

3次元 CG のための配色エディタ†

宇佐美 芳明^{††} 武内 良三^{††} 谷中 雅雄^{††}

本論文では、3次元コンピュータ・グラフィックスのための配色エディタのプロトタイプについて述べている。このエディタの使用により、3次元モデルの質感と色彩の変更ができる。さらに、このエディタは従来にない配色ガイダンス機能を持っているので、調和した色彩を容易に選択できる。このガイダンスは美術における色彩調和理論から導かれたものである。ガイダンス機能を評価し、このエディタを使用することで配色の操作時間を短縮できる見通しが得られた。

1. はじめに

現在の3次元CG(コンピュータ・グラフィックス)システムでは、例えばプレゼンテーションに利用できるように高度な映像を、一般のユーザが制作することは非常に困難である。その最大の理由は、映像の制作には使用機器の技術的知識だけでは不十分で、美術的専門知識も必要なためである。したがって、現状ではCGを熟知したデザイナーやアーティストの手助けが不可欠となっている。この美術的知識は配色、照明、構図、動作などの技法に分類されるが、本報告では特に配色について取り上げた。

以下では、筆者らが試作した配色エディタについて述べる。このエディタのユーザは色彩についての専門知識を持たない一般の人を想定している。色彩の専門家であれば、RGBやCMYなどの色彩パラメータだけから実際の配色を想起でき、試行錯誤することなく配色を決定できる。しかし一般のユーザには、色彩パラメータだけで配色の良否を判断することはできない。そこで、配色エディタでは配色に関する専門知識を格納し、ユーザに適切な配色を例示して、ガイダンスを与える機能を持たせた。本研究の目的は、3次元で定義された物体モデルに対して、計算機が調和する色彩をユーザに例示して、対話形式で配色を決定する方法を開発することである。

2. 従来技術と技術課題

2.1 従来のCGシステム

図1に示すように、通常のCGシステムはモデリング、アニメーション、レンダリングの3つのプログラムから構成されている。ここでモデリングは形状表

現のための、アニメーションは動作表現のためのモデル化処理であり、レンダリングは最終的な映像出力のためのモデル可視化処理である。そしてレンダリングの内部については、さらに投影変換、隠面処理、シェーディング処理などに分類できる。ここで、特に高度な画像を生成する場合には、これらのレンダリング処理は非常に多くの処理時間を必要とする。したがって、すべての作業をユーザとの対話形式で処理することは困難で、従来はバッチ形式が普通であった。ゆえに、この操作性の悪さを改善するために、部分的な処理について、各種の対話入力ツールが開発されている。

例えば構図決定用のツールでは、モデルをワイヤフレームで高速に表示し、構図変更がほぼリアルタイムでできる。従来はレンダリング用の入力ツールとして、この構図決定用のツールしか存在しなかったが、最近では質感や照明決定用のツールも開発・市販されている。例えば質感決定用ツールとしては、物体モデルの材質感や色彩および模様などを対話形式で決定できるものもある。このような質感決定用ツールでは、質感パラメータを表すバーをマウスでピックして、色や材質を選択すると、画面にその結果が表示される。ただし、この結果は実際の形状モデルに反映して表示されるのではなく、テスト的に球状の物体でシェーディング処理して表示されている例が多い。この球状にシェーディングされた結果を見て、ユーザは入力値を修正し、質感を決定する。

さらに対話形式で質感決定と照明決定の両者の機能を持つレンダリングシステムとして、Perlin¹⁾のPSE(Pixel Stream Editor)がある。PSEでは、レンダリング処理の中で多くの処理時間を要する投影変換や隠面処理と、処理時間を要さないシェーディング処理を、分離できるようにデータ構造を定めている。このデータ構造の内容は第4章で述べるが、要するに

† Coloring Editor for 3D Computer Graphics by YOSHIKI USAMI, RYOZO TAKEUCHI and MASAO YANAKA (Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.).

†† (株)日立製作所日立研究所

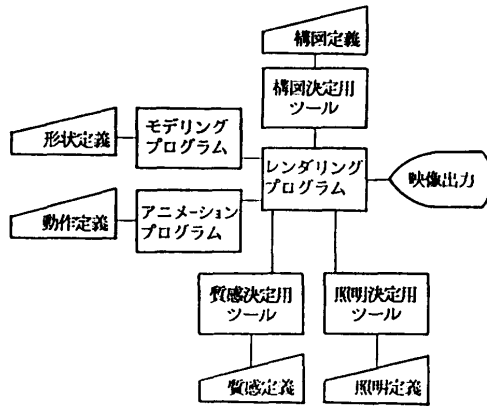


図1 一般的なCGシステムの構成

Fig. 1 Configuration of computer graphics system.

シェーディング処理だけをローカルに高速処理できる方式である。またPSEの方式によれば、テスト的に球にシェーディングするのではなく、実際のモデルをシェーディングして表示することもできる。

またエキスパートシステムの分野では、Meier²⁾がユーザ・インタフェースの設計のための配色のエキスパートシステムを発表している。しかし、このシステムでは問題の対象を、テキストやアイコンおよびウィンドウなどの2次元図形の色を決定することに限定しており、現状ではこれをそのまま、ここで取り上げているような3次元のCGで利用することは困難と思われる。

以上に述べたように、現状のCGレンダリング技術では、制作されるCG映像の品質がすべてユーザの技量に委ねられている点で問題と考える。

2.2 配色についての技術課題

現状のレンダリング用入力ツールでの対話処理は可能ではあるが、使い勝手では不十分な点が多い。本報告の配色エディタは、基本的には質感決定用ツールに属するものであり、色彩決定作業の容易化を狙ったものである。色彩決定の問題点は以下の2点に要約される。

a) 配色についての配慮がない

色彩は配色の仕方によって効果が大きく異なる。例えば我々がネクタイの色を選択する際にも、それがスーツの色に調和するかどうか、大いに気にしているはずである。もし、自分の配色センスに自信がなければ、誰かのアドバイスを受けるであろう。したがって、CGでも配色に自信のないユーザに対しては、何らかのアドバイスが受けられるようにする必要がある。しかし、現在のCGで色彩決定する場合に、シ

ステムは配色を配慮していないので、ほとんど無限に近い1677万色からユーザ自身が色彩を選択しなければならない。逆に無限に色彩が表現できるために、かえって必要な色彩が選択できないことが問題とも言える。

b) 色彩表現のパラメータが人間の感性に合っていない

例えばRGB成分で色彩を指定する場合には、加法混色の法則をよく理解していないと、所望の色彩を指定することは難しい。一般のユーザは、例えば肌色を表現するためのRGBの比を決めるために、多数回の試行が必要である。

上記のような問題が生じている理由は、色彩は物理量としてではなく、人間の感覚によって知覚される量のためである。一般に色の違いは波長の違いであり、波長が同じならば色は同じである。しかしながら人間の知覚特性により、色が同じに見えても波長が同じとはならない³⁾。したがって色彩を扱うためには物理量としてではなく、人間のメンタルな作用を考慮した知覚量として扱う必要がある。ゆえに、配色や色彩表現パラメータの問題は、計算機にとっては非常に扱いにくい問題である。本論文では、特にa)の配色の問題の解決を試みた。

3. 調和配色方法

前章で述べたように、色彩は人間の心理と深い関係があるため、心理学の一分野として古くから研究が進められてきた。色彩を調和配色する方法についても数多くの提案がされており⁴⁾、色彩調和理論と呼ばれている。そこで筆者らは、この色彩調和理論をアルゴリズム化することによって、前述の配色への無配慮の問題を解決しようと考えた。この過程で幾つかの色彩調和理論の中から、最初の試みとしてオストワルドの方法⁵⁾をアルゴリズム化することにした。この方法を採用した理由は、現在でも広くデザイン分野で利用されている方法であること、またカラーモデル上での幾何学的関係から調和色彩を算出できるためアルゴリズム化が容易と考えたためである。以下ではオストワルドの色彩調和理論について内容を簡単に紹介する。

まず図2がオストワルドのカラーモデルであり、すべての色彩はこの複円錐体の内部の点として表現される。円錐体の2つの頂点を結ぶ軸上に無彩色が並び、円錐の外周に純色が置かれている。ここで、円錐体の軸方向は色の明度を、半径方向は彩度を、そして円周

方向は色相を表す。特に、このカラーモデルでは明度の尺度付けにおいて、心理学的実験により、物理的ではなく知覚的に等歩度（等間隔）となるように工夫されている点の特徴である。次に図3はオストワルドの色彩調和理論を示すものであり、図2のカラーモデルをある色相で切ったときの断面図に相当する。

ここで、オストワルドの方法では、ある点Pを基準色として選ぶと、4つの線上に存在する色が基準色と調和する色彩として限定できることを意味している。1つはP点を通して直線BFに平行な直線であり、混色のための白色量が等しいことから等白系列と呼ばれる。同様に直線WFに平行なものが、等黒系列、直線WBに平行なものが等純系列、同一半径上にあるものが、等値色環と呼ばれる。このようにして、調和する色彩を限定することができるが、これら色彩調和理論は経験則に基づくものであり、物理的裏付けはない。しかし前述のように、色彩は人間の知覚量であ

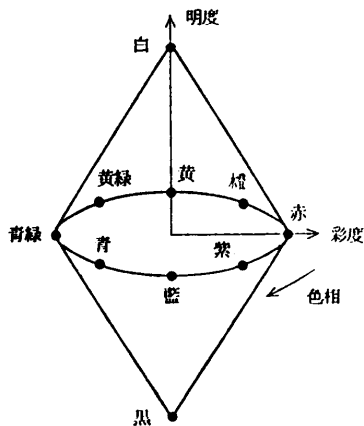


図2 オストワルドのカラーモデル
Fig. 2 Ostwald's color model.

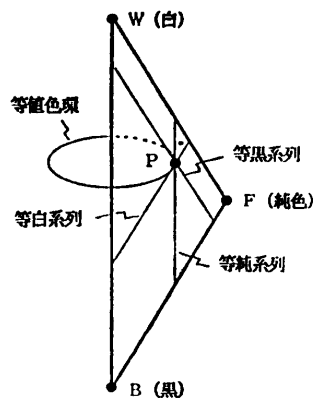


図3 オストワルドの色彩調和理論
Fig. 3 Ostwald's color harmonic theory.

るため、配色エディタでは、この方法を使用してユーザに配色のガイダンスを行うことにした。

4. 配色エディタ

図4に本試作による配色エディタの入出力構成を示す。まず形状モデルを入力して、レンダリングプログラムにより、投影変換と隠面処理のみを行い、法線データとIDデータを出力する。ここで法線データとは、図5に示すようにスクリーン上の画素単位に物体モデルの表面法線ベクトル成分を記憶したものであり、IDデータとは同じく画素単位に物体モデルの識別子を記録したものである。ここで表面法線ベクトル成分とは、その画素に投影されている物体モデルの部分表面の法線方向成分であり、NX, NY, NZの3成分である。またIDデータも同様に、その画素に投影されている物体モデルの識別子であり、これはIDだけの1成分である。通常のCADのような場合では、モデルを単純な三角形板のような幾何図形に置き換え

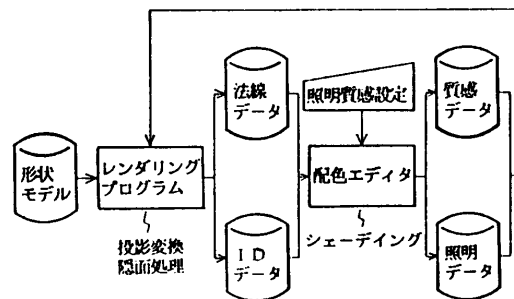


図4 配色エディタの入出力構成
Fig. 4 Configuration of coloring editor.

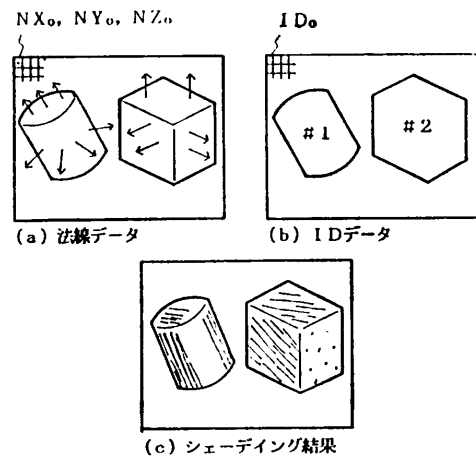


図5 配色エディタの入出力データ
Fig. 5 Input data and output image.

て、セグメントバッファと呼ぶメモリで図形単位に管理している。しかし、CG では CAD よりも多様なモデルを扱う必要があり、すべてを単純な幾何図形に変換することはできない。したがって、このようにスクリーン上の画素単位にモデルの情報を格納しておくデータ構造が必要となる。これらのデータ構造は第2章で述べた PSE の方式に準じたものであり、これにより配色エディタではシェーディング計算を独立させて、質感と照明の変更をローカルに処理できる。また処理時間のかかる3次元の投影変換と隠面処理は、すでに終了しているため、質感や照明の変更処理を2次的に高速に実行でき、対話処理も可能である。シェーディング計算にはフォンシェーディングを使用しており、次式により計算する。

$$I' = Ka * I + (n \cdot q)^a * Kd * I + (n \cdot r)^b * Ks * I \quad (1)$$

ここで、 I' は反射光強度、 I は入射光強度、 Ka は周囲光係数、 Kd は拡散反射係数、 Ks は直接反射係数、 n は表面法線方向ベクトル、 q は光源方向ベクトル、 r はハイライト方向ベクトル、 a は拡散反射指数、 b は直接反射指数である。

質感を変更する場合には、 Ka 、 Kd 、 Ks 、 a 、 b の値を変更すればよく、照明の場合には q 、 I を変更する。 n のデータは法線データから取り出せるので、配色エディタでは(1)式の計算を、全画素について2次的に繰り返すだけでシェーディング結果が得られる。また ID データは物体モデルをピックするために使用する。

オストワルドの方法を実現するためには、まず図2に示したオストワルドのカラーモデルを構築する必要があるが、現状では計算機で扱うことが難しい。オストワルドのモデルでは、心理実験により知覚的に等歩度になるように明度段階の尺度を定めている。したがって、物理的には等歩度になっていないため、計算機で扱うための RGB モデルに容易には変換できない。そこで、HLS カラーモデルで近似することとした。このモデルは図6に示すように、オストワルドのカラーモデルによく似ており、実際にこれを基に作られたモデルである。この複円錐形の座標系の HLS モデルでは物理的に尺度付けされているので、例えば直交座標系の RGB モデルとの変換は文献6)に示されているような座標系の変換アルゴリズムにより容易に行うことができ、ディスプレイ表示色に反映させることが簡単である。

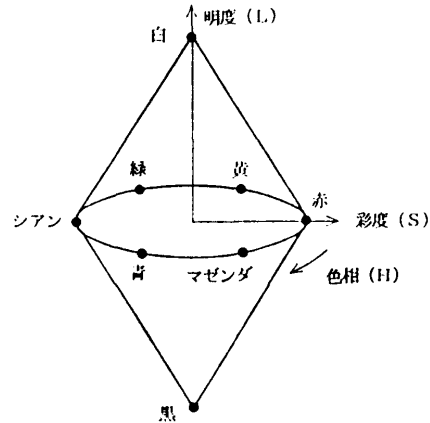


図6 HLS カラーモデル
Fig. 6 HLS color model.

上述のように厳密には、明度の尺度付けの方法、および色相の割付方法において両モデルは異なっている。しかし図3で示したオストワルドの4つの調和色彩系列を表示して、これを配色のガイダンスとして使用する場合に、この相違は実用上の問題にはならないと考える。しかし、より正確な色彩表現のためには知覚的尺度のモデルを物理的モデルに変換する方法が必要であると考えられる。このような問題に関しては、例えば富永⁵⁾による RGB モデルを知覚的等歩度のマンセルのカラーモデルに変換する手法などがある。

4つの調和色彩系列を求めることは、HLS モデルで直線または曲線(等値色環)上の色を求める問題に置き換えられる。この調和色彩を求めるための計算方法を図7に示す。ここで、点 P_0 は基準色であり、直線 P_1P_2 、 P_3P_4 および P_5P_6 はそれぞれ等純系列、等黒系列、等白系列を表す。また、 S 軸に平行で L 軸と原点を一致させた S' 軸を定義する。さらに配色ガイダンスを表示する表示セルは、横一列に並んでおり、0から $n-1$ までの n 個のセルから構成されているとする。そして、点 P_0 の HLS 値を (h_0, l_0, s_0) とし、定義域を

$$0 \leq h \leq 360, \quad 0 \leq l \leq 1, \quad 0 \leq s \leq 1$$

とすると、 i 番目のセルの HLS 値は幾何的な関係から、以下のようなになる。

(1) 等値色環

l と s を固定して、 h だけを変えればよいので、

$$h = i/n * 360$$

$$l = l_0$$

$$s = s_0$$

とする。

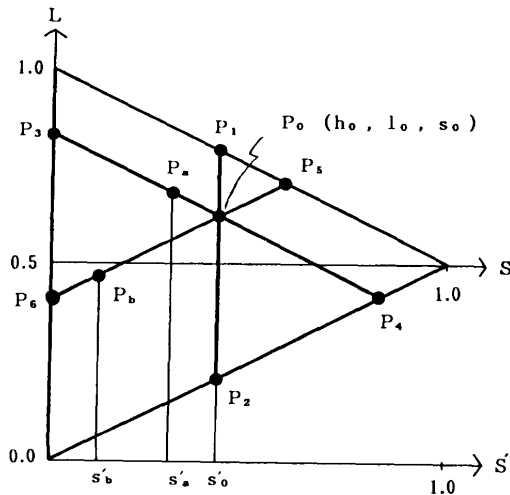


図7 調和色彩の計算方法
Fig. 7 Calculation of harmonic color.

(2) 等純系列

点 P_1, P_2 の L 座標値を l_1, l_2 とし、直線 P_1P_2 が S' 軸と交差するときの座標を s_0' とすると、 $s_0' = (1 - |2 \cdot l_0 - 1|) \cdot s_0$, $l_2 = s_0'/2$, $l_1 = 1 - l_2$ なので、次のようにする。

$$h = h_0$$

$$l = i/n \cdot (l_1 - l_2) + l_2$$

$$s = s_0' / (1 - |2 \cdot l - 1|)$$

(3) 等黒系列

点 P_3, P_4 の L 座標値を l_3, l_4 とし、直線 P_3P_4 上を移動する点 P_a を S' 軸上に投影したときの座標を s_a' とすると、

$$l_3 = l_0 + s_0'/2, \quad l_4 = l_3/2, \quad s_a' = (l_3 - l) \cdot 2$$

なので、

$$h = h_0$$

$$l = i/n \cdot (l_3 - l_4) + l_4$$

$$s = s_a' / (1 - |2 \cdot l - 1|)$$

である。

(4) 等白系列

点 P_5, P_6 の L 座標値を l_5, l_6 とし、直線 P_5P_6 上を移動する点 P_b を S' 軸上に投影したときの座標を s_b' とすると、

$$l_6 = l_0 - s_0'/2, \quad l_5 = (l_6 + 1)/2, \quad s_b' = (l - l_6) \cdot 2$$

なので、

$$h = h_0$$

$$l = i/n \cdot (l_5 - l_6) + l_6$$

$$s = s_b' / (1 - |2 \cdot l - 1|)$$

である。

配色エディタでは、このようにして求めた調和色彩系列を配色ガイダンスとしてユーザに例示する。ユーザは例示された中から色彩を選択できるので、配色の試行回数が減少し、容易に調和配色が得られる。配色エディタにより決定した質感データは図4のように、レンダリングプログラムにフィードバックできるので、この値を使用して最終的なレンダリング処理を行うことができる。最終的なレンダリング処理では質感および照明データが確定しているため、レンダリングプログラムはシェーディング処理までのすべてを行い、映像を出力する。

5. 試作結果

5.1 ワークステーションへの適用

配色エディタの機能は日立製エンジニアリングワークステーション 2050 G (約 3.5 MIPS) 上で実現した。その表示画面を図8に示す。以下では表示画面上の各部の機能について簡単に説明する。

- メニュー領域：各メニューをマウスでクリックすると、光源設定、材質設定などの機能を実行する。
- 光源設定領域：光源色は白色で平行光線とし、光源方向ベクトルをマウス指示で変更する。光源数は1である。
- 材質設定領域：各種反射係数および反射指数をマウス指示で変更する。この値の組合せにより、ゴム、プラスチック、金属などの材質が表現できる。
- 色彩設定領域：図6に示した HLS カラーモデルを使用した。色相 (H) を指定すると、これに対応した明度 (L) と彩度 (S) の断面が表示されて、 L と S の値がクリックできる。

e) 配色ガイダンス領域：d)で基準色を設定すると、前述のオストワルドの方法により4つの調和色彩系列を例示する。4つのカラーバーは上から、等白系列、等黒系列、等純系列、等値色環を示す。

f) カラーパレット領域：e)のカラーバーから色彩をマウスで選択すると、c)で指示された材質で、テスト的に球がシェーディングされ、これをカラーパレットとする。

g) シェーディング領域：f)のパレットをマウスでクリックしてから、この領域内のモデルをクリックすると、指示した材質および色彩に物体モデルが変更される。

なお、配色エディタのプログラムはC言語で記述しており、規模は約 3300 行である。

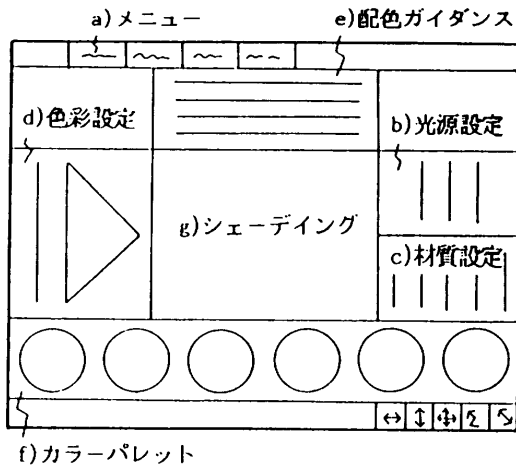
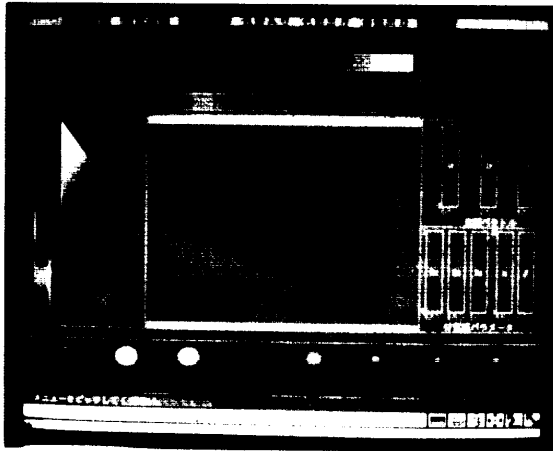


図 8 配色エディタの表示画面
Fig. 8 Display image of coloring editor.



図 9 配色結果の例
Fig. 9 Example of coloring.

5.2 応答時間の測定

前述のワークステーションを使用して、

a) 光源変更時間：光源ベクトルを指定してから、全部のモデルにつきシェーディング計算を行って再表示されるまでの時間。

b) 材質変更時間：反射係数および指数を指定してから、パレットの材質が変更されて表示されるまでの時間。

c) 色彩変更時間：HLS モデルの色彩を指定してから、パレットの色彩が変更されて表示されるまでの時間。

d) ガイダンス作成時間：基準色を指定してから、ガイダンスを表示するまでの時間。

e) モデルの変更時間：パレットとモデルを指定してから、1つのモデルの色彩と材質が変更されるまでの時間。

の5点について配色エディタの応答時間を測定した。

a)の光源変更には約60秒を要するが、その他のb)からe)の項目では十数秒程度で応答できた。なお、ここで使用した物体モデルは図8に示すもので、約120個の基本図形から構成されている。

5.3 配色結果の評価

調和配色のガイダンスによる効果を調査するために、試みとして被験者による主観評価を行った。まず第1回めは、被験者には調和配色については何も説明せず、配色ガイダンスを使用しないで自由に配色させた。第2回めでオストワルドの方法について説明し、ガイダンスから色彩を選択させるようにした。図9は第2回めの配色で得られた結果である。この物体モデルは図8のものと同じである。また被験者は満足な配色結果が得られるまで、試行を繰り返し行い、被験者がこれで十分と判断した時点で配色を終了とした。このときの配色に要した操作時間は、第1回めが約90分、第2回めが約30分であった。

6. 検 討

6.1 応答時間

前章で示した応答時間の結果においては、光源変更の応答が遅く、対話処理には問題がある。その理由は、このケースだけスクリーン上のすべての画素についてシェーディング計算の(1)式を再計算する必要があるため、他の評価項目に比べて計算量が多いことによる。この高速化のためには、シェーディング計算を必要とする範囲を最小化することや、画素間のコ

ヒール量を利用した計算簡略化が必要である。

しかし光源変更以外の応答時間では、十数秒程度であり、ほぼ問題はないと思われる。さらに、対話処理に好都合な点は、これらの応答時間が物体モデルの複雑さに影響されない点である。つまり、モデルを定義している幾何図形の数に依存せずに、一定の時間で応答ができる。前述のように、シェーディング処理だけを独立させた方式を採用したために、この応答時間が可能となっている。投影変換や隠面処理を含んだ方式では、幾何図形の数が多い場合、対話処理はまず不可能である。以上のように、配色のための対話処理ツールとして、配色エディタはほぼ満足できるレベルで応答できる。

6.2 配色結果

配色結果だけを比較して、ガイダンスを使用した場合としない場合の差異を、明確に指摘することは難しい。それは被験者が試行を重ねるうちに、ガイダンスを使用しない場合でも、調和配色しようとする意思が、働いていたためと考えられる。オストワルドの方法は、簡単に言えば同系色で色をそろえること、および色のトーンをそろえることを、法則化したものと考えられる。今回の評価実験でも、当初被験者は色相のかなり異なる純色（赤、青、黄などの原色）を使って配色していたが、結果が好ましくないと感じて、同系色でまとめるように試行を重ねている。したがって配色結果だけをみると、ガイダンスの使用による効果は明確にはならないものと考えられる。

一方、操作時間の減少については、配色ガイダンスにより大きな効果が得られていると考えられる。前章で示したように、ガイダンスの利用により操作時間は約 1/3 になった。この要因には被験者の習熟度の向上も含まれているため、この数値をそのまま効果とすることはできないが、ガイダンスは非常に有効であったと考えている。また、被験者も使用後の感想として、ガイダンスがあると試行回数が減少するために、操作時間が短くなったと述べている。

以上をまとめると、今回試作した配色ガイダンス機能により、配色についての専門的な知識を持たない人にとっては、配色の試行回数を減らすことができ、操作時間の短縮に効果があるとの見通しが得られた。

6.3 調和配色の方法

今回採用したオストワルドの色彩調和理論は、19世紀末に提案されたものであり、これだけでは十分な配色ができないことは、デザイン界でも通説となってい

る。しかしながら現在でも、なおこの方法が広く利用されている理由は、法則が単純で明解なためである。そもそも配色の良否は個人の感情やし好との結び付きが強く、最適な配色を求める方法を容易に法則化できるものではない。そこで現在の色彩調和理論では、人間の配色に対する感情効果を、心理的手法により因子分析し、心理的空間の中で配色を尺度付けしようとする方法が一般的である。これは要するに、人間の心理と配色とを対応付けしようとするアプローチであり、多数の被験者による配色についての主観評価から導き出せるものである。

7. おわりに

3次元CGにおいて、物体モデルの配色を決定する際に、一般のユーザでも容易に調和した色彩で配色できるように、調和配色理論による配色ガイダンス機能を持つ配色エディタを試作し、評価して以下の結論を得た。

a) 今回試作したプログラムは、配色のための対話形式のツールとして、ほぼ満足できるレベルにあることを確認した。

b) 配色ガイダンス機能により、配色の専門知識を持たない一般のユーザに対して、配色の試行回数を減らすことができ、操作時間の短縮に効果があるとの見通しが得られた。

今後は人間の心理と配色とを対応付けし、調和配色ガイダンス機能をより強化したいと考えている。

参考文献

- 1) Perlin, K.: An Image Synthesizer, *ACM SIGGRAPH, Comput. Gr.*, Vol. 19, No. 3, pp. 287-296 (1985).
- 2) Meier, B. J.: ACE: A Color Expert System for User Interface Design, *Proc. of the ACM SIGGRAPH Symp. on User Interface Software*, pp. 117-128 (1988).
- 3) 金子隆芳: 色彩の科学, 岩波新書 (1988).
- 4) 千々岩英彰: 色彩学, 福村出版 (1984).
- 5) 富永昌治: 色知覚の3属性によるカラー画像の展開, *電子通信学会論文誌*, Vol. J 68-D, No. 3, pp. 300-307 (1985).
- 6) Foley, J. D. and Van Dam, A.: *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*, Addison-Wesley (1983).

(平成元年 3月20日受付)

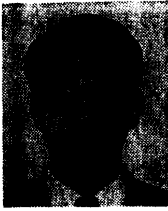
(平成元年 12月12日採録)

**宇佐美芳明 (正会員)**

1958年生。1981年慶応義塾大学工学部機械工学科卒業。1983年同大学院修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。現在同社日立研究所第3部に勤務。コンピュータ・グラフィックスのソフトウェアの研究開発に従事。レンダリング技術について興味を持つ。

**谷中 雅雄 (正会員)**

1937年生。1960年東京工業大学物理学課程卒業。同年(株)日立製作所に入社。以来同社日立研究所にて、データ通信、計算機網の研究に従事。1982年よりCAD, CGの研究に従事。電気学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, ACM 各会員。

**武内 良三**

昭和20年生。昭和43年名古屋大学工学部電子工学科卒業。昭和45年同大学院修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。以来、電界解析、応力解析による材料物性の研究に従事。その後、カラー画像の入出力等の処理方法の開発を行う。現在は、日立研究所にて、コンピュータ・グラフィックスの研究開発に従事。昭和53年IEEE論文賞受賞。昭和61年画像電子学会研究奨励賞受賞。電気学会, 電子情報通信学会, IEEE 各会員。