

## 雲や煙などの不定形物のセル画調レンダリング

## Cartoon Rendering of Gaseous Phenomena

黒田 祐介<sup>†</sup>      土橋 宜典<sup>†</sup>      山本 強<sup>†</sup>  
Yusuke Kuroda    Yoshinori Dobashi    Tsuyoshi Yamamoto

## 1. はじめに

3次元コンピュータグラフィックスを用いた非写実的画像生成 (Non-photorealistic Rendering, NPR) は近年、映画やゲームといったエンターテインメント分野で広く使われるようになってきている。中でもセル画調レンダリングは、従来のセルアニメーションに必要な膨大な作業をコンピュータが肩代わりし、アニメータの負担を軽減させるため、特に利用が盛んである。

しかし、従来のセル画調レンダリングは、ポリゴンモデルを使った定形物への適用が主であり、従来のセルアニメーションで特殊効果として盛んに利用されてきた、雲や煙といった不定形物への適用についてはまだ多くの研究の余地がある。

本稿では、セルアニメーションの特殊効果として違和感なく利用できるような、雲や煙といった不定形物をセル画調に表現するための手法について提案する。

## 2. 概要

セルアニメーションにおける雲や煙を表現する上で重要となるのは、その「動き」と「形状」である。熟練したアニメータは実際の物理現象を細かに観察し、それに省略や誇張を加えることで独特の表現を行う。

本研究ではその「動き」を、Navier-Stokes 方程式を利用した流体解析から求め、それに特定の形状をもった煙の塊を付加していくことで「形状」を表現する。

提案手法の概要を図1に示し、以下、処理の流れについて説明していく。

## 3. 提案手法

## 3.1 流体解析

まず、物理的に確からしい煙の動きを実現するため、Stamの手法[1]を使った流体解析を行う。Stamの手法は、空間全体を多数の格子(ボクセル)で区切り、各格子ごとに圧力  $p$ 、密度  $\rho$ 、速度  $v$  などの物理量を記憶しておく。そして1タイムステップごとに、それらの物理量から4つの段階(外力、移流、拡散、圧力)に分けて非圧縮性流体のNavier-Stokes方程式

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}$$

を解いていく。

## 3.2 解析用格子と表示用格子

上記の流体解析に使用する格子とは別に、後に等値面計算用に使用する格子(表示用格子)を用意しておく。表示用格子は、解析用格子よりも解像度を高くしておき、毎タイムステップごとに解析格子から表示用格子に物理量がコピーされる。

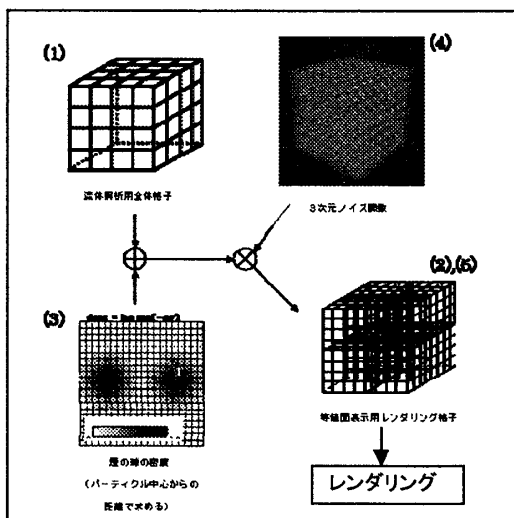
計算量の多い流体解析には低い解像度の格子を使い、次に行うパーティクル処理やノイズ処理には高解像度の格子を使うことで、煙の形状の滑らかさを保ちつつ計算負荷の軽減が行える。

## 3.3 パーティクル処理

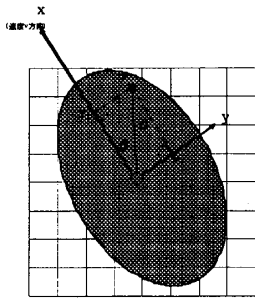
次に、表示用格子の空間内に、任意の数の粒子(パーティクル)を作成する。パーティクルは空間内のランダムな位置に生成され、空間内の速度場に沿って移動する。

そしてパーティクル位置の空間密度が設定された閾値  $D_p$  よりも高い場合、パーティクル位置を中心として、図2の式で示されるような球状の密度を表示用格子の密度に足し合わせる。球の大きさは空間の密度に依存し、また、空間の速度場方向に引き伸ばされた形に変形する。

この球状の密度を加えることによって、セルアニメーション的な煙のヴォリュームを表現する。



<sup>†</sup> 北海道大学大学院 情報科学研究科



$$x_1 = d \cos \theta$$

$$y_1 = d \sin \theta \quad v: \text{パーティクル速度}$$

$$d_* = \frac{x_1^2}{(\alpha v)^2} + \frac{y_1^2}{\Gamma^2} < \beta \quad (\alpha, \beta: \text{const.})$$

を満たすとき、

$$\text{dens} = a \exp(-d_*) + b \quad (a, b: \text{const.})$$

図2. 密度球とその変形式

### 3.4 ノイズ

最後に、煙の形状に細かな粒状感を加えるため、空間内の位置によって一意に決まるノイズ関数を表示用格子の密度に掛け合わせる。

ノイズには3次元 Perlin ノイズを使用した。

### 3.5 レンダリング

以上で求めた表示用格子の密度を用いて画面表示を行う。設定した密度  $D_{iso}$  の等値面を Marching-Cube 法により求める。またこのとき、等値面の各頂点の色は、視線と各頂点における空間の勾配との内積から計算されたテクスチャ座標

$$c = (-v \cdot g + 1) / 2$$

( $v$ : 視線ベクトル,  $g$ : 勾配ベクトル)

により、1次元トーンマッピングテクスチャから参照された色となる。



図3. トーンマッピングテクスチャの例

## 4. 適用例



図4. 提案手法の適用例

実装環境: Intel Core2Duo 2.66GHz, メモリ 2GB  
 解析格子数:  $32^3$ , 表示格子数:  $64^3$   
 パーティクル数: 1000

提案手法の適用例を図4に示す(中央の赤い球は障害物として配置したオブジェクト)。参考として、上記の環境で平均0.6fps前後の速度であった。

期待した、流体解析による現実的な煙の動きと、パーティクル処理で追加された煙の塊によってできたセルアニメ的な形状が確認できる。

## 5. おわりに

本研究では、煙や雲などの不定形物をセルアニメーション調にレンダリングする手法について提案した。期待していた煙の動きと形状をある程度満足する結果が得られたが、どちらも実際のアニメーションと比較してまだまだ改善の余地があるだろう。

今後の課題としては、上記の改善に加え、輪郭線や効果線といった効果の追加や、対話的にユーザの意図した動きと形状を指定できるようなインターフェイス、リアルタイムで操作できるようにするためのGPU等を利用した高速化などが挙げられる。また、レンダリング結果をどのように評価していくかといった点についても考慮する必要があるだろう。

## 参考文献

[1] J. Stam, "Stable Fluid", Proceedings of SIGGRAPH '99, pp. 121-128, 1999.