

## 画像生成のための物体表面のボリュームモデリング

### Volume Modeling of Object Surface for Image Rendering

田中法博\*

Norihiro Tanaka

本稿は、複雑な構造を持つ物体表面を効率的に映像化するためにボリュームモデルを用いた映像化手法の一つを提案する。まず Torrance-Sparrow モデルを基に、ボリューム空間内の精密な光反射モデルの構築方法を述べる。ここでは、光反射を精密にモデル化することにより、照明、物体、観測の様々な幾何条件に対しても精密な映像再現を可能にする。

次に、ボリューム空間の幾何的なモデリング方法を述べる。ここではボリューム空間に階層構造を持たせ、少い記憶容量で複雑な表面構造を表現する方法を述べる。最後にボリュームモデルを用いて CG 映像を生成し、視覚的に手法の妥当性を確認する。映像化の対象は動物の毛皮や密集して繁っている植物である。

#### 1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックス (CG) の映像品質は飛躍的に向上しており、映画やコンピュータゲームといった分野で高品質な CG 映像が用いられるようになってきた。

CG は、物体表面上の光反射とそれを観測する視覚系を数学的にモデル化し、そのモデルをコンピュータ上に実装することによって映像を生成する。そして、その映像品質はモデルの記述精度に依存する。

CG で使われるモデルは、次の2種類のモデルで構成されている。まず一つめは物体表面の光反射を数学的にモデル化する光反射モデルと呼ばれるもので、CG の分野では極めて重要な役割を果たしている。この光反射モデルは、光源、物体、観測の三者の幾何関係と物体表面の反射特性から記述される。次に二つめは、視覚系モデルと呼ばれるもので、光が視覚系に入射したときにどのような色に見えるかという光に対する感度特性や遠近感のような幾何的な特性から記述される<sup>1)</sup>。

この2つのモデルのうち映像品質に決定的な影響を与えるものは光反射モデルである。これまで光反射モデルは、その用途や対象となる物体の種類によって様々なものが提案されてきた<sup>2)~5)</sup>。

本来、光反射モデルの研究は、光学解析のような物理学研究を目的として行われており、これが CG の出現により映像表現や画像解析にも用いられるようになった<sup>6)7)</sup>。そして、光反射モデルは、様々な分野から注目されるようになり、モデル構築や光反射解析に関する研究の利用範囲は広がっていった<sup>8)~11)</sup>。

ここで物理学的な光反射モデルから画像生成・解析用の反射モデルへの研究の流れについて述べる。まず Torrance と Sparrow が提案した反射モデルは、幾何光学の分野で光反射を精密に記述した<sup>2)</sup>。このモデルは、Torrance-Sparrow モデルと呼ばれ、現在でも多くの反射モデルの基本型となっている。ただし、このモデルは光の波長成分のパラメータを含む詳細な物理モデルであり、また未知パラメータを多く含むため CG への応用には不向きであった。

\*産業社会学部助教授

そこで Phong は、実験から経験的に得られた単純な数学モデルで光反射を記述した<sup>3)</sup>。このモデルは、物理的に詳細ではないものの構造が簡便であり、比較的良好な近似を得ることができた。この利点から Phong モデルは、現在でも CG の分野では広く使われている。しかし、Phong モデルは様々な幾何条件において光反射の記述には限界があることも知られている<sup>12)</sup>。この問題点を解決し、また光反射をより詳細に記述するため Cook らや Blinn らが、Torrance-Sparrow モデルを基に CG 用の高精度な反射モデルを開発した<sup>4)5)</sup>。

さて、これまで述べてきた光反射モデルは CG の分野では広く使われているが、物体表面の滑らかで均質であることを仮定している。なぜなら、物体表面の内部構造を無視してポリゴンや自由曲面といった面で表現することができれば、処理速度やデータ量の点で有利になるからである。このように面で物体表面を記述するモデルは、一般的にサーフェイスモデルと呼ばれている。

しかしながら、このモデルでは、複雑な 3 次元の表面構造をもつ物体の表現は難しい。例えば、毛皮で覆われた動物や遠景から見た森林、その他にもオパールのような内部構造が不均質な宝石類等は、サーフェイスモデルで記述することは計算機の記憶容量や処理速度の点から現実的ではない。このような物体では、物体表面が明確でないため面の決定が難しくなり、また内部が不均質な材質でできているため、面では表現できる情報が限定されてしまう。

こういった問題に対して表面構造が複雑な物体の映像化には、物体表面を 3 次元的なボリューム空間でモデリングする手法が提案されている<sup>13)~16)</sup>。この方法は、物体表面の構造を 3 次元的に直接モデル化するため、複雑な 3 次元構造を持ち数学的にモデル化することが難しい物体表面に対してのモデリングに有効である。

ボリュームモデルを用いた研究として、Kajiya の物体表面に 3 次元拡張したテクスチャを張り付けるテクセルレンダリング<sup>13)</sup>をはじめ多数の研究が報告されている。また森林のように、より複雑な構造をもつものに対してもボリュームモデルが適用されている<sup>17)</sup>。

ただしボリュームモデルによる物体のモデル化

は、物体表面に 3 次元的な情報を与えなければならないためモデリングが難しく、自由度の高い効率的な手法はまだ確立していない。特にボリューム空間内のデータは、メモリの使用量が非常に多くなるという問題点があり、効率的なボリューム空間の管理手法が必要となる。また、ボリューム空間内の複雑な光反射を記述する反射モデルも必要とされている。

そこで本研究では、ボリュームモデルを用いた効率的な物体のモデル化手法を光反射モデルと幾何モデルの両面から提案する。

本稿ではまずボリューム空間内の光反射のモデリング手法を述べる。ここでは、Torrance-Sparrow モデルを基に、ボリューム空間内の光反射モデルの構築方法を述べる。Torrance-Sparrow モデルは、照明、物体、観測の様々な幾何条件に対して高い精度で光反射を記述していることが証明されている<sup>18)</sup>。次に、ボリューム空間の幾何的なモデリング方法を述べる。ここでは特にボリューム空間に階層構造を持たせ、少い記憶容量で複雑な表面構造を表現する方法を述べる。そして実際に、ボリュームモデルを用いて CG 映像を生成し、視覚的に手法の妥当性を確認する。

## 2. ボリュームモデル

### 2.1 ボリューム空間

ここではボリューム空間内のモデリング方法を述べる。ボリューム空間は、三次元空間  $[X, Y, Z]^1$  内の部分空間  $[x, y, z]^1$  として存在する。物体形状は、ボリューム空間内では仮想微粒子の密度分布として表現される<sup>19)</sup>。ボリューム空間の映像化は、図 1 のように視線探索法により行う。

### 2.2 ボリューム空間の実装

このときボリューム空間は、離散化し 3 次元配列で表現し、物体（仮想微粒子）の密度、表面反射特性情報を格納する。この 3 次元配列で表現されたボリューム空間をボリュームボックスと呼び、ボリュームボックス内に格納されたデータをボリュームデータと呼ぶ。

### 2.3 ボリューム空間内の輝度計算

ボリューム空間内では空間内部の仮想微粒子の

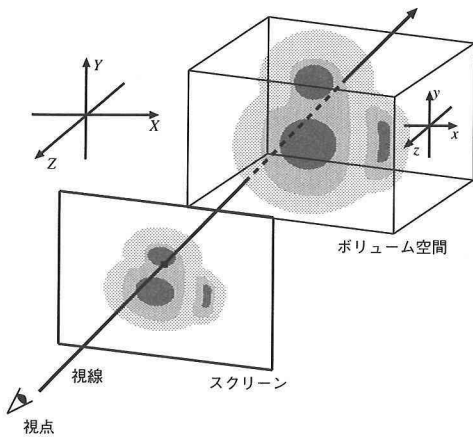


図1 視線探索法によるボリューム空間の映像化

密度に対して輝度計算を行う。この空間内部では、任意の点で密度  $\rho(x, y, z)$  が与えられている。この密度によって、光源からの光は減衰する。光線はそのボリューム空間内の経路  $s_1 \sim s_2$  において、経路に沿って各点の密度  $\rho(x, y, z)$  によって非線型に減衰させられる。このとき、光線の経路上のボリューム空間の透過率  $f$  は次式で与えられる。

$$f = \exp(-\tau \int_{s_1}^{s_2} \rho(x(s), y(s), z(s)) ds) \quad (1)$$

ここで  $\tau$  は、ボリューム空間内の密度による減衰係数である。

また、仮想微粒子からの反射光も視点に到達するまでに減衰させられるが、(1)式を用いて同様

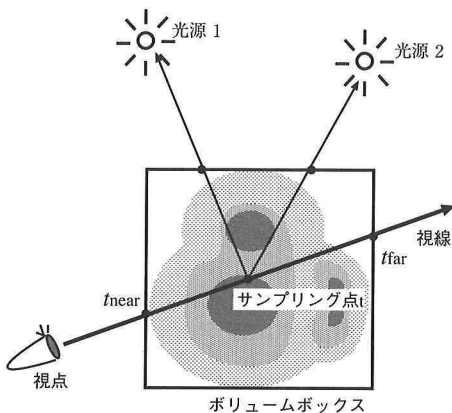


図2 ボリュームボックス内での輝度計算

に計算する。このためボリューム空間を通過して視点に到達する光の輝度  $I$  は次式のように求める。

$$I = \int_{t_{near}}^{t_{far}} [\exp(-\tau \int_{t_{near}}^t \rho(x(u), y(u), z(u)) du) \cdot I_t(x(t), y(t), z(t)) \cdot \rho(x(t), y(t), z(t))] dt \quad (2)$$

このとき(2)式は、次の3つの要素から成る。

まず、第1に視点から距離  $t$  までのボリューム空間の透過率  $f$  は、(1)式で計算する。第2に距離  $t$  の位置の輝度  $I_t$  であり、これについては光反射モデルの項で述べる。第3に距離  $t$  における空間の密度であり、 $\rho(x(t), y(t), z(t))$  として与えられる。

視点に到達する輝度  $I$  は、この3つの要素の積を、ボリューム空間内の視線路上  $t_{near} \sim t_{far}$  の全ての経路上に対して計算することにより求めることができる。視線が貫くボリューム空間の輝度値  $I$  が求められる。

また、(1)式、(2)式は、積分を含む式であるため計算機上への実装が難しいが、視線系路上を一定区間毎にサンプリングして離散化すると、(3)式、(4)式のように変形できる。

$$f = \exp(-\tau \sum_{s=s_1}^{s_2} \rho(x(s), y(s), z(s))) \quad (3)$$

$$I = \sum_{t=t_{near}}^{t_{far}} [\exp(-\tau \sum_{u=t_{near}}^t \rho(x(u), y(u), z(u))) \cdot I_t(x(t), y(t), z(t)) \cdot \rho(x(t), y(t), z(t))] \quad (4)$$

### 3. 光反射モデル

#### 3.1 ボリューム空間内の光反射モデル

ボリューム空間内の各点  $I_t$  上では、光反射モデルに基づいた輝度計算を行う。

ここでは密度空間は2色性反射の特性を持つと仮定する<sup>19)</sup>。2色性反射モデルは、次式のように拡散反射と鏡面反射の線形結合で表すことができる。

$$I_i(x) = w_d \mathbf{c}_b + w_s \mathbf{e} \quad (5)$$

ここで  $w_d$ ,  $w_s$  は、それぞれ拡散反射成分量、鏡面反射成分量となる。また  $\mathbf{c}_b$ ,  $\mathbf{e}$  は、それぞれ  $3 \times 1$  の拡散反射成分の色ベクトル、鏡面反射成分の色ベクトルである。

本論文では3次元光反射モデルとしてTorrance-Sparrowモデルを採用した。このモデルでは物体表面は、完全鏡面の微小面で構成されており、ハイライトの広がり、この微小面の向の分布であると仮定している。ここで位置パラメータ  $x$  に対して次のベクトルが与えられる。 $\mathbf{V}$  は視線ベクトル、 $\mathbf{Q}$  は微小鏡面の法線ベクトルで  $\mathbf{V}$  と  $\mathbf{L}$  の2等分ベクトルとして与えられ、さらに  $\varphi$  は  $\mathbf{N}$  と  $\mathbf{Q}$  のなす角であり、ハイライト位相角と呼ぶ。Torrance-Sparrowモデルに基づいて輝度値  $I_i$  を記述すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} I_i(x) &= w_d \mathbf{c}_b + w_s \mathbf{e} \\ &= \alpha \cos(\theta_i) \mathbf{c}_b + \\ &\quad \beta \frac{D(\varphi, \gamma) F(\theta_Q, n) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos(\theta_r)} \mathbf{e} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで右辺第1項と第2項は、それぞれ、拡散反射成分と鏡面反射成分を表わす。 $\alpha$  と  $\beta$  は、拡散反射成分、鏡面反射成分の重み係数である。

さらに第2項の鏡面反射成分はいくつかの関数から構成されている。まず、 $D$  は物体表面の表面粗さを示す関数で、 $\mathbf{Q}$  の方向を向く微小面の割合を表現する。この分布関数としてグローバルな法線  $\mathbf{N}$  を中心とする次式のガウス関数を仮定した。

$$D(\varphi, \gamma) = \exp\{-\ln(2)\varphi^2/\gamma^2\} \quad (7)$$

ここで  $\gamma$  は表面の粗さを表わす指標となる。次に、 $F$  はFresnel反射率である。本来、Fresnel反射率は、屈折率  $n(\lambda)$ 、吸収係数  $k(\lambda)$  といった波長関数をパラメータとして持つ関数であるが、本研究で仮定する不均質誘電体では、 $n(\lambda) = \text{const}$ 、 $k = 0$  とおくことができる。この場合、入射角  $\theta_Q$  と屈折率  $n$  の関数として次式のように記述できる<sup>4)</sup>。

$$F(\theta_Q, n) = \frac{1}{2} \frac{(g - \cos(\theta_Q))^2}{(g + \cos(\theta_Q))^2} \quad (8)$$

$$\left\{ 1 + \frac{[\cos(\theta_Q)(g + \cos(\theta_Q)) - 1]^2}{[\cos(\theta_Q)(g - \cos(\theta_Q)) + 1]^2} \right\}$$

ただし  $g^2 = n^2 + \cos(\theta_Q) - 1$  である。さらに、 $G$  は物体表面の微小面が互いを遮蔽する割合を決定する関数である。隣接する微小面は、互いに他をマスクしたり、光の当たらない陰ができると考えることができる。この遮蔽の割合は次式で示す。

$$\begin{aligned} G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) &= \\ \min \left\{ 1, \frac{2\cos\varphi \cdot \cos\theta_r}{\cos\theta_Q}, \frac{2\cos\varphi \cdot \cos\theta_l}{\cos\theta_Q} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4. 毛状物体への光反射モデルの拡張

ここでは、特に動物の毛皮等の表現のための毛状物体への反射モデルの拡張方法を述べる。

動物の毛の様に画素に対して非常に細い物体の映像化は通常の反射モデルでは困難である。なぜなら、このような物体の場合、物体の向である法線ベクトルが一つに定まらないためである。

毛状物体の映像化のためにKajiyaは、毛状物体の画像生成に微小線分モデルを導入した。本稿では、モデルの記述精度を向上させるために、KajiyaのモデルをTorrance-Sparrowモデルを基に改良する。

##### 4.1 拡散反射成分 $w_d$

図3は、毛状物体の拡散反射の幾何モデルを示したものである。ここでは法線ベクトル  $\mathbf{N}$  は、微小線分の接線ベクトル  $\mathbf{t}$  と光源方向ベクトル  $\mathbf{L}$  と同一平面上にあるものを用いる。このとき毛状物体への入射角  $\theta_i$  は次式で求まる。

$$\theta_i = \cos^{-1}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) \quad (10)$$

ここで求まった  $\theta_i$  を(7)式に代入する。

##### 4.2 鏡面反射成分 $w_s$

図3は、毛状物体の鏡面反射の幾何モデルを示

したものである。光源から入射した光は、図のように円錐状に鏡面反射する。この円錐の角度は、接線ベクトル  $\mathbf{t}$  と光源方向ベクトル  $\mathbf{L}$  のなす角  $\theta$  と同じになる。

(7)式の分布関数  $D$  を決定するためにハイライト位相角  $\varphi$  を次のように求める。ここではまず、接線ベクトル  $\mathbf{t}$  と光源方向ベクトル  $\mathbf{L}$  のなす角  $\theta$  を  $\theta = \cos^{-1}(-\mathbf{t} \cdot \mathbf{L})$  として求める。そしてこの  $\theta$  より位相角  $\varphi$  は次式のように求めることができる。

$$\varphi = \cos(\mathbf{t} \cdot \mathbf{V}) - \theta \tag{11}$$

### 5. ボリューム空間モデリングの拡張

ここでは効率的なボリューム空間を配置するための方法を提案する。これまでボリューム空間のモデリング技術に関してはいくつか提案されている<sup>16),21)</sup>。ここでは特に、モデリングの自由度の向上を目指した方法を述べる。

#### 5.1 ボリュームボックスの配置

ボリュームボックスは、1つの巨大な3次元配列で表現するより、小さな3次元配列を再利用しながら、組み合わせて使用した方が記憶領域の消費が少ないのは明らかである。しかし、複雑な表面構造をもった物体を表現する場合、物体表面上に小さなボリュームボックスを整列させて張り付けようとする、次のような問題点が生じる。

- ボリュームボックスの配置によっては規則的なパターンが発生
- 部分的に構造の異なる表面構造をもった物体の表現が困難

このため、本研究ではボリュームボックスとその配置方法が以下の条件を満足するようにし、後述する階層化に対応できるようにした。

- ボリュームボックスの重なりを許す。
- ボリュームボックスを完全な直方体として扱い、変形を行わなくてもよい。
- 個々のボリュームボックスの大きさは均一でなくてもよい。
- ボリュームボックスのX,Z軸方向の向きをそろえて配置しなくてもよい。

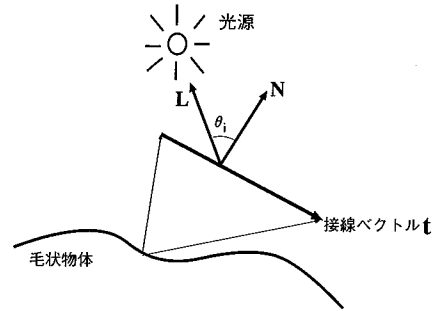


図3 毛状物体での拡散反射の幾何モデル

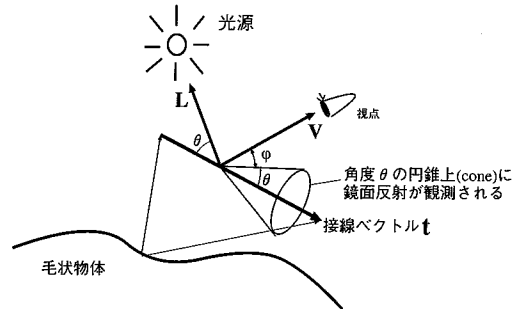


図4 毛状物体での鏡面反射の幾何モデル

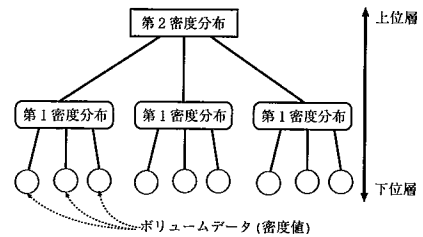


図5 密度分布の階層化

- ボリュームボックスのY軸方向の向きは規則的である。ただし完全に同一方向でなくてもよい。

#### 5.2 密度分布の階層化

単一のボリューム空間を使用するのではなく、階層化した複数のボリューム空間を使用する。低位の密度分布は、基本形状を表現し、高位の密度分布では低位の密度分布を組み合わせてより複雑な形状を生成する。本研究では、2階層で表現を行った。まず1つ目の密度分布は、ボリュームボックス内のボリュームデータによって表現される密度空間である。2つ目は物体の表面構造を表す密度空間である。本研究では、それぞれの密度分布を区別するため、前者を第1密度分布、後者を

第2密度分布と呼ぶ。第1、第2密度分布は図5のような階層構造をもち、第2密度分布は第1密度分布の上位層となる。

### 5.3 ポリウムボックスの重なり

本研究で使用したポリウムボックスは次のような性質を持つ。

- (1) ポリウムボックスの重なりを許せば、ポリウムボックスを完全な直方体として扱い、変形を行わなくてもよい。
- (2) ポリウムボックスの大きさはランダムである。
- (3) ポリウムボックスのX,Z軸方向の向きはランダムである。
- (4) ポリウムボックスのY軸方向の向きは規則的である。

このような特徴の画像を生成する場合、ポリウムボックス間の重なりを考慮しなければならない。

### 5.4 第1密度分布

ポリウムボックス内に密度分布を生成し、物体の基本形状を生成する。3次元配列を使用し、その要素にポリウムデータを格納する。ここでいうポリウムデータとは、密度値を含むポリウム空間の要素である。密度の他には、例えば、方向ベクトル、色情報等が含まれる。木や草の場合の密度分布の生成は、文献20)にある手法を簡略化したものを用いている。本研究では、植物や、毛等の形状をアルゴリズムで表現するために3次元拡張した再帰関数を用いて密度分布を生成した。

### 5.5 第2密度分布

第2密度分布を関数の形で表現したものを、本研究では第2密度分布関数と呼ぶ((12)式)。2次元の第2密度分布の例を図6に示す。

$$p = \rho_2(u, v) \quad (12)$$

$p$  : ポリウムボックスの存在確率  
(あるいは色情報)

$\rho_2$  : 第2密度分布関数

$u, v$  : 第2密度空間内の座標

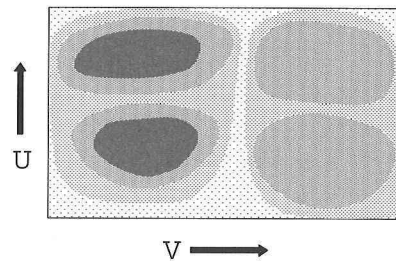


図6 第2密度分布の例

第2密度分布は、曲面等にマッピングして使用する。このマッピングされた密度分布により、ポリウムボックス(第1密度分布)の配置を以下の手順を用いて決定する。ここでの説明は簡単化のため2次元で表現している。

- (1) 第2密度空間に対して、ランダムサンプリングを行い、複数のサンプリング点 $(u, v)$ を選択する。その際、第2密度空間を小領域に分割し、それぞれの小領域に対して個別にサンプリングを行い、空間全体にサンプリング点が一様に広がるようにした。
- (2) 第2密度空間 $((u, v)$ 座標系)を球投影、平面投影等の投影法により曲面等にマッピングする。
- (3)  $(u, v)$ 地点の第2密度分布関数 $\rho_2(u, v)$ の値により、ポリウムボックスを $(u, v)$ が投影された地点に置くか否かを決定する。

密度分布を階層化することにより、規則的なパターンの発生を抑えることができる。しかし、このままでは部分的に異なる表面構造をもつ物体を表現するのは難しい。そこで、図7のようにポリウムボックスの種類毎に複数の第2密度分布を重ね合わせて使用する。これにより、部分的に異なる表面構造をもった物体の表現が可能になる。

一方、第2密度分布を色情報として用いることでテクスチャマッピングを行うことが可能になる。しかも、第2密度分布の多重化を利用することにより、テクスチャマッピング用の第2密度分布と、ポリウムボックスの配置用の第2密度分布の併用が可能となる。第2密度分布を使用したテクスチャマッピングの利点として、絨毯等に模様をマッピングした場合に、毛の幾何学的形状とは独立して、色の境界線を作ることができることなどがあげられる。

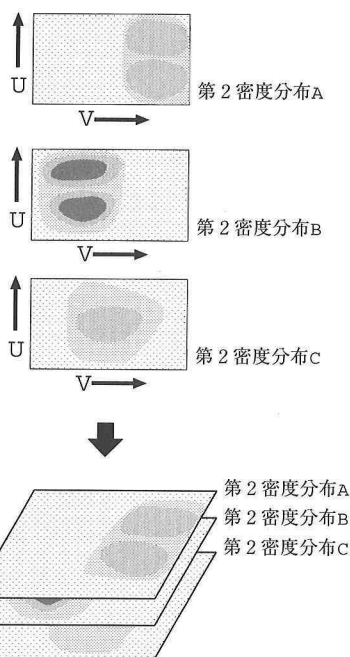


図7 複数の第2密度分布の重ね合わせ

## 6. 実験

本手法を用いて森林や毛皮といった物体の画像生成を行った。仮想空間内にボリュームボックスを配置し、光源は物体周囲に3つ配置した。それぞれの画像は640×480のサイズで生成した。

### 6.1 植物（森林）等の映像化

本手法を用いて植物の表現を行う。ここでは様々な植物が群生していると仮定し、森林や植物を画像生成した。

図8は、植物の群生のモデリングの概念図である。森林や草むらでは、地面の層と植物の層を別々に作成し、モデリングを行った。植物の大き

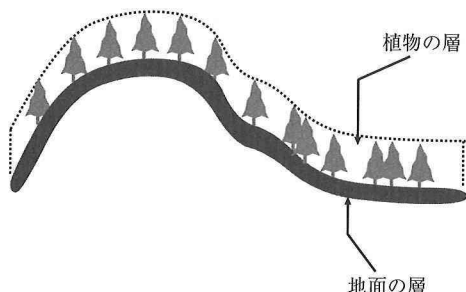


図8 植物の群生のモデリング例

かな分布は、手動で設定し、細かな森林配置は乱数を用いて自動的に行った。植物個々の形状は再帰関数により自動生成した。

図9、図10は、それぞれ森林と群生した植物の例である。ここでは共に地面の層の上に植物の層が存在し、再帰関数で自動生成した植物のボリュームボックスを配置している。

### 6.2 毛状物体の映像化

本研究で拡張した手法を用いて毛状物体の表現を行う。質、長さ、色等に部分的に変化をつける。毛皮の層は、手動で毛の分布や色を決定し、それを基にボリュームボックスは自動的に配置させた。毛の形状は、植物と同様に再帰関数で自動生成した。

Kajiya らの方法<sup>13)</sup>と比較して、部分的に性質が異なっていたり、模様がある毛状物体の表現が可能である。図11、図12は、それぞれ毛皮のコートとバスロープの画像生成例である。それぞれ色や毛の質感が部分的に異なる材質を用いている。

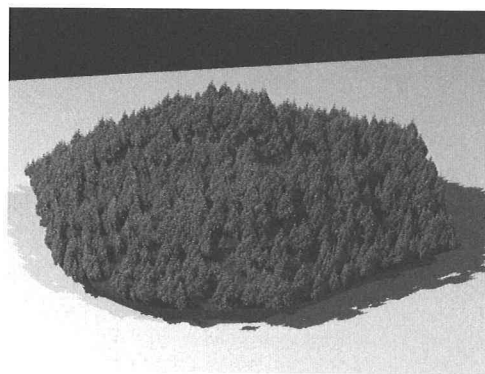


図9 画像生成例（森林）

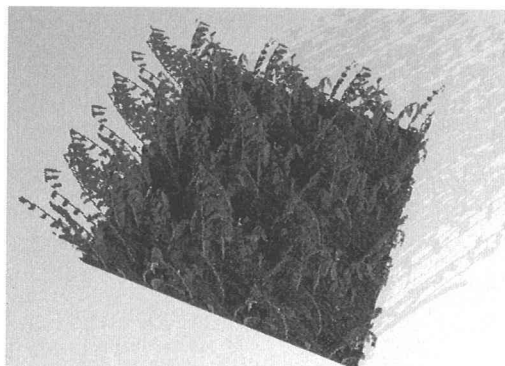


図10 画像生成例（植物）

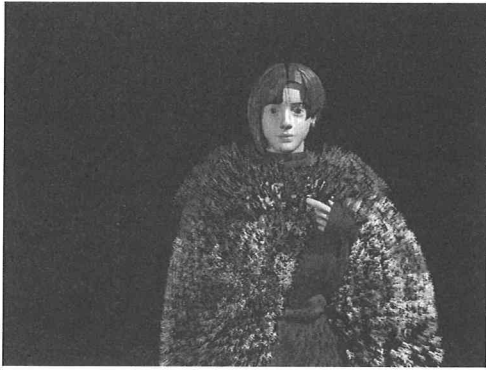


図11 画像生成例 (毛皮のコート)



図12 画像生成例 (バスローブ)

## 7. おわりに

本論文では、複雑な表面構造を持つ物体の映像化のためにボリュームモデルを用いた映像生成手法を述べた。特に本研究ではボリュームモデルを光反射モデルと幾何モデルの2つの点について改良した。まず光反射を物理的に詳細にモデル化するために、Torrance-Sparrowモデルを基に、ボリューム空間内の光反射モデルの構築方法を述べた。ここでは、まず通常の物体に対する反射モデルをTorrance-Sparrowモデルで記述した。さらにKajiyaの微小線分モデルをTorrance-Sparrowモデルで拡張する方法を述べた。この拡張により、複雑な表面構造を持つ物体に対しても照明、物体、観測の様々な幾何条件に対して高い精度で映像化が可能となる。

次に、ボリューム空間の幾何的なモデリング方法を述べた。ここではボリューム空間を構築するために必要なボリュームデータのモデリング方法

を述べた。さらにボリュームボックスに階層構造を持たせて、少い計算機記憶容量で複雑な表面構造を持った物体の表現方法を述べた。そして最後に、ボリュームモデルを用いて森林や毛状物体のCG映像を生成し、本手法の妥当性を視覚的に確認した。

## 参考文献

- 1) 徐剛, 辻三郎: 3次元空間ビジョン, 共立出版(1998).
- 2) K. E. Torrance and E. M. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *J. of Optical Society of America A*, Vol. 57, No. 9, pp. 1105 - 1114 (1967).
- 3) B. T. Phong: Illumination for computer generated pictures, *Comm. ACM*, Vol. 18, No. 6, pp. 311 - 317 (1975).
- 4) R. L. Cook and K. E. Torrance: A reflection model for computer graphics, *Computer Graphics*, Vol. 15, pp. 307 - 315 (1981).
- 5) J. F. Blinn: Model of light reflection for computer synthesized pictures, *Computer Graphics*, Vol. 11, No. 2, pp. 192 - 198 (1977).
- 6) S. A. Shafer, G. J. Klinker and T. Kanade: A physical approach to color image understanding, *SPIE Proceedings*, Vol. 1250, pp. 222 - 235 (1990).
- 7) H. C. Lee, E. J. Breneman and C. Schulte: Modeling light reflection for computer color vision, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 12, No. 4, pp. 402 - 409, (1990).
- 8) E. P. LaFortune, S. Foo, K. E. Torrance and D. P. Greenberg: Non-linear approximation of reflectance functions, *Proc. of SIGGRAPH 97*, pp. 117 - 126 (1997).
- 9) H. Haneishi, T. Iwanami, N. Tsumura, and Y. Miyake: Goniospectral imaging of 3D objects, *Proc. 6th Color Imaging Conf.*, pp. 173 - 176 (1998).
- 10) Y. Sato, M. D. Wheeler and K. Ikeuchi: Object shape and reflectance modeling from observation, *Proc. of SIGGRAPH 97*, pp. 379 - 387 (1997).
- 11) N. Tanaka, S. Tominaga and T. Kawai: A method for estimating parameters of a 3D spectral reflection model, *Proc. International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives*, pp. 127 - 130 (1999).
- 12) 田中法博, 富永昌治: 3次元反射モデルの解析と推定, 情報学論: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 41, No. SIG10 (CVIM1), pp. 1 - 11 (2000).
- 13) J. T. Kajiya and T. L. Kay: Rendering fur with three di-



- mensional textures, *ACM Computer Graphic*, Vol.23, No.3, pp.271 - 280 (1989).
- 14) 田中法博, 河合利幸: 階層的密度分布を用いたボリュームレンダリングと森林の表現, 電子情報通信学会技術報告, IE95 - 127, pp.47 - 53 (1996).
  - 15) 高木佐恵子, 藤代一成, 中嶋正之: 色えんぴつ画のボリュームモデリング, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.3, pp.1177 - 1187 (1999).
  - 16) 立野玲子, 山口裕美, 藤代一成, 東多恵子, 櫻庭均: Voxel Stuffing: 3方向の平行粗断像列を用いた高品質ボリューム補間, 画像電子学会論文誌, Vol.29, No.4, pp.292 - 301 (2000).
  - 17) 細川潤哉, 村岡一信, 千葉則茂: 3次元テクスチャによる森林景観のレンダリング法, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究報告, Vol.95, No.74, pp.29 - 34 (1995).
  - 18) N. Tanaka, S. Tominaga and T. kawai: Estimation of the Torrance-Sparrow reflection model from a single multi-band image, *Proc. 15th International Conference on Pattern Recognition*, Vol.3, pp.600 - 603 (2000).
  - 19) S. Tominaga: Surface reflectance estimation by the dichromatic model, *Color Research and Application*, Vol.21, No.2, pp.104 - 114 (1996).
  - 20) P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer: *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer Verlag (1990).
  - 21) 中村浩子, 竹島由里子, 藤代一成, 奥田洋司: 形状/色分布特徴を考慮した区間型ボリュームの半自動詳細度制御, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.5, pp.1115 - 1123 (2001).