部分単位でLODを切り替える方法が考えられる。しかしながら、このような手法では、隣接する部分の間でLODが異なる場合、接合部で隙間などの不整合を生じる。したがって、根本的に解決するためには、各LODの形状データを静的に用意するのではなく、本手法を改良し、局所的にLODの異なる形状データを動的に生成する方式が考えられる。

(2) また、今回の実験ではLOD間の遷移を単純な切り替えにより実現している。LODの変化によるちらつき感を軽減するためには、2つのLODの間で、中間的な画像あるいは形状モデルを合成するなどの方式を用いることができる。

謝辞 本研究を進めるにあたり、形状データの提供など様々なご協力をいただいた本研究室の内山晋二氏と藤木真和氏に深く感謝します。

参考文献

- 1) Airey, J.M., Rohlf, J.H. and Brooks Jr., F.P.: Towards image realism with interactive update rates in complex virtual building environments, *Computer Graphics*, Vol.24, No.3 (*Proc. SIGGRAPH'90*), pp.41-50 (1990).
- 2) Teller, S.J. and Sequin, C.H.: Visibility preprocessing for interactive walkthroughs, *ibid*, Vol.25, No.4 (*Proc. SIGGRAPH'91*), pp.61-69 (1991).
- 3) Clark, J.H.: Hierarchical geometric models for visible surface algorithms, *Comm. ACM*, Vol.19, No.10, pp.547-554 (1976).
- 4) Foley, J., van Dam, A., Feiner, S. and Hughes, J.: *Computer Graphics - Principles and Practice*, 2nd ed., Addison-Wesley (1990).
- 5) Funkhouser, T.A., Sequin, C.H. and Teller, S.J.: Management of large amount of data in interactive building walkthroughs, *Computer Graphics (Special Issue on 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics)*, pp.11-20 (1992).

- 6) Funkhouser, T.A. and Sequin, C.H.: Adaptive display algorithm for interactive frame rates during visualization of complex virtual environments, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'93)*, pp.247-254 (1993).
- 7) Blake, E.H.: A metric for computing adaptive detail in animated scenes using object-oriented programming, *Euro-graphics'87*, G. Marechal (Ed.), pp.295-307, Elsevier Science Publishers, North-Holland (1987).
- 8) 加藤, 岡崎: 形状簡略化に基づく3次元オブジェクト空間の最適高速表示, *信学論*, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1712-1721 (1993).
- 9) 北嶋, 遊佐: リアルタイム景観シミュレータのための形状のグルーピングと多重表現に基づく描画時間の短縮, *信学論*, Vol.J77-D-II, No.2, pp.311-320 (1994).
- 10) Schachter, B.J. (Ed.): *Computer Image Generation*, John Wiley & Sons, New York (1983).
- 11) Kalawsky, R.S.: *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*, Addison-Wesley (1994).
- 12) Young, L.R. and Sheena, D.: Survey of eye movement recording methods, *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, Vol.7, No.5, pp.397-429 (1975).
- 13) Levoy, M. and Whitaker, R.: Gaze-directed volume rendering, *Computer Graphics*, Vol.24, No.2 (*Special Issue on 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics*), pp.217-223 (1990).
- 14) 内山, 山本, 田村: 距離画像からの階層化適応型パッチ生成法, *情報処理学会論文誌*, Vol.36, No.2, pp.351-361 (1995).
- 15) Hoppe, H.: Progressive Meshes, *SIGGRAPH '96 Conference Proceedings*, pp.99-108 (1996).

(平成8年10月23日受付)

(平成9年9月10日採録)



大島登志一 (正会員)

1963年生。1986年筑波大学第三学群情報学類卒業。1991年同大学院博士課程工学研究科修了。工学博士。同年キャノン(株)入社。情報システム研究所配属。1997年より(株)MRシステム研究所に転出。コンピュータグラフィックス、仮想現実感・複合現実感に関する研究に従事。1990年情報処理学会学術奨励賞受賞。日本バーチャルリアリティ学会会員。



山本 裕之 (正会員)

1962年生。1984年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1986年同大学院修士課程修了。同年キャノン(株)入社。1990~1992年マクギル大学知能機械研究所客員研究員。現在、(株)MRシステム研究所第一研究室室長。工学博士。三次元画像計測・認識、アクティブビジョン、複合現実感の研究に従事。電子情報通信学会、日本バーチャルリアリティ学会会員。



田村 秀行 (正会員)

1970年京都大学工学部電気工学科卒業。工業技術院電子技術総合研究所を経て、1980年キャノン(株)入社。現在、同社情報メディア研究所所長。工学博士。画像情報処理、人工知能、マルチメディア、バーチャルリアリティ等の研究に従事。1997年1月より(株)MRシステム研究所取締役を兼務。複合現実感研究プロジェクトを指揮。本学会論文賞等受賞。編著書:「コンピュータ画像処理入門」、「脳映像世界の探検」、「知能情報メディア」等。IEEE, ACM, 電子情報通信学会、日本バーチャルリアリティ学会各会員。現在、人工知能学会理事。