

## 視覚心理に基づくウォークスルーのための高速表示法

加藤 伸子

筑波技術短期大学

狩野 均 西原 清一

筑波大学

インタラクティブCGの様々な分野での広がりと共に、マシン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操作に十分な描画速度を保證する描画処理方法が問題となってきた。本報告では、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、インタラクティブを保證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。

[キーワード] 仮想環境、インタラクティブ、視知覚特性

### A Realtime Display Method for Walkthrough Based on Visual Perception

Nobuko KATO

Tsukuba College of Technology

Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Hitoshi KANO, Seiichi NISHIHARA

Univ. of Tsukuba

Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

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技術の普及に伴い、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。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。

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如何に作成できるか、という興味深い問題であり、視覚心理と切り離す事のできない問題である。

そこで、我々の基本的な課題は、視知覚特性に合ったCGの処理過程を定義するための強力で一般に成立する表示原理を同定することにある。その上で、実際にリアルタイム性を保持しながらこの処理を行うアルゴリズムを決定することが研究の主題である。このため、本報告では、まず基本的な表示原理を構成する視知覚特性を明らかにし、その後、実際の処理を行うためのアルゴリズムについて述べる。

トレードオフの問題を解決するためのこれまでの研究としては、個々の物体に階層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替える事で、描画ポリゴン数を減らすものがある<sup>[Sequin93][加藤93][玉田95][新藤95]</sup>。

しかし、物体数の非常に多い仮想空間では、各物体全てが簡略化された状態で表示されても、描画速度が保てない、という問題が生じる。また、これまでの形状簡略化法では、明るさや色のコントラストについて考慮がなされていない。

一方、視知覚に関する研究では、視野中に複数の対象が存在する時、知覚的に体制化され一定のまとまりを形成する事が知られている<sup>[田崎]</sup>。ここでは、この群化と呼ばれる現象に基づき、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。つまり本手法は、個々の物体形状を簡略化する

だけでなく、情景全体を考慮したものになっている。

## 2 視覚心理に基づく表示方法

我々は、ある景色を眺めた時に、遠方の物体がぼけてみえること、色褪せて見えること、動く物体がぶれて見えること、などを体験する事ができる。CGを用いてこのような人間の見方に近い表示を行う事は、個々の課題として別々に取り組まれてきた<sup>[Spencer95][Hagen91]</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事は、意義のある事である。このため、まず我々が感じる見方を生じる表示原理について述べる。

### 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、本能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事ができる。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みなす事ができる。

このモデルに基づき、画像の高周波成分を選択的に除去すると、全体としてピンボケの画像が得られる。つまり物体のディテールに関する情報が失われおり、全体の形態は保存された事になる。

同一の画像に対して、精度を種々に変えた $\nabla^2 G$ フィルターを用いることで、大まかな情報から細かい情報までを段階的に得ることができる。

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選択的に阻害される事が報告されている。この事から、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 $d\phi/dt$ )、に依存することがわかる。

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

れた色相のパターンに関しても同様に考えることが可能である。つまり、形状や色のボケ、ブレなどの現象は、周波数の選択的除去を行う関数  $f$ 、

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

を用いて、統一的に扱うことができる。

このようなフィルター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。このため次節では、視覚原理に基づく表示アルゴリズムについて議論する。

## 2.2 視角による定式化

フィルターによる周波数成分の選択的除去の考え方を実装する際には、視角  $\Omega$  を用いる(図1参照)。ある一定以下の視角  $\Omega$  を人間は感

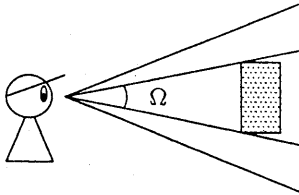


図1 視角

知できないことから、 $\Omega \leq \Omega_{max}$  となる長さを選択的に簡略化する事で、周波数除去と同様の処理を行う事ができる。

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

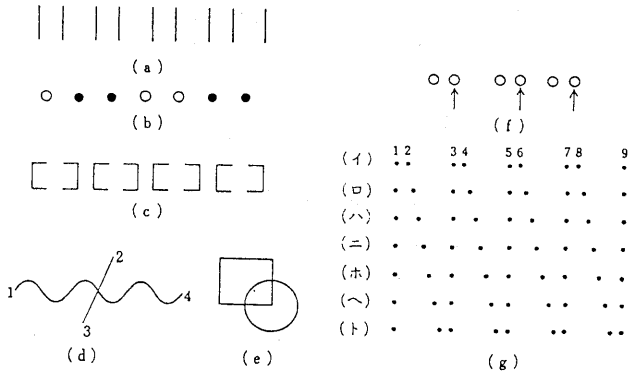
この考え方を、個々の物体に用いたのが形状簡略化の手法である。ある長さ、面積以下のポリゴンを簡略化することで、定量的な簡略化形状の作成が可能となる<sup>[加藤 93]</sup>。

これまでの形状簡略化を用いる手法では、複数の物体の関連や、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を保証する表示

においては、短時間で情景を把握する事が重要である。そこで情景全体に対して(2)式を拡張し、周波数の選択的除去を実現する手法が必要と考えられる。

## 2.3 群化概念の導入

視知覚に関する研究では、視野中に複数の対象が存在する時、知覚的に体制化され一定のまとまりを形成する事が知られている<sup>[田崎]</sup>。この現象は群化と呼ばれ、図2に示すような例が知られている<sup>[Spare]</sup>。群化は元々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実現する事が確認されている<sup>[Watt]</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。群化の要因としては、ゲシュタルトの法則が知られている(表1)。



(Wertheimer, 1923)

図2 群化の例

## 2.4 インタラクティブ保証のための条件

インタラクティブを保証するために次の点を考慮する必要がある。CG作成の処理時間

表 1 群化の要因

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

は各物体の視野内判定などを行う計算時間と描画時間に大別する事ができる。つまり、

[ 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

[ 描画処理時間の減少 ]

描画ポリゴン数が一定以下であること

が必要である。

形状簡略化は、描画ポリゴン数の減少を狙ったものであるが、群化手法は、物体数を減らす事により、計算時間の減少の効果も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

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

[A] 表示のための主要因となる群化要因

第1は、高速表示に常に利用可能なもので、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事ができる。このため近接の要因は、群化手法の主要因と言える。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つにわけて考える事ができる。

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。近接、類同など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。

[B] 用途に依存した要因

第2は、応用によっては有効な要因である。よい連続の要因は、曲線状に配列されたものにおいても、当てはまる現象であるが、ポリゴン数減少の観点からは、直線配列された場合に有効である。具体的な例としては、街路樹など同物体が直線上に配置された場合、つまり人工的な配置において有効である。また、閉合、よい形態の要因も、データによっては、群化によりポリゴン数が削減される場合があり得るが、一般的には成立ちにくい要素である。

[C] 高速表示への寄与の低い要因

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。更に、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。例えば、図2では、目線が上から下へ動いた時と、下から上へ動いた時では、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、

高速表示への寄与が低いと考えられる。

### 3.2 物体群化法の定式化

分類 A による群化の要因から、評価関数を定め、その評価値に基づき群化するかどうかを決定する。

近接の要因に基づく評価関数を  $F_r$ 、形の類同の要因に基づく評価関数を  $F_v$ 、色の類同の要因に基づく評価関数を  $F_c$ 、共通運命の要因に基づく評価関数を  $F_m$  とした時に、群化決定のための評価関数は、次のように定義する。

$$\Omega = F_r \cdot F_v \cdot F_c \cdot F_m \quad (3)$$

2つの物体に対して評価関数を適用し、その評価値  $\Omega$  が閾値  $\Omega_{max}$  以下ならば群化が行われる。

各要因について以下に記す。(  $\alpha, \beta$  は全て定数とする。)

#### [1] 近接の要因に基づく評価関数 $F_r$

主要因となる近接の要因に基づく評価関数  $F_r$  は、2つの物体間の距離  $L_{two}$  と、視点からの距離  $L_{eye}$  により、物体間の視角  $\Omega_{two} = L_{two}/L_{eye}$  を見積もった値である (図3)。つま

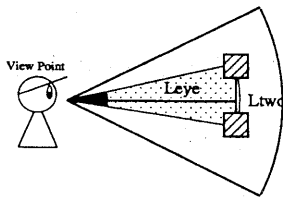


図3 視点と  $L_{two}$ ,  $L_{eye}$  の関係

り、他の要因が一定の場合には、 $F_r \propto \Omega_{two}$  である。

$$F_r = \alpha_r \cdot \Omega_{two} = \alpha_r \cdot \frac{L_{eye}}{L_{two}} \quad (4)$$

#### [2] 類同の要因に基づく評価関数 $F_v, F_c$

類同の要因による評価関数は、 $F_r$  に乗算され、 $\Omega$  を強める、又は、弱めるように働く。

例えば、形や色が一致する場合には、類同の要因による評価関数は、 $\Omega$  を  $F_r$  で求まる視角よりも小さくするように働き、群化を促進する。逆に、形や色が全く異なる場合には、物体同士の間隔が閾値以下でも群化を生じないように、視角を広げるように働く。

この評価関数は、形状と色で別々に計算される。形状の類似度を正確に見積もるのは、処理時間が必要となる。ここでは形、方向が揃った場合には、群化物体の体積が元の2つの物体の体積の和と等しくなる事に注目し、群化前後の体積に基づき評価関数を作成する。また、色の類同による評価関数は、2つの物体の色空間における距離を用いる。

以上のことから、 $F_v, F_c$  は次のように表せる。

$$F_v = \alpha_v \cdot M_v + \beta_v \quad (5)$$

$$F_c = \alpha_c \cdot M_c + \beta_c \quad (6)$$

ただし、  
 $M_v$  : 体積の一致度 (0.0~1.0)  
 $M_c$  : 色の一致度 (0.0~1.0)

#### [3] 共通運命の要因に基づく評価関数 $F_m$

共通運命の要因による評価関数は物体の静止時には働かず、動いている場合には、類同の要因と同じように、 $\Omega$  を弱める又は強める働きをする。知覚実験からは、必ずしも同じ向き、速さで移動しなくとも、群化を起こすことが知られているが、別々の方向に動くものに群化形状を作成する事は、形状を大きく変えることになり、好ましくない。このため、速度、方向の一致するものを選択する。

$F_m$  は以下のように表せる。

$$F_m = \begin{cases} 1.0 & (\text{物体静止時}) \\ \alpha_m \cdot M_m + \beta_m & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (7)$$

ただし、

$M_m$  : 速度、進行方向の一致度 (0.0~1.0)

### 3.3 群化アルゴリズム

実際に群化を実現するためには、まず、評価値に基づき群化ノードを作成し、図 4 に示すような木構造のデータを構築する。ウォークスルー実行時には、適切なノードを選択し表示を行う。このアルゴリズムを以下に示す。

#### [Step1] 群化データの作成

- (1-1) オリジナル形状データ、位置データを読み込む
- (1-2) 簡略データを作成又は読み込み、基本ノードを作成する
- (1-3)  $\Omega_{max}$  を  $\Delta\Omega$  増加させる
- (1-4) 2つのノード間の評価値を (3) 式で計算し、初期  $\Omega$  とする
- (1-5)  $\Omega \leq \Omega_{max}$  ならば新しいノードを追加する

Step1-3 から 1-5 を繰り返す

#### [Step2] 視点、参照点を決定

#### [Step3] ノードの選択

- (3-1) 視点からノードまでの距離と初期  $\Omega$  から現時点の  $\Omega$  を求める
  - (3-2)  $\Omega \geq \Omega_{max}$  を満たす最小の  $\Omega$  を持つノードを選択する
  - (3-3) 選択されたノードを描画する
- Step2 から Step3 までを繰り返す。

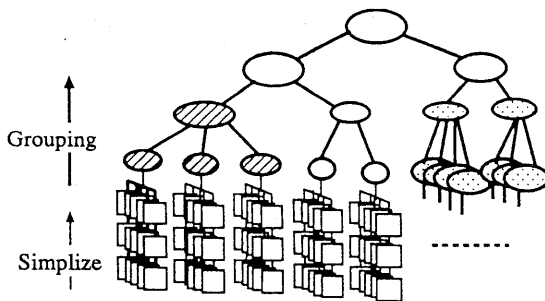
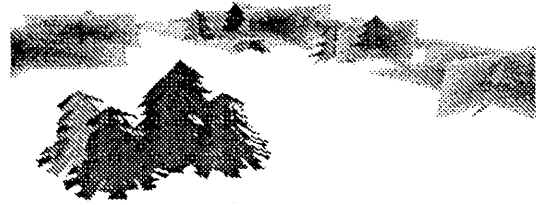


図 4 群化利用時のデータ構造



a) 群化+形状簡略化



b) 形状簡略化のみ



c) 原データ

図 5 混色配置時の画像生成例

## 4 画像生成例

本手法により SiliconGraphics 社の Indy 上で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次の通りである。簡単のため、形状簡略化レベルは 2 段階とした。

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

図 5 は、36 本の樹木データ A を用いて表示

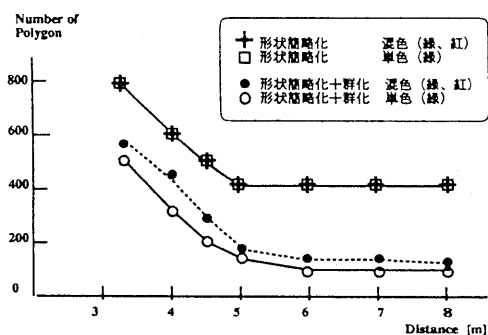


図 6 視点からの距離に応じたポリゴン数の変化

を行った例である(原データのみを用いた場合は、3769 ポリゴン)。その内の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。視点から樹木群までの距離に応じたポリゴン数の変化を図6に示す。紅色の樹木は、群化が進んだ場合でも、単独に残っており、色の異なる物体を配置した場合には、色の類似度の影響により、異なる色の間で、群化が抑制されているのがわかる。

図7は、同様のデータを用い、全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6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事がわかる。

以上の結果から、群化を用いた場合には、視

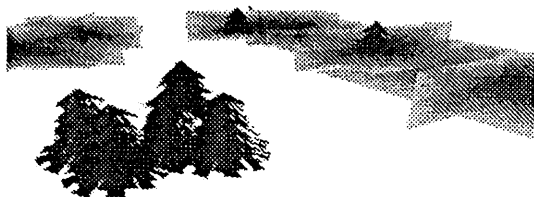


図 7 単色配置時の画像生成例

点からの距離が遠方になる程ポリゴン数が減少するため、広域に大量のデータが配置された場合に、効果が高い事がわかる。

図8は、樹木データA、Bを用いて作成した例である。樹木データBの幹データは葉データと同一座標ではあるが、形状、色が異なるために、簡略化形状のまま残り、葉データのみが群化されている様子がわかる。

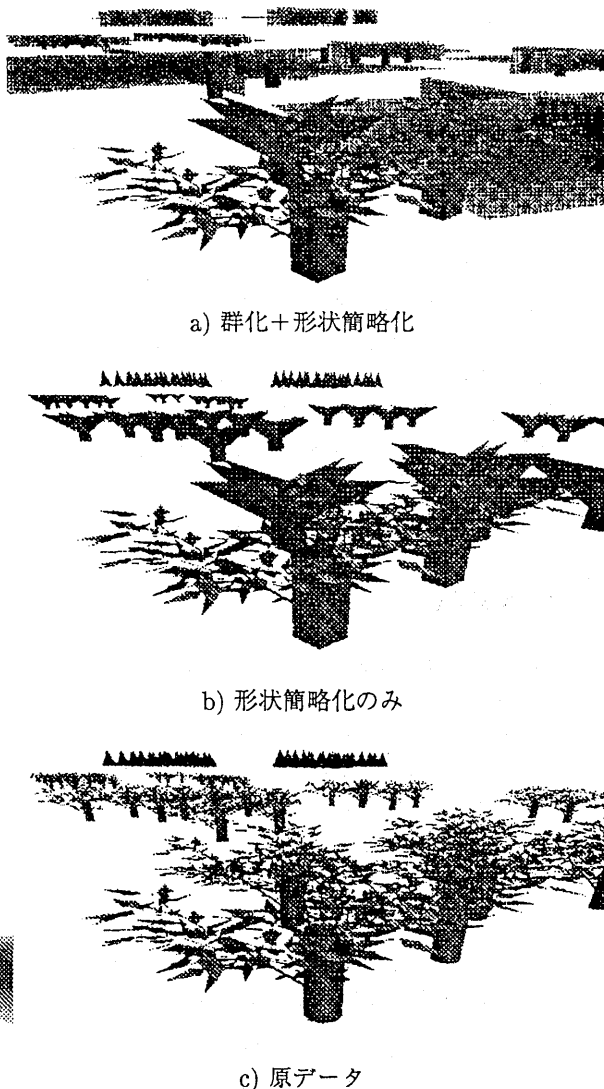


図 8 形状の異なる物体配置時の画像生成例

## 5 おわりに

本報告では、まず視覚心理に基づく表示原理を明らかにした。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、情景全体に全体に適用するために、群化の概念を導入した。

群化概念の導入により、視野内に大量の物体があった場合にも高速表示が可能な方法を提案した。

また樹木データを用いて幾つかの画像を生成し、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を確認した。更に、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事により、近接の要因のみの時と比較して、群化が抑制され、見た目が損なわれない事を確認した。今後は、広域に大量のデータが配置された場合の群化の効果を調べる実験を行う方針である。

## 参考文献

[Sequin93] Funkhouser T. and Sequin C.: "Adaptive Display Algorithm for Interactive Frame Rates During Visualization of Complex Environments", Computer Graphics Proceedings, pp.247-254(1993).

[加藤 93] 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).

[玉田 95] 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).

[新藤 95] 新藤義昭、松田郁夫、他"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).

[Spencer95] Spencer,G., Greenberg,D.P: "Physically-based Glare Effects for Digital Images", Computer Graphics Proceedings, pp325-334(1995).

[Hagen91] Margaret A.Hagen: "How to Make a Visually Realistic 3D Display", Computer Graphics,Vol.25、No.2、pp76-81(1991).

[Watt] R.J.Watt: "Visual Processing:Computational,Psychophysical and Cognitive Research", Lawrence Erlbaum Associates,(1988).

[Spare] K.T.Spare,et.al:"Visual Information Processing", W.H.Freeman and Company, (1982).

[田崎] 田崎京二、他: "視覚情報処理—生理学、心理学、生体工学—", 朝倉書店,(1979).