

3次元テクスチャによる森林景観のレンダリング法

細川潤哉* 村岡一信** 千葉則茂*

*岩手大学工学部情報工学科 **盛岡短大

コンピュータ・グラフィックス(CG)による森林景観のビジュアルシミュレーションは、植生の生成、樹木の表現、季節の色彩変化の表現、大量の樹木のレンダリングなど困難な問題を多く含む挑戦的な課題である。

特に、投影像のサンプリングに基づく通常のレンダリング法では、森林の様な微細な表面構造をもつ物体の画像生成を行う場合、深刻なエイリアシングの問題が発生し、画質を低下させてしまうことがある。本論文では、まず樹木の3次元幾何モデルから3次元テクスチャ(ボリュームデータ)を生成し、次にその3次元テクスチャをポリゴン表現された山岳地表面に重なりを許して多数配置し、レイトレーシング法とボリュームレンダリング法を適用することにより遠景の森林景観のビジュアルシミュレーションを行う方法を提案する。

Rendering of Forest Scenery Using 3D Textures

Norishige Chiba*, Junya Hosokawa*, and Kazunobu Muraoka**

*Iwate University and **Morioka Junior College

Visual simulation of forest scenery is a challenging problem which includes the following tough sub-problems: generation of vegetation, representation of trees, simulation of color change of leaves, and rendering of numerous trees. Among those sub-problems, this paper treats the last one. A conventional polygon-based rendering algorithm often produces troublesome aliasing effects when it is applied to the objects having complex fine surfaces, such as forest scenery. In this paper, we show that an extended volume rendering technique applied to 3D textures, i.e. volume data in this paper, of trees is effective in the concerned problem. Kajiya left, as further work, the problem of rendering forest scenery by applying his 3D texture called texel. Our rendering method consists of the following three steps: we first generate 3D textures of trees from their polygon-based geometric models, we next arrange the 3D textures, allowing their possible mutual intersections, on the surface of a given polygon-based terrain model according to a simulated vegetation, and we finally produce an image of forest scenery by applying the ray-tracing algorithm including our slightly extended volume rendering technique.

1. はじめに

架空の山岳景観のシミュレーションに関して、これまで山岳地形の生成に関する研究は多数ある ([Fou82] [安居院86] [三沢87] [Anj88] [Kel88] [Mus89] [千葉87] [Chi91] など) が、森林などの山岳のテクスチャの表現に関するものは少ない。それでも、大きく分けると1/fノイズなどのフラクタル手法に基づくもの ([Gar84] [大野86] など) と、テクスチャを構成する物体 (多くは樹木) の3次元幾何モデルに基づくもの ([山名88] [斉藤93] [村岡93] など) に分類される。前者は遠景の簡便なシミュレーションには向くが、樹木の3次元形状を考慮していないため、森林の微細構造がつくる質感の表現はなされていない (実在の山岳についてよく用いられている航空写真のテクスチャマッピングによる森林景観の表現法 ([安居院86] [山名88] など多数) でも同様である)。山名らや斉藤らの方法では、森林の表面の微細構造がつくる質感を表現するため、膨大な数の樹木の幾何形状モデルを直接レンダリングしているためエイリアシングの問題は避けられない。そのため、森林の微細な柔らかな印象を得るためには、スーパーサンプリングを行うなどの対策が必要となる。筆者らは植生と葉の色彩変化を考慮し、樹木の3次元モデルを用いることで、単純なテクスチャマッピングでは得られない山岳の季節により認識される視覚的な森林モザイクを表現している [村岡93, Chi94b] (図1参照)。しかし、この画像生成法は、樹木の3次元モデルから2次元投影画像を生成し、それをモンタージュ手法により山岳景観に合成するというものであり、森林の表現において印象的な、樹木が他の樹木や地表面につくる影の表現に難点があるなど、厳密には3次元CGとは呼べない手法によっている。

一方、森林や毛皮の様な微細な表面構造をもつ物体の質感表現には、先に述べた物体の幾何モデルを直接レンダリングする方法と、テクセル (texel) [Kaj89] などのように表面構造の反射特性を3次元テクスチャによって表現する方法がある。3次元テクスチャは基本的には平滑化された

幾何形状の情報をもつため、エイリアシングが発生しにくいなどの特長を持つが、微細構造の幾何モデルを使うことなく、実際と酷似した反射特性を表すデータを直接生成することは容易ではなく、その応用例の報告は少ない [木元92] [木元93]。

本報告では、森林の微細な構造がつくる印象、例えば冬の枯木の群立や春や夏のこんもりした樹冠の印象を実現するために、樹木のポリウムデータ表現を3次元テクスチャとし、これを用いた森林景観のビジュアルシミュレーション法を提案する。

以下では、まず樹木の3次元幾何モデルから3次元テクスチャ (ポリウムデータ) を生成する方法を示し、次にその3次元テクスチャをポリゴン表現された山岳地表面に重なりを許して多数配置し、レイトレーシング法とポリウムレンダリング法を適用することにより遠景の森林景観のビジュアルシミュレーションを行う方法を提案する。

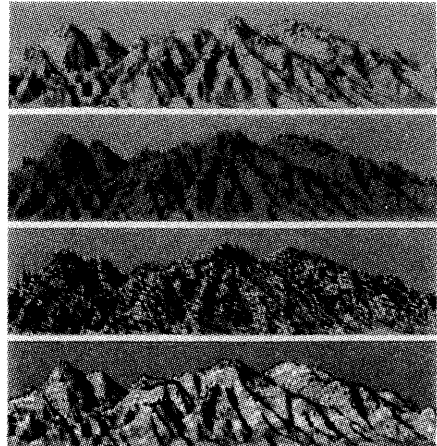


図1 モンタージュ手法による森林景観のシミュレーション例

2. 3次元テクスチャの生成法

3次元幾何モデルから3次元テクスチャであるスカラ空間 (密度分布) を生成するアルゴリズムを示す。

3次元テクスチャの生成 (図2参照) :

Step0: ポリゴン表現された樹木の3次元幾何モデルを用意する。

Step1: 樹木の3次元幾何モデルから,以下のよ
うに3次元テクスチャを生成する.

Step1-1: 求める3次元テクスチャより解像度
の高いボクセル(本論文では $256 \times 256 \times 256$)
を用意し, 樹木の3次元幾何モデルのスキ
ャン変換を求める.(これは,ボクセルの解像度で
放射されるそれぞれの平行なレイと樹木との交差
線分を求めることにより行っている.)

Step1-2: 3次元テクスチャの解像度(本論文で
は $32 \times 32 \times 32$)へ圧縮することにより平滑
化された密度分布を求める.

Step1-3: Step1-2で求めた密度分布により, 3
次元テクスチャの各セルでの法線を3次元Sobel
微分オペレータにより求める.

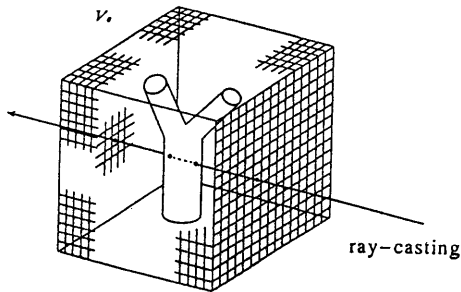


図2 3次元テクスチャの生成法

3. 3次元テクスチャのレンダリング

ここでは, まず1つの3次元テクスチャのレン
ダリング法についてまとめ, 次に, 複数個の重なり
をもつ3次元テクスチャのレンダリング法につ
いて述べる.

3.1 1つの3次元テクスチャのレンダリング

3次元テクスチャのレンダリングはボリューム
レンダリング[Bli82][Kaj84]とほぼ同様の方法
であり, 基本的には平滑化された幾何形状の密度
分布をボリュームデータとして与え, その密度分
布を用いて幾何形状の反射, 散乱の計算を行う方
法である. すなわち, 以下に示す2つの仮定によ
り計算される.

(1) 視線上の各点 t の微小面(密度分布から定義
される面)が視線方向へ反射する光は累積される.

(2) 光源からの光が点 t に到達するまで, または
点 t の反射光が視点に到達するまでの間に, それら
の光量は密度分布により減衰される.

この仮定に基づき, 視点に到達する光の強さ B
は次式で表すことができる(図3参照).

$$B = \sum_{t=t_{near}}^{t_{far}} \left\{ \exp\left(-\gamma \sum_{s=t_{near}}^t \rho(s)\right) \cdot I_r(t) \right\} \quad (1)$$

ここで, t_{near} , t_{far} はそれぞれの視線が3次元テ
クスチャへ突入した点と脱出した点である. t, s は
視線上の点, ρ は密度, γ はボクセルの密度の和
を光の減衰係数に変換する係数である. また, I_r
(t)は t での視線方向への反射光の強さである. 一
般に, t に関する総和は, 減衰係数

$$-\gamma \sum_{s=t_{near}}^t \rho(s)$$

がある閾値以上となるとところで打ち切ることが
できる.

点 t への光源からの入射光の強さ $I(t)$ は,

$$I(t) = I_0 \cdot \exp\left(-\gamma \sum_{r=t}^{L_{in}} \rho(r)\right) \quad (2)$$

ここで, I_0 は光源の光の強さであり, L_{in} は光源か
らの光線が3次元テクスチャに突入する点であ
る. r は光線上の点である.

(1), (2)式に現れる Σ の計算は光線を一連の
線分に分割し, それぞれの線分において1点をラン
ダムに選択し, その標本の期待値を計算すると
いう手法(モンテカルロ法)を使ってこれらの和
を近似する. また, 選択した点の密度, 法線は近
傍ボクセルの値から3次元線形補間により求め
る.

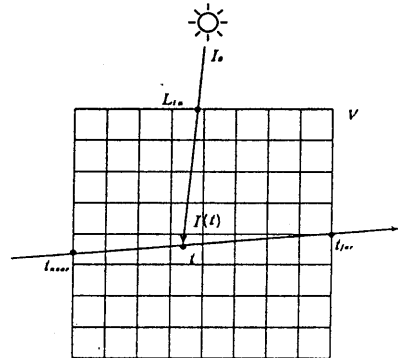


図3 ボリュームレンダリング

シェーディングは、LambertおよびPhongのモデルを用い、 I_r を次式のように定義する。

$$I_r(t) = \rho(t) \{ I(t) \cdot (k_d \cdot \cos \theta + k_s \cdot \cos^n \alpha) + I_a \cdot k_a \} \quad (3)$$

ここで、 θ は光源光の入射角（法線ベクトルと光源のなす角）、 α は光源光の正反射ベクトルと視線ベクトルとのなす角、 n はPhongのモデルの係数、 k_d 、 k_s は微小面の拡散反射および鏡面反射係数、 I_a は環境光の強さである。

3. 2 重なりのある複数ボクセルのボリュームレンダリング

kajiyaらのテクセルはテクセルの内部に熊の毛が密に格納されているため、ワールド空間へのテクセルのマッピングは個々のテクセルは重ならないように、隙間なく配置すればよかった。しかし、本研究における3次元テクチャは毛のように一樣な微細構造の一部を表すものではなく、樹林を構成するそれぞれの樹木であるため、樹木が密に入り組んで生育している森林の画像生成のためには3次元テクチャのボクセルを重なるように配置せざるを得ない。

筆者らのレンダリングアルゴリズムの概要は以下のようなものである。

(1) 重なりのある複数ボクセルのボリュームレンダリングへの拡張

拡張点は以下のようなものである。

(a) 密度 ρ の定義を以下のように変更する。

$$\rho(x) = \sum_{j \in V} \rho_j(x) \quad (4)$$

ここで、 V は点 x を含むボクセルの集合で、 ρ_j はボクセル j の密度分布を表す。

(b) 点 x での法線と色は、密度 $\rho_j(x)$ に関する加重平均で求める。

(c) 点 x を含むボクセルの集合 V は以下のように求める（図4参照）。

Step 1: 視線や光線のレイが貫くすべてのボクセルとの交点を求める。交点にはボクセルのIDをもたせる。

Step 2: 求めたすべての交点をレイの始点からの

距離でソートする。ボリュームレンダリングの(1)式の t 、 s 、 r の増加に合わせてソート済の交点列を走査することにより点 x が属するボクセルが決定できる。

(d) t_{near} 、 t_{far} 、 Lin は交点列の両端点で定める。

(2) 山岳景観のレンダリング法

山岳地形はポリゴンにより表現されているとする。3次元テクスチャのマッピングのために、3次元テクスチャを表す立方体（ポリゴン表現でボクセルのIDをもつ）を山岳地形に配置する。また、レイトレーシング法を基本とするので、空間等分割による高速化法を組み込んでいる。

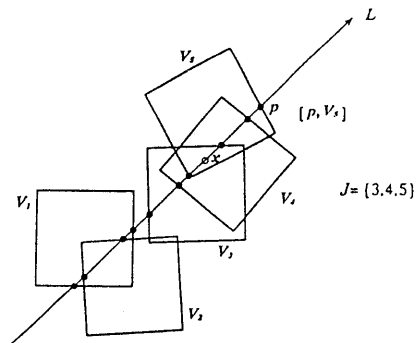


図4 重なりのある複数ボクセルのボリュームレンダリング

4. 森林景観の生成

筆者らの森林景観のシミュレーション法は以下のようなステップからなる。

Step 0: 典型的な樹種とその色彩変化の系列を用意する。

Step 1: 山岳地形に応じて植生を定める。

Step 2: 樹木のモデルを配置しレンダリングする。

これまで、Step 0,1について、“針葉樹・広葉樹、陰樹・陽樹、常緑・落葉、順次開葉型・一斉開葉型、紅葉・黄葉”という観点における代表的な樹種の存在を仮定し、その色彩変化の系列と植生の定め方を提案している [村岡93]。ここで、“陰樹”とは、ブナなどのように日陰を好み、湿気の多い

土地（沢・湿地など）になじむ樹種で、“陽樹”とは、アカマツなどのように日当たりのよいところを好み、少々乾いた土地（尾根、はげ山など）でもよく耐える樹種である。

おもに陰樹・陽樹で生育地を定め、常緑・落葉、開葉型、紅葉・黄葉から色彩変化の系列を与えている。また、針葉樹か広葉樹か、落葉期かどうかで3次元テクスチャを与える樹木の幾何モデルを変えている。

夏の葉の繁った樹木や、冬の落葉樹などの季節に応じた樹木の幾何モデルを用意することが望ましいが、ここで示す景観画像の生成には簡便な方法を用いた。すなわち、生長モデルで生成した樹木の骨格データを基本とし、先端枝の太さを大きくすることにより、夏の葉の生い茂った様子を表現した（図5参照）。

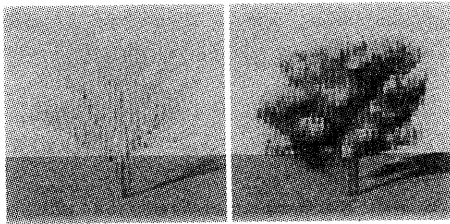


図5 葉の生い茂った樹木の簡便な3Dテクスチャ

(3) 3次元テクスチャの配置法

山岳地形に樹木の3次元テクスチャをマッピングする場合、単純にランダムに生育点を定めると、重なるように近接する点が生じ好ましくない。筆者らは、生育点をポアソンディスクサンプリング点[Coo86]と同様に分布させる手法を用いた。すなわち、以下のように生育点を逐次に定める方法である。ランダムに地点を定め、その点が禁止領域ならばその点を捨て、そうでなければ新たな生育点とし、その点を中心として一定の半径以内の領域を禁止領域とする。これを必要な回数だけ繰り返す。

また、限られた3次元テクスチャを配置するので、より自然な印象を与えるために、配置する際に3次元テクスチャのサイズやy軸周りで回転をランダム化して配置している。

5. 画像生成例

本手法で生成した森林景観画像を示す。図6は、同一サイズの樹木の3次元テクスチャを約2万個配置した場合の森林景観の画像である。図7は約1万8千個の樹木の3次元テクスチャを配置した景観画像であり、3次元テクスチャの各辺のサイズは2倍の範囲でランダマイズしたものである。図6は均一な樹種からなる樹海のような様相を、図7は針葉樹と広葉樹の混合林の様相を表現している。図1と比較し、森林の微細な表面構造が自然な印象で表現されており、提案手法の有効性が示されている。画像生成のための計算時間は、HP9000/730でそれぞれ数時間を要した。

6. むすび

樹木の3次元テクスチャの生成法と、多数の重なりを考慮した3次元テクスチャのレンダリング法を提案した。さらに、これらの手法を基に3次元テクスチャによる森林景観の画像生成法を示し、本手法による森林景観の画像生成例によりその有効性を示した。

今後の課題としては、遠景から近景までのスムーズな視点移動によるアニメーションの作成などが挙げられる。



図6 森林景観の表現例1

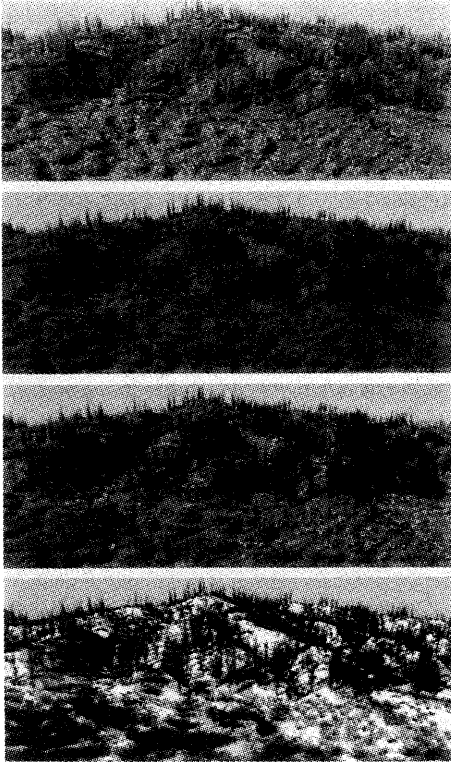


図7 森林景観の表現例2

参考文献

[安居院86] 安居院, 長, 中島: "森林に覆われた山岳の生成に関する研究", 昭和63年電子情報通信学会春期大会論文集, SD-3-6, pp.2_281-2_282, 1986.

[大野86] 大野: "山岳の表示(その2)", P I X E L, No.50, pp.153-157, 1986.

[木元92] 木元, 大野, 拡張3次元テクスチャを用いた布地物体の質感表現, 信学論, J75-D-II(4), pp.706-713, 1992.

[木元93] 木元, 大野, テクスチャマッピングによる流水の質感表現, 情報処理学会「グラフィクスとCAD」研究会報告, 61-6, pp.41-47, 1993.

[斉藤93] 斉藤, 熊谷, 本條, リアルな森林景観シミュレーション-G I Sおよび植物モデリングの応用, 第9回N I C O G R A P H論文コンテスト論文集, pp.226-236, 1993.

[千葉87] 千葉, 村岡, 三沢, 斉藤, CGにおけるデジタル地形モデルのための補間法, 情報処理学会論文誌, 28, 11, pp.1121-1133, 1987.

[三沢87] 三沢, 千葉, 斉藤, 自然の画像生成, 情報処理学会論文誌, 28, 1, pp.35-45, 1987.

[村岡93] 村岡, 千葉, 高橋, 斉藤, 季節変化に基づく山岳景観画像生成法の検討, 画像電子学会誌, 22, 5, pp.466-474, 1993.

[山名88] 山名, 秋本, 末永, 景観シミュレーションの一手法, 信学技報, IE88-116, 1988.

[Anj88] K.Anjyo, A simple spectral Approach to Stochastic Modeling for Natural Objects, Proc. of Eurographics'88, pp.285-296, 1988.

[Bli82] J.F.Blinn, Light Reflection Functions for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces, Computer Graphics, 16, 3, pp.21-29, 1982.

[Chi91] N.Chiba et al., Terrain Simulation Based on the Recursive Refinement of Ridge-Lines, Proc. of CAD/Graphics'91, pp.19-24, 1991.

[Chi94a] N.Chiba et al., A Growth model Having the Abilities of Growth Regulations for Simulating Visual Nature of Botanical Trees, Computers Graphics, 18, 4, pp.469-479, 1994.

[Chi94b] N.Chiba, Visual Simulation of Seasonal Mountain Scenery, SIGGRAPH94 Technical Slide Set, 67, 1994.

[Coo86] R.L.Cook, Stochastic Sampling in Computer Graphics, acm Transactions on Graphics, 5, 1, pp.51-72, 1986.

[Fou82] A.Fournier, D.Fussell, and L.Carpenter, Computer Renderring of Stochastic Models, Comm. ACM, 25, 6, pp.371-384, 1982.

[Gar84] G.Y.Gardner, Simulation of Natural Scence Using Textured Quadric Surfaces, Computer Graphics, 18, 3, pp.11-19, 1984.

[Kaj84] J.T.Kajiya and B.V.Herzen, Ray Tracing Volume Densities, Computer Graphics, 18, 3, pp.165-174, 1984.

[Kaj89] J.T.Kajiya and T.L.Key, Rendering Fur with Three Dimensional Textures, Computer Graphics, 23, 2, pp.271-280, 1989.

[Kel88] A.D.Kelley, M.C.Malin, and G.M.Nielson, Terrain Simulation Using a Model of Stream Erosion, Computer Graphics, 22, 4, pp.263-268, 1988.

[Mus89] F.K.Musgrave, C.E.Kolb, and R.S.Mace, The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrain, Computer Graphics, 23, 3, pp.41-50, 1989.