

## 群化を用いた 3 次元仮想空間のための高速表示法

加 藤 伸 子<sup>†</sup> 狩 野 均<sup>††</sup> 西 原 清 一<sup>††</sup>

インタラクティブ CG の様々な分野での広がりとともに、コンピュータの処理速度に応じて、画質を保ちながらインタラクティブ性を保証する描画処理方法が問題となってきた。これまでこの問題を解決するために、視点からの距離や物体の大きさに応じて物体の簡略度を選択し描画する形状簡略化が試みられている。しかし視野内に非常に多くの物体があるときには、形状簡略化だけでは必ずしも十分な描画速度が得られないといった問題があった。本論文ではこの問題に取り組むために、視知覚特性の観点から CG の表示法について考察を行い、これに基づき、インタラクティブ性を保証するアルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムは、視角に基づき簡略化を行うものであるが、この際、個々の物体形状だけでなく、群化と呼ばれる概念を用いて、情景全体の色、明るさを考慮したものとなっている。ここでは、樹木データを配置した仮想空間に対して本手法を適用することにより、本手法の有効性を示す。

### A Realtime Display Method for Virtual Environment Using Grouping Operation

NOBUKO KATO,<sup>†</sup> HITOSHI KANO<sup>††</sup> and SEIICHI NISHIHARA<sup>††</sup>

It is important to balance the tradeoff between the display speed and the quality of displayed images in an interactive graphics environment. In the paper, we first discuss the characteristics of visual perception from the display technique point of view. Then we propose a high-speed method that efficiently displays 3-D object worlds. The method makes use of the idea of 'grouping', or a visual-psychological concept, to get simplified or merged shapes of objects taking into consideration their distance from the viewpoint, their color and brightness, and the contrast of the whole scene as well.

#### 1. はじめに

仮想環境を構築しその中でユーザが対話操作を行えるインタラクティブ CG は、CG 技術の普及にともない、各種シミュレータからアミューズメントまで、幅広い分野で需要が高まってきている。ところが、一般的に CG の画質と処理時間とはトレードオフの関係にあるため、画質を保持しながらインタラクティブ操作に十分な表示速度を保証することは、困難な問題である。

著者は先に、このトレードオフの問題を解決するために個々の物体に階層的に簡略化されたデータを持たせ、視野に応じて各物体の階層を切り替えることで、

描画ポリゴン数を減らす手法を提案した<sup>1)</sup>。しかし、物体数が非常に多い仮想空間においては、各物体が最も簡略化された状態で表示されたとしても、全体として十分な描画速度が保たれない、または、遠方の物体まで描画できない、という場合がある。

このため、簡略化の階層を切り替える際に、データの領域管理を工夫する方法やワークスルー中の描画速度を一定に保つ方法が種々試みられている<sup>2)~4)</sup>が、上記の問題点については十分とはいえない。また、これまでの形状簡略化法では、周囲の物体との色や形の対比について考慮がなされていなかったため、描画されたものが不自然な場合があった。

ところで、この CG におけるトレードオフの問題は、人間が違和感なく把握できる情景を限られた処理時間でいかに作成できるか、という興味深い問題であり、視覚心理と切り離すことのできない問題である。

そこで本研究ではまず、視知覚特性に合った CG の処理過程を記述するための強力でかつ広く成立する表示原理を見出し、そのうえで、実際にリアルタイム

<sup>†</sup> 筑波技術短期大学電子情報学科

Department of Electronics and Information Science,  
Tsukuba College of Technology

<sup>††</sup> 筑波大学電子・情報工学系

Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba

性を保持しながらこの処理を行うアルゴリズムを開発した。提案する手法は、視野中の複数の対象が知覚的に体制化され一定のまとまりを形成する、群化と呼ばれる現象<sup>5)</sup>に基づいて、視野内を単純化し、整理することで、高速な表示を行うものである。つまり本手法は、簡略化を個々の物体にとどめないで、情景全体の構造まで考慮したものになっている。このため、物体間の距離と、2つの物体の色、形状、速度の非類似度を用いて、群化の判定を行う方法を定式化した。

以下では、まず2章で、視覚心理に基づいた表示方法について考察を行い、次に3章において、ウォークスルーに適した定式化とアルゴリズムについて述べる。最後に4章では、群化を実際の景観に適用した実験結果を示し、本手法の有効性を確認する。

## 2. 視覚心理に基づく表示方法

我々は、ある景色を眺めたときに、遠方の物体がぼけて見えること、色褪せて見えること、動く物体がぶれて見えること、などを体験することができる。CGを用いてこのような人間の見方に近い表示を行うことは、個々の課題として別々に取り組まれてきた<sup>6),7)</sup>。しかし、心理実験や計算理論によるシミュレーションを通して視知覚システムの解明が進められている現在、視覚心理の観点からCGの表示原理を明らかにすることは、意義のあることである。このため、まず我々が感じる見え方を与える表示原理について考察を行う。

### 2.1 空間周波数

視知覚システムが受容する複雑な刺激は、基本的には様々な明るさが空間的に配置されたパターンと考えることができる。このパターンはフーリエ解析を行って得られた周波数スペクトルの加算と見なせる。

このモデルに基づき、画像の高周波成分を除去すると、全体としてピンボケの画像が得られる。つまり物体の細部に関する情報は失われるが、全体の形は保存されたことになる。これを利用して、同一の画像に対してガウス関数の導関数  $\nabla^2 G$  フィルタのパラメータを変えることで、大まかな情報から細かい情報までを段階的に得られることが知られている。

また、知覚実験の結果から、提示時間を短くした刺激や、視野中心から離れた位置に提示された刺激に対しては、高周波帯域の処理が阻害されることが報告されている。このことから、周波数成分の選択的除去は、視野中心からの距離（角度  $\phi$ ）、刺激の提示時間（速度  $d\phi/dt$ ）に依存することが分かる。

このような空間周波数を用いた考え方は、明るさのパターンだけではなく、空間に配置された色相のパ

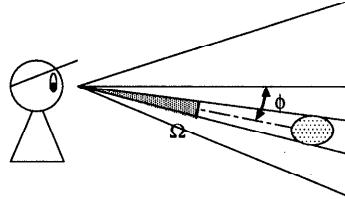


図1 視角  
Fig. 1 View angle.

ターン

$$f\left(\phi, \frac{d\phi}{dt}\right) \quad (1)$$

を用いて、統一的に扱うことができる。

### 2.2 視角による定式化

以上述べたフィルタによる画像処理手法は、視知覚機構を明らかにする方法としては有効であるが、CG表示のための実装アルゴリズムとしては、適切なものではない。そこで、視角  $\Omega$ （図1参照）を用いることにする。つまり、ある一定の値  $\Omega_t$  未満の  $\Omega$  を人間は感知できないことから、

$$\Omega < \Omega_t \left(\phi, \frac{d\phi}{dt}\right) \quad (2)$$

となる形状部分を選択的に簡略化することで、周波数除去と同様の処理を行うことを考える。

この考え方を、個々の物体に用いたのが形状簡略化の手法であるが、これまでの形状簡略化を用いる手法では、複数の物体相互の関連や、情景全体の色の配置など、全体的な構成については考慮されていなかった。実際にインタラクティブ性を保証する表示においては、短時間で情景を把握することが重要である。そこで情景全体に対して式(2)を拡張し、周波数の選択的除去を実現する手法が有効と考えられる。

### 2.3 群化概念の導入

視知覚に関する研究では、視野内に複数の対象が存在するとき、知覚的に体制化され一定のまとまりを形成することが知られている<sup>5)</sup>。この現象は群化と呼ばれている<sup>8)</sup>（詳細後述）。群化の要因としては、表1に示すゲシュタルトの法則が知られている（この例を図2に示す）。

群化はもともと現象面から法則化されたものであるが、計算機シミュレーションにおいて、周波数フィルタリングの概念を用いて群化が発生することが確認されている<sup>9)</sup>。ここでは、この群化を形成する法則に基づき、視野内を単純化し、整理することで、高速な表示を行うことを可能とする。

### 2.4 インタラクティブ性保証のための条件

CG作成の処理時間は物体の視野内判定などを行う

表1 群化の要因

Table 1 The important factors of grouping.

分類	要因	内容	図
A	近接の要因	近くにあるものはまとまりやすい	a)
	類同の要因	似ているものはまとまりやすい	b)
	共通運命の要因	動きなどの変化が同じものはまとまりやすい	c)
B	良い連続の要因	滑らかな連続性を持つものはまとまりやすい	d)
	良い形態の要因	単純, 規則的, 対称的なパターンはまとまりやすい	e)
	閉合の要因	互いに閉じあう関係にあるものはまとまりやすい	f)
C	対象集合の要因	パターンの呈示系列に依存してまとまりやすい	g)
	経験の要因	過去の体験によって見慣れたものはまとまりやすい	なし

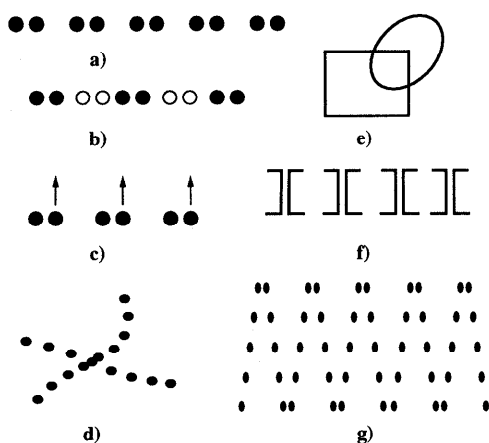


図2 群化の例

Fig. 2 Examples of grouping.

計算時間と描画時間に大別することができる。この処理時間に対し、インタラクティブ操作に十分な描画速度を保証するためには、次の点を考慮する必要がある。

#### [1] 計算時間の減少

計算対象となる物体数が一定以下であること

#### [2] 描画時間の減少

描画ポリゴン数が一定以下であること

形状簡略化は描画ポリゴン数の削減により、[2] の効果を狙ったものであるが、群化手法は物体数も減らすことにより、[1]、[2] の両方の効果を合わせて期待できる。

### 3. 群化に基づく高速表示法

#### 3.1 群化の要因と高速表示

表1に示した群化の要因を仮想空間における高速表示の観点から分析すると、次の3つに分類することができる。

##### [A] 高速表示への効果が大きい群化要因

第1のグループは、独立した要素間の関係に起因するもので、近接、類同、共通運命の3つの要因である。

近接の要因では、物体間の間隔から求まる視角により、2つの物体が群化するかどうかを決定することができる。このため近接の要因は、群化手法の主要因といえる。類同の要因は、仮想空間においては、色の類同と形状の類同との2つに分けて考えることができる。

共通運命の要因は、鳥の群れ、車の列など物体が集団で移動している場合の現象である。これは、近接、類同等の要因で群を形成していた物体のいくつかが動きだした場合には、同じ動きをしているものがまとまる傾向にあるというものである。

##### [B] 効果が限定される要因

第2のグループは、線の連続性に関するものである。良い形態、良い連続、閉合の3つの要因がある。これらは視覚心理的には本来近接の要因よりも優先される強い要因であるが、群化により必ずしもポリゴン数の減少が見込めるものではなく、高速表示への寄与は限定されたものになる。

たとえば、良い連続の要因では、滑らかな曲線に沿った配置に対して群化されるが、ポリゴン数減少の観点からは、街路樹のような同一形状の物体が直線上に配置された場合にのみ有効である。同様に、良い形態の要因は、配置が文字の形に似ていれば、その形をまとまりとしてとらえるが、元形状からポリゴン数が減少する文字の形は限定される。

このように、これらの要因は、直線的な配置などの限定された場合に有効となる要因であると考えられる。

##### [C] 高速表示への効果が小さい要因

過去経験の要因は重要視されがちであるが、実際には他の要因に比べて弱い要因である。さらに、ポリゴン数の減少にはつながりにくい要因である。

対象集合の要因は、見る時々で異なる場合がある。たとえば、図2g)では、目線が上から下へ動いたときと、下から上へ動いたときでは、群化する点が異なる。つまり、過去経験、対象集合の2つの要因は個人差の大きい要因であり、全体への寄与が低いと考えられる。

### 3.2 物体群化法の定式化

3.1 節 [A] の群化要因から、評価関数を定める。その評価関数を2つの物体に対して適用し、得られた評価値  $\Omega$  が閾値  $\Omega_t$  以下ならば群化が行われる。

[A] の3つの群化要因は互いに分離的であるので、これらの組合せは加算で表されることが知られている<sup>8)</sup>。このため評価関数は、近接の要因に基づく群化関数を  $F_p$ 、形の類同の要因に基づく群化関数を  $F_s$ 、色の類同の要因に基づく群化関数を  $F_c$ 、共通運命の要因に基づく群化関数を  $F_f$  としたときに、これらの和として次のように定義する。

$$\Omega = \alpha_p F_p + \alpha_s F_s + \alpha_c F_c + \alpha_f F_f \quad (3)$$

ここに、 $\alpha_p$ ,  $\alpha_s$ ,  $\alpha_c$ ,  $\alpha_f$  は定数。

各要因について以下に記す。

#### [1] 近接に基づく群化関数 $F_p$

主要因となる群化関数  $F_p$  は、2つの物体間の距離  $L_2$  と、視点からの距離  $L_{eye}$  により求まる物体間の視角 (図3) として、次のように表せる。

$$F_p = \frac{L_2}{L_{eye}} \quad (4)$$

#### [2] 類同に基づく群化関数 $F_s$ , $F_c$

物体間の色、形状の相違は、視点からの距離が遠くなるほど目立たなくなるため、 $F_s$ ,  $F_c$  は形状、色の非類似度 ( $M_s$ ,  $M_c$ ) を用いて、

$$\begin{aligned} F_s &= M_s / L_{eye} \\ F_c &= M_c / L_{eye} \end{aligned} \quad (5)$$

と表せる。以下に、形と色各々の非類似度の定式化について述べる。

一般に、形状の非類似度  $M_s$  は、体積  $s_1$ ,  $s_2$  の2つの物体の共通部分の体積を  $s$ 、相違した部分の体積を  $d$  としたときに次のように表せる<sup>10)</sup> (図4(a))。

$$M_s = \frac{d}{s_1 + s_2 - s} = \frac{d}{s + d} \quad (6)$$

この考え方を群化に適用する場合には、体積  $V_1$ ,  $V_2$  の2つの独立した物体からなる  $s_1 = (V_1 + V_2)$ 、ならびにこれらが群化した結果得られる物体  $s_2 = V_{12}$  に対して、非類似度の計算を行う。この際、群化形状が元の2物体を包含するよう作成されることを考慮すると (図4(b))、形状の非類似度は、

$$\begin{aligned} s &= V_1 + V_2 \\ d &= V_{12} - (V_1 + V_2) \text{ より,} \\ M_s &= \frac{V_{12} - (V_1 + V_2)}{V_{12}} \end{aligned} \quad (7)$$

と表せる。これは、形状の違った物体が群化したことにより見た目がどの程度変化するかを評価できるため、3次元仮想空間においては、有効であると考えられる。

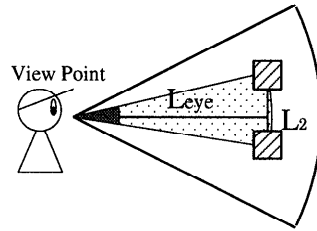
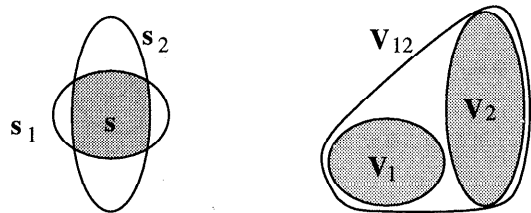


図3 視点と  $L_2$ ,  $L_{eye}$  の関係

Fig. 3 Relation between view point and  $L_2$ ,  $L_{eye}$ .



(a) 2物体の場合 (b) 群化の場合

図4 群化による形状の非類似度の計算法

Fig. 4 Calculation of non-similarity of shape.

一方、色の非類似度  $M_c$  は、2つの物体の色の色空間における距離  $L_{color}$  で表す。

$$M_c = L_{color} \quad (8)$$

ここでは、色の距離として計算が簡便な、RGB色空間でのユークリッド距離を用いる。2つの物体間のR, G, Bの差を各々、 $\Delta R$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta B$  としたときに、

$$M_c = \sqrt{\Delta R^2 + \Delta G^2 + \Delta B^2} \quad (9)$$

と表せる。

#### [3] 共通運命に基づく群化関数 $F_f$

共通運命の要因は、3.1 節 [A] で述べたように、他の要因よりも強く働く場合があるが、仮想空間内での適用では、群化形状を作成した場合の違和感が少ない範囲にとどめる。そのため  $F_f$  は、物体の静止時には働かず、物体どうしが異方向、異速度で動いている場合に  $\Omega$  を大きくする働きをする。そのため、ここでは速度ベクトルによる定式化を行う。2つの物体の速度ベクトルを  $v_1$ ,  $v_2$  としたとき、 $F_f$  は2つの物体の相対速度を角速度で表したものと考えられるので、以下のよう表せる。

$$F_f = \frac{|v_1 - v_2|}{L_{eye}} \quad (10)$$

### 3.3 群化物体作成の必要条件

上記の評価関数により、群化する物体を特定することができる。その結果、群化物体を作成する際には、複数の物体全体を何らかの方法でカバーする形状を作成することが必要である。たとえば、元物体の各頂点

をつないで生成される形状や元形状を包む楕円球、直方体などが考えられる。

しかし、このような群化物体を表示したときに、その形状や色が周囲に対して高い周波数成分を持ち、式(2)の周波数成分の選択的除去の意味が損なわれることがありうる。つまり、群化形状を作成する場合には、次の2点が求められる。

- [a] 描画時間短縮の要請から、群化形状のポリゴン数は、元形状の総ポリゴン数よりも少ないこと。
- [b] 元形状よりも高い周波数成分を含まないこと。

上記の2つの条件のうち、[a]はウォークスルーで利用する際の必要条件であり、[b]は満たすことが望ましい条件である。ここでは、これらの条件より、直方体などの少ないポリゴン数の物体をアルファブレンディングを用いてはかした表示方法をとる。

### 3.4 群化処理の基本方針

ウォークスルーに群化処理を用いた場合には、ポリゴン数、物体数の減少により、処理時間を短くすることができるが、逆に群化のための計算時間が必要となる。計算時間の増加を最小限にとどめ、かつウォークスルー時の処理時間を効果的に短縮させるために、ここでは、次のような方針をとる。

#### [1] 群化されたデータは木構造で表現する

このデータ構造を模式的に図5に示す。この図において、原データはCADやモデリングツールで作られた詳細な形状データを意味し、簡略化データは原データから手動または自動であらかじめ生成されたデータである。群データは本節で述べる群化アルゴリズムを用いて、複数の簡略データから自動的に作成される形状データであり、下位ノードを群化したものを上位ノードで表している。

#### [2] 群化処理は初期設定で行う

初期設定での群化処理として、あらかじめ物体の位置データ、形状データから群化木構造を作成し、ウォークスルー時にはこの木構造をたどって描画データを選択する処理のみを行う。

#### [3] 視点に応じて $\Omega$ の変化分のみを再計算する

群化の評価関数により求まる $\Omega$ は、視点から物体までの距離 $L_{eye}$ に依存するため、視点の位置により異なることになる。ここでは[2]の方針に基づき、 $L_{eye}$ の項を含まない $\Omega_0$ を次のように定義する。

$$\Omega = \Omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_{eye}} \quad (L_0 = \text{一定}) \quad (11)$$

この $\Omega_0$ を用いて群化木構造作成を行い、ウォークスルー時に視点が定まるごとに式(11)から、 $\Omega$ を計算することで、計算時間を短縮する。

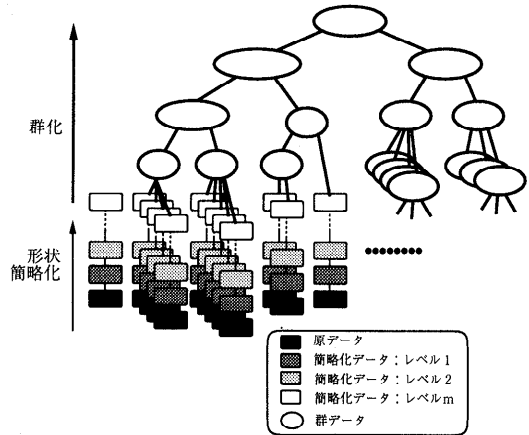


図5 群化利用時のデータ構造

Fig.5 Data structure.

#### procedure: 群化処理

```

リスト  $T := (d_1 d_2 \dots d_n)$  を作成する
for  $\Omega_t := \Omega_t$  の初期値 to  $\Omega_t$  の最大値 do
   $T' := 0$ ;
  repeat リスト  $T$  から  $\Omega_0$  を最小とする  $d_i, d_j$  を選ぶ;
    if  $\Omega_0 < \Omega_t$  then  $d_i, d_j$  を群化
    until  $\Omega_0 \geq \Omega_t$ 
   $\Omega_t := \Omega_t + \Delta\Omega$ 
procedure:  $d_i, d_j$  を群化
  delete( $d_i, T$ );
  delete( $d_j, T$ );
  if ( member( $d_i, T'$ ) ) then cons( $d_j, d_i$ ),  $T$ )
    else if ( member( $d_j, T'$ ) )
      then cons( $d_i, d_j$ ),  $T$ )
      else cons(list( $d_i, d_j$ ),  $T$ );
      cons(list( $d_i, d_j$ ),  $T'$ )

```

delete( $p1, p2$ )	: リスト $p2$ から リスト $p1$ を削除する関数
member( $p1, p2$ )	: $p1$ が $p2$ に含まれる時真となる関数
list( $p1, p2$ )	: $p1, p2$ を要素とする新しいリストを作る関数
cons( $p1, p2$ )	: $p2$ に新しい先頭要素 $p1$ を挿入する関数

図6 群化アルゴリズム

Fig.6 Grouping algorithm.

#### [4] 物体移動時には局所的に木構造を再構築する

仮想空間内のオブジェクトが移動した際には、群化木構造を作り直す必要がある。この際には、移動物体に關する木構造のみを、局所的に再構築を行う。

### 3.5 群化アルゴリズム

群化処理の概要を図6に示す。この図において、リスト $T$ は図5の木構造をリストで表したものであり、その初期値は簡略化レベル $m$ のデータ $d_1, d_2, \dots, d_n$ である。またリスト $T'$ は、 $\Omega_t$ が一定の間に新たに作成された群化データのリストである。

まず $\Omega_t$ を初期値としてリスト $T$ の中から任意の2つ( $d_i, d_j$ )を選び、式(11)により定義される $\Omega_0$ を計算する。この $\Omega_0$ が最小となる $d_i, d_j$ の組を求め、 $\Omega_0 < \Omega_t$ のとき、群化物体を作成し、リスト $T$ を更新する。この処理を $\Omega_t$ を $\Delta\Omega$ ずつ増加させて、最大

$\Omega_t$  を設定する;  
**repeat** 視点, 参照点を決定する;  
 描画リスト  $L_d := ()$ ;  
 NodeChoice( $T$ );  
 描画リスト  $L_d$  に含まれるものを描画する  
**until** 終了を指示する

図7 手続き:ウォークスルー

Fig. 7 Procedure: Walkthrough.

**procedure:NodeChoice( $p$ )**  
**if**  $p$  が視野に含まれる  
**then if**  $p$  が簡略化レベル  $n$  のデータである  
**then**  $cons(p, L_d)$ ;  
     簡略化レベルを決める  
**else if** リスト  $p$  の中に  $\Omega < \Omega_t$  となる要素がある  
**then**  $cons(p, L_d)$   
     **else for**  $p$  の全要素について  
       **do** NodeChoice( $p_i$ )  
**else return**

$p$  : 群化木構造リスト  $T$  に含まれるリスト  
 ここで, リスト  $p$  の各要素を  $p_i$  とする ( $i = 1, 2, \dots$ )  
 $L_d$  : 描画データのリスト

図8 手続き:ノード選択

Fig. 8 Procedure: Node choice.

値になるまで繰り返すことにより, 階層的に群化木構造を作成する.

### 3.6 ウォークスルー時の処理

ウォークスルー時には, フレームごとに視点, 参照点が更新され, その時点での視点に基づき描画データを選択し, 描画する (図7).

群化木構造リスト  $T$  に対して, データ選択を行う手順を図8に示す. まず, 現視点から物体までの距離  $L_{eye}$  を用いて, 式(11)より  $\Omega$  を計算する. この  $\Omega$  を用いて,  $T$  の中から  $\Omega \geq \Omega_t$  を満たす最小の  $\Omega$  を持つ要素を選択する. また, 選択された要素が群化されていない簡略化レベル  $m$  のデータのときには, さらに, 視点からの距離に応じて簡略化レベルを決定する.

## 4. 実験と結果

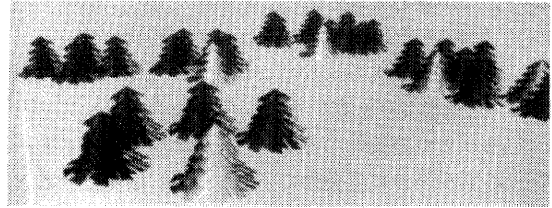
### 4.1 群化パラメータと形状データの量

本手法により SiliconGraphics 社の O2 上で OpenGL を用いて画像を生成した例を以下に示す. 使用したデータのポリゴン数は表2のとおりである. ここでは, 形状簡略化レベルは2段階とし, 簡略化データはあらかじめCADで作成したものをを用いている. 実験において,  $\Omega_t = 0.001 \sim 0.1$  ( $\Delta\Omega = 0.001$ ),  $L_0 = 5000$ .,  $\alpha_p = 0.1$ ,  $\alpha_s = 2000$ .,  $\alpha_c = 2000$ .,  $\alpha_f = 0.1$  として群化木構造を作成した.

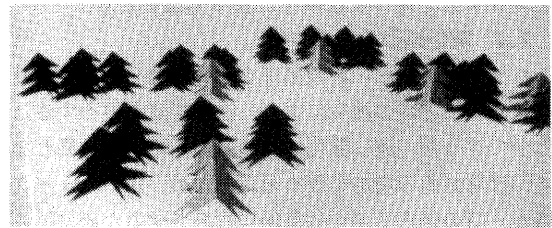
図9は, 32本の樹木データBを用いて  $\Omega_t = 0.011$  として表示を行った例である (原データのみを用いた

表2 データのポリゴン数  
 Table 2 The number of polygons.

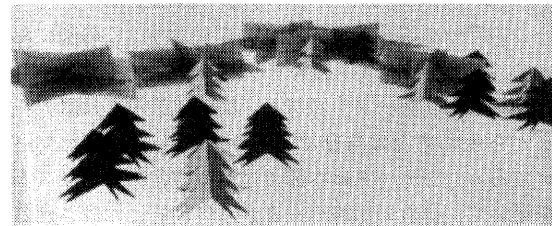
	原データ	簡略データ
樹木データ A (葉)	700	12
樹木データ A (幹)	20	6
樹木データ B	105	12



(a) 原データ



(b) 形状簡略化のみ



(c) 群化+形状簡略化

図9 混色配置時の画像生成例

Fig. 9 Display examples (mixed color).

場合は, 3360 ポリゴン). そのうちの5本の樹木は紅色に変化させているため混色配置となっている.  $\Omega_t$  を変化させた場合のポリゴン数の変化を図10に示す. 紅色の樹木は, 群化が進んだ場合でも, 単独で残っており, 色の異なる物体を配置した場合には, 色の一致度の影響により, 異なる色の間で, 群化が抑制されているのが分かる.

図11は, 同様のデータを用い, すべて緑色の樹木として設定したものである. この場合のポリゴン数の変化を図10に示す. 同一色, 形状のため, この群化は近接の要因によるものである. 混色時に比べ, 群化が進みポリゴン数が減少していることが分かる.

以上の結果から, 群化を用いた場合には,  $\Omega_t < 0.006$

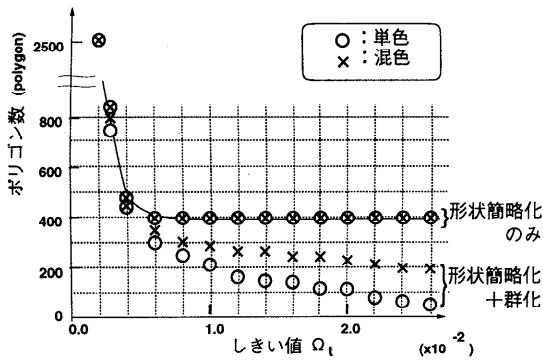
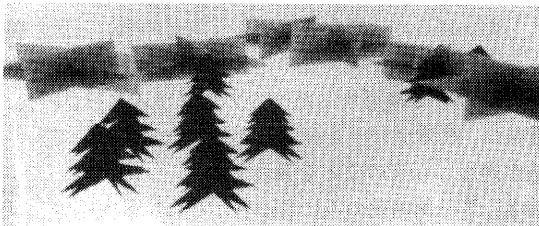
図 10  $\Omega_t$  に応じたポリゴン数の変化Fig. 10 The number of polygons with  $\Omega_t$ .

図 11 単色配置時の画像生成例

Fig. 11 Display example (single color).

のときは、形状簡略化のみと同程度の効果であるが、 $\Omega_t \geq 0.006$  では、ポリゴン数を減少させる効果があることが分かる。つまり、視点からの距離が遠方の場所に大量のデータが配置された場合に、ポリゴン減少の割合が高いことが分かる。

#### 4.2 画質評価実験

前節では、群化を用いることにより、ポリゴン数が減少できることを示した。本節では、ウォークスルーを行った場合に、このような画像データの縮小化が画質劣化へ及ぼす影響について、主観評価実験を行った。

実験に用いた評価画像を図 12 に示す。これは、表 2 の樹木データ A と同 B をそれぞれ視点の近傍と遠方に配置した例である。樹木データ A は互いに接する幹と葉の 2 つの対象からなっているにもかかわらず、形状、色が異なるために群化は起こらず、形状簡略化のみでとどまり、葉どうしだけが群化まで施されている様子が分かる (図 12(c))。

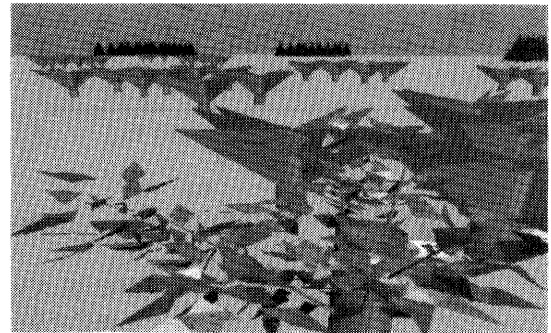
実験は一般の非専門者 36 人を被験者としてビデオ映像を用いて行ったものである。

##### 〔実験 1〕 画質劣化度合の比較

原画像 (図 12(a)) に対する図 12(b) および図 12(c) の劣化について調査した。実験に用いた映像は、原画像および比較する画像を上下に並置し、画面上を水平



(a) 原データ (原画像)



(b) 形状簡略化のみ



(c) 形状簡略化+群化

図 12 広域空間における画像生成例

Fig. 12 Display examples.

方向に往復 (100 pixel/sec) するものである。この映像はウォークスルー映像ではないが、運動視の影響を調査するためのものである。この動画像を 30 インチのモニタに表示し、注目場所の指示なし、近景に注目した場合、遠景に注目した場合の各々でアンケートを行い画質劣化の度合いを調べた。評価値として、表 3 を用いた。評価実験を行った結果得られた評価値の平均値と 95% の信頼区間を図 13 に示す。この結果から、形状簡略化のみを行った場合と、形状簡略化+群化が行われた場合とでは、画質劣化の度合いに有意な差がな

表3 主観評価に用いた評価値(1)  
Table 3 Rating scale (1).

5	比較元の画像に対して、まったく差がない
4	比較元の画像に対して、ほとんど差がない
3	比較元の画像に対して、やや差がある
2	比較元の画像に対して、かなり差がある
1	比較元の画像に対して、非常に差がある

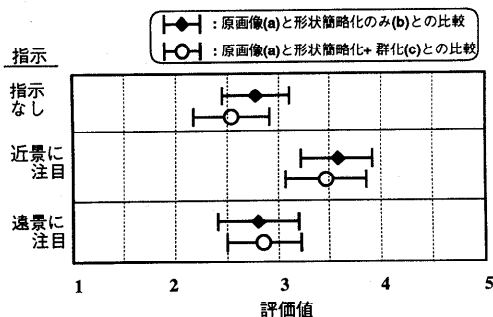


図13 アンケート結果

Fig. 13 Results of questionnaire.

いことが分かる。特に、群化により形状が変化している遠景に注目した場合でも、動画としての画質劣化には差がないことが示された。

#### 〔実験2〕 ウォークスルー映像の比較

次に、実際にウォークスルーした映像を用いて [i] 形状簡略化のみ、[ii] 形状簡略化+群化、の2つの画質の相違を評価実験により確認した。ここではコンピュータの性能上の理由により原画像との比較は行っていない。実験に用いた映像は、図12と同様の仮想空間において、視点を水平移動させながら、インタラクティブにウォークスルーを行った様子をビデオで撮影したものである。[i]と[ii]を比べて差を感じるか、という質問(評価値として表3を使用)に対しては、平均3.9点(95%の信頼区間:3.5-4.3)という結果を得た。また、[i],[ii]のどちらの映像が自然かという質問(評価値として表4を使用)に対しては、2.9点(95%の信頼区間:2.7-3.1)という結果が得られた。つまり、[i]と[ii]ではほとんど差がないといえる。したがって、ウォークスルーを行った場合でも実験1と同様に群化による画質劣化が被験者にはほとんど認識されていないと考えられる。

実験1,2の結果から、群化を用いて表示ポリゴン数を減少させた場合でも、画質はほとんど劣化しないという結論が得られ、群化の有効性が確認できた。

## 5. おわりに

本論文では、まず視覚心理に基づく表示原理を明ら

表4 主観評価に用いた評価値(2)  
Table 4 Rating scale (2).

5	[ii] が自然である
4	[ii] がやや自然である
3	どちらともいえない
2	[i] がやや自然である
1	[i] が自然である

かにした。すなわち、形のボケ、色褪せなどの視覚現象は、明るさ、色相のスペクトルに対して、空間周波数の選択的除去を行うことで統一的に説明することができる。この原理に基づき、インタラクティブ性を保証するような表示を行うために、まず、視角を用いた定式化について述べ、次に、これを各物体形状にだけでなく、情景全体に適用するために、群化の概念を導入した。さらに、群化の概念を仮想空間高速表示の観点から分類し、評価関数の定式化を図り、ウォークスルーに対して適用するためのアルゴリズムを述べた。最後に、樹木データを配置した仮想空間において本手法を適用し以下のことを確認した。

- (1) 形状簡略化のみによる表示法に比べ表示ポリゴンの削減が行えること。
- (2) 形状簡略化のみによる表示法と比較して画質劣化の度合に有意な差がみられないこと。
- (3) 色、形状が異なるデータに対しては、類同の要因を用いて群化を行うことにより、近接の要因のみのときと比較して、群化が抑制され見た目が損なわれないこと。

また、ウォークスルーを行う場合に、描画時間に制限を設けて速度を一定に保つ方法がある。このような場合、形状簡略化のみを用いた処理では、対象によっては遠方の物体が省略されて表示されることがある。一方、群化は少ないポリゴン数で遠方まで表示できるので、視野内に大量の物体があった場合にも全体的な景観を損なわずに高速表示が可能な手法であるといえる。

実験結果からも明かなように、視点から離れた場所で有効性が高まるために、本手法は広域に大量のデータが配置された空間において有効である。適用例としては、建物が密集する都市空間や、樹木の密生した森林の中、大量のICが高密度実装された基板などが考えられる。特に群化の特性から、配置にある程度以上の密度がある場合に効果が期待される。逆に、物体がまばらに配置された空間、互いに類似度の低い物体で構成された空間では、効果が期待できない。

今後の課題として、以下の2つがあげられる。

第1に、群化の決定をどう行うかという問題がある。



本来、群化の決定は情景全体に対し大局的に行うことが考えられる。しかしこの方法では、群化する物体が視点ごとに異なるため、処理時間の点からウォークスルーに適さない。そこで、本論文では局所的な群化を階層的に行う方法を用いている。さらに、このことにより生じる形状の非類似度の実際からのずれを、群化における非類似度を定義することで吸収している。この視点を群化にどうなじませるかという問題は今後も検討を続けていきたい。

第2に、群化形状の作成、表示法の問題である。今回は、画質劣化を抑えるため、アルファブレンディングを用いて背景になじませる方法を用いた。さらに、テクスチャを用いたビルボード処理などの手法を用いることで、画質劣化を抑制できることが期待できる。群化物体の形状と背景との色の対比によって画質が大きく左右されるため、群化形状作成方法とその表示方法の改良が今後の課題である。

謝辞 本研究を考察するきっかけを与えていただいた(株)東芝の岡崎彰夫氏、ならびに評価実験にご協力いただいた東京家政学院筑波女子大学の鈴木恵美子助教授に深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 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, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J76-DII, No.8, pp.1712-1721 (1993).
- 2) Funkhouser, T., et al.: Adaptive Display Algorithm for Interactive Frame Rates During Visualization of Complex Environments, *Proc. SIGGRAPH '93*, pp. 247-254 (1993).
- 3) 玉田隆史, 中村泰明: 多次元データ構造に基づく3次元仮想都市空間の管理と高速描画, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J78-DII, No.8, pp.1205-1213 (1995).
- 4) 新藤義昭, 松田郁夫: 形状簡略化による3次元形状モデルの描画速度制御の一技法, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.10, pp.2452-2463 (1995).
- 5) 田崎京二ほか: 視覚情報処理, 朝倉書店 (1979).
- 6) Spencer, G. and Greenberg, D.: Physically-based Glare Effects for Digital Images, *Proc. SIGGRAPH '95*, pp.323-334 (1995).
- 7) Hagen, M.A.: How to Make a Visually Realistic 3D Display, *Computer Graphics*, Vol.25,

No.2, pp.76-81 (1991).

- 8) Spare, K., et al.: *Visual Information Processing*, W.H.Freeman and Company (1982).
- 9) Watt, R.: *Visual Processing: Computational, Psychophysical and Cognitive Research*, Lawrence Erlbaum Associates (1988).
- 10) Leeuwenberg, E.: A Perceptual Coding Language for Visual and Auditory Patterns, *American J. of Psychology*, Vol.84, No.3 (1971).
- 11) 加藤伸子, 西原清一ほか: 視覚心理に基づくウォークスルー高速表示法, 情報処理学会研究報告, Vol.95-CG, No.78, pp.47-54(1995).

(平成 8 年 5 月 22 日 受付)

(平成 10 年 1 月 16 日 採録)



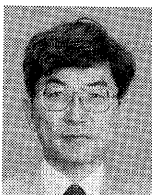
加藤 伸子 (正会員)

1990 年筑波大学物理学研究科修士課程修了。同年 (株) 東芝研究開発センター入社。1995 年より、筑波技術短期大学電子情報学科助手。グラフィックス, VR, HI の研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会等各会員。



狩野 均 (正会員)

1980 年筑波大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、日立電線 (株) 入社。1993 年より筑波大学電子情報工学系。現在、同助教授。制約に基づく問題解決、遺伝的アルゴリズムの研究に従事。工学博士。1992 年電気学会論文賞受賞。電気学会、計測自動制御学会等各会員。



西原 清一 (正会員)

1968 年京都大学工学部数理工学科卒業。同年、同大学大型計算機センター助手。1975 年より筑波大学電子・情報工学系。現在、同教授。工学博士。グラフィックスと CAD, 組合せ探索アルゴリズム, 知識処理, 制約充足問題, GA の研究に従事。1975 年情報処理学会論文賞受賞。著書に「データ構造」(オーム社) など。電子情報通信学会, 人工知能学会, ACM, IEEE 各会員。