

リアリスティックな自然景観CG画像の追求

西田友是(東京大学大学院新領域創成科学研究科)

nis@is.s.u-tokyo.ac.jp <http://nis-lab.is.s.u-tokyo.ac.jp/~nis/>

1. はじめに

コンピュータグラフィックス(以下CG)の研究の目標の一つは、リアルな画像を生成することである。近年はその反動としてNPR(ノンフォトリリスティックレンダリング)にも注目されてはじめているが、リアリスティックな画像生成のための追求に関してまだまだ多くの課題が残されている。本講演においては、リアルなCG画像を生成するためのシェーディングモデルについて述べる。すなわち、光源の種類、反射特性(材質)、相互反射光、散乱光等を考慮した陰影計算に関する研究動向を論じる。特に、筆者の研究室および共同研究者で研究開発している大気散乱、雲、煙、霧、空、水、雪の色など自然現象のレンダリング技法について紹介する。なお、雲の動作シミュレーションおよび表示法については詳しく説明する。

2. フォトリリスティックCGの追求

CGは、当初3次元物体の隠面消去や各種表示技法を含むリアルな画像の生成法の研究が主であったが、CADシステムへの応用、科学計算結果の可視化(ビジュアライゼーション)、医療への応用、バーチャルリアリティ(仮想現実感)、ハリウッドの映画で代表されるエンターテインメント分野への応用と多岐に亘り応用されるようになってきた。CGは当初、球とか直方体など単純な幾何形状の表示法の研究が主であり、その後、建築物、車、電気製品などの人工物の表示が盛んになり、最近では自然現象の表示法に注目されている。すなわち、CGの研究対象物は次のように変遷している。

- 1) 球、直方体など単純な幾何形状の表示、
- 2) 建築物、車、電気製品などの人工物の表示、
- 3) 生物(人体等の医療分野)、肌、髪、毛の表示、
- 4) 自然物・自然現象の表示法(リアリスティックレンダリング)、
- 5) 絵画的表現(ノンリアリスティックレンダリング)。

本稿では4)について論じる。CGの研究分野としては、形状モデリング、隠面消去、陰影表示、アニメーションなどがある。リアルな画像生成は極めて重要である。リアルな画像を得るには照明計算のモデルをいかに物理則に近づけるかが重要である。そのための代表的技法として

RaytracingとRadiosityがある。これらは、自然現象のシミュレーションにも適用されることが多い。

自然現象の表示の場合、形状(ダイナミックスも含む)および陰影のモデリングが重要である。この場合、山、海、地球、木などの自然物の形状モデリング、空、雲、雪、水の色などの自然現象(特に光学的効果)のシェーディングモデリングがある。いずれにしても自然界の現象は複雑でありそのモデリング法も長年議論されている。一つの解決策としてフラクタル理論による形状モデリングが用いられている。したがって、フラクタルおよび複雑な光学現象(散乱特性)を考慮した自然現象の可視化法について論じる。

3. 自然物の表示シミュレーション

自然現象の表示には、形状および陰影のモデリングが重要である。自然物の形状生成あるいは複雑な光学現象の可視化シミュレーションを実現するため、フラクタル理論、セルオートマトン、カオス、ニューロン、ウエーブレット、GA、Lシステム、1/fゆらぎ、周波数解析などが用いられる。

自然景観の表示については、CG画像と写真との合成法をはじめ、水、空、雲等を考慮することによるリアルな画像の生成法が開発された。すなわち、建築物のCG画像の場合、背景になる空の色、雲、建物を照らす天空光の色、霞の効果を無視できない。さらに、水の色、煙、雪とさまざまな自然現象も重要な役割をはたす。表1に、CGでの研究対象の自然物モデルを示す。

表1 自然物モデルの対象

自然物の形状モデリング	山、地形、岩石、海、地球、砂漠、樹木(植物、森林)、宇宙(惑星)、ひび割れ
自然現象のモデリング	光学的効果: 空、雲、雪、水の色、霧、大気(霞)、虹、蜃気楼 ダイナミックス: 気象現象、流体・気体(煙、水、雲)、波、炎、雷

3.1 自然物形状の生成

自然界のものは自己相似性があり、フラクタルに従うものが多い。山岳(地形)、樹木、雲、川の分岐等が代表的なものである。筆者は、山、雲、地球にフラクタルを用いた。雲は2次元と3次元

を試みたが、2次元に関しては Mandelbrot 集合で生成されたパターンを台風状の雲の生成に用いた[1]。また、3次元雲に関しては、メタボール(中心ほど密度の高い球状の密度関数)の分布を雲の周囲になるほど小さい半径のものを配置することでフラクタル性をもたせた[2]。雲の時間変化はセルオートマトンによって実現した[3]。風紋を考慮した砂漠に関しては、砂の動きをセルオートマトンで実現した[4]。さらに、地球規模の地形の変化にもフラクタルを用いた。障害物を考慮した煙の表示には乱流を考慮した速度場を利用した[5]。雲の生成およびリアルな表示は特に興味深いので4章で詳しく述べる。

3.2 光学的特性(照明効果)

1) 散乱光

天空光の色、霞の効果、水の色、煙、雪、これらはすべて大気中(あるいは水中、物質中)の粒子による光の散乱・吸収効果によるものである。散乱特性は粒子の大きさに依存する、粒径の小さいものはレーリー散乱、大きいものはミー散乱理論に準じた特性を示す。前者は波長の短いものほど散乱は強い。後者は波長の依存性は少ないが、強い前方散乱特性を示す。

表2のように、CGにおいてこれまで多様な散乱モデルの研究がされている。一般に1次散乱までが考慮されているが、雲や雪のようにアルベド(反射率)が高いものは、多重散乱まで考慮してシミュレートされる必要がある。

表2 散乱光モデルの多様な適用例

散乱物質	実現された光学的効果
大気中の粒子による散乱	<ul style="list-style-type: none"> ・スポットライトによる光跡 ・雲・葉の間からもれる光跡 ・大気散乱を考慮した空の色 ・雲や煙の表示 ・多重散乱を考慮した雲、雪 ・大気圏外から見た地球大気 ・媒質を考慮したラジオシティ ・炎の表示
水中の粒子による散乱	<ul style="list-style-type: none"> ・池、川などの水面の色 ・大気圏外から見た海の色 ・水中の集光効果や光跡
物質中の粒子による散乱	<ul style="list-style-type: none"> ・土星の輪 ・肌、葉の層における多重散乱

図1は雲の粒子による光の多重散乱まで考慮することによるリアルな画像生成例である[2]。雲の形状はメタボールをフラクタルで生成した。図2に水中の光学的効果(水の色、集光効果)を考慮したアニメーションの1シーンを示す[6]。図3は、

雪の粒子による光の多重散乱まで考慮することによるリアルな画像生成例である。雪の表面形状は、メタボールにより生成した。図4は、インターネットで公開されてる「ひまわり画像」(2次元)から3次元雲を生成した例である。図5は障害物を考慮した煙りの表示例である[5]。

2) 天空光

建築物などの屋外の物体を表示するには、自然光について考慮する必要がある。屋外および窓からの採光には、天空光は欠かせない要素といえる。なお、天空の輝度分布は一様ではなく、太陽位置によって変化する。天空は非常に大きいから、任意の計算点は非常に大きい半径のドームの中心にあると考えてもよい。すなわち、天空光は半径の大きい半球光源とみなされる。天空の輝度分布を考慮するため、半球をいくつかの帯光源に分割する方法を開発した。



図1 多重散乱まで考慮した雲の表示例



図2 水中の光学的効果の計算例



図3 フラクタルで生成した山と多重散乱光を考慮した雪の表示例

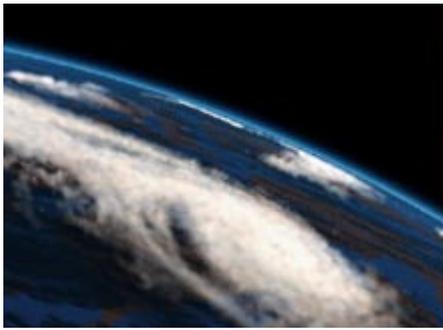


図4 ひまわり画像から生成した3次元雲の表示例



図5 障害物を考慮した煙の表示

4. 雲の表示[3]

本稿では雲の生成・表示は特に詳しく述べる。雲のレンダリングは、雲のダイナミクスをシミュレートする処理と雲の粒子による光の散乱効果の表示、影および光跡を表示するレンダリング処理に分割される。

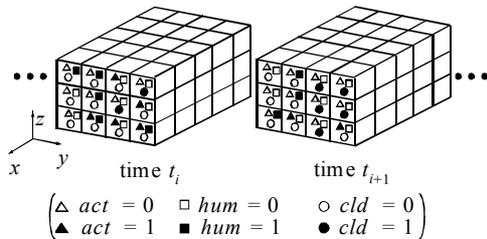


図6 シミュレーション方法

4.1 雲の動きのシミュレーション手法

図6に示すように、シミュレーション空間を3次元ボクセルで表し、各セルに水蒸気(hum)、雲(cld)、相転移因子(act)の3つの論理変数を割り当

てる。これらの論理変数は0または1の二つの値をとり、状態遷移規則を逐次適用することで、雲の動きのシミュレーションを行う。状態値が0または1であるため、遷移規則は論理演算のみで表現でき、低コストで計算できる。

雲が発生するメカニズムは次のようなものとされている。地上で暖められた水蒸気を多く含む空気塊が浮力によって上昇する。上昇に伴って空気塊は冷却されるため温度が下がる。そして、ある高度に達すると水蒸気から水滴への相転移が始まり、雲が発生する。このメカニズムをシミュレートするため、以下の3点を表す遷移規則がNagelによって開発されている[7]。(i) 水蒸気が発生, (ii) 水蒸気から水滴(雲)への相転移, (iii) 雲の成長。しかし、これだけでは、雲が発生するのみであり、リアルな動きを表現することは難しい。雲の動きを観察すると、風によってある一定方向に流されながら、発生と消滅を繰り返していることがわかる。そこで、我々は、以下の2点を表す規則を新たに追加した。(i) 雲の消滅, (ii) 風による移動。さらに、前述した水蒸気を含む空気塊を表すため楕円体を用いる。楕円体内部のセルでは、中心に近いほど水蒸気が発生しやすく、また、相転移も起きやすいよう設定する。逆に、中心から離れるにつれ、水蒸気は発生しにくく、また、雲は消滅しやすくする。この楕円体の発生パターンや動きをコントロールすることで、雲の発生パターンをコントロールすることができる。

4.2 雲のレンダリング手法

シミュレーションにより得られた結果から画像を生成する。まず、各セルの変数cldの状態を取り出す。しかし、実際の雲の密度分布は連続な密度分布であるが、シミュレーションから得られる結果は各セルについて雲がある(cld=1)またはない(cld=0)の2値であるため、リアルな画像を生成できない。そこで、2値の分布を平滑化し、平滑化された各セルの値を中心密度とするメタボールを各セルの中心位置に配置することで連続な分布を算出する。得られた密度分布からボリウムレンダリング法を応用し、画像を生成する。雲のレンダリングと雲からもれる光跡のレンダリングそれぞれについて以下に説明する。

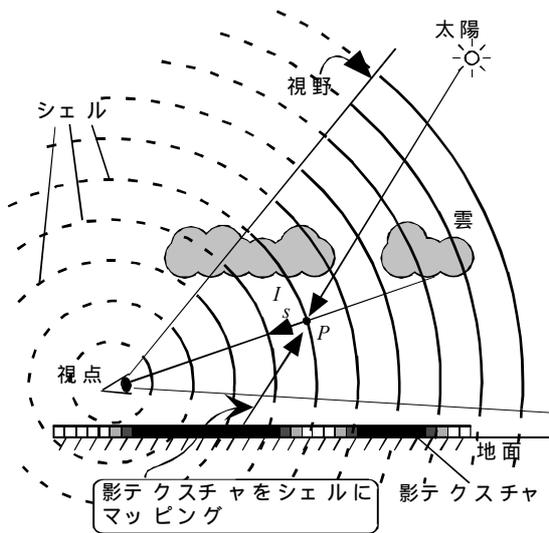


図7 光跡の計算法

1) 雲のレンダリング

雲のレンダリングはスプラッティング法[8]を利用する。そのため、前処理において、あるレイがメタボールを通過したときの光の減衰率と累積密度を記憶したテクスチャを計算しておく。そして、二つのステップで雲のレンダリングを行う。まず、第一ステップにおいて、各メタボールに届く太陽光の強さと雲が地面に落とす影を計算する。そして第二ステップで視点から見た画像を生成する。

第一ステップの基本的な考え方は、太陽位置を視点位置としたときの画像を作成することにより、各メタボールに届く光の強さを求める。まず、視点を太陽位置とし、平行投影に設定する。またフレームバッファは白色で初期化しておく。そして、メタボールを太陽に近い順に描画する。このとき、OpenGL のもつ ブレンディングの機能を用いて、フレームバッファに記憶されている値とテクスチャとして記憶されているメタボールの減衰率を乗算しながら描画する。その後、メタボールの中心位置に対応する位置の画素値を読み出す。この値は太陽光がそのメタボールに届くまでの光の減衰率となる。この値に太陽光の強さを乗じれば、このメタボール中心に届く太陽光の強さとなる。全てのメタボールについて処理が終了した後にフレームバッファに描画されている画像は雲が地面に落とす影のテクスチャとして保存する

次に、第2ステップでは、第1ステップで求めたメタボール中心での色を用いて画像を生成する。まず、雲を除いた全ての物体を背景画像として描画する。次に、視点から遠い順にメタボールを描画する。このとき、フレームバッファ内の色とメタボールの色を ブレンディングの機能を

用いて混合しながら描画する。これを全てのメタボールについて繰り返すことで画像を生成できる。

2) 光跡のレンダリング

図6に示すように、雲の間隙からもれる光跡を計算するためには、太陽光の散乱光 I_s を視線に沿って数値積分する必要がある。そこで、提案手法では、視点を中心とする球状の透明な仮想的なシェルを設定する(図6参照)。そして、数値積分のサンプル点をこの仮想平面とレイとの交点に設定する。このとき、雲の影を考慮するため、4.1節において求めた影テクスチャを利用する。すなわち、レイとシェルとの交点Pに対応する影テクスチャの要素の値を参照し、その輝度値を散乱光 I_s に乗じる。グラフィックスハードウェアを利用してこの処理を行うため、まず、仮想シェルの視野内に存在する部分をポリゴンで近似して表現する。次に、各ポリゴンの頂点において散乱光 I_s を計算する。そして、これらのポリゴンを描画し、ブレンディングの機能を用いてフレームバッファに足し込むことで散乱光の積分を行う。このとき、各ポリゴンは、影のテクスチャをマッピングして描画する。ただし、影テクスチャに格納されている値とポリゴンの色が乗算されるよう、マッピングパラメータを設定する。

4.3 適用例

図8は雲の発生のシミュレーションを行った例であり、視点位置を雲の上方に設定した例である。

図9は地上から雲を眺めた例であり、雲の間隙からもれる光跡が表現されているのがわかる。図8は256x256x20のボクセルを用いてシミュレーションを行い、計算機はDELL Dimension XPS T750r (PentiumIII 750MHz, NVIDIA GeForce 256搭載)を用いた。レンダリング時間は1枚あたり、10秒程度となっている(画像サイズは640x480)。



図8 雲の発生のシミュレーション



図9 雲の影および光跡の表示

5. まとめ

本稿では、CGの研究動向を概観し、リアルな自然物・自然現象の画像を生成するためのシミュレーション技術について紹介した。特に散乱光まで考慮した自然物の表現シミュレーションなどを報告した。

謝辞

本稿の研究の一部は広島大学の山下研究室、北海道大学の土橋助教授（元広島市立大）との共同研究の成果であり、皆様に感謝いたします。

参考文献

[1] T.Nishita, T.Shirai, K.Tadamura, E.

Nakamae, "Display of The Earth Taking into account Atmospheric Scattering," Proc. of SIGGRAPH'93, 1993-8, pp.175-182.

[2] T. Nishita, Y.Dobashi, E.Nakamae, "Display of Clouds Taking into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light," Proc. of SIGGRAPH'96, 1996, pp.379-386.

[3] Y.Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, T. Nishita "A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds," Proc. of SIGGRAPH'2000, 2000, pp.19-28.

[4] K. Onoue, T. Nishita, "A Method for Modeling and Rendering Dunes with wind-ripples", Proc.of the 8th Pacific Conference, 2000, pp.427-430.

[5] S. Yoshida, T. Nishita, "Modelling of Smoke Flow Taking Obstacles into Account" Proc. of the 8th Pacific Conference, 2000, pp.135-144

[6] T.Nishita, E.Nakamae, "Method of Displaying Optical Effects within Water using Accumulation-Buffer," Proc. of SIGGRAPH'94, 1994, pp.373-380.

[7] K. Nagel, E. Raschke, "Self-Organizing Criticality in Cloud Formation," Physica A, 182, 1992, pp. 519-531.

[8] D.Blythe, "Advanced Graphics Programming Techniques Using OpenGL," Course Note #29 of SIGGRAPH 99, 1999

