

透明物体表示のための改良光線追跡法 (2)[†]

安田 孝美^{**} 横井 茂樹^{**}
鶴岡 信治^{***} 三宅 康二^{***}

現実感のある透明物体を表示するのに、従来 T. Whitted が光線追跡法 (Ray Tracing Algorithm) を考案しているが、物体境界面での光の反射率および屈折率を一定値に定めているため、十分満足な透明質感を表現することはできなかった。われわれはこの方法にフレネルの反射法則に基づく反射率および透過率を導入した改良光線追跡法を考案し、より現実感のある画像を得ている。本文では、この改良光線追跡法を拡張し、色のついた透明物体の表示方法について述べる。本来、光が透明物体中を通過するとき、物体固有の光エネルギースペクトルの吸収を受け、その吸収が波長により異なるために、透過光は入射光と異なる色として感知する。われわれはこのスペクトル吸収を R, G, B 3 成分で簡略化し、現実感のある色のついた透明物体の表示を得ることができた。

1. はじめに

透明な物体を表示する場合、光の反射とともに、透過・屈折効果を表現する必要がある。これらの効果を表現するのに T. Whitted が光線追跡法 (Ray Tracing Algorithm) を考案しているが、彼の方法では光線追跡における物体表面上での光の反射率および透過率を適当な一定値としたため、光の反射量および透過量が物体表面全体で一様となり、十分に満足できる透明質感を表現することはできなかった¹⁾。

われわれはこの欠点を補うための改良光線追跡法を考案し、透明物体表示において、よりリアリティの高い表示画像を得ている²⁾。この改良光線追跡法は以下に示す二つの特色をもつ。

(1) フレネルの反射法則に基づく反射率および透過率を導入する。

(2) 光線追跡のための木構造の生成過程と輝度計算過程とを同時に行う。これにより木の無駄な節点を記憶する必要がなく、また木が完成してからボトムアップして輝度計算をしなくてすむので、計算時間および記憶容量を軽減できる。

ところで、上述のモデルは無色の透明物体を表示するためのものであった。色のついた透明物体を表示するには、本来、入射光のスペクトル (分光強度) と波

長に依存する物体固有の吸収係数を考慮しなければならない。そのようなモデルの一つを R. Hall らが提案しているが、彼らの方法では光線のスペクトルデータおよび各物体の反射係数、吸収係数のスペクトルデータを必要とし、データ量および計算量が大きくなりすぎる点が問題である³⁾。これに対しわれわれは、R, G, B 3 成分値に対する吸収係数を考えることにより、われわれが先に開発した無色の透明物体表示のための改良光線追跡法をその計算量、データ量を大きく増加させることなく拡張し、色のついた透明物体を表示する方法を開発した。

2. 改良光線追跡法

Whitted による光線追跡法では、透明物体表面上の任意の 1 点からある方向に出てくる光の強度 I は次式で与えられる。

$$I = I_a + \alpha \sum_{j=1}^l (N \cdot L_j) + \beta S + \gamma T \quad (1)$$

ただし、

I_a : 背景光による反射光

α : (拡散) 反射係数

l : 光源の個数

N : 対象点での面の単位法線ベクトル

L_j : 対象点から光源 j への単位方向ベクトル

β : (鏡面) 反射係数 (一定値)

S : 正反射方向からの入射光強度

γ : 透過係数 (一定値)

T : 透過方向からの入射光強度

これに対してわれわれは、この Whitted のモデルに以下に示す二つの点を考慮し、改良モデルを提案し

[†] An Improved Ray Tracing Algorithm for Rendering Transparent Objects (2) by TAKAMI YASUDA, SHIGEKI YOKOI (Department of Information Science, Faculty of Engineering, Nagoya University), SHINJI TSURUOKA and YASUJI MIYAKE (Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Mie University).

^{**} 名古屋大学工学部情報工学科

^{***} 三重大学工学部電子工学科

た。

(1) 純粋な透明物体では拡散反射 (内部反射) は起こらない。

(2) 物体表面上での反射率および透過率は、物体を構成する物質の屈折率と光の入射角とで決定される (フレネルの反射法則)。

上記(1)より, Whitted のモデル(式(1))の背景光からの反射光である第1項および, 拡散反射光である第2項を省くことができる。さらに(2)より, Whitted のモデルでは一定値としていた反射率および透過率 β, γ をフレネルの反射法則に基づく値とする。

これらの点を考慮してわれわれが先に開発した改良光線追跡法では, 透明物体表面上の任意の1点からある方向に出てくる光の強度 I を次式で与える。

$$I = \beta S + \gamma T \tag{2}$$

ただし,

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{C_i - n C_r}{C_i + n C_r} \right)^2 + \left(\frac{n C_i - C_r}{n C_i + C_r} \right)^2 \right\} \tag{3}$$

$$\gamma = 1 - \beta \tag{4}$$

$C_i = \cos \theta$ (θ : 入射角)

$C_r = \cos \varphi$ (φ : 屈折角)

n : 屈折率 (透過媒質の入射媒質に対する屈折率)

S, T は式(1)のものと同じ。

式(2)を用いて光線追跡を行うが, 光線追跡による輝度計算は, Whitted の場合と同様に, 視点から実際に光の進む方向とは逆に光の木構造を生成, 追跡することにより実行される。

3. 改良光線追跡法の拡張

ここでは, 色のついた透明物体を表示するために, 改良光線追跡法をさらに拡張した方法について述べる。

3.1 透明物体のスペクトル吸収

Whitted のモデルを利用して色をつけることを考えると, 第2項成分 (拡散反射) により色をつけることが考えられるが, 透明物体の場合には拡散反射 (内部反射) は起こらないので, これは便宜的な方法にすぎない。

物理的に考えると⁴⁾, 光が透明物体中を通過するとき, 物体固有の光エネルギースペクトルの吸収を受け, それが波長により異なるため, 入射光の色とは異なった色の光が出てくることにより色がついて見える。すなわち, 透明物体が光に対して一種のカラーフィルタの効果をもつためである。このスペクトル吸収

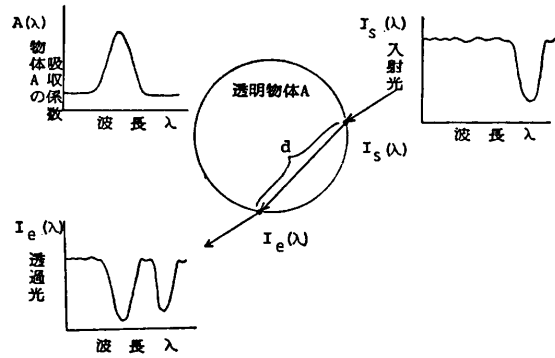


図1 スペクトル吸収
Fig. 1 Spectrum absorption.

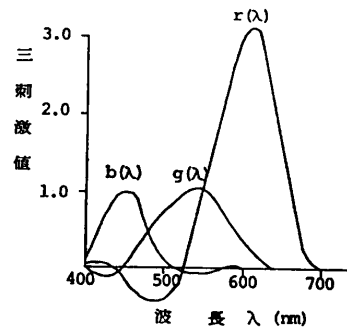


図2 等色関数
Fig. 2 Color matching functions.

は次のように表される。

物体に入射する光はあるスペクトルをもつ。この光が物体中を通過するときの光路を考え, その光路の始点と終点でのスペクトルを $I_s(\lambda), I_e(\lambda)$ (λ : 波長) とする。また, 物体のスペクトル吸収係数を $A(\lambda)$ とする。ここで光路の長さを d とすれば, 終点でのスペクトルは次式で与えられる。

$$I_e(\lambda) = e^{-A(\lambda)d} I_s(\lambda) \tag{5}$$

ここで $e^{-A(\lambda)d}$ は入射光 $I_s(\lambda)$ が物体中を透過する割合を示している (図1)。

この光線が適当な経路をたどって視点に達したときのスペクトルを $P(\lambda)$ とすると, 人間は R (赤) 成分, G (緑) 成分, B (青) 成分におのおの感度をもつ3種の視細胞によって光の色を感知する。この各細胞の刺激値 (感度値) は図2に示す重み関数 $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ を入射光のスペクトルに掛けて積分することによって得られる。すなわち, 各細胞の刺激値 R, G, B は以下のように求められる⁴⁾。

$$R = \int r(\lambda) P(\lambda) d\lambda \tag{6}$$

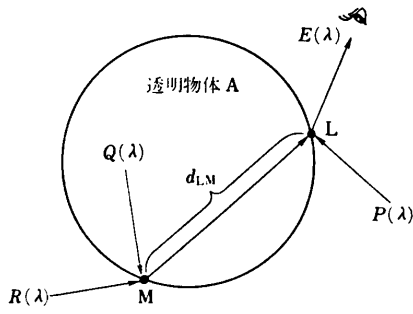


図3 簡略化スペクトル吸収モデルのための説明図
Fig. 3 Illustration of the simplified spectrum absorption model.

$$G = \int g(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

$$B = \int b(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

したがって、この R, G, B の値を3成分値として各画面に与えればよいことになる。

この式(5)~(8)を直接用いて光線追跡法を構成することも考えられ、R. Hall らはそのような方法を試みている³⁾。しかし、この場合は入射光のスペクトルデータおよび各物体の反射率、吸収率のスペクトルデータが必要となり、データ量、計算量とも相当大きなものとなる。また、スペクトルデータを与える作業も大変である。そこでわれわれは、 R, G, B 3成分値を用いてスペクトル吸収効果を簡略化して表現する方法を考案した。

3.2 簡略化スペクトル吸収モデルによる光線追跡法

いま図3に示すように、光線 $P(\lambda), Q(\lambda), R(\lambda)$ が各光路をたどって視点に光線 $E(\lambda)$ として入射するとすれば、 $E(\lambda)$ は $P(\lambda), Q(\lambda), R(\lambda)$ を用いて次式のように表される。

$$E(\lambda) = \beta_L P(\lambda) + (1 - \beta_L) e^{-A(\lambda)d_{LM}} \{ \beta_M Q(\lambda) + (1 - \beta_M) R(\lambda) \} \quad (9)$$

ただし、

β_L, β_M : 点LおよびMでの反射率(式(3)による)*

d_{LM} : LM間の距離

ここで、人間が感知する光線 $E(\lambda)$ のR成分は式(6)より次のように与えられる。

$$R = \int r(\lambda) E(\lambda) d\lambda$$

* 厳密には反射率は波長 λ に依存して変化するが、その変化はそれほど大きくないので、ここでは一定値として扱う。

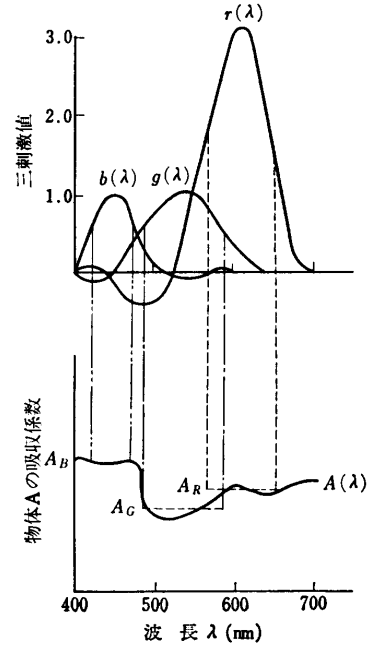


図4 スペクトル吸収モデルの簡略化
Fig. 4 Simplification of spectrum absorption model.

$$\begin{aligned} &= \beta_L \int r(\lambda) P(\lambda) d\lambda \\ &+ (1 - \beta_L) \beta_M \int e^{-A(\lambda)d_{LM}} r(\lambda) Q(\lambda) d\lambda \\ &+ (1 - \beta_L)(1 - \beta_M) \int e^{-A(\lambda)d_{LM}} r(\lambda) R(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (10)$$

ところで、図3の透明物体Aの吸収係数 $A(\lambda)$ が図4のように与えられているとし、等色関数 $r(\lambda)$ が比較的大きい値をとる波長領域に注目し、その領域内で吸収係数 $A(\lambda)$ が一定値 A_R により近似できると仮定する (A_R としては、その波長領域の $A(\lambda)$ の平均値を用いる)*。すると式(10)は以下のように表される。

$$\begin{aligned} R &\approx \beta_L \int r(\lambda) P(\lambda) d\lambda \\ &+ (1 - \beta_L) \beta_M e^{-A_R d_{LM}} \int r(\lambda) Q(\lambda) d\lambda \\ &+ (1 - \beta_L)(1 - \beta_M) e^{-A_R d_{LM}} \int r(\lambda) R(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)において、三つの積分は各光線 $P(\lambda), Q(\lambda), R(\lambda)$ を直接人間が見たときのR成分の刺激値を表しており、この刺激値をおのおの R_P, R_Q, R_R とすれば、

* この仮定は、 $A(\lambda)$ が波長 λ に依存して比較的滑らかな変化をするときに成り立つと考えられる。

$$R \approx \beta_L R_P + (1 - \beta_L) \beta_M e^{-Ard_{LM}} R_Q + (1 - \beta_L)(1 - \beta_M) e^{-Ard_{LM}} R_R \quad (12)$$

となる。したがって R はそれぞれの刺激値のみを用いて表現できることになる。

G, B 成分についても同様に考え、図4において等色関数 $g(\lambda), b(\lambda)$ の値が比較的大きい波長領域における $A(\lambda)$ の平均値 A_G, A_B を用いて吸収係数 $A(\lambda)$ を G, B 成分についておのこの $A(\lambda) \approx A_G, A(\lambda) \approx A_B$ と仮定することにする。

また式(12)と同様に、各光線 $P(\lambda), Q(\lambda), R(\lambda)$ を直接見たときの G 成分の刺激値をおのこの G_P, G_Q, G_R とし、 B 成分の刺激値をおのこの B_P, B_Q, B_R とすれば、

$$G \approx \beta_L G_P + (1 - \beta_L) \beta_M e^{-A_G d_{LM}} G_Q + (1 - \beta_L)(1 - \beta_M) e^{-A_G d_{LM}} G_R \quad (13)$$

$$B \approx \beta_L B_P + (1 - \beta_L) \beta_M e^{-A_B d_{LM}} B_Q + (1 - \beta_L)(1 - \beta_M) e^{-A_B d_{LM}} B_R \quad (14)$$

となる。

したがって、物体によるスペクトル吸収の効果をスペクトルデータを与えて求めるのではなく、式(12), (13), (14)のように R, G, B の3成分に分けて簡略化して表現することができる。

このように、3成分値における吸収を考えたとき光線追跡木は次のように導かれる。

図5に示すように視点へ物体表面上のある点Pから入射する光線 I_1 は、点Pに正反射方向から入射する光線 I_2 と屈折方向から入射する光線 I_3' とを加えたものである。すなわち、

$$I_1 = \beta_P I_2 + (1 - \beta_P) I_3' \quad (15)$$

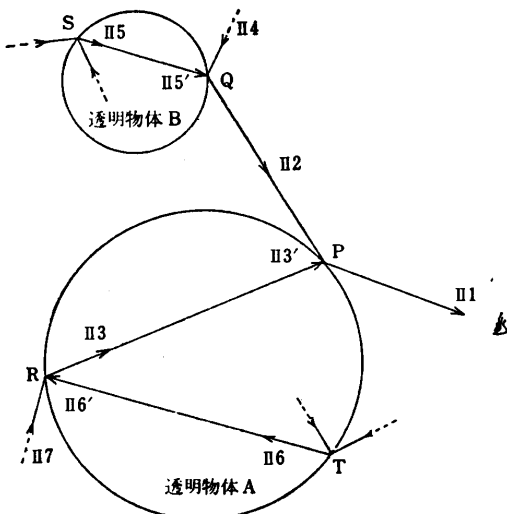


図5 光線の追跡

Fig. 5 Tracing a ray from a view point.

ただし、

$$I_n = \begin{pmatrix} R_n \\ G_n \\ B_n \end{pmatrix} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

β_P : 点Pでの反射率 (式(3)による)

さらに、 I_2 は点Qにおいて I_1 と同様に、正反射方向、屈折方向から入射する光線 I_4, I_5' より次式で与えられる。

$$I_2 = \beta_Q I_4 + (1 - \beta_Q) I_5' \quad (16)$$

ただし、 β_Q : 点Qでの反射率

また、 I_3 も I_6', I_7 より次式で与えられる。

$$I_3 = \beta_R I_6' + (1 - \beta_R) I_7 \quad (17)$$

ただし、 β_R : 点Rでの反射率

ここで、 I_3' は点Rからの光線 I_3 が物体中を通過するため、 I_3 の3成分値が吸収によって減衰している。したがって、 I_3' はP, R間の距離を d_{PR} とすれば、次のように求められる。

$$I_3' = \begin{pmatrix} R_3' \\ G_3' \\ B_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-A_R d_{PR}} R_3 \\ e^{-A_G d_{PR}} G_3 \\ e^{-A_B d_{PR}} B_3 \end{pmatrix} = \tau(A, d_{PR}) \otimes I_3 \quad (18)$$

ただし、 A_R, A_G, A_B は透明物体Aの3成分の吸収係数

$$\tau(A, d) = \begin{pmatrix} e^{-A_R d} \\ e^{-A_G d} \\ e^{-A_B d} \end{pmatrix}$$

記号 \otimes は成分ごとの掛算を表すものとする。

同様に I_5', I_6' も次式で与えられる。

$$I_5' = \begin{pmatrix} e^{-B_R d_{QS}} R_5 \\ e^{-B_G d_{QS}} G_5 \\ e^{-B_B d_{QS}} B_5 \end{pmatrix} = \tau(B, d_{QS}) \otimes I_5 \quad (19)$$

$$I_6' = \begin{pmatrix} e^{-A_R d_{RT}} R_6 \\ e^{-A_G d_{RT}} G_6 \\ e^{-A_B d_{RT}} B_6 \end{pmatrix} = \tau(A, d_{RT}) \otimes I_6 \quad (20)$$

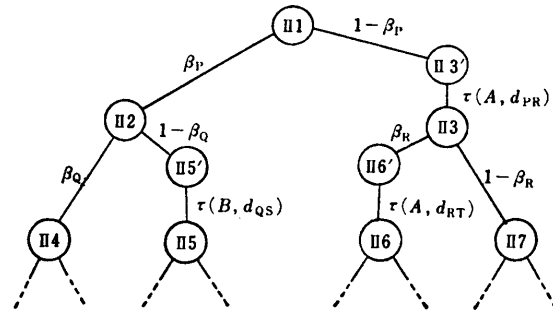


図6 光線追跡木

Fig. 6 Tree expression of ray tracing.

ただし, B_R, B_G, B_B は透明物体 B の 3 成分の吸収係数

このように光線追跡は従来の反射および屈折に加え, 物体中でのスペクトル吸収を考慮したものとなる. 以上の過程は図 6 のように光線追跡木で表現される.

ところで, 式(16)~(20)を式(15)に代入すると,

$$\begin{aligned}
 \mathbf{I}_1 &= \begin{pmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{pmatrix} \\
 &= \beta_P \beta_Q \mathbf{I}_4 \\
 &\quad + \beta_P (1 - \beta_Q) \tau(B, d_{QS}) \otimes \mathbf{I}_5 \\
 &\quad + (1 - \beta_P) \beta_R \tau(A, d_{PR}) \\
 &\quad \otimes \tau(A, d_{RT}) \otimes \mathbf{I}_6 \\
 &\quad + (1 - \beta_P)(1 - \beta_R) \tau(A, d_{PR}) \otimes \mathbf{I}_7
 \end{aligned} \tag{21}$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 \tau(A, d) &= \begin{pmatrix} e^{-Ard} \\ e^{-Acd} \\ e^{-Abd} \end{pmatrix}, \\
 \tau(B, d) &= \begin{pmatrix} e^{-Brd} \\ e^{-Bcd} \\ e^{-Bbd} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

となる. ここで, $\mathbf{I}_4, \mathbf{I}_5, \mathbf{I}_6, \mathbf{I}_7$ の各係数はそれぞれの光線 $\mathbf{I}_4, \mathbf{I}_5, \mathbf{I}_6, \mathbf{I}_7$ が視点に達するまでの 3 成分のおおの減衰の割合を示しており, これを積算減衰率ベクトルと呼ぶ. 前回の光線追跡法と異なって, 積算減衰率が 3 成分をもつベクトル量になる.

式(21)に基づけば, 積算減衰率ベクトルは各光線が 2 分岐するごとに反射率, 透過率あるいは吸収係数を掛けて更新していけばよいことがわかる. したがって, 光線追跡を行いながら (3 成分値の) 積算減衰率ベクトルを計算していき, この 3 成分の値の最大値があらかじめ定めた十分小さい値以下になったとき, それ以降の光線が視点の輝度にあまり寄与しないとして, その光線以降の追跡を終了する. この拡張された場合においても, Whitted の方法のように完成した木構造を再びボトムアップにより計算する必要はなく, 葉の部分の光線にそれぞれの積算減衰率ベクトルの各成分を

掛けて加えることにより視点の輝度が計算される.

以上の考え方を踏まえて, 拡張された改良光線追跡法の具体的な計算は次のようになる.

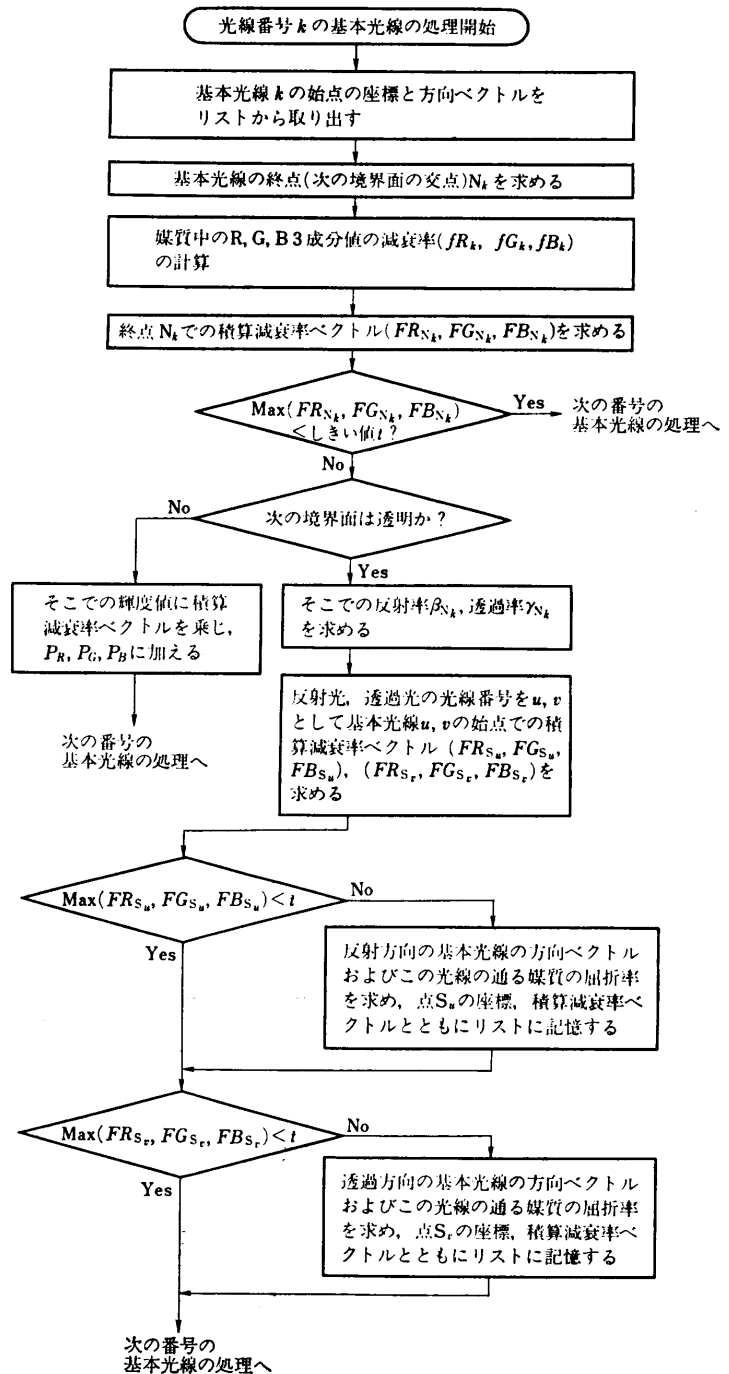


図 7 簡略化スペクトル吸収モデルによる光線追跡アルゴリズムの流れ図
 Fig. 7 The flow of the improved ray tracing algorithm based upon the simplified spectrum absorption model.

3.3 3成分値の吸収を考慮した拡張改良光線追跡アルゴリズム

視点に投影画面上の1点(画素)Pを通して入射する光線を考える。まず、Pでの輝度値を表す変数 P_R, P_G, P_B に初期値0を与える。この光線を逆にたどり、最初に交わる境界面が不透明物体の場合、その交点での輝度を計算し、 P_R, P_G, P_B に記憶して、次の画素の処理に移る。以下、追跡される光線上で、境界面(または視点)から次の境界面までの一本の直線線分で表される部分を単位と考え、これを基本光線と呼ぶ。透明物体の場合、画素から最初の境界面までの基本光線の光線番号を1とする。以下、境界面から次の境界面までの基本光線に順次光線番号を与えていく。各基本光線の始点の座標、方向ベクトル、基本光線の通る媒質の屈折率および始点での積算減衰率ベクトルを記憶する表1のようなリストを用意しておき、このリスト中に必要な情報を書き込んだり読み出したりしながら光線追跡計算を行う。

最初に交わる境界面が透明物体の場合、図7の処理

表1 基本光線のリスト構造
Table 1 List structure of elementary rays.

| 光線番号 | 1 | 2 | 3 | ... | k | ... |
|-------------|----------|------------|------------|-----|------------|-----|
| 始点の座標 | S_{1x} | S_{2x} | S_{3x} | ... | S_{kx} | ... |
| | S_{1y} | S_{2y} | S_{3y} | ... | S_{ky} | ... |
| | S_{1z} | S_{2z} | S_{3z} | ... | S_{kz} | ... |
| 方向ベクトル | D_{1x} | D_{2x} | D_{3x} | ... | D_{kx} | ... |
| | D_{1y} | D_{2y} | D_{3y} | ... | D_{ky} | ... |
| | D_{1z} | D_{2z} | D_{3z} | ... | D_{kz} | ... |
| 光線の通る媒質の屈折率 | n_1 | n_2 | n_3 | ... | n_k | ... |
| 3成分値の積算減衰率 | 1 | FR_{S_2} | FR_{S_3} | ... | FR_{S_k} | ... |
| | 1 | FG_{S_2} | FG_{S_3} | ... | FG_{S_k} | ... |
| | 1 | FB_{S_2} | FB_{S_3} | ... | FB_{S_k} | ... |

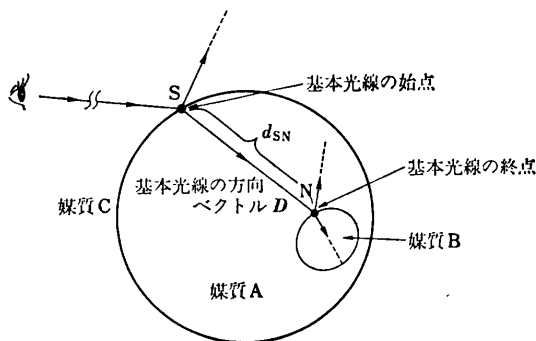


図8 基本光線の構成要素
Fig. 8 Attributes of an elementary ray.

手順に従って実行される。

最初に視点位置を光線番号1の始点とし、その基本光線の方向ベクトル、およびそれが通る媒質の屈折率をリスト中の光線番号1のところに書き込み、さらに積算減衰率ベクトルとして3成分に1を与えるとす。以下、 $k=1, 2, 3, \dots$ の順に以下の処理を適用する。

まず、リストから番号kの基本光線の始点Sの座標(S_{kx}, S_{ky}, S_{kz})および方向ベクトル(D_{kx}, D_{ky}, D_{kz})を取り出し、終点Nの座標を求める(図8)。正確には以下のN, S, f_R 等にはすべて添字kが付くが、記号の簡単のため、kを省略することがある。さらに、SN間の距離 d_{SN} を求め、媒質A中のR, G, B3成分値の減衰率ベクトル(f_R, f_G, f_B)を以下のように求める。

$$\begin{pmatrix} f_R \\ f_G \\ f_B \end{pmatrix} = \tau(A, d_{SN}) = \begin{pmatrix} e^{-A_R d_{SN}} \\ e^{-A_G d_{SN}} \\ e^{-A_B d_{SN}} \end{pmatrix}$$

(ただし、 A_R, A_G, A_B はあらかじめ与えられている)

次に、始点Sでの積算減衰率ベクトル(FR_S, FG_S, FB_S)に(f_R, f_G, f_B)を乗じて、終点Nでの積算減衰率ベクトル(FR_N, FG_N, FB_N)を求める。すなわち、

$$\begin{aligned} FR_N &= FR_S \cdot f_R \\ FG_N &= FG_S \cdot f_G \\ FB_N &= FB_S \cdot f_B \end{aligned}$$

ここで、終点での積算減衰率ベクトルの3成分の最大値がしきい値t以下のとき、これ以降の基本光線が視点の輝度にあまり寄与しないとして追跡を終了し、次の基本光線(kを1増加させた基本光線)の処理に移る。tより大きいとき、終点Nでの境界面で隣接する物体を調べ、これが不透明物体であれば、その点での輝度を計算し、積算減衰率ベクトル(FR_N, FG_N, FB_N)を乗じて P_R, P_G, P_B に加えて追跡を終了し、次の基本光線の処理に移る。透明物体であれば、点Nでの反射率 β_N 、透過率 γ_N を式(3),(4)より求める。反射方向の基本光線、透過方向の基本光線の光線番号として未使用の番号 $u, v (=u+1)$ を与える。この各基本光線の始点 S_u, S_v (実際には点Nと一致)での積算減衰率ベクトルを次のように求める。

$$\begin{aligned} FR_{S_u} &= FR_N \cdot \beta_N & FR_{S_v} &= FR_N \cdot \gamma_N \\ FG_{S_u} &= FG_N \cdot \beta_N & FG_{S_v} &= FG_N \cdot \gamma_N \\ FB_{S_u} &= FB_N \cdot \beta_N & FB_{S_v} &= FB_N \cdot \gamma_N \end{aligned}$$

ここで、反射方向の基本光線 u の積算減衰率ベクトルの3成分の最大値が t より大きいとき、リストの光線番号 u の欄に始点の座標として点 N の座標、方向ベクトルとして反射方向ベクトル、さらに基本光線 u の通過する媒質の屈折率および点 S_u での積算減衰率ベクトル (FRS_u, FGS_u, FBS_u) を記憶する。積算減衰率ベクトルの3成分の最大値が t 以下のときは何もしな

い。透過方向の基本光線についても同様の処理を行い、次の基本光線の処理に移る。

k を増加させたとき、リストに記憶されている基本光線がなくなったなら、その画素での光線追跡を終了し、求められた P_R, P_G, P_B をこの画素の陰影値とし、次の画素の処理に移る。

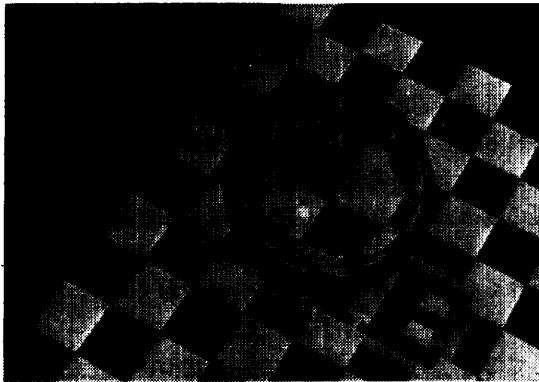
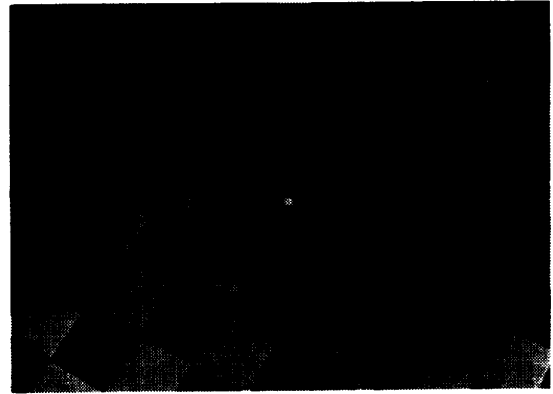
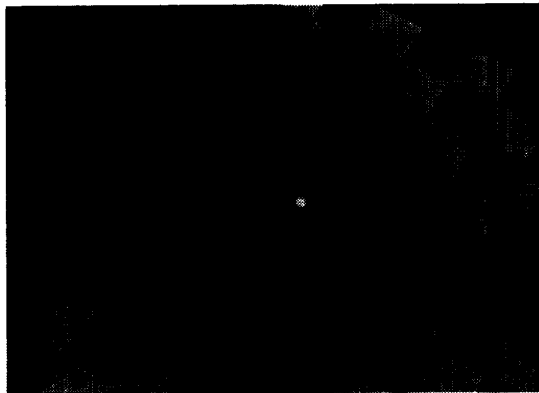
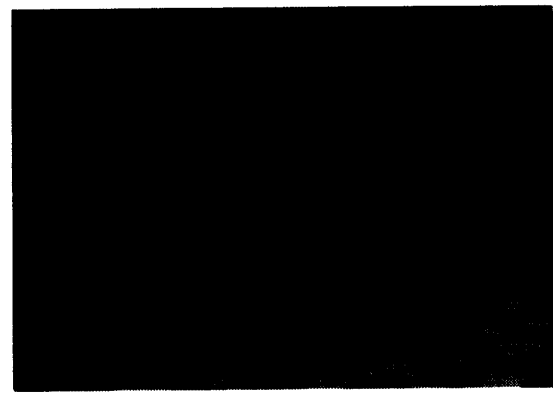
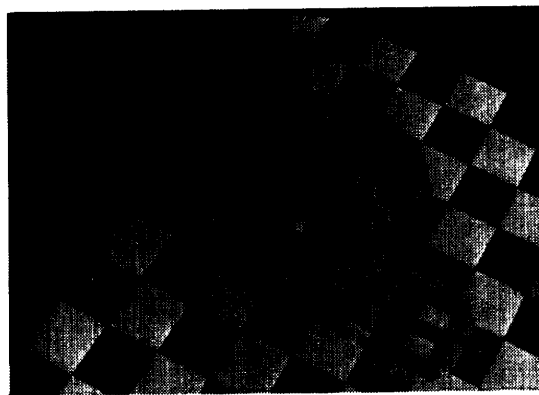
(a) $A_R=0, A_G=0, A_B=0.02$ (d) $A_R=0, A_G=0.08, A_B=0$ (b) $A_R=0.04, A_G=0.04, A_B=0$ (e) $A_R=0.02, A_G=0, A_B=0$ (c) $A_R=0, A_G=0.02, A_B=0$

図 9 本方法による色のついた透明なガラス球の表示例 ($n=1.52, t=0.01$)

Fig. 9 Examples of colored transparent glass spheres displayed by the algorithm presented here.

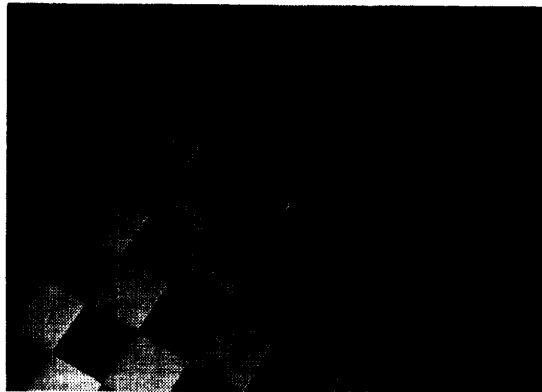
4. 表示例および考察

本方法を用いたさまざまな色のついた透明なガラス球の表示例を図9に示す。また、減衰係数の3成分値を等しくとって、吸収のあるガラス球の表示例を図10に示す。

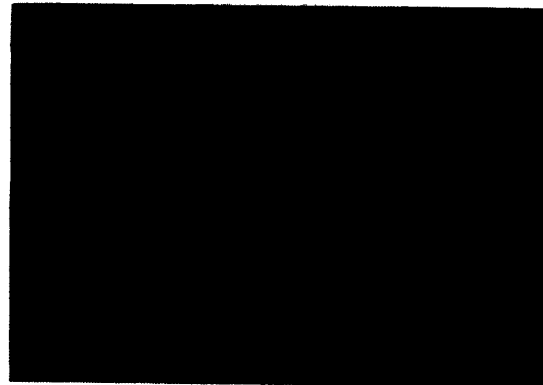
光路長による光の減衰効果の差を見るため、楔形の透明物体の表示を行った(図11)。図から明らかなように、傾斜している面に注目すると、光路長の長い所ほど光の減衰量が大きいため暗くなっていることがわかる。これは球の表示例においても確認でき、図9, 10では球の中心部ほど暗くなっている。なお、本文で用いた計算機はミニコンのOKITAC SYSTEM 50/40で、図9の表示時間は約17分であった。

ここで、積算減衰率ベクトルのしきい値の変化による計算時間および探索ノード数への影響の評価を行った。図9において、積算減衰率ベクトルに対するしきい値を0.01~0.20の範囲で変化させたとき、視点と画素を結ぶ直線が透明物体と交わる画素すべてについ

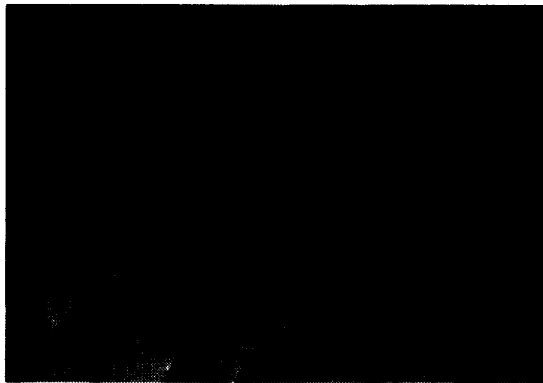
て、追跡した基本光線が最も多い画素の探索ノード(光線)数(最大基本光線数)、および追跡した基本光線数の総和を追跡した画素数で割った平均基本光線数、さらに全体の計算時間を図12に示す。積算減衰率は通過光路の各減衰率の積として表されるので、木の深さに対して指数関数的に減少する。また、この場合、探索される基本光線数は木の深さの約2倍となる。したがって、探索される基本光線数はしきい値に対して対数関数的に減少すると考えられる。また、1本の基本光線の処理にはほぼ一定の計算を要することから、計算時間は平均基本光線数にほぼ比例すると考えられる。したがって、しきい値をかなり小さくとってにおいてもよいと考えられる。また、光源の輝度値は一般の物体よりかなり高く設定するのが普通であり、設定した光源の輝度値に積算減衰率をかけたものが十分小さくなるようなしきい値を定めておくべきであろう。ただし、本考察は図9のような簡単なシーンに対してであり、一般の複雑なシーンについては未検討である。



(a) $A_R = A_G = A_B = 0.01$



(c) $A_R = A_G = A_B = 0.04$



(b) $A_R = A_G = A_B = 0.02$



(d) $A_R = A_G = A_B = 0.08$

図10 光吸収のあるガラス球の表示例

Fig. 10 Examples of displaying glass spheres with light absorption.

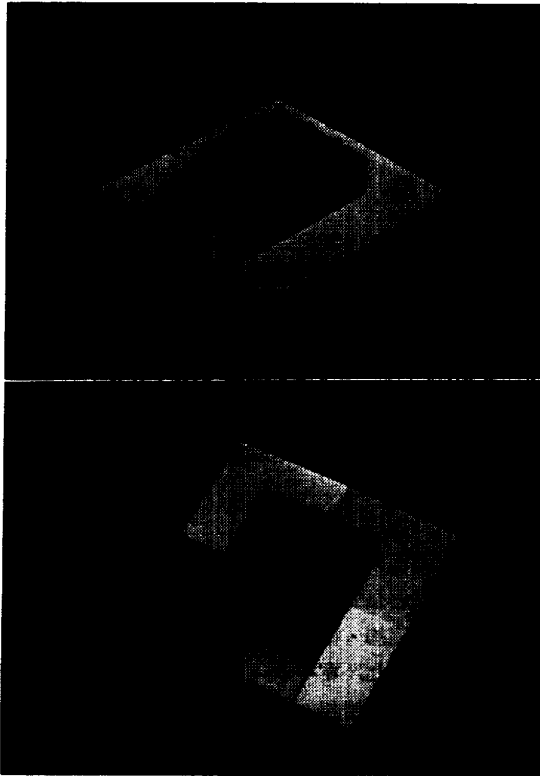


図 11 光路長による光の減衰効果の例

Fig. 11 Illustration of light attenuation effect depending on ray path length.

ところで、色のついた透明物体を表示するために、従来の改良光線追跡法を拡張したことによる計算時間の増加は図9の例で約7割である。一般的な場合には物体数が多いか、あるいは面の数が多い物体を扱うことになり、光線追跡で次の交点を求める計算はそれらの数(物体の数、面の数)に応じて増加すると考えられる。しかしながら、次の交点を求める計算は、3成分値を用いて拡張した場合も従来の場合とまったく同じになる。したがって、一般的なシーンの表示では、本文での拡張により増加する計算時間の割合は上記より相対的にはかなり少なくなると考えられる。

5. むすび

本文では改良光線追跡法を拡張し、透明物体中を通過する光線が吸収される割合を R, G, B 各成分について求め、色のついた透明物体を簡略化して表示する方法について述べ、その表示例を示した。本方法はスペクトルデータを用いずに色のついた透明物体、吸収効果をもつ透明物体を表示できるため実用性は高いと

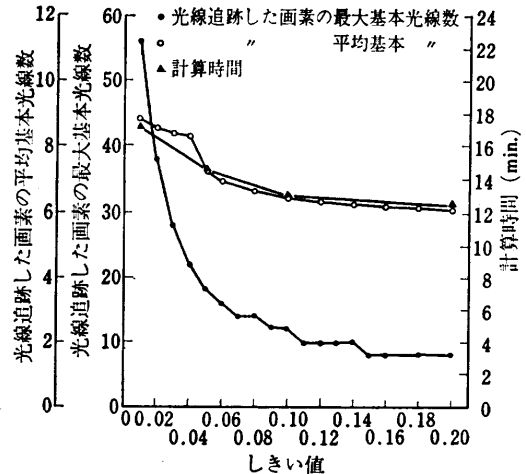


図 12 計算時間および探索ノード数に対するしきい値の影響

Fig. 12 Dependence of computation time and numbers of traced nodes on the threshold level.

考えられる。本方法は、メモリ容量、計算時間ともに比較的小さいが、入射光および物体の吸収係数のスペクトル・データを3成分で近似しているため、実際の色とは異なる場合がありうる。今後、本文で述べたような近似のための条件が成立しないときに他の近似法を考察することも必要であろう。また、より一般的なシーンにも対処していくために、光線追跡計算の高速化の工夫が必要と考えられる。

謝辞 本研究に関し日頃、有益なご助言をいただく名古屋大学福村教授、鳥脇教授、ならびに三重大学木村助教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Whitted, T.: An Improved Illumination Model for Shaded Display, *Comm. ACM*, Vol. 23, No. 6, pp. 343-349 (1980).
- 2) 安田他: 透明物体表示のための改良光線追跡法, 情報処理学会論文誌, Vol. 25, No. 6, pp. 953-959 (1984).
- 3) Hall, R. A. and Greenberg, D. P.: A Testbed for Realistic Image Synthesis, *IEEE Comput. Gr. Appl.*, Vol. 3, No. 8, pp. 10-20 (1983).
- 4) 日本色彩学会(編): 色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, 東京 (1980).
- 5) 久保田: 応用光学, 岩波全書, 東京 (1962).
- 6) 石黒: 光学, 共立全書, 東京 (1969).

(昭和59年5月25日受付)

(昭和59年12月20日採録)