

3次元空間における物体色のリアルな生成とその評価

富 永 昌 治†

3次元物体表面の物体色をカラーモニタ上にリアルに生成する方法を述べ、その精度を評価する。リアルな物体色生成には、(1)カラーモニタでの正確な色再現と、(2)3次元的な光反射の実現という2つの問題がある。まず前者については、カラーモニタの特性に基づいて定まる色座標変換と、ガンマ補正用のルックアップテーブルの使用によって色再現を行う。後者の問題については、まず3次元的な光反射モデルを示す。プラスチックのような不均質物体のためのPhongモデルと、物理的に厳密で均質物体の金属色の生成が可能なTorran-Sparrowモデルを示す。さらに拡散反射物体間の相互反射のモデルを提示する。物体色生成に必要な表面反射率の分光データは未知の場合が多い。そこで金属のような均質物体の分光反射率を効率よく推定するための計算法について検討する。結果としてフレネル反射率の算出にCook-Torranceの方法は誤差が多く、むしろHallの方法のほうが優れていることが判明した。3次元物体のレンダリングにはレイトレーシング法を用い、輝度の計算はすべて分光的に行う。本物体色生成法の総合的な性能を実験的に評価する。実際の光学データを用いて物体の映像を生成し、カラーモニタを測色する。不均質物体、金属、拡散相互反射物体のいずれの場合も、生成した物体色の信頼性は高いことがわかった。

Realistic Production of Object Color in a Three-Dimensional Space and Its Evaluation

SHOJI TOMINAGA†

A method is described for realistic production of object color of any surface of a three-dimensional object on a color monitor, and its accuracy is evaluated. For the realistic production we have two problems of (1) accurate color reproduction on a color monitor, and (2) realization of three-dimensional light reflection. For the first problem, color reproduction is performed by a XYZ-RGB coordinate transformation and lookup tables for gamma correction. For the latter problem, we first show some light reflection models. The Phong model and the Torrance-Sparrow model are shown, respectively, for inhomogeneous objects like plastics and homogeneous objects like metals. A mutual reflection model is proposed for diffuse reflectors. Since the optical data for surface reflectance are often unknown, a computational method is considered to estimate spectral reflectance. Then it is shown that the Cook-Torrance method has much errors in computing Fresnel reflectance, but the Hall method is even better. A ray tracing method is used for rendering three-dimensional objects, where radiance computation is done in wavelength. The overall performance of the present method for object color production is evaluated on experiment. We show that the produced object colors are reliable in all cases of inhomogeneous objects, metallic objects, and diffuse reflectors with mutual reflection.

1. はじめに

カラーディスプレイ上で3次元物体の色をリアルに生成することは、コンピュータグラフィックスや画像処理分野はもとより、最近ではカラーディスプレイで映像を取り扱うあらゆる分野で必要とされてきている。3次元物体色の正確な生成は、3原色R, G, Bの加

法混色を制御することにつぎるが、これには2つの異なる問題が関係している¹⁾。

まずCRTカラーモニタに代表されるディスプレイ装置のハード面に関連する問題で、カラーモニタの特性を考慮して正確な色再現を行わなければならない。通常、カラーモニタの入出力関係は非線形で、3原色R, G, Bの色度も装置によって異なるからである。しかし、この色再現の問題を解決しただけでは、3次元的な物体色のリアリティを作り出すことはできない。

次に3次元的な光反射の過程を計算機で実現すると

† 大阪電気通信大学工学部精密工学科
Department of Precision Engineering, Faculty of
Engineering, Osaka Electro-Communication Uni-
versity

いうソフト面の問題が重要である。例えば、金や銅のような金属色の見えはカラーパレット上では作れない。いいかえれば、物体の持つ材質感、平面を均一に塗装するだけではリアルに現れない。これは3次元空間における光の反射過程を無視しているためである。色知覚は物体に入射した光が反射し、それが眼に入射して起こるが、3次元反射による色光の変動が物体の質感を伴う色知覚となる。すなわち、物体のリアルな見えは3次元世界を2次元画像平面に投影することにより、はじめて現れる。

本論文では、このような2つの問題を考慮して現実の物体の色をリアルに生成する方法を述べ、その精度を総合的に評価する。色再現の問題は、歴史的にテレビジョンなどの分野でカラーモニタの校正のために検討されてきた。現在いくつかの解法が提案されている^{2)~4)}。光反射の仕組みを解明することは、光計測の分野で本来取り扱われてきたが、そのモデリングの問題がコンピュータグラフィックスのシェイディングのためや^{5)~7)}、最近ではコンピュータビジョンの画像解析のためにも^{8),9)}研究されてきた。3次元的な物体色の生成はシェイディングの問題と密接に関係している。これまでいくつかのシェイディングのモデルが提案されているが、色に関する評価は十分といえない。

複雑な物体表面の色を生成するには、正確でしかも簡便なモデルが望まれる。筆者らはこれまで各種の物体についてカラー反射モデルを検討し、多くの物体は簡便な2色性反射モデルで記述できることを示した^{10),11)}。ここではこの結果に基づいて、現実の物体に対してモデルを定め、物体色の正確な計算法を決定する。3次元空間に存在する物体の表面は、他の物体からの反射光の影響を受ける場合もある。これは表面状態にも依存するが、単なる写り込みではなくて、拡散反射物体のように相互反射によって新たな色を生成することがある。これを考慮した物体色の生成についても検討する。

さてこのような物体色を厳密に求めるためには波長ごとの分光計算が必要である。通常はR, G, Bの3原色成分の強度を計算し、これらでカラーモニタを駆動する。この方式は正確な物体色を必要としない応用分野では有効である。しかしR, G, Bのみの計算では、表面反射率の物理量が組み込めない。また蛍光灯や太陽光といった異なった分光組成をもつ光源や相互反射光で照明できない。分光計算では、眼に到達した反射光の分光分布を任意のモニタのRGB値に変換し

て、物体色の色刺激を作り出すことができる。

またこのような分光計算の重要性は、鈴木ら¹²⁾によって指摘されており、金属色や光の干渉効果によるしゃぼん玉の表示が試みられた。しかし表示結果の評価については述べられていない。

本論文では、3次元物体の色が実際のカラーモニタでどの程度正確に表示し得るかを評価する。まず第2章でカラーモニタ上での色再現の方法と具体例を示す。次に第3章で不均質物体と金属などの均質物体に対する3次元的な光反射モデルを示し、拡散相互反射のモデルも述べる。第4章では均質物体の分光反射率を効率よく計算する方法を述べる。第5章では分光計算に基づいて物体の映像を作るためのレンダリングの手順を述べる。第6章では評価実験を行う。カラーモニタ上に表示した画像の測色データに基づいて、物体色生成法の信頼性を詳細に調べる。

2. カラーモニタ上での色再現

ディスプレイ装置として、自然色が表示可能なR, G, B各8ビットのリフレッシュメモリを持つ一般的なCRTカラーモニタを想定する。希望する色をカラーモニタ上に再現することは、CIEのXYZ表色系から、カラーモニタによって決まるRGB表色系へ写像することになる(文献1)参照)。図1に色再現の手順を示す。色再現は色座標変換とガンマ補正のステップからなる。三刺激値を行列で座標変換し、さらにルックアップテーブルでモニタのRGBディジタル値に変換する。各ステップにおける手続きを次に示す。

A. 色座標変換

カラーモニタの蛍光体の発色特性は色度(x, y)と輝度 L の3つの数値の組で特徴づけられる。

$$R : (x_R, y_R), L_R,$$

$$G : (x_G, y_G), L_G,$$

$$B : (x_B, y_B), L_B.$$

色度と三刺激値XYZの間には、

$$x = X/(X+Y+Z), y = Y/(X+Y+Z) \quad (1)$$

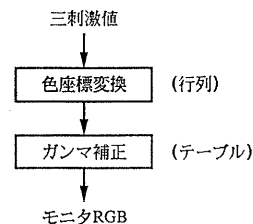


図1 色再現の手順

Fig. 1 Process for color reproduction.

の関係があり、輝度 L は刺激値 Y に対応する。

さて、三刺激値 XYZ からカラーモニタの RGB への変換式を

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

で定義する。ここで T は 3×3 変換行列で、このとき R, G, B の各値は区間 $[0, 255]$ のアナログ値として算出される。これは最終的にはデジタル値に変換する。変換行列 T は再現色と原画色の等色性から次のように導出される^{11), 12)}。

$$T = \begin{bmatrix} \frac{255}{L_{Rmax}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{255}{L_{Gmax}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{255}{L_{Bmax}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_R-y_R}{y_R} & \frac{1-x_G-y_G}{y_G} & \frac{1-x_B-y_B}{y_B} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

ただし $L_{Rmax}, L_{Gmax}, L_{Bmax}$ は各原色の最大輝度で、 RGB 各 8 ビットのデジタルディスプレイ装置では最高レベル 255 の時の輝度値である。変換行列はカラーモニタの発色特性に依存する。

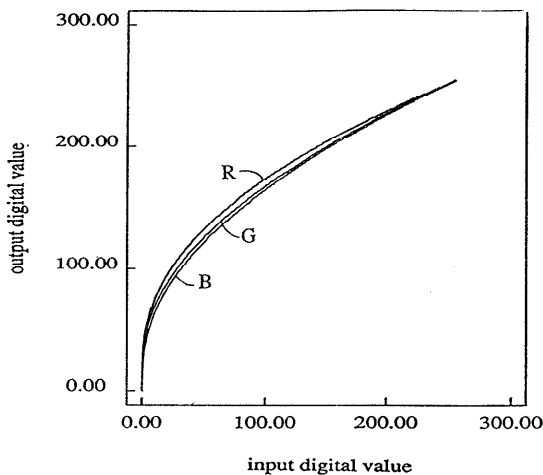


図 2 全域 (0-255) 用ルックアップテーブルの内容
Fig. 2 Contents of the look-up table for the entire domain 0-255 of input values.

B. ガンマ補正

モニタの発光輝度と RGB 値の関係は線形でない。これを線形にすることが一般にガンマ補正と呼ばれる処理である。両者の関係は少数のパラメータで記述できるほど単純でなく¹²⁾、ルックアップテーブルの形で補正を行うのが実用的である。図 2 に本研究で使ったカラーモニタのためのルックアップテーブルの補正曲線を描く。 R, G, B によって対応関係が若干異なることがわかる。

ルックアップテーブルのサイズは通常 256 (すなわち, $0, 1, \dots, 255$) であるが、 RGB の入力値が小さい場合サンプリングの誤差の影響が生じる。すなわち、補正曲線の立ち上がりが急であるから、ここで量子化誤差が出力値に大きく拡大されてしまう。そこで、本研究では RGB の小さい入力値 (たとえば 14 以下) に対して、別の細分化したルックアップテーブルを用意した。すなわち原データをスプライン関数で補間することによって、 $1/10$ に細分化し、 $0, 0.1, 0.2, \dots$ の RGB 値に対するテーブルを作った。これを図 3 に示す。

C. 適用例

本研究で使ったカラーモニタについて、3 原色の色度値と最大輝度値は以下のとおりであった。

$$x_R = 0.614, y_R = 0.350, L_{Rmax} = 42.7$$

$$x_G = 0.306, y_G = 0.607, L_{Gmax} = 138.7$$

$$x_B = 0.149, y_B = 0.074, L_{Bmax} = 27.3$$

これらのデータを用いて XYZ から RGB への変換行列を算出した。

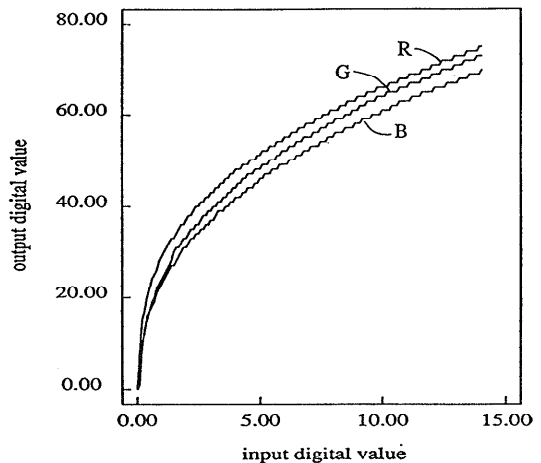


図 3 低域 (0-14) 用ルックアップテーブルの内容
Fig. 3 Contents of the look-up table for the low domain 0-14 of input values.

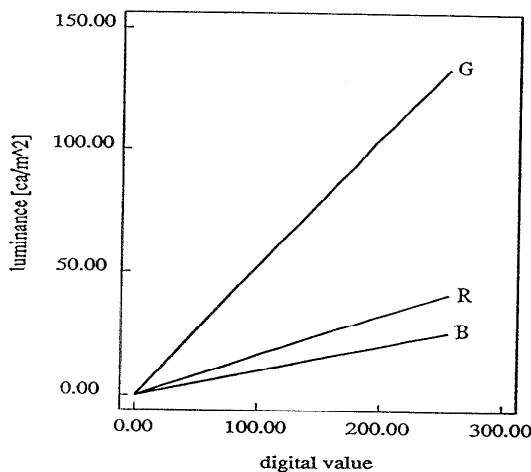


図 4 ガンマ補正の結果
Fig. 4 Results of gamma correction.

$$T = \begin{bmatrix} 4.784 & -2.342 & -0.694 \\ -1.481 & 2.592 & 0.037 \\ 0.045 & -0.169 & 0.894 \end{bmatrix}$$

次にガンマ補正用のルックアップテーブルとして図2、図3のものを使用した。図4に補正結果を示す。ルックアップテーブルを用いて3原色を表示し、そのときのモニタの輝度を計測したものである。RGB値と発光輝度値の間に良好な線形関係が得られている。

3. 3次元的な光反射モデル

3次元物体色のリアルな生成に光反射モデルの役割は大きい。光反射モデルは物体表面の光学的性質、および照明・観測の幾何学的性質に基づいて構築される。筆者らは各種の物体について色彩解析の立場から反射モデルを検討し、ほとんどの物体は2色性の反射モデルで記述できることを明らかにした¹¹⁾。まずプラスチックから植物の葉に至る多くの不均質物体は鏡面と拡散から成る標準の2色性反射モデルで記述できる。また銅などの金属については鏡面反射成分のみから成る異なった反射をするが、近似的に2色性と考えることができた。物体のシェーディングモデルとしてよく知られたPhongのモデル¹³⁾は鏡面反射と拡散反射の組み合わせで陰影をつける標準的な手法である。そこで本研究では不均質物体の色を生成するためにPhongのモデルを用いるものとする。また金属については厳密なTorrance-Sparroのモデル¹⁴⁾を採用して現実との適合を図った。なお後者のモデルは前者と比べてより一般的といえるが、通常の不均質物体の表

面は前者で近似できる。モデルの一般的な説明は文献にゆずり、ここでは物体色生成に必要な反射光のスペクトル分布の記述に重点を置いて述べる。また拡散相互反射については、物体の形状を限定してモデルを提案する。

3.1 Phong モデル

物体からの反射光は、鏡面反射（界面反射）と拡散反射（内部反射）の2つの加法的成分から成る。前者は物体表面と空気層の間の境界で反射する成分で、鏡面からの反射のように、この反射光成分は視角の狭い範囲でのみ観測される。後者は物体の表面を通過した光が物体内部の色素粒子との間で起こした散乱による。この散乱光は再び空気中に戻った場合のみ観測されるので、拡散反射成分は強い方向性をもっていない。

図5に反射の幾何学的モデルを示す。まず N は物体表面の法線ベクトル、 L は光源方向を示す単位ベクトル、 V は視点方向の単位ベクトルである。また R_l と R_v は、それぞれ、光の反射方向と視線の反射方向を表す単位ベクトルとする。鏡面反射成分はベクトル R_l の方向に最も強く、この方向から角度がずれるにつれて、強度が急激に減少する。ずれ角を ρ として、この減少割合を $(\cos \rho)^n$ で表す。指数 n が大きいほど鏡に近くなり、シャープなハイライトが得られる。一方、拡散反射は Lambert の法則に従うものと仮定している。すなわち反射光の強度分布は入射角の余弦 $\cos \theta$ 、すなわち N と L の内積で決まり、見る方向 V とは無関係である。

以上の特徴を定式化すれば、反射光の分光スペクトル分布は次式のように記述される。

$$I(\lambda) = S_d(\lambda)(N \cdot L)I_i(\lambda) + S_s(R_v \cdot L)^n I_i(\lambda) \quad (4)$$

ここで λ は波長で、 $I_i(\lambda)$ は入射光の分光分布を表す。右辺第2項と第3項がそれぞれ拡散と鏡面の成分を表す。第3項の内積 $(R_v \cdot L)$ は $\cos \rho$ を意味する。

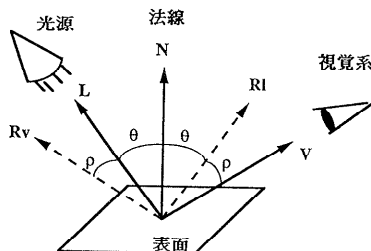


図 5 Phong モデルのための反射幾何
Fig. 5 Reflection geometry for the Phong model.

$S_d(\lambda)$, S_s は物体の重要な光学的性質を規定する表面反射率を表す。物体色に直接寄与するのは拡散反射率 $S_d(\lambda)$ である。また鏡面反射率 S_s が波長 λ に依存せず一定値をとることに注意すべきである。これは鏡面反射成分の色度は常に照明光と一致し、物体のハイライトは光源色をもつことを意味する。

3.2 Torrance-Sparrow モデル

表面を磨いた金属からの反射光は大部分が鏡面反射成分である。鏡面反射成分が金属の物体色を作る。鏡面反射率は波長の関数になるとともに、入射角にも依存して変化する。また金属表面などを拡大してみれば、必ずしもプラスチックのようになめらかでなく、でこぼこしていることが多い。Torrance-Sparrow¹⁴⁾ は物理的に厳密な反射モデルの理論を示した。Blinn¹⁵⁾ は最初にこのモデルをコンピュータグラフィックスに適用し、Cook-Torrance¹⁶⁾ は反射光のスペクトルを近似する方法を提案した。

図6に反射の幾何学的モデルを示す。 L と V はそれぞれ光源と視点に向く単位方向ベクトルで、 H はこれらの2等分ベクトルである。 H と法線ベクトル N との角を α としている。反射光のスペクトル分布は次のような一般式で記述される。

$$I(\lambda) = S_d(\lambda)(N \cdot L)I_i(\lambda) + f(\lambda, V, L, N)I_i(\lambda) \quad (5)$$

金属などでは右辺第1項の拡散成分は無視できるほど小さい。第2項の f は鏡面反射関数で、この関数の設定は Torrance-Sparrow の詳細な理論¹⁴⁾ に基づいており、次式のような形で与えられる。

$$f = \frac{D(\alpha)G(N, V, L)F(\theta, \lambda)}{(N \cdot V)} \quad (6)$$

右辺の3種類の関数 D , G , F のうち、 D と G は表面形状に関する関数で、物体色に直接影響を与えるのは関数 F のみである。

A. 表面形状に関する関数 D , G

関数 D は、物体表面を微小な面の集合で構成され

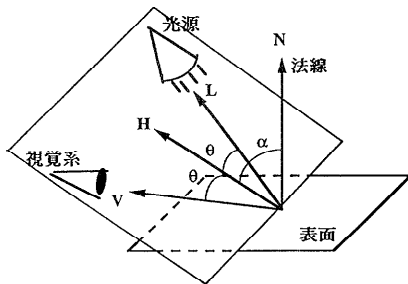


図6 Torrance-Sparrow モデルのための反射幾何
Fig. 6 Reflection geometry for the Torrance-Sparrow model.

ているとみなすとき、面の向きを表す分布関数である。これで H 方向を向いている微小面の割合が定まる。分布関数として法線を中心とする一次元の対称関数が仮定される。たとえばガウス関数を用いれば、

$$D(\alpha) = \exp \{-\ln(2)\alpha^2/\beta^2\} \quad (7)$$

のように書ける。ただし、 $\alpha = \cos^{-1}(N \cdot H)$ である。定数 β は D の値が $1/2$ に落ちる角度であり、したがって鏡面反射の鋭さを表す。

関数 G は幾何学的減衰係数である。微小面は傾きをもって分布しているため、隣接する微小面が互いに他をマスクしたり、光の当たらない陰ができたりする。このような入射光や反射光のさえぎりは当然それらの角度に依存する。具体的には次式で与えられる。

$$G(N, V, L) = \min \left\{ 1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(V \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(V \cdot H)} \right\} \quad (8)$$

B. 物体色に関する関数 F

関数 F は微小面の分光反射率を表す。一般的な分光反射率は波長と入射角の関数である。分光反射率を求めるためにフレネルの式を用いることは物理的に厳密といえる。またこれに対する近似の方法も提案されている。金属などの均質物体について分光反射率を計算する具体的方法については第4章で詳述する。

3.3 相互反射モデル

光源からの直接光ではなくて、物体で反射した間接的な光が別の物体を照明する。このような物体間の光反射を相互反射 (mutual reflection) と呼ぶ。なめらかな表面をもつプラスチックなどに他の物体が写り込む現象はよく見かけられる。この現象は、別の物体で拡散反射した物体色が前者のなめらかな表面で鏡面反射した結果といえる。このような鏡面反射と拡散反射、あるいは2物体とも鏡面反射といった組み合わせによる相互反射は、前述の光反射モデルにレイトレーシング法などを用いてレンダリングすれば実現できる。しかし紙のように鏡面反射成分が弱い物体については、拡散反射成分のみによる相互反射が顕著になる。拡散表面間の相互反射を厳密にモデル化することは困難である。レンダリングにも通常のレイトレーシング法は利用できず、分散型¹⁷⁾やラジオシティ法^{18), 19)}で工夫することになる。しかし問題を限定すれば相互反射の効果を近似的に作り出すことができる。

いま図7のような2つの物体の平らな表面 A , B を想定する。2表面は一端で接しており、面の幅を w ,

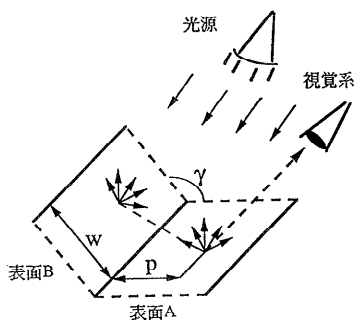


図 7 接合した2表面間の相互反射
Fig. 7 Mutual reflection between joined two surfaces.

開き角を γ とする。現実にはこのような接合2平面間で拡散反射が生じることが多い。簡単のため面の長さは無限大で、光源からの平行光線を仮定する。各面から眼に入射する光は、光源からの直接光が表面を照明し、これが反射して眼に到達する光と2表面間の相互反射による光の和になる。ここで相互反射は1回の跳ね返りのみと仮定し、多重反射を無視することにする。このとき表面Aの場所 p における反射光の分光分布は次式で記述できる。

$$I^A(\lambda) = S_A^A(\lambda)(\mathbf{N}^A \cdot \mathbf{L}^A)I_i(\lambda) + \alpha^{BA}(p)S_A^A(\lambda)S_B^B(\lambda)(\mathbf{N}^B \cdot \mathbf{L}^B)I_i(\lambda) \quad (9)$$

上式右辺第1項が表面Aに固有の物体色を表し、第2項が相互反射による寄与を表す。ただし添字A, Bのついたパラメータは各表面における拡散分光反射率や法線、光源ベクトルを表す。係数 $\alpha(p)$ は形態係数(configuration factor)と呼ばれ、表面Bから放射される全光束のうち表面Aに入射する光束の割合を表す。この係数は相対位置 $P=p/w$ をパラメータとする関数として、次式から算出できる²⁰⁾。

$$\alpha^{BA} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\cos \gamma - P}{(P^2 + 1 - 2P \cos \gamma)^{1/2}} \right] \quad (10)$$

(9)式の第2項で、分光反射率の積 $S_A^A(\lambda)S_B^B(\lambda)$ による新しい色が付加されることになる。同様な式は表面Bについても書ける。

4. フレネル反射率の計算法

分光反射率には物体の実測データを用いることが望ましいといえる²¹⁾。しかし金属のような均質物体では入射角に依存して分光反射率が変動するので、すべてを実測データに頼ることは容易でない。フレネルの関係式は光の物理法則から導かれたもので、もし一定の

物理定数が既知ならば、計算で任意の入射角における分光反射率を推定することができる。しかし必要な物理定数自身が計測データであったり、算出した分光反射率が実測値と異なることがある点に注意すべきである。フレネルの関係式は分光反射率の標準的な値を知るのに使用できる。これに対する近似計算は実測データを組み込むことができ利用価値は高いといえる。

4.1 フレネルの計算式

屈折率や吸収係数の物理定数が与えられているならば、フレネルの式より分光反射率の理論計算が可能である。金属のような均質物体に無偏光の光が角度 θ で入射して鏡面反射するとき、フレネルの反射率は

$$F(\theta, \lambda) = 0.5(R_{\perp} + R_{\parallel}) \quad (11)$$

で与えられる。ただし右辺の $R_{\perp}$ と $R_{\parallel}$ は、それぞれ、入射面に垂直に偏光された成分と平行に偏光された成分を表す。これらの反射率成分は以下のように導出される^{22), 23)}。

$$R_{\perp}(\theta, \lambda) = \frac{a^2 + b^2 - 2a \cos \theta + \cos^2 \theta}{a^2 + b^2 + 2a \cos \theta + \cos^2 \theta} \quad (12)$$

$$R_{\parallel}(\theta, \lambda) = R_{\perp} \frac{a^2 + b^2 - 2a \sin \theta \tan \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta}{a^2 + b^2 + 2a \sin \theta \tan \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta} \quad (13)$$

ここで a と b は、対象物体の屈折率と吸収係数を $n(\lambda)$ と $k(\lambda)$ とおくと、次式で求まる。

$$a = (0.5)^{1/2} \{ [(n^2(\lambda) - k^2(\lambda) - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2(\lambda)k^2(\lambda)]^{1/2} + (n^2(\lambda) - k^2(\lambda) - \sin^2 \theta) \}^{1/2} \quad (14)$$

$$b = (0.5)^{1/2} \{ [(n^2(\lambda) - k^2(\lambda) - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2(\lambda)k^2(\lambda)]^{1/2} - (n^2(\lambda) - k^2(\lambda) - \sin^2 \theta) \}^{1/2} \quad (15)$$

各波長における $n(\lambda)$ と $k(\lambda)$ の値を代入すれば、(11)-(15)式より分光反射率 $F(\theta, \lambda)$ が算出できる。

4.2 近似計算

現実には代表的な金属以外、屈折率や吸収係数の値が可視域の全波長において既知であることは少ない。実測データとして、物体への垂直入射(すなわち入射角 $\theta=0$)のときの分光反射率の実測データが得られていることがあるので、このデータを近似に利用することが一般的である。また任意の物体の分光反射率は、入射角が $\pi/2$ に近づくと、完全反射 $F(\pi/2, \lambda)=1$ となる性質があり、これを計算の高速化に利用することも多い。

A. Cook-Torrance の方法

Cook-Torrance¹⁶⁾は吸収係数 $k(\lambda)$ を0と仮定して、誘電体(不均質物体)のフレネル式を利用している。(11)-(15)式で $k(\lambda)=0$ とおけば次式を得る。

$$F(\theta, \lambda) = \frac{1}{2} \frac{(g(\lambda) - c(\theta))^2}{(g(\lambda) + c(\theta))^2} \cdot \left\{ 1 + \frac{[c(\theta)(g(\lambda) + c(\theta)) - 1]^2}{[c(\theta)(g(\lambda) - c(\theta)) + 1]^2} \right\} \quad (16)$$

ただし

$$c(\theta) = \cos \theta, \quad g^2(\lambda) = n^2(\lambda) + c^2(\lambda) - 1.$$

いま垂直入射 $\theta=0$ を仮定すれば, (16)式は

$$F(\theta, \lambda) = \left(\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda) + 1} \right)^2 \quad (17)$$

と簡略になり, これを屈折率について解けば

$$n(\lambda) = \frac{1 + \sqrt{F(0, \lambda)}}{1 - \sqrt{F(0, \lambda)}} \quad (18)$$

を得る.

したがって垂直入射のときのデータ $F(0, \lambda)$ が与えられているとき, (18)式から $n(\lambda)$ の近似値が求まり, さらにこれを(16)式に代入すれば任意の入射角に対する分光反射率が求まる. 以上のような Cook-Torranceの方法は現実によく引用されているが, 第6章の評価の結果から, 近似精度は次の Hall の方法のほうが優れているといえる.

B. Hall の方法

Hall²⁴⁾は屈折率を固定して, 吸収係数を未知パラメータとして求めている. まず, 垂直入射のときの分光反射率データと水平入射のときの条件式 $F(\pi/2, \theta) = 1$ を用いて, 任意の入射角 ($0 < \theta < \pi/2$) に対する分光反射率の推定に補間式を用いる. 補間式は

$$F(\theta, \lambda) = F(0, \lambda) + (1 - F(0, \lambda)) \frac{F_{ave}(\theta) - F_{ave}(0)}{1 - F_{ave}(0)} \quad (19)$$

である. ここで $F_{ave}(\theta)$ は入射角 θ のときの平均反射率で, Ditchburn²⁵⁾による導電物体に対する次のようなフレネル近似式を用いて求める.

$$F_{ave}(\theta) = 0.5(R_{\perp} + R_{\parallel}) \quad (20)$$

$$R_{\perp}(\theta) = \frac{(n^2 + k^2) - 2n \cos \theta + \cos^2 \theta}{(n^2 + k^2) + 2n \cos \theta + \cos^2 \theta} \quad (21)$$

$$R_{\parallel}(\theta) = \frac{(n^2 + k^2) \cos^2 \theta - 2n \cos \theta + 1}{(n^2 + k^2) \cos^2 \theta + 2n \cos \theta + 1} \quad (22)$$

ただし n と k は, それぞれ, 屈折率 $n(\lambda)$ と吸収係数 $k(\lambda)$ の平均的な値である.

次に n と k が未知であるとき, Hall は物体の n を空気と同じ値 $n=1$ と仮定して, k について近似解を求めている. 実際(20)-(22)式で $\theta=0$ において k について解けば, 次式を得る.

$$k = \frac{2\sqrt{F_{ave}(0)}}{\sqrt{1 - F_{ave}(0)}} \quad (23)$$

手順としては, まず与えられた $\theta=0$ のときの分光反射率 $F(0, \lambda)$ を平均して $F_{ave}(0)$ を算出し, (23)式から k の近似値を得る. 次に, この k と $n=1$ を(20)-(22)式に代入して, 任意の θ における平均反射率 $F_{ave}(\theta)$ を計算する. さらに, (19)の補間式より分光反射率を推定する.

5. レンダリングの手順

光反射モデルに基づいて, カラーモニタ上に3次元物体の画像を生成するために, レイトレーシング法を使用した. レイトレーシング法ではスクリーンを通して物体を観測するので, スクリーン上の各画素ごとに見える物体面を探索して分光的な輝度計算を行った.

可視面の分光輝度の値は, 光源からの直接光が反射したことによる輝度値に, 他の物体からの反射光の影響も加えられる. ただし拡散相互反射は(9)式を組み込んで実現した. なお複数の光源が存在する場合の取り扱いが容易で, 例えば Phong のモデルについて, 光反射モデルは次のように記述できる.

$$I(\lambda) = S_d(\lambda) \sum_{i=1}^m (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_i) I_{ii}(\lambda) + S_r \sum_{i=1}^m (\mathbf{R}_v \cdot \mathbf{L}_i) I_{ii}(\lambda) \quad (24)$$

ここで m は光源の数で, 光の透過は考えていない. さらに光源として点光源を仮定する場合は, 照明光の強度は光源から物体表面までの距離で減衰するので, 距離計算を加える.

各画素の分光輝度の計算はすべて波長ごとに行う. 照明環境が蛍光灯のような輝線スペクトルを含むものにも対応できるようにするには, 可視領域 [400, 700] を少なくとも 5 nm おきにサンプルする必要がある. この場合, 各画素につき分光データが 61 次元ベクトルとして表される. 輝度計算の最後に, 物体色の三刺激値 XYZ を次のような形式で算出する.

$$X = \int I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = \int I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad Z = \int I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (25)$$

これらの三刺激値 XYZ を(2)式でモニタの RGB 値に変換し, さらにテーブルでガンマ補正をすれば, カラーモニタ上に物体の色が正確に表示されることになる.

本レンダリングに必要なデータのうち主なものは以下のとおりである.

- (1) 物体・プリミティブ: 基本物体の形状, 空間座標および材料名など.
- (2) 光源: 光源の座標, 種類 (例えば日光, ハロゲ

ンランプ、蛍光灯など)。

- (3) カメラ: 観測点座標, 目標点座標, ズーム率。
- (4) 材料: 物体を構成する材料について光学的性質を指定する。拡散反射の分光反射率, 鏡面反射の分光反射率, 屈折率, 吸収係数など。
- (5) 照明光: 光源の種類に対応した光の分光分布と係数など。

6. 評価実験

物体の映像をカラーモニタ上に生成し, モニタを直接測色することによって物体色生成の総合的な性能を調べた。まず色票などの基準物体色を用いて, 明るさに関する表示性能を確認した。そして色度情報に基づいて以下解析を行った。

6.1 不均質物体色の生成

プラスチックなどの不均質物体を 3.1 節の Phong モデルに基づき 5 章の手順で生成した。図 8 に生成した赤, 緑, 青の球の画像を示す。球の分光反射率や照明光の分光分布には, すべて実測データを使用した。例えば赤い球はリンゴの表皮の分光反射率を観測し, その拡散成分を求めて $S_d(\lambda)$ とした (文献 26 参照)。図 9 (a) (b) に表面の分光反射率と照明光の分光分布を示す。光源はスライドプロジェクトである。なお点光源を仮定し, 光源の方向と視線方向は一致させた。その他のパラメータは $S_s=5$, $n=11$ とした。

さてカラーモニタの測色には輝度計を使用し, 計測を容易にするため, 計測箇所にあたる画素領域をアパーチャサイズにあうように拡大した。図 10 に測定したカラーモニタの色度分布を描く。十字が測定値を表し, 各球において中心を通る直線上の画素を適当な間隔でサンプルして得られたものである。ひし形と円はそれぞれ 3 つの拡散物体色と光源の色度を表し, これらは計算で求めた目標値である。すでに知られているように, 不均質物体を単一光源で照明した場合, 表面の色度は拡散反射による色度座標と光源の色度座標を両端とする線分上を動く¹¹⁾。図 10 の結果から表示色は正確で, しかも不均質物体の光学的特徴を満たしていることがわかる。

6.2 金属色の生成

一般に屈折率や吸収係数が光学データとして公表されている金属は金, 銀, 鉛, 銅, アルミニウム程度で, フレネル式を直接利用することは限定される。また求めた分光反射率は, 研磨やスパッタリングで作った金属面の実測値よりもしばしば高くなることがあ

る。ここではフレネル式を近似の妥当性を調べるために用いた。

図 11 (a) は標準データとして作成した銅の分光反射率である。入射角と波長の関数として 3 次元的に描かれている。これは文献 27) に記載された屈折率と吸収率のデータを用いてフレネル式から得たものである。図 11 (b) (c) はこれに対して Cook-Torrance と Hall の方法を用いて近似した結果を示す。いずれの場合も, 入射角 $\theta=0$ のときの分光反射率 $F(0, \lambda)$ には図 11 (a) のフレネル式による値を用いた。Cook-

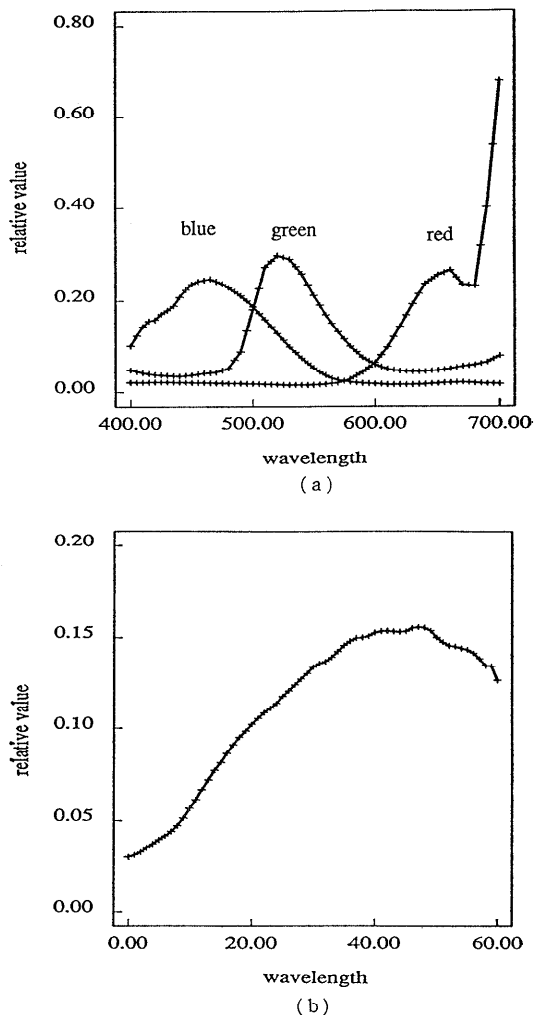


図 9 球の画像生成に用いた分光データ
(a) 物体表面の分光反射率, (b) 光源の分光分布
Fig. 9 Spectral data used for generating the sphere image.
(a) Spectral reflectance of object surfaces,
(b) Spectral distribution of light source.

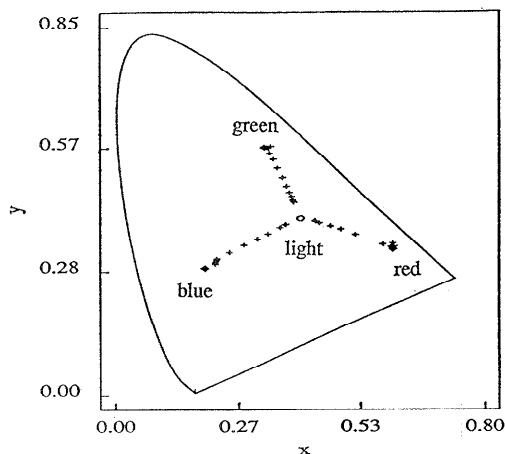


図 10 モニタを測色して得られた球の色度分布
(+: 測定値, ◆: 拡散物体色の色度,
○: 光源の色度)

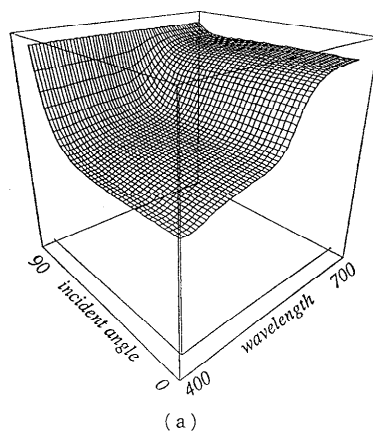
Fig. 10 Chromaticity distribution of the spheres obtained by measuring a monitor.

(+: measurement, ◆: chromaticity of diffuse object color, ○: chromaticity of light source.)

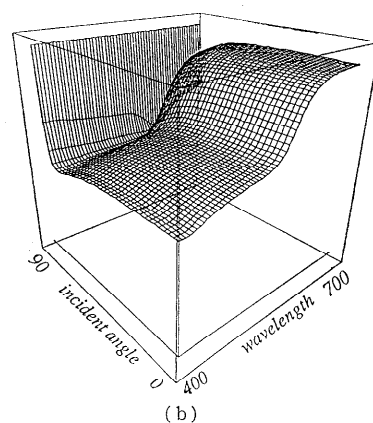
Torrance 法の結果において、入射角が 0° から 50° ぐらいまで反射率曲線はフレネル反射に適合しているが、 75° ぐらいに近づくと反射率が急激に低くなることからわかる。これに比べて Hall 法の結果では、近似は良好であるといえる。

次にこれらの 3 種類の分光反射率から作られる物体色について、その色度の変化を調べた。図 12 は、太陽光の照明下で銅を見たとき、その入射角 θ に応じて色度が変わる軌跡を xy 色度図上に拡大して示している。Hall 法による色度変化は直線的で、元のフレネルの軌跡をほぼ近似していることがわかる。これに対して Cook-Torrance 法の色度は部分的に大きくずれていることがわかる。筆者らは実測データに基づいて、銅の色度軌跡は光源の色度と垂直入射のときの色度を結ぶ線分で近似できることを明らかにした¹¹⁾。これは正しく Hall の軌跡を意味している。さらに図 13 はこの色差を視覚的に確認するために、レンダリングで生成した銅板の画像である。入射角は 80° で、各板の中心において入射角と視角が一致している。この入射角 80° において Cook-Torrance の銅色は他と違って赤味をおびていることがわかる。

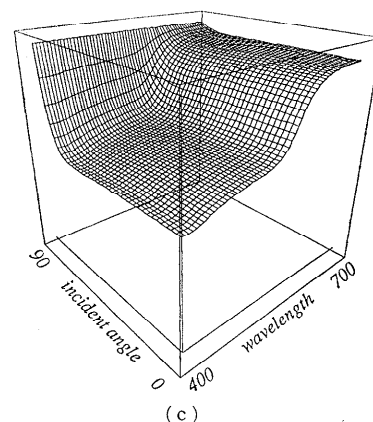
Cook-Torrance の近似法は金属を誘電体 ($k=0$) として近似させるところに無理があるといえる。他のいくつかの金属でも同様な結果が得られた。



(a)



(b)



(c)

図 11 銅の分光反射率

(a) フレネル式による反射率, (b) Cook-Torrance の方法による近似, (c) Hall の方法による近似

Fig. 11 Spectral reflectance of copper.

(a) Reflectance by the Fresnel equation, (b) Approximation by the Cook-Torrance method, (c) Approximation by the Hall method.

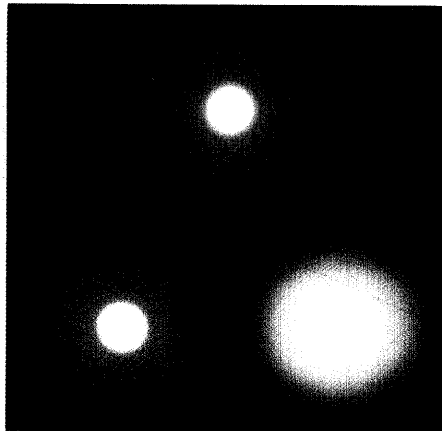


図 8 不均質物体の球の生成画像
Fig. 8 Generated image of spheres of an inhomogeneous material.

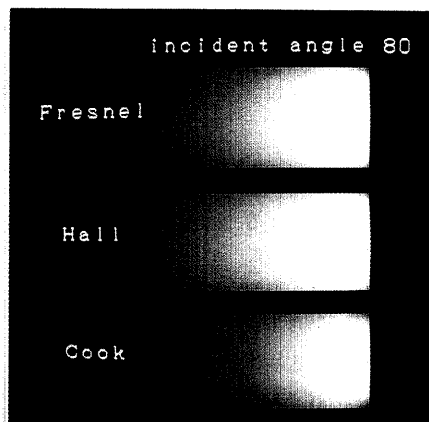


図 13 3種類の分光反射率を用いて生成した銅板
Fig. 13 Copper plates produced using three spectral reflectances.

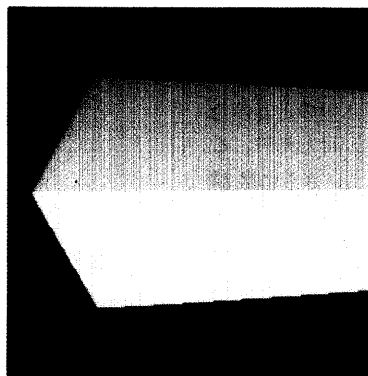


図 15 拡散相互反射を含む接合2表面の生成画像
Fig. 15 Generated image of joined two surfaces with mutual reflection by the diffuse component.

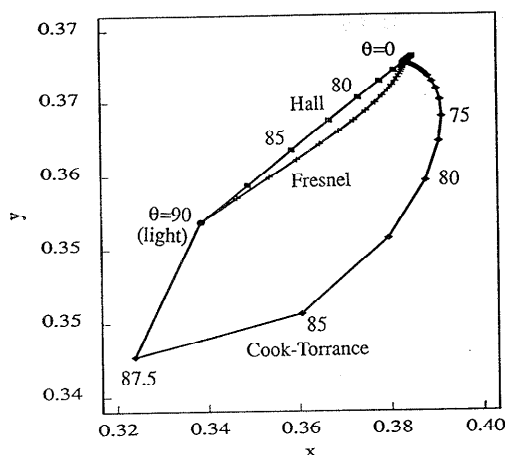


図 12 太陽光の下で入射角を変動させたときの銅の色度軌跡

Fig. 12 Chromaticity loci of copper by changing the incident angle under sunlight.

さて、金属物体をモニタ上に生成し、これを測色することによって総合的な評価を行った。金属面は鋭い鏡面反射を含み、輝度のダイナミックレンジは非常に広い。このため R, G, B 各 255 レベルの範囲で球や曲面の色を表現することはできない。そこで図 13 のような銅板を入射角を変えて別々に生成し、平行光線で均一に照明させた。そして輝度値を適当に調整してモニタのダイナミックレンジ内で表示できるようにし、モニタを計測して色度を調べた。

図 14 は垂直入射のフレネル反射率を実測データで置き換えて、Hall の方法で生成した銅板の色度軌跡を示している。菱形は垂直入射のときの正しい色度座標を表し、円は太陽光源の色度である。十字は銅板への入射角を 2.5° おきに変えてモニタを測色した色度座標を表す。入射角 0° 付近で誤差が見られるが、軌跡は直線的で良好な表示性能が得られている。

6.3 拡散相互反射色の生成

図 7 のような接合した 2 表面間で拡散的な相互反射をする映像を生成した。図 15 に (9) 式に基づいてレイトレーシング法で作成した 2 表面の一部を示す。上面は本来青緑の物体色をもち、下面は黄の物体色を持つ。ただし $w=20$, $\gamma=30^\circ$ に設定し、また光源は太陽光とした。各面固有の物体色に比べて、拡散相互反射による色変動は弱く写真からその影響を見出しにくい。図 16 はこのときのモニタを直接測色して得られた接合 2 表面の色度分布を示している。図 15 の 2 面を鉛直方向に測定して xy 色度を求めた。図 16 の色

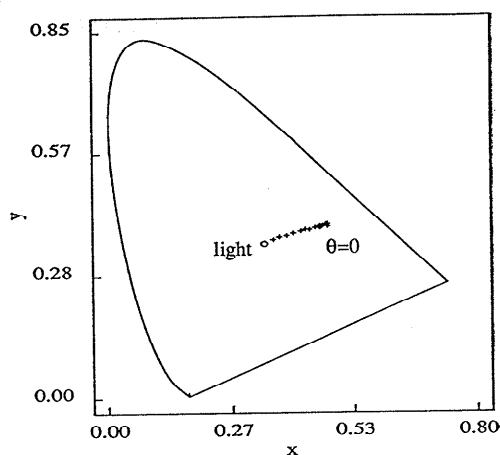


図 14 モニタを測色して得られた銅板の色度軌跡 (◆: 垂直入射の色度, ○: 光源の色度, +: 測定値)

Fig. 14 Chromaticity loci of a copper plate obtained by measuring a monitor. (◆: chromaticity at vertical incidence, ○: chromaticity of light source, +: measurement.)

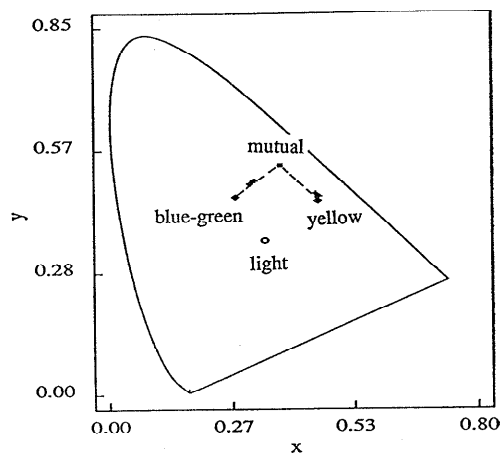


図 16 モニタを測色して得られた接合 2 表面の色度分布 (◆: 各面固有の色度, ■: 相互反射成分の色度, +: 測定値)

Fig. 16 Chromaticity distribution of the joined two surfaces which was obtained by measuring the displayed colors on a monitor. (◆: chromaticity inherent to each object, ○: chromaticity of mutual reflection component, +: measurement.)

度図で菱形が青緑と黄の物体色を表し、黒四角が拡散分光反射率の積 $S_0^s(\lambda)S_0^p(\lambda)$ による純粋な相互反射のみの色度点を表す。そして十字は実測値である。生

成した各面の色度は物体色と相互反射色を結ぶ線分上にほぼ存在する。観測対象の点が接合点に近くなるにつれて、すなわち ρ が小さくなるにつれて、相互反射の影響は増大する。このとき色度は純粹相互反射色の方向に移動する。図より色度変化の特徴と表示色の信頼性がわかる。

7. おわりに

本論文では3次元空間における現実の物体色をカラーモニタ上にリアルに生成する方法を述べ、その精度を評価した。リアルな物体色生成には、(1)カラーモニタでの正確な色再現と、(2)3次元的な光反射の実現という2つの問題があった。まず前者については、カラーモニタの特性に基づいて色座標変換を決定し、さらにガンマ補正用ルックアップテーブルを工夫することによって色再現を行う簡便な方法を示した。

後者については、まず3次元的な光反射モデルを示した。Phong モデルはプラスチック、陶器、塗装された物体のように表面がなめらかな不均質物体の色を生成するのに利用できる。Torrance-Sparrow モデルは物理的により厳密で、金属色の生成まで可能である。金属のような均質物体の分光反射率は照明光の入射角に依存して変動し、しかも光学データが未知の場合が多い。そこでフレネル反射率を効率よく計算する方法について検討した。結果として、よく知られた Cook-Torrance の方法は誤差が多いことが明らかになり、むしろ Hall の方法のほうが優れていることが判明した。さらに拡散反射物体間で相互反射の影響を含んだ物体色の生成法を述べた。接合2平面について光反射モデルを提示した。

3次元物体のレンダリングにはレイトラッキング法を用い、輝度の計算はすべて分光的に行った。物体色生成に最も重要な材料の光学的データは拡散反射と鏡面反射の分光反射率である。金属の場合は垂直入射の分光反射率と屈折率、吸収係数があれば、任意の入射角に対する分光反射率は補間により推定できる。また屈折率、吸収係数も Hall の方法で推定可能である。

評価実験では、実際のデータを用いて3種類の場合について物体の映像をカラーモニタ上に生成した。これまで生成した3次元物体の色がどの程度現実を反映しているかは人間の視覚に訴えることが多く、カラーモニタを測色して評価することはほとんどなかった。本論文での実験はカラーモニタの特性も考慮に入れた物体色生成システムの総合的な評価である。不均質物

体色、金属色、拡散相互反射色のいずれについても、生成した物体色は信頼性が高く、物体の光学的特徴も満たしていることがわかった。

本論文では、反射光による物体色のみを取り扱った。光源色や透過色の3次元的な生成とその評価は今後の課題である。

参考文献

- 1) 富永昌治: CRT 上への物体色のリアルな表示 (解説), 光学, Vol. 21, pp. 10-15 (1992).
- 2) Sproson, W. N.: *Colour Science in Television and Display Systems*, Adam Hilger, Bristol, England (1983).
- 3) Cowan, W. B.: An Inexpensive Scheme for Calibration of a Colour Monitor in Terms of CIE Standard Coordinates, *Comput. Gr.*, Vol. 17, pp. 315-321 (1983).
- 4) 田島譲二: カラー画像表示アルゴリズム, 情報処理, Vol. 27, pp. 11-20 (1986).
- 5) 中前栄八郎, 西田友是: 3次元コンピュータグラフィックス, 昭晃堂 (1986).
- 6) Watt, A.: *Fundamentals of Three-dimensional Computer Graphics*, Addison-Wesley, Wokingham, England (1989).
- 7) Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K. and Hughes, J. F.: *Computer Graphics: Principles and Practice*, 2nd ed., Addison-Wesley, Reading, MA (1990).
- 8) Klinker, G. J., Shafer, S. A. and Kanade, T.: The Measurement of Highlights in Color Images, *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 2, pp. 7-32 (1988).
- 9) Lee, H. C., Breneman, E. J. and Schulte, C.: Modeling Light Reflection for Computer Color Vision, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 12, pp. 402-409 (1990).
- 10) Tominaga, S. and Wandell, B. A.: The Standard Surface Reflectance Model and Illuminant Estimation, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 6, pp. 576-584 (1989).
- 11) 富永昌治, 大橋伸一郎: 物体のカラー反射モデル, 情報処理学会論文誌, Vol. 33, pp. 37-45 (1992).
- 12) 鈴木信雄, 横井茂樹, 烏脇純一郎: コンピュータ・グラフィックスにおける色計算法の検討と干渉色表示への応用, 電子情報通信学会パターン認識と理解研究会資料, PRU 88-130, pp. 41-48 (1989).
- 13) Phong, B. T.: Illumination for Computer-generated Pictures, *Comm. ACM*, Vol. 18, pp. 311-317 (1975).
- 14) Torrance, K. E. and Sparrow, E. M.: Theory for Off-specular Reflection from Roughened

- Surfaces, *J. of OSA*, Vol. 57, pp. 1105-1114 (1967).
- 15) Blinn, J. F.: Model of Light Reflection for Computer Synthesized Picture, *Comput. Gr.*, Vol. 11, pp. 192-198 (1977).
- 16) Cook, R. L. and Torrance, K. E.: A Reflection Model for Computer Graphics, *Comput. Gr.*, Vol. 15, pp. 307-315 (1981).
- 17) Cook, R. L.: Stochastic Sampling in Computer Graphics, *ACM Trans. Graphics*, Vol. 5, pp. 51-72 (1986).
- 18) Goral, C. M., Torrance, K. E., Greenberg, D. P. and Battaile, B.: Modeling the Interaction of Light between Diffuse Surfaces, *Comput. Gr.*, Vol. 18, pp. 213-222 (1984).
- 19) Nishita, T. and Nakamae, E.: Continuous Tone Representation of Three-dimensional Objects Taking Account of Shadows and Inter-reflection, *Comput. Gr.*, Vol. 19, pp. 23-30 (1985).
- 20) Funt, B. V., Drew, M. S. and Ho, J.: Color Constancy from Mutual Reflection, *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 6, pp. 5-24 (1991).
- 21) Takagi, A., Takaoka, H., Oshima, T. and Ogata, Y.: Accurate Rendering Technique Based on Colorimetric Conception, *Comput. Gr.*, Vol. 24, pp. 263-272 (1990).
- 22) Born, M. and Wolf, E.: *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford (1983).
- 23) Healey, G.: Using Color for Geometry-insensitive Segmentation, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 6, pp. 920-937 (1989).
- 24) Hall, R.: *Illumination and Color in Computer Generate Imagery*, Springer-Verlag (1989).
- 25) Ditchburn, R. W.: *Light*, Academic Press, London (1976).
- 26) Tominaga, S. and Wandell, B. A.: Component Estimation of Surface Spectral Reflectance, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 7, pp. 312-317 (1990).
- 27) Palik, D. (ed.): *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, London (1985).

(平成4年1月22日受付)

(平成4年11月12日採録)

富永 昌治 (正会員)



昭和22年生。昭和45年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。昭和50年同大学院博士課程修了。工学博士。電総研大阪支所を経て、昭和51年大阪電気通信大学講師。昭和61年教授。昭和62年より1年間スタンフォード大学心理学科客員教授。色彩情報処理、コンピュータカラービジョン、画像処理などの研究に従事。計算視覚や色覚に興味をもつ。電子情報通信学会、計測自動制御学会、日本色彩学会、テレビジョン学会、IEEE、OSA等各会員。