

バーチャルミュージアムシステムのための 多重解像度 3次元物体表示

— 奥行きおよび空間知覚特性に基づく LOD —

田中 弘美[†] 松本卓[†] 金子昇治^{††}

[†]立命館大学 理工学部 情報学科 コンピュータビジョン研究室, 滋賀県草津市

^{††}三菱電機株式会社

概要: 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。リアリティが高く臨場感を与える3次元バーチャルミュージアム空間を効率的に表示するために、人間の視知覚特性を考慮することは重要である。特に奥行き感とは3次元空間知覚の成立の基本となるものであり、奥行き知覚を明らかにすることは3次元のバーチャルミュージアム空間内の距離感覚の認識を高め、効率的にバーチャルミュージアム空間を表示するために重要である。バーチャルミュージアム空間において視点から遠くに展示されるモノの形状を、その奥行き距離(視距離)と知覚感度に基づき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表示速度を向上することが考えられる。そこで本論文は、形状簡略化の基準として、3次元空間における解像視力を表す最小分離閾である奥行弁別閾、奥行き空間周波数特性と空間周波数特性を適用することにより、多重解像度レベルを持つ階層的3次元物体モデルを高速に効率的に表示する手法を提案する。本手法では、奥行き知覚特性に基づく奥行弁別閾に応じて、解像度レベルの表示有効範囲を自動的に決定することにより、視距離に応じて解像度レベルを滑らかに切替えることが可能になる。また、さらに空間周波数特性を適用して、奥行きと空間方向(物体輪郭)の3次元視知覚特性を考慮することにより、任意の3次元方向の適応的多重解像度物体表示が可能になる。

Levels of Detail based on Depth and Spatial Perception Sensitivity of Human Vision

Hiromi T. Tanaka[†], Takashi Matsumoto[†], and Shoji Kaneko^{††}

[†]Computer Vision Laboratory, Department of Computer Science,

Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

^{††}MITSUBISHI electric corporation

abstract: Virtual Reality technology provides a new methodology for human interface with realistic sensation, and has been received growing attention. One of key issues for the real time view generation problem is how to represent and display the 3-D virtual space efficiently with adapting human vision sensitivity. In this paper, we propose a novel and efficient approach for hierarchical view generation of the 3-D objects for Image-based Virtual Museum system, in which the resolution of each level is determined according to the distance from the observer to the object based on the depth and spatial perception sensitivity of human vision. The object is then efficiently displayed with sufficient accuracy by selecting the appropriate level of the model based on the distance between the observer and the object. Experimental results demonstrate the efficiency and correctness of the proposed approach.

1 はじめに

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。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。このよう

なりリアリティが高く臨場感を与える3次元バーチャルミュージアム空間を効率的に表示するためには、人間の視覚特性に応じて可変解像度表示が可能な、効率的な多重解像度の3次元物体モデルが必要である。仮想空間においては、特に奥行き感(奥行き知覚)の成立の基本となるものであり、奥行き知覚に基づいた物体モデル表示を行うことが仮想空間内の距離感(奥行き知覚)を高め、効率的に仮想空間を表示するために重要である。人間の奥行き知覚特性に関する研究としては長田 [1] が、視距離と、奥行き差異を知覚できる最小の範囲を表す奥行弁別閾との関係を分析した。この結果から、人間の奥行き知覚における立体視特性(両眼視差特性)の感度は、視距離に対して非線形に変化することが報告されている。しかし従来の提案手法 [3, 4, 5, 6] では奥行き知覚の非線形性は考慮されていない。また、最近では3次元仮想空間を記述・生成する言語である Virtual Reality Modeling Language (VRML) [8] においても、効率的に物体を表示するために、観察者から対象物体までの距離(視距離)に応じて指定された解像度レベルの物体を表示する多段階表示機能: Level of Detail (LOD) 機能が提供されている。

そこで本論文では、人間の奥行きおよび空間知覚の3次元視知覚特性に基づいた、高速かつ効率的な多重解像度の3次元物体表示法を提案する。まず、1) 適応格子法 [11, 12] を用いて多数の解像度レベルを持つ階層的3次元物体モデルを効率的に生成し、2) 3次元空間における解像視力を表す最小分離閾として奥行弁別閾、奥行き空間周波数特性および空間周波数特性を分析し、3) 視距離に応じてそれらの全ての3次元視知覚特性を同時に満たす解像度レベルを自動的に選択し、4) 多数の解像度レベルを滑らかに切り替えることにより、3次元視知覚特性に基づく任意の3次元方向からの高速物体表示を可能する方法について述べる。

提案手法をVRMLのLOD機能における解像度レベル切替距離のパラメータの設定に用いる主観評価実験結果から、提案手法の有効性を確認した。

2 3次元視知覚特性

視力とは視覚パターンの細部構造を識別する能力であり、測定方法により分類すると、1) 最小視認閾(視野中に存在する点または線を検出させたときの視認できる最小の大きさ)、2) 最小分離閾(二つ、あるいはそれ以上の点や線が分離して見える最小の距離)、3) 最小可読閾(文字や図形が判読できたり弁別できる最小の大きさ)、4) 副尺視力(2本の直線のずれを見分けさせたときに、見分けることのできる最小のずれ)の4種に大別される [9]。以下では3次元物体形状の表示精度を適切に選択するために、3次元空間における解像視力に関わる、奥行弁別閾、奥行き空間周波数特性および空

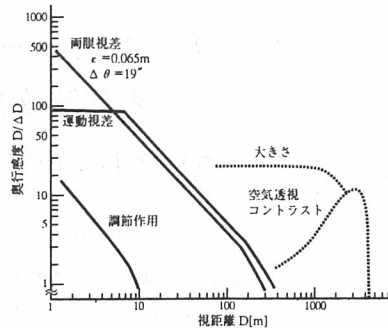


図 1: 奥行き感度の距離特性
(長田 [1] p652: 図 4 より引用)
Fig.1: Depth sensitivities.

間周波数特性の3種類の最小閾について述べる。

2.1 奥行き感度

奥行きのある3次元空間を知覚するための様々な要因のうちどれが支配的であるかは、眼球から対象物体までの距離によって決まる。長田 [1] は画面内の奥行き感(奥行き知覚)は画面内に存在する多くの対象物体相互間の相対距離感によって形成されるとし、奥行き知覚要因の効果の尺度として、(1)式で定義される奥行き感度により種々の要因と視距離との関係について分析した。

$$\text{奥行き感度} \equiv \frac{\text{視距離 } (D)}{\text{奥行弁別閾 } (\Delta D)} \quad (1)$$

ただし ΔD は2点A,B間の奥行き差異を知覚できる最小の範囲を示す。(図2)

図1は視距離 D に対して奥行きの弁別閾 ΔD とした場合両者の関係を示す奥行き感度視距離特性を示したものである。視距離が数 m くらいまでは両眼視差が、10 m 位では運動視差が奥行き知覚の要因として支配的であることが明らかにされた。これより、本研究では室内の3次元仮想空間を想定し、視距離10 m の範囲で最も有効な両眼立体視特性を奥行き感度の要因として考慮する。

2.2 両眼視差による奥行弁別閾

図2に示すように、両眼視差が要因となる奥行き感度において、両眼視差 $\Delta\theta$ は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{\gamma_R - \gamma_L}{D} \\ &= \frac{x_R - x_L}{D} - \frac{x_R - x_L}{D + \Delta D} = \frac{\varepsilon}{D} - \frac{\varepsilon}{D + \Delta D} \\ &= \frac{\varepsilon \Delta D}{D^2 + D \Delta D} \end{aligned} \quad (2)$$

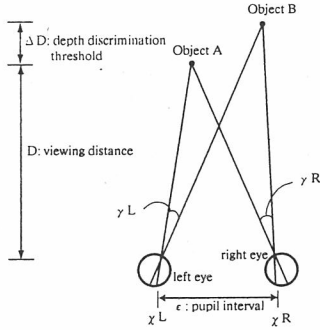


図 2 : 視差による奥行き弁別関
(長田 [1] p650 : 図 1 より引用)

Fig.2 : Viewing distance and binocular parallax.

ただし, γ_L, γ_R は視距離 D および, $D + \Delta D$ のそれぞれの点 A, B を見た時の左右眼の視線方向のずれ角度, $\epsilon (= x_R - x_L)$ は, 両眼の瞳孔間隔である。

(2) 式より, 奥行き弁別関 ΔD は次式のように D の非線形増加関数として表される。

$$\Delta D = \frac{\Delta \theta D^2}{\epsilon - \Delta \theta D} \quad (3)$$

奥行き弁別関の定義から, ある視距離 D において, 奥行き弁別関 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。これより奥行き方向の物体凹凸形状簡略化基準として両眼視差による奥行き弁別関 ΔD を考慮する。

2.3 奥行き空間周波数特性

長田 [2] はさらに, 両眼視差が正弦波状に変化する奥行き弁別関の空間周波数特性を分析し, 奥行き感度と単位視野角内の正弦波状の凹凸形状の周波数の関係を調べ, 特定の空間周波数で感度が最大となる帯域通過器の性質を持つことを明らかにした。実験は視差が正弦波状に変化するランダムドットパターン画像, すなわち奥行き方向に正弦波状の横波状の凹凸を持つ面の画像を用いて行ない, 結果として 1cpd で奥行き感度が最も高くなり, 5cpd 以上では感度が低下するだけでなく, 視差量を増やしても両眼像の融合ができないことを報告している。

これより図 3 に示すように振幅と 1 周期幅の比を $1 : 2\pi$ とする正弦波状凹凸形状を用いて奥行き方向と空間方向それぞれの物体形状簡略化基準として凹凸の大きさ Δa , すなわち振幅の 2 倍長を, また, 凹凸の $\frac{1}{2}$ 周期幅 ΔS_d を考慮した。

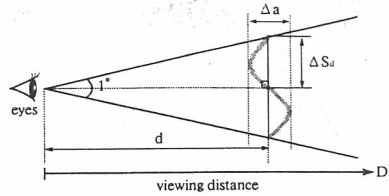


図 3 : 両眼視差の奥行き空間周波数特性

Fig.3 : Thresholds of binocular parallax as a function of sine wave.

2.4 空間周波数特性

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知覚特性を考慮する必要がある。縞視力は視野の 2 次元空間内の弁別能力を示す解像視力の一種であり, 視覚系の空間周波数特性から求められる。空間周波数とは, 視野の一定方向に沿って輝度が周期的に変化する場合に, 視野の一定の範囲内 (通常は視角 1 度以内) に入る明暗の周期の数 cycle per degree (cpd) であり, 縞模様の粗密に対応する。

図 4 のように輝度が正弦波状に変化する空間正弦波パターンコントラストを変化させ, 縞を知覚する最小のコントラストを求めると, 奥行き空間周波数特性と同様に, 特定の空間周波数の時に縞を知覚する閾値が最小となり, 空間周波数がそれより高くなっても低くなっても閾値が上昇する傾向があり, 特定の空間周波数で感度が最大となるような帯域通過器の性質を持つことが明らかにされている [9]。図 5 に示すように, 平均輝度 L_0 が 500cd/m^2 では $2 \sim 5 \text{cpd}$ の時に, 50cd/m^2 では $0.8 \sim 1 \text{cpd}$ の時に感度が最大になり, いずれも特定の周波数のところで感度のピークがある。これより, 空間方向の, つまり物体輪郭の形状簡略化基準値として空間正弦波パターンコントラストの縞間隔の値 ΔS ($\frac{1}{2}$ 周期の距離) を考慮する。

図 6 に, 以上の 3 種類の最小分離閾と視距離特性を示す。

3 階層的 3 次元物体モデルの生成

3.1 再帰的二分割による階層的 3 次元物体モデルの生成

本手法では, 物体形状を表現するために三角パッチ表現を用いる。三角パッチを用いた再帰的二分割による 3 次元物体モデルの生成法としては, 二等辺三角形の形に 2 分割する方法 [10, 11, 12], 三角形の内心を新しい頂点としてパッチを 3 分割する方法 [13], 各辺の中点を新頂点として 4 分割する方法 [14] な

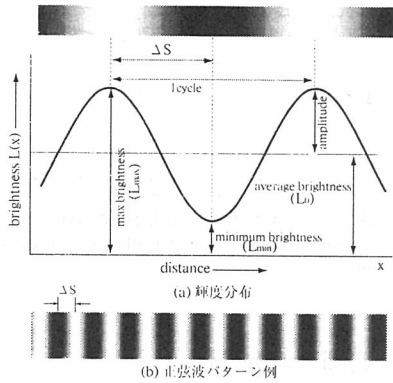


図 4：空間正弦波パターン
 (参考文献 [9] p560：図 9.2.7, 図 9.2.8 より引用)
 Fig.4 : Spatial sinusoidal pattern.

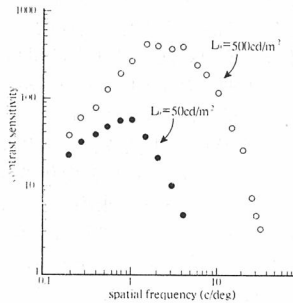


図 5：空間周波数特性 (○印は平均輝度 $L_0 = 500\text{cd/m}^2$, ●印は $L_0 = 50\text{cd/m}^2$ のときの結果を示す。参考文献 [9] p561：図 9.2.9 より引用)
 Fig.5 : Modulation transfer function (MTF).

どがある (図 7)。しかし、3分割する手法では分割後の三角パッチの角が不均一であり分割前の形状を保存できない。また、4分割する手法では分割前と後でパッチサイズの差が大きくなるため、本手法のように階層的に解像度の異なるモデルを生成する場合にはレベル間の連続性という点で適さない。

そこで本手法では、我々が提案した適応格子生成法 [10, 11, 12] を用いて、二等辺三角形を再帰的に 2分割することにより階層的 3次元物体モデルの生成を行なう (図 8)。多重解像度表示が可能な階層的 3次元物体モデルは、三角パッチ分割の最大階層数を変化させることによって生成する。この各解像度レベルの表示有効範囲を人間の視覚特性に基づき自動的に決定し、3次元仮想空間において、決定された視距離に応じた物体形状モデルを選択・表示することで、効率的で滑らかな物体形状モデルの切替表示が可能になる。

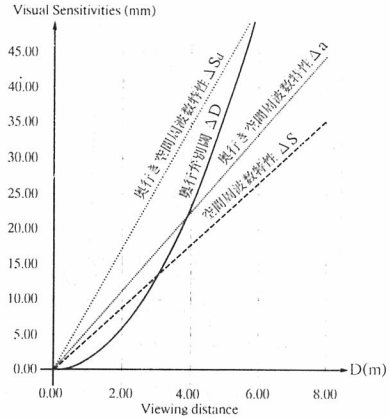


図 6：視距離と各視覚特性の関係
 Fig.6 : Relations between Viewing distance and Depth discrimination.

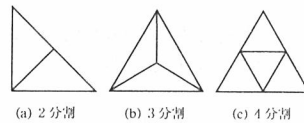


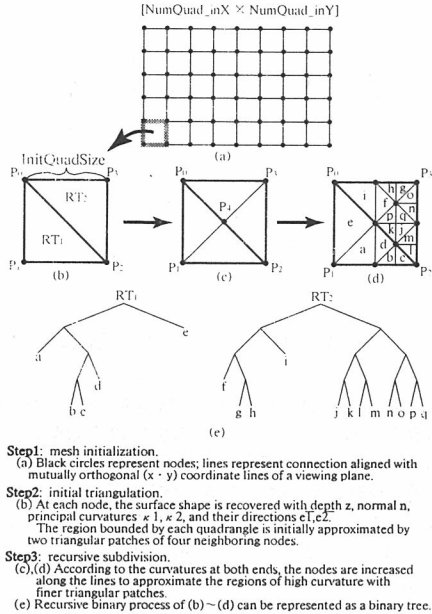
図 7：三角パッチの分割手法
 Fig.7 : The dividing method of triangle patch

3.2 多重解像度モデルの効率的表現

従来の多重解像度モデルは、各解像度レベルごとに物体全体のデータを保持しておく冗長表現が一般的であり膨大な記憶メモリを必要としていた。本研究では、各解像度レベル間で三角パッチ集合の差分を持つことにより、保持するデータ量の削減を行なう。図 9に示すように、物体の生成は、下位レベルの三角パッチデータ (図 9(a)) に、上位レベルの差分三角パッチデータ (図 9(b)) を追加することにより行なう。

4 視知覚特性に基づく適応的 3次元物体表示

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 [11, 12] を用いて再帰的に 2分割し生成された多重解像度を持つ階層的 3次元物体モデルを生成し、各解像度レベルの表示有効範囲を、奥行きおよび空間知覚の感度に基づいて自動的に決定する方法を述



Step1: mesh initialization.
 (a) Black circles represent nodes; lines represent connection aligned with mutually orthogonal (x, y) coordinate lines of a viewing plane.

Step2: 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 c_1, c_2 . The region bounded by each quadrangle is initially approximated by two triangular patches of four neighboring nodes.

Step3: 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.
 (e) Recursive binary process of (b)-(d) can be represented as a binary tree.

図 8 : 適応格子生成法
 Fig.8 : Adaptive mesh generation.

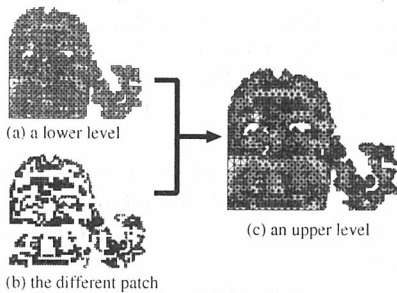


図 9 : 差分三角パッチデータによる物体形状モデルの生成
 Fig.9 : Making upper level models by using a difference patch

べる。視距離に応じた解像度レベルを選択し滑らかに切り替えることにより、高速にかつ効率的に多重解像度の物体モデルを表示する。

4.1 解像度レベルの選択

従来の多重解像度表示の手法では、視距離を等間隔に分割し、各視距離に適切な解像度のモデルを生成し表示する方法が一般的であった。しかし、そのような解像度切り替え点の視距離を線形に決定する方法では、適切な解像度を持つモデルを生成することが困難であり、そのため物体モデルの切替時に形状精度の不連続が生じる。さらに三角パッチ集合

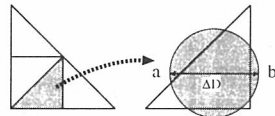


図 10 : 奥行弁別関と三角パッチサイズの比較
 Fig.10 : Patch size depth discrimination threshold v.s.

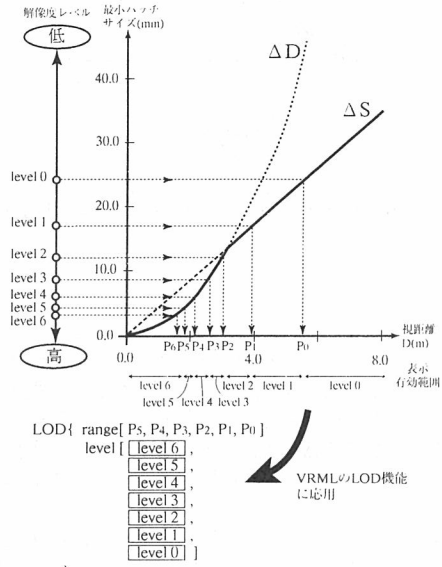


図 11 : 解像度レベルの選択と LOD 機能切替距離の設定
 Fig.11 : Multi resolution levels for LOD.

を用いて物体形状を表現する場合、連続する解像度レベル間の精度差は 2, 3, あるいは 4 倍になるため、非線形系の両眼視差特性に適合するようにモデルを生成することは困難である。

そこで本手法では、図 11 に示すように、従来法とは逆に、3次元視覚特性に基づきモデルの各解像度レベルがどの視距離の範囲で表示されることが適切かを判定しその結果からレベル切替距離を決定する方法を採る。さらに、求められたレベル切替距離を VRML の LOD 機能のレベル切替距離設定パラメータとして用いることで、違和感のない滑らかな解像度レベルの切替が可能になる。

4.2 奥行きおよび空間方向の視覚特性に基づく 3次元物体表示

本手法では奥行きおよび空間方向全ての 3次元方向視覚特性を満たすために、視距離に対応する各最小分離閾を比較して最小の弁別閾値をそ

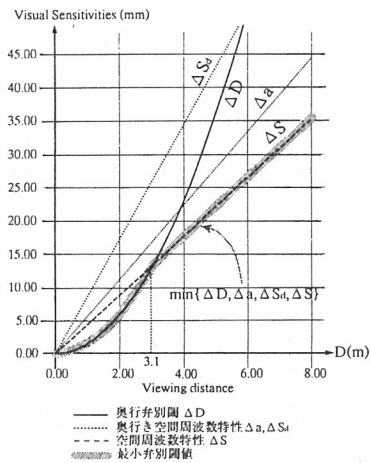


図 12 : 視距離と各視覚特性の関係
Fig.12 : Relations between Viewing distance and Depth discrimination.

の視距離における物体形状簡略化基準として用いる。図 12 と表 1 に視距離 D に対する各最小分離閾 $\Delta D, \Delta \alpha, \Delta S_d, \Delta S$ の関係を示す。したがって視距離 3.1m までは奥行弁別閾 ΔD 、それ以上の距離では空間周波数特性 ΔS が形状簡略化基準として選択され、図 12 に示す最小弁別閾値グラフとして抽出される。

次に、最小弁別閾値グラフを用いて、解像度レベル i の三角パッチサイズと視距離 D_i における奥行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り替え視距離を決定する。

表 1 : 視距離に対する各視覚特性の値

Table 1 : The value of each sight character toward distance

視距離 $D(m)$	ΔD	$\Delta \alpha$	ΔS_d	ΔS
1.0	*1.42	5.56	8.73	4.36
2.0	*5.68	11.11	17.45	8.73
3.0	*12.81	16.67	26.16	13.09
4.0	22.80	22.22	34.90	*17.45
5.0	35.68	27.78	43.64	*21.82
6.0	51.45	33.33	52.35	*26.18
7.0	70.14	38.89	61.09	*30.54
8.0	91.74	44.45	69.82	*34.91

ΔD : 奥行弁別閾 (単位 mm)
 $\Delta \alpha$: 奥行空間周波数特性 (凹凸波の振幅 $\times 2$, 単位 mm)
 ΔS_d : 奥行空間周波数特性 (凹凸波の $\frac{1}{2}$ 波長, 単位 mm)
 ΔS : 空間周波数特性 (縮間隔, 単位 mm)
 *印: 各視距離における全視覚特性の弁別閾の最小閾値

5 主観評価実験

観察者が階層的 3 次元物体モデルの各解像度レベルを、どの程度の視距離まで違和感なく知覚して

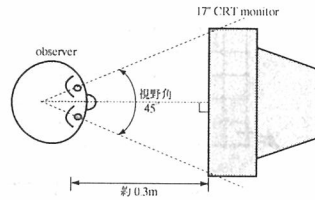


図 13 : 実験の条件
Fig.13 : The condition of the experiment.

いるのかを被験者 20 人による主観評価実験により求めた。

実験には、NRCC (カナダ国立研究所) が提供する距離画像データファイルの男性の実顔距離画像 (Face12) を用い、適応格子生成法により階層的に 7 段階の解像度レベルを持つ階層的 3 次元物体モデルを生成した。表 2 と図 14 に各解像度レベルのパッチ数、パッチサイズ、表示有効限界視距離の推定値 D と主観評価値 d を示す。物体の多段階表示には VRML の LOD 機能を用い、モデルの各解像度レベルはフラットシェーディング/テクスチャ無しとして表示した。遠距離から徐々に物体形状モデルを観察者方向に近付けていき、観察者がパッチ間の角を知覚し、なめらかさに違和感を感じた時の視距離を、その解像度レベルの主観評価値 $d(m)$ として求めた。なお、図 13 に示すように VRML における視野角のデフォルト値が 45 度に設定されていることから、被験者からディスプレイまでの距離は約 0.3m とした。

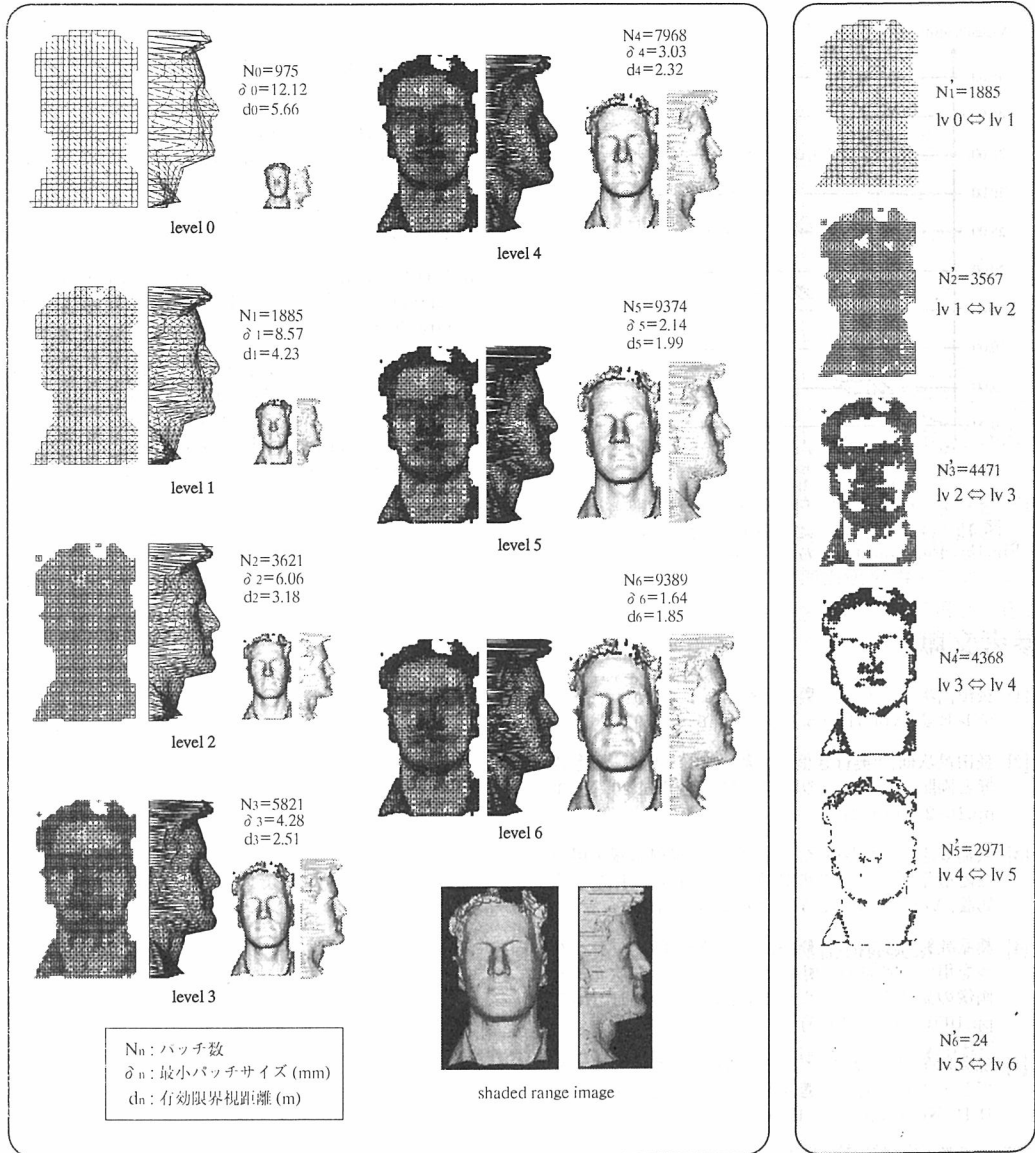
主観評価実験により得られたレベル切替距離と、本手法により選択された物体形状簡略表示の基準値とを比較することにより、本手法の有効性について考察する。

表 1 に示した各視距離における視覚特性の最小分離閾の中で最小値は図 15 の太線で示した最小閾値曲線として抽出することができる。主観評価実験により得られた値 d がレベル切替距離グラフの相関性が高いことからレベルの切替が 3 次元視知覚特性に適合していることが確認できる。

表 2 : 各解像度レベルの推定有効限界視距離と主観評価結果
Table 2 : Experimental Results.

解像度 Lv	パッチ数	size(mm)	$D(m)$	$d(m)$
レベル 0	975	24.24	5.56	5.66
レベル 1	1885	17.14	3.93	4.23
レベル 2	3621	12.12	2.93	3.18
レベル 3	5821	8.56	2.45	2.51
レベル 4	7968	6.06	2.07	2.33
レベル 5	9374	4.28	1.74	1.99
レベル 6	9389	3.28	1.52	1.85

size: 三角パッチサイズ (単位 mm)
 D : 本手法で算出されるレベル切り替え視距離 (単位 m)
 d : 主観評価実験での有効限界視距離 (単位 m)



(a) 生成された階層的3次元モデルと表示サイズ

(b) 各解像度レベル間の差分データ

図 14 : 階層的 3 次元物体モデル
 Fig.14 : Hierarchical 3-D object models

6 まとめ

本論文では、人間の3次元視知覚特性に基づく高速でかつ効率的な物体表示を行うために、まず、1) 適応格子法を用いて多数の解像度レベルを持つ階層的3次元物体モデルを効率的に生成し、2) 3次元空間における解像視力を表す最小分離閾として奥行弁別閾、奥行き空間周波数特性および空間周波

数特性を分析し、3) それら3次元視知覚特性の全てを同時に満たす解像度レベルを視距離に応じて自動的に選択し、多数の解像度レベルを滑らかに切り替えて、4) 3次元視知覚特性に基づき任意の3次元方向からの高速物体表示を可能にする方法を提案した。提案手法をVRMLのLOD機能に応用した主観評価実験により提案手法の有効性を確認した。

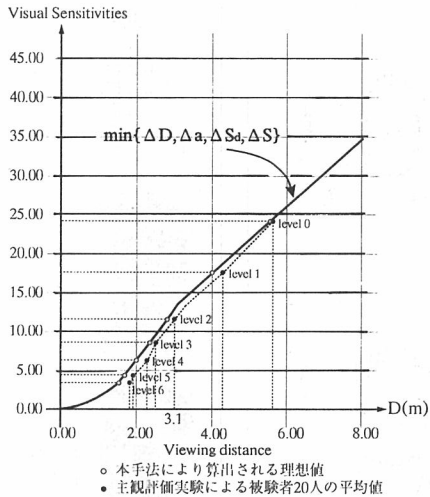


図 15 : 視距離と物体形状簡略表示基準値の関係
Fig.15 · Relations between distance and each scale

[11] 田中弘美, 岸野文郎, “曲面再構成のための適応格子生成法 -階層的三角パッチ表現並列生成アルゴリズム-,” 信学論, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1691-1703, (1993).

[12] H.T.Tanaka, “Accuracy-Based Sampling and Reconstruction with Adaptive Meshes for Parallel Hierarchical Triangulation,” Computer Vision and Image Understanding, Vol.61, No.3, pp.335-350, (1995).

[13] L.D.Floriani, “A pyramid data structure for triangle-based surface description,” Computer Graphics, Appl. 9, pp.67-78, (1989).

[14] M.Vasilescu, D.Terzopoulos, “Adaptive meshes and shells: Irregular triangulation, discontinuities, and hierarchical subdivision,” IEEE Computer Vision and Pattern Recognition '92, pp.829-832, (1992).

参考文献

[1] 長田昌次郎, “視覚の奥行距離情報とその奥行感度,” テレビ誌, Vol.31, No.8, pp.649-655, (1977).

[2] 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).

[3] 大島登志一, 山本裕之, 田村秀行, “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,” 情報処論, Vol.38, No.12, pp.2499-2508, (1997).

[4] 桑原教彰, 志和新一, 鉄谷信二, 岸野文郎, “フラクタルを用いた階層的な樹木形状表現による 3 次元樹木画像の高速生成方法,” 信学論, Vol.J78-D-II, No.7, pp.1091-1104, (1995).

[5] 加藤伸子, 岡崎彰夫, “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).

[6] 佐藤隆宣, 伴野明, 岸野文郎, “運動視における表示遅れの影響と高速画像生成表示方法,” テレビ誌, Vol.46, No.9, pp.1179-1188, (1992).

[7] S.WANG, M.SATO, 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, (1997).

[8] 三浦憲二郎, VRML2.0 -3D サイバースペース構築言語-, 朝倉書店, (1996).

[9] 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).

[10] 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, pp441-447 (1998).