

## テクスチャ・マッピングによる流水の質感表示

木元宏次<sup>†</sup> 大野義夫<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 神奈川大学理学部情報科学科

<sup>‡</sup> 慶應義塾大学理工学部電気工学科

テクスチャ・マッピングを用いて、滝のような勢いよく流れる水の質感を表示する手法について述べる。適用するテクスチャは、流水の質感に対応できるようにテクセルを改良した拡張3次元テクスチャ(ボリューム・テクスチャと呼ぶ)である。ボリューム・テクスチャの各データは3つの要素から構成され、それぞれ、単位空間内の水の密度、水流方向を表す3次元ベクトル、そしてボリューム・テクスチャのためのシェーディング関数の反射係数である。第2要素を設定するときに3次元空間に作成したフラクタル曲線を利用する。レンダリングには、zバッファ法、テクスチャ・マッピングを用い、効率よく、良好な流水の質感表示ができた。

## Rendering Gushing Water Using Texture Mapping

Hirotsugu KIMOTO<sup>†</sup> Yoshio OHNO<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Department of Information Science, Faculty of Science,  
Kanagawa University

<sup>‡</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology,  
Keio University

We describe a technique to render gushing water such as a waterfall using texture mapping. The texture we use here is an extended three-dimensional texture which is an improved one of *Texel*. We call it *volume texture*. *Volume texture* has three elements. The first is a density of water in a unit space, the second is a vector which represents a direction of gushing water, and the third is a coefficient of the shading function for *volume texture*.

We use *z-buffer* method and texture mapping in rendering, and obtained realistic images of a waterfall efficiently.

## 1 序論

コンピュータ・グラフィックスによる微細形状物体の質感表示は、現在重要な研究課題の一つである。これまでに、さまざまな質感に関する研究がなされてきたが、微細形状物体については、まだ十分満足のいく表示が困難なものが多い。それは、精密な形状モデリングが難しいこと、レンダリングの際に激しいエイリアシングが生じてしまうこと、さらには、その表面における適切な光反射モデルの構築が困難なこと、などが大きな原因である。

水の質感については、静かな海面 [Perlin 85] とか、海の波の様子 [Fournier and Reeves 86] [Peachey 86]、また、プールのゆらゆらした水の様子 [Watt 90] など、これまでにいくつか研究が行われている。滝のような勢いよく流れる水の質感表示についても、パーティクル・システムを用いる方法 [Sims 90] が紹介されている。しかし、[Sims 90] の表示結果はまだグラニュー糖をさらさらと流したような感じがあり、満足のいく結果を得るためには、さらなる研究開発が必要である。

本論文では、テクスチャ・マッピングを用いて水の流れる質感を表示する方法について述べる。本手法では、流水を表現する新しい形式の3次元テクスチャを利用する。このテクスチャは、J. Kajiyaらのテクセル [Kajiya and Kay 89] を流水に適用できるように改良を加えたものである。ここではこのテクスチャをボリューム・テクスチャ [木元, 大野 92] と呼ぶことにする。3次元配列で表現するボリューム・テクスチャの個々の要素をセルと呼ぶ。各セルには、次の3つの要素を設定する。第1要素は単位空間内に存在する水の密度であり、第2要素は水の流れる方向を表す3次元ベクトル、そして第3要素は

ボリューム・テクスチャのためのシェーディング関数の反射係数である。第2要素の3次元ベクトルを設定するために3次元空間に作成したフラクタル曲線を利用する。レンダリングには、zバッファ法、テクスチャ・マッピングを用いる。ボリューム・テクスチャから物体の表面にマッピングする輝度を計算するときに、Kajiyaらによるテクセルのレンダリング技法を適用する。

本手法を用いて、比較的効率よく良好な流水の質感表示を行うことができた。

以下、次節からの内容を簡単に述べる。第2節では流水の質感表示のために用いるボリューム・テクスチャの作成方法について述べる。第3節で、流水のレンダリングについて述べ、第4節で表示結果を示し、最後に結論を述べる。

## 2 流水のためのボリューム・テクスチャ

ここで述べるボリューム・テクスチャは、テクセルを流水の質感表示に適用できるよう改良したものである。流水のためのボリューム・テクスチャは3つの要素から構成される。第1要素は単位空間内に存在する水の密度であり、第2要素は水の流れる方向を表す3次元ベクトル、そして第3要素はボリューム・テクスチャのためのシェーディング関数の反射係数である。そして、第2要素を設定するためにフラクタルを利用する。

ここでは、最初に3次元空間にフラクタル曲線を作成する方法について簡潔に述べ、次にボリューム・テクスチャの各要素の設定方法について述べる。なお、以下、3次元空間のフラクタル曲線を空間フラクタル曲線、2次元空間のフラクタル曲線を平面フラクタル曲線と呼ぶことにする。

## 2.1 空間フラクタル曲線

空間フラクタル曲線は、平面フラクタル曲線を作成するときに頻繁に用いられる中点分割法 [Fournier et al. 82] を拡張して作成する。

以下に、3次元空間内の1本の線分を2本に分割する方法について述べる。この分割を再帰的に繰り返せば、空間フラクタル曲線を生成できる。

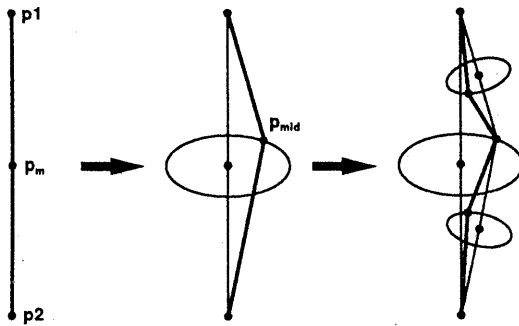


図 1: 空間フラクタル曲線

1. 線分の端点を  $p_1, p_2$  とする。
2. 線分  $p_1p_2$  の中点  $p_m$  を求める。
3. 線分  $p_1p_2$  に垂直、かつ  $p_m$  を通る平面上に、 $p_m$  を原点とする極座標系  $[r, \theta]$  を考える。極軸の向きは一様乱数を用いて与えることにする。

まず、半径  $r$  を以下の式で与える。

$$r = g \times S(n) \quad (1)$$

$$S(n) = S(n-1) \times (0.5)^h$$

$$S(0) = 1 \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

ここで、 $g$  は正規乱数、 $n$  は再帰レベル、 $h$  は形状の複雑さを表す定数である。つまり、 $r$

は平面フラクタル曲線を作成するとき用いられる変位置と同じものである。

4.  $\theta$  は、極軸の向きが乱数で与えられるので、ここでは便宜上、常に0とする。
5.  $r, \theta$  から決定される点を  $p_{mid}$  とし、線分  $p_1p_2$  を  $p_{mid}$  で分割する。

## 2.2 ボリューム・テクスチャの設定方法

水の流れる量、その方向、速度、温度、光の反射状態など、勢いよく流れる水の質感に影響を与える要素はいろいろあると考えられる。しかし、実際にそれらの要素の性質を調べることは、実質的にはほとんど不可能である。

ここでは、実際の流水の観察などから得た経験的な方法を用いてボリューム・テクスチャを設定する。以下、各要素の設定方法について詳しく述べる。

### 第1要素 $\rho$ :

第1要素  $\rho$  は、第2要素  $v$  が設定されているセルについて、乱数を使用し以下のようにして設定する。

```

 $\rho = \text{normal\_rand}() + 0.5;$ 
if ( $\rho < 0$ )  $\rho = 0;$ 
else if ( $\rho > 1$ )  $\rho = 1;$ 
 $\rho = \rho * \alpha;$ 

```

ここで、 $\text{normal\_rand}()$  は平均0、分散1の正規乱数、 $\alpha$  は  $\rho$  のスケール・パラメータである。

そして、第2要素が設定されていないセルにはついては0を設定する。

### 第2要素 $v$ :

ボリューム・テクスチャの  $xz$  平面に平行な一方の面上にジターサンプリング [Cook 86]

を用い、複数個の点を設定する(図2)。これらすべての点について、以下の操作を実行する。

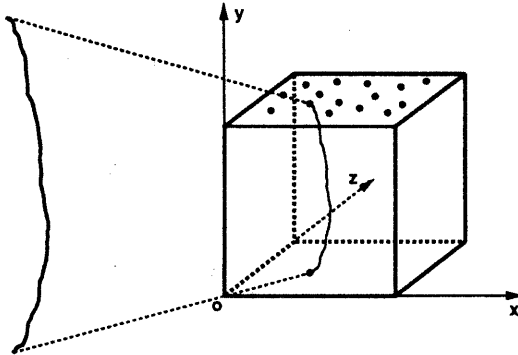


図2: ボリューム・テクスチャと空間フラクタル曲線

1. もう一方のボリューム・テクスチャの  $xz$  平面に平行な面上に  $x, z$  座標を同じくする点を設定する。
2. 設定された2点を端点として、空間フラクタル曲線を生成する(図2)。
3. 空間フラクタル曲線が通過する各セルについて、セルに含まれる線分(空間フラクタル曲線を構成する線分)に平行な単位ベクトルを第2要素  $v$  として設定する。

### 第3要素 $k$ :

流水のためのシェーディング関数には、木元らの反射モデル[木元, 大野 92]を用いる。よって、第3要素  $k$  には、拡散反射係数、鏡面反射係数の2つを設定する。

まず、各反射係数について、基準となる反射係数を与える。ここでは、(拡散反射係数) : (鏡面反射係数) = 1 : 1とする。

そして、正規乱数を用いて乱雑性を加えて、第3要素  $k$  とする。

### 3 流水のレンダリング

流水のレンダリングは、テクスチャ・マッピング、 $z$ バッファ法を用いて行う。物体上にマッピングする輝度を、ボリューム・テクスチャから算出するときに、Kajiyaらによるテクセルのレンダリング技法を利用する。

ここでは、ボリューム・テクスチャを物体上にマッピングする方法について述べる。簡単のため、物体はポリゴン、しかも凸の四角形のみで構成されている場合を考える。

ポリゴンはワールド座標空間  $(x_w, y_w, z_w)$  に、そして、ボリューム・テクスチャは別のローカル座標空間(ここではボリューム・テクスチャ空間  $(x, y, z)$  と呼ぶ)に定義されているとする。

物体を構成するポリゴン上の点を  $p$  とする。まず、ポリゴンとボリューム・テクスチャの上面(ここではボリューム・テクスチャ空間における  $xy$  平面に平行な二面の内の一方)とを一対一に対応させる写像  $m$  を求める(図3)。この写像  $m$  を

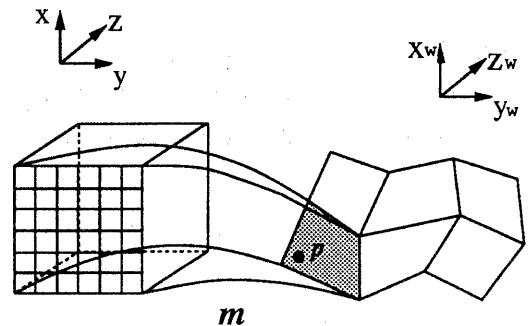


図3: ワールド座標空間から

ボリューム・テクスチャ空間への写像  $m$

を用いて、点  $p$ 、点  $p$  における法線ベクトル、視線

ベクトル,そして光源ベクトルをボリューム・テクスチャ空間にマッピングする。

次に,ボリューム・テクスチャ内をトレースし,テクセルのレンダリング技法を適用して,ポリゴン上の点  $p$  にマッピングする輝度を計算する。このとき,テクセルの輝度を求める式に,木元らが布地物体のレンダリングに用いた反射モデルを適用する [木元, 大野 92]。ボリューム・テクスチャ内のトレースには 3 次元 DDA アルゴリズム [Snyder and Barr 87] を用いる。トレースの始点,そして方向は,それぞれ,写像  $m$  によってマッピングされた点  $p$  に対応するセルと視線ベクトル方向である。このとき,ボリューム・テクスチャ 1 つに対してトレースを行うと,始点,トレース方向によっては,すぐさまテクスチャの外にトレース・レイが出てしまうという不具合が生じる。よって,1つのボリューム・テクスチャを図4のように  $xy$  平面に平行にその周りに複数個コピーし,ボリューム・テクスチャのトレ

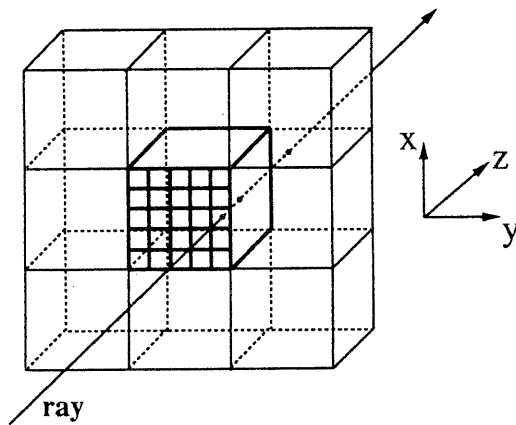


図 4:  $xy$  平面に平行に並べた  
ボリューム・テクスチャ

ス・レイがもう一方の  $xy$  平面に平行な面を通過するまでトレースして,セルのリストを求める

ことにする。また,このとき,ボリューム・テクスチャ内をトレースする方向が  $xy$  平面に平行に近づくと,セル・リストが非常に長くなってしまふ。このような場合,セル・リストの後ろのセルについては透過率が 0 に近づき,輝度にはほとんど影響を与えないことから,計算コストを考慮し,セル・リスト長には上限値を設定する。

#### 4 結果

ボリューム・テクスチャを用いた流水の表示例を示す。

図 5 は滝の表示例である。勢いよく水の流れ

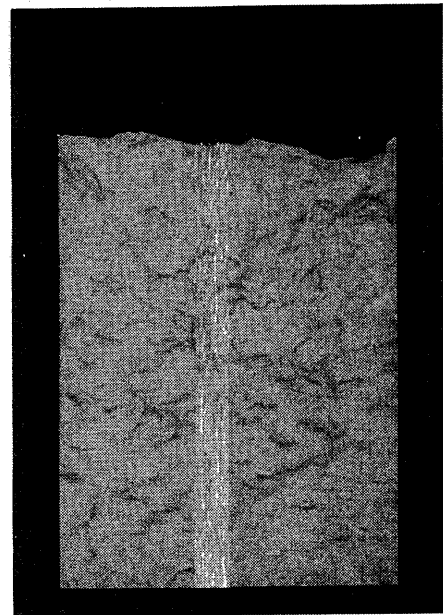


図 5: 滝(その 1)

る滝を表現している。背景は,フラクタルを用いて作成した。マッピングしたボリューム・テクスチャの大きさは  $40 \times 40 \times 40$  である。滝の部分は,8枚のポリゴンから構成されており,解像度は,  $266 \times 426$ , 計算時間は SparcStation2GX で約 14 分であった。図 6 は,図 5 で使用した



図 6: 滝(その2)

ボリューム・テクスチャの第1要素の密度を大きくした場合の表示例である。図7は、図5で使用したボリューム・テクスチャの第2要素を変更した場合の表示例である。複雑さをより小さくした空間フラクタル曲線を用いて第2要素を設定している。

## 5 結論

本論文では、ボリューム・テクスチャを物体表面にマッピングすることにより、流水の質感表示を行う方法について述べた。本手法を用いて、良好な流水の質感表示が可能であることが確認できた。レンダリングには、zバッファ法、テクスチャ・マッピングを利用しており、コスト・パフォーマンスのよい画像生成を行うことができる。

ボリューム・テクスチャの各要素の設定を変化させることで、もっと違った印象の滝のレンダ

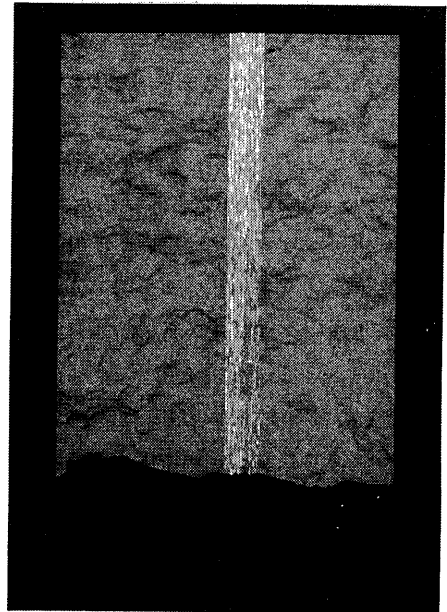


図 7: 滝(その3)

リングを行うことができる。しかし、現段階ではそれぞれの要素の適切な設定方法はまだ確認できていない。また、今回は流水のためのボリューム・テクスチャの第2要素の設定に、実験的にフラクタルを利用している。もし、滝のような実際の流水から各要素を測定する手段を開発できれば、さらにリアルな画像生成が可能になると考える。

また、本手法で用いた反射モデルは、特に流水のために考えられたモデルではない。さらに自由度をあげるためには、流水のための反射モデルを考案することがあげられる。

滝のように、形状というよりはむしろその表面の色合いの変化が質感に影響している物体のレンダリングには、テクスチャ・マッピングを用いるアプローチがコスト、柔軟性などの点でより適切である。本論文で述べた手法は、これまでにいくつか別の質感表示ができることが確認さ

れており [Kajiya and Kay 89] [木元, 大野 92], さらに他の質感への応用が期待できる。現在では, 質感が異なればその表示手法も異なるという場合がかなり多い。本手法は, 複雑な表面を持つ物体, 微細形状物体の画像生成を統合することのできる有効な手法の1つである。今後の重要な課題は, さまざまな質感に対する適切なボリューム・テクスチャの作成方法を開発することである。現在, 具体的な他の質感への応用として, 近景の山肌とか, 髪の毛, 人間の皮膚などを考えている。

#### 参考文献

- [Cook 86] Cook, R. L., "Stochastic Sampling in Computer Graphics," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 5, No. 1, Jan. 1986, pp. 51-72.
- [Fournier et al. 82] Fournier, A., Fussell, D., and Carpenter, L., "Computer Rendering of Stochastic Models," *Comm. ACM*, Vol. 25, No. 6, June 1982, pp. 371-384.
- [Fournier and Reeves 86] Fournier, A. and Reeves, W. T., "A Simple Model of Ocean Waves," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 86)*, Vol. 20, No. 4, Aug. 1986, pp. 75-84.
- [Kajiya and Kay 89] Kajiya, J. T. and Kay, T. L., "Rendering Fur with Three Dimensional Textures," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 89)*, Vol. 23, No. 3, July 1989, pp. 271-280.
- [木元, 大野 92] 木元宏次, 大野義夫, "拡張3次元テクスチャを用いた布地物体の質感表示," *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol. J75-D-II, No. 4, Apr. 1992, pp. 706-713.
- [Peachey 86] Peachey, D. R., "Modeling Waves and Surf," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 86)*, Vol. 20, No. 4, Aug. 1986, pp. 65-74.
- [Perlin 85] Perlin, K., "An Image Synthesizer," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 85)*, Vol. 19, No. 3, July 1985, pp. 287-296.
- [Sims 90] Sims, K., "Particle Animation and Rendering Using Data Parallel Computation," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 90)*, Vol. 24, No. 4, Aug. 1990, pp. 405-413.
- [Snyder and Barr 87] Snyder, J. M. and Barr, A. H., "Ray Tracing Complex Models Containing Surface Tessellations," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 87)*, Vol. 21, No. 4, July 1987, pp. 119-128.
- [Watt 90] Watt, M., "Light-Water Interaction using Backward Beam Tracing," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 90)*, Vol. 24, No. 4, Aug. 1990, pp. 377-385.