

煙のセル画調レンダリング

星野 隆[†] 土橋 宜典^{††} 山本 強^{††}

近年、映像制作においてコンピュータグラフィックスが広く用いられている。特に段階的に変化する陰影と、輪郭線により表現されるセル画調画像を生成するレンダリング手法は、アニメーション制作への応用が期待されている。本研究では、3次元コンピュータグラフィックスを利用し、ボリュームデータで与えられる煙をセル画調にレンダリングする手法を提案する。提案手法を用いることにより、煙のセル画調映像を高速に生成することができ、視点変化等のアニメーションをリアルタイム生成することが可能となる。

Cartoon Rendering of Smoke

TAKASHI HOSHINO,[†] YOSHINORI DOBASHI^{††}
and TSUYOSHI YAMAMOTO^{††}

Recently, computer graphics have been used in various fields. Especially, a technique for rendering cartoon images, expressed by the cel-shading and the outline, is expected to animation productions. In this paper, we propose a method for creating cartoon images and animation of smoke. In the method, images are created by using volume data representing smoke. The proposed method makes it possible to create cartoon images of dynamic smoke viewed from arbitrary viewpoints in real time.

1. はじめに

セルアニメーションなどに用いられるセル画は、段階的に変化する陰影と輪郭線により表現される特徴をもつ。コンピュータグラフィックスを使用して、3次元モデルからこのセル画調画像を生成するセル画調レンダリング (Cartoon Rendering) は、近年アニメーション制作において広く用いられるようになってきている。アニメーション制作にセル画調レンダリングを用いることで、視点の移動やキャラクタの動きに応じた画像をセル画調で自動生成し、アニメータの負担を軽減することができる。また、手作業で1枚ずつ動きをつけることが事実上不可能に近いような複雑な構造を持つオブジェクトでも、3次元コンピュータグラフィックスの技術を利用することで、容易にアニメーション映像を作成できる。

しかし煙や雲など、明確な境界をもたない物体に対するセル画調レンダリングの研究はあまり行われていない。従来、煙や煙はアニメータの経験に基づいて手作業により表現されている。しかし、煙や煙の3次

元的な形状を捉えた映像を作成することは難しい。そのため、例えば、雲や煙の複雑な動きを考慮しつつ、視点位置を変更するといった映像を手作業で作成することは不可能に近い。一方、3次元コンピュータグラフィックスの分野では、流体解析を利用した雲や煙の画像生成に関する研究は非常に盛んになっており、非常に低コストで写実的な映像を作成することが可能となっている。そこで、本研究では、これらの流体解析を利用した雲や煙のシミュレーション手法を基にセル画調の画像を生成する手法を提案する。

提案手法では、雲や煙を表すボリュームデータは上述の流体解析を利用した手法により生成する。そして、このデータを基にセル画調画像を生成する。手描きによる雲や煙のセル画調画像では、これらを球の集合で表現したかのような映像が多く見られる。そこで、提案手法では、まず、得られたボリュームデータを2値化した後、これを球の集合で近似的に表現する。そして、この球の集合をレンダリングすることでセル画調画像を生成する。提案手法を用いれば、視点位置の変化や時間経過に伴う煙の形状変化のセル画調アニメーションをリアルタイム生成することが可能となる。

[†] 北海道大学大学院工学研究科, 札幌市

^{††} 北海道大学大学院情報科学研究科, 札幌市

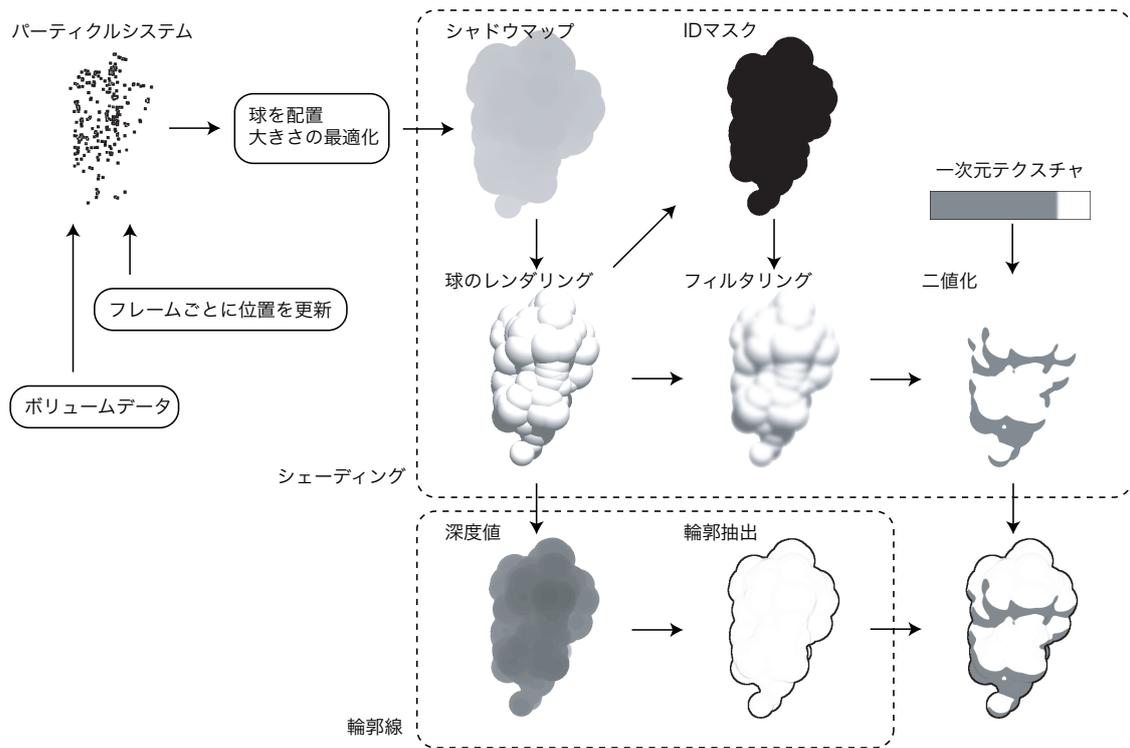


図1 提案手法による画像生成の流れ

2. 従来手法

煙のセル画調アニメーションを生成する従来手法として、Andrew¹⁾らによる手法が挙げられる。この手法では、パーティクルシステムとビルボードを用いて煙のセル画調レンダリングを行い、そのアニメーションを生成する。以下、その画像生成の流れについて簡単に説明する。

流体解析により空間に発生する煙の密度および速度ベクトルを求める。そして、空間中にパーティクルを生成し、得られた速度ベクトルに応じて移動させる。このとき、煙の形状はパーティクルの位置にビルボードを配置し、円形などのテクスチャをマッピングすることで表現される。つづいて煙の輪郭の描画を行う。パーティクルシステムのようにサーフェスを持たない物体に対して輪郭線の描画を行うには、深度値の差分を取る手法²⁾が有効である。ここでは各ビルボードの深度値を参照し、深度値の差がしきい値以上となるピクセルを黒く塗ることで描かれる。以上のような方法で、煙のセル画調レンダリングを行う。

しかし従来手法では、煙の形状をビルボードで表現するため、ライティングなどによる適切なシェーディングを行うことができない。また、ビルボードはすべ

て同じ大きさであり、1つのパーティクルがパーティクルの集合から離れる場合には不自然に見える。さらに、視点移動の際にビルボードの入れ替えが発生しアニメーションがちらつく問題がある。

次章では、これらの問題を解決する煙のセル画調レンダリング手法を提案する。

3. 提案手法

提案手法では、ボリュームデータで表現される煙のデータに対しセル画調レンダリングを行う。ここでは、煙の形状表現、および輪郭描画とその内部に適切なシェーディングを施す手法について述べる。

図1に提案手法による画像生成の流れを示す。

入力として与えられるボリュームデータは、文献³⁾の手法を用いて生成される。ボリュームデータの大きさは、 $n_x \times n_y \times n_z$ とし、各ボクセルには、煙の密度とその点での速度ベクトルが記録されている。また、時間の経過に伴う煙の形状変化は、ボリュームデータを時系列に沿って連続的に与えることで表現する。

提案手法の基本的な考え方を以下に述べる。まず、初期状態として、空間中にパーティクルを生成する。煙や雲の発生源が分かっている場合には、その位置にパーティクルを生成する。各パーティクルには、球を

割り付け、これを用いて煙または雲の形状を表現する。すなわち、図 1 に示すように、密度分布に合わせて球の大きさを最適化する。次に、光源を配置し、グラフィックスハードウェアを利用して陰影および影の計算を行って画像を生成する。これによって得られた画像をフレームバッファから取得し、セル画の特徴である段階的なシェーディング画像への変換と輪郭抽出を行う。最後に段階的なシェーディング画像と輪郭画像を合成することで最終的な画像を得る。

以降、3.1 節でパーティクルの制御および配置した球の大きさの最適化について述べ、3.2 節で球のレンダリングについて述べる。そして 3.3 節と 3.4 節では段階的なシェーディング手法について述べ、3.5 節で輪郭線の描画手法について述べる。

3.1 パーティクルシステムと最適化

提案手法では、煙の形状やその変化は流体解析により得られたシミュレーション空間の密度と、速度ベクトルの変化を記録したボリュームデータで与えられる。時間経過に伴う密度や速度ベクトルの変化はフレーム単位で記録される。このボリュームデータの空間内に一定数のパーティクルをランダムに発生させ、煙の形状や動きを表現する。

各パーティクルの移動法則は次の通りである。パーティクルの移動速度は、パーティクルが存在する位置でのボリュームデータが持つ速度ベクトルにより決定される。パーティクルを速度ベクトルに沿って 1 フレーム分だけ移動させ、次のフレームの位置における速度ベクトルでパーティクルの速度ベクトルを更新する。パーティクルの速度ベクトルの大きさが 0 になった時点で、そのパーティクルは消滅させ、新たなパーティクルをボリュームデータの空間内に発生させる。

煙の形状は、基本的に多数のパーティクルの集合で表現することができる。しかし、レンダリング時間の短縮を図るには必要最小限のパーティクルを使用するのが望ましい。また、従来の手描きによる雲や煙の表現では、あまり細かな形状表現は行われておらず、省略された表現が行われている。多数のパーティクルを用いることで細かな煙や雲の形状表現が可能ではあるが、写実性が増してしまい、背景画像との調和が保てない。そこで、提案手法では、より少ないパーティクルにより形状を表現するため、パーティクルの位置に配置する球の大きさの最適化を行う。最適化の方法は次の通りである。

まず、入力として与えられるボリュームデータ (図 2a) に対して、あるしきい値 t を設定し、ボリュームデータを 2 値化する。そして、このしきい値 t 以上の

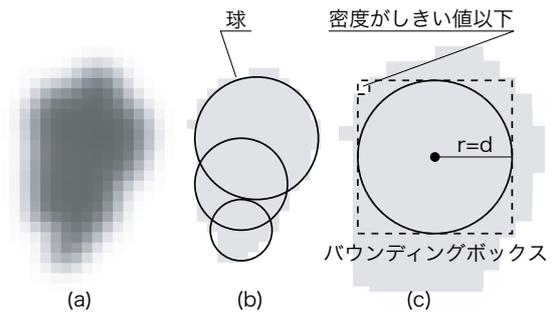


図 2 球の大きさの最適化



図 3 球のレンダリング

密度をもつボクセルの中に、パーティクルを発生させ、球を配置することで煙の形状を表現する (図 2b)。球の半径は以下のように決定する。パーティクルの位置を中心とするバウンディングボックスを用意する。バウンディングボックスの一辺の長さを $2d$ とする。 $d = 0$ の状態から、バウンディングボックスを徐々に拡大し、バウンディングボックス内のボクセルのうち、1 つでも以下の条件

$$\text{dens}(x, y, z) \leq t$$

を満たした時点でのバウンディングボックスの大きさ d を球の半径として用いる (図 2c)。ただし、 $\text{dens}(x, y, z)$ はバウンディングボックス内のボクセル (x, y, z) での密度を表す。

3.2 球のレンダリング

セル画調画像を生成する基となる画像を、球の集合をレンダリングすることで生成する。それぞれの球をパーティクルの位置に配置し、その半径の大きさは 3.1 節で求めた最適化半径 r とする。

ここでは 3 次元空間に光源を設定し、球の集合に対して光を照射し図 3 のように通常のシェーディングを行う。さらに提案手法ではシャドウマップを利用し、煙のセルフシャドウを表現することで煙の立体感を演出する。

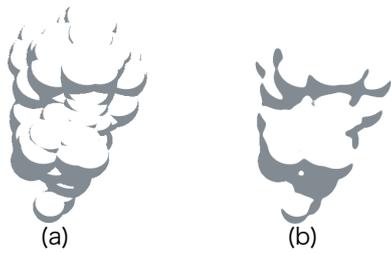


図 4 二値化



図 6 フィルタの適用

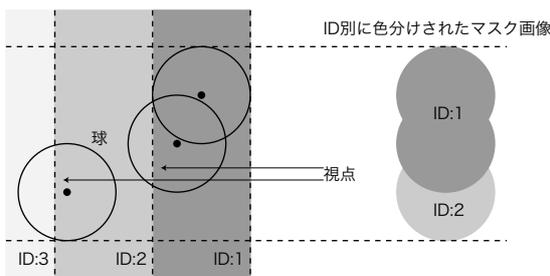


図 5 ID マスクの生成

3.3 フィルタリング

セル画の特徴である段階的な陰影は、3.2 節で得られる画像 (図 3) に対し、3.4 節で述べるしきい値処理を施すことで生成される。しかし、図 3 の画像に対しそのまましきい値処理を施した場合、図 4a のようにそれぞれの球の輪郭が鮮明に見えてしまい、煙らしい印象が得られない。

この問題を解決するには、煙の形状を表現する際に、球ではなくボリュームデータの密度値から等値面を生成する方法が考えられる。しかしその場合、生成される等値面の精密さはボクセル空間の解像度に依存し、煙のように多くの曲面で構成される物体を表現するには高解像度のボクセル空間を用意する必要がある。その場合、毎フレームにおける煙データ作成のための流体解析や等値面生成に膨大な計算コストがかかってしまう。

提案手法では、球のレンダリング画像 (図 3) に対して Gaussian フィルタを適用し、各ピクセルの色成分を平滑化することでこの問題を解決する。ただし、画像全体にフィルタを適用した場合、手前にある煙と奥にある煙が一部分で重なるような、本来平滑化がされるべきではない箇所においても平滑化がされてしまう。そこで、提案手法では奥行きを考慮したフィルタリング処理を施す。そのため、3.2 節においてパーティクルの深度値を基に ID マスクを生成する。ID マスク



図 7 シェーディングテクスチャ

はある深度の範囲に存在する球をグループ化し、範囲ごとに独立した ID を色として画像に保存したものである (図 5)。フィルタを適用する際には、周辺ピクセルの ID を参照し、注目ピクセルと等しい ID を持つピクセルに対して、Gaussian フィルタの式

$$c'(x, y) = \sum_i \sum_j \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2\sigma^2}\right) t(x_i, y_i)$$

を適用する。ただし、 d_{ij} は注目ピクセル (x, y) から周辺ピクセル (x_i, y_i) までの距離を表し、 σ は分散、 t は球のレンダリング画像 (図 3) における色成分とする。

フィルタ適用後の c' は、Gauss 分布における重みの総和 w で規格化する必要がある。ここでも、先と同様に注目ピクセルの ID と周辺ピクセルの ID を参照し、等しい場合に、次式

$$w(x, y) = \sum_i \sum_j \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2\sigma^2}\right)$$

で重みの総和を計算する。したがって、フィルタを適用された最終的な色成分 c は

$$c(x, y) = \frac{c'}{w}$$

により得られる (図 6)。

3.4 2 値化

ここではセル画の特徴である段階的なシェーディングを行う。3.3 節で得られる画像 (図 6) の色成分、すなわち輝度をテクスチャ座標とし、図 7 のような一次元テクスチャ (シェーディングテクスチャ) をマッピングすることで段階的な陰影を表現できる。提案手法ではテクスチャマッピングによりシェーディングの階

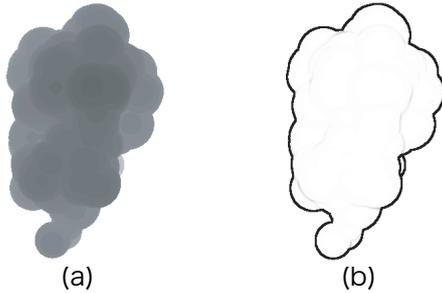


図 8 輪郭線抽出

調を表現するため、シェーディングテクスチャを変えることで2階調以外にも対応することができる。図 4b は2階調に出力した結果である。

3.5 輪郭線の描画

3.2節で球をレンダリングする際に得られる深度値(図 8a)に対し、Robertsの微分オペレータを適用することで輪郭線の抽出を行う。輪郭となるピクセル l' は次式

$$l'(x, y) = (d(x-1, y+1) - d(x+1, y-1))^2 + (d(x-1, y-1) - d(x+1, y+1))^2$$

を深度値を保存した画像に適用することにより抽出される。ただし、 d は深度値である。実際に画面に描画されるピクセルの色 l は、

$$l(x, y) = \begin{cases} 1 - wl' & (l \geq 0) \\ 0 & (l < 0) \end{cases}$$

で求める。ここで、 w は輪郭の濃さを指定する係数である。 l を α 成分に持つ画像を生成し、3.4節で得られる画像(図 4b)とアルファ合成をすることで、輪郭を描画する(図 8b)。

4. 実装例

提案手法を用いて、煙のセル画調レンダリングを行った結果を示す。本研究では、提案手法を実装するフレームワークとして DirectX 9.0 を使用し、プログラマブルシェーダを用いることで3.2節から3.5節までの処理をグラフィックスハードウェアに分担させ、レンダリング時間の更なる短縮を図る。

レンダリング環境は次の通りである。CPU: Pentium4 3.06GHz, グラフィックスハードウェア: ATI RADEON9700PRO. 生成される画像の解像度は横 512 ピクセル, 縦 512 ピクセルであり, 3.2節で用いるシャドウマップの解像度は横 2,048 ピクセル, 縦 2,048 ピクセルとする。入力として与えられるボリュー



図 9 煙の適用結果



図 10 煙の適用結果

ムデータの大きさは、幅 15 ボクセル, 奥行き 15 ボクセル, 高さ 20 ボクセルである。

提案手法によって、図 9, 図 10 のように輪郭線と、段階的な陰影で表現されるセル画調画像が生成されていることが分かる。特に今回使用したボリュームデータのように、流体解析のシミュレーション空間解像度が低い場合でも、球を用いて形状表現を行うことで柔らかな煙の輪郭を描くことができる。また提案手法では、流体解析のデータを変えることで図 11 のように、煙だけではなく、雲のセル画調レンダリングを行うことも可能である。

時間経過に伴う、煙の発生の様子を図 12 に示す。提

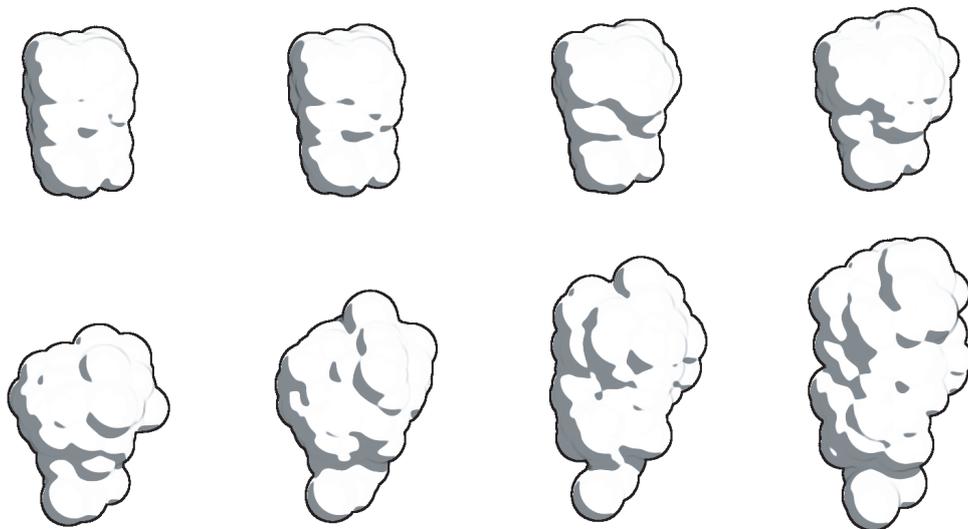


図 12 煙の発生の様子

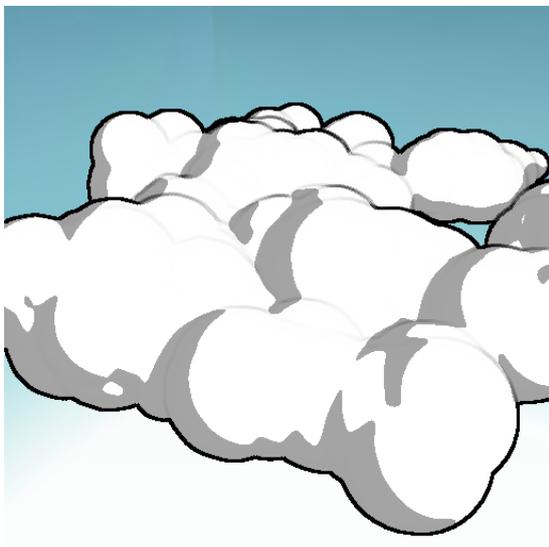


図 11 雲の適用結果

案手法によるアニメーションのフレームレートは 40fps である。したがって、レンダリングにかかる時間は 1 フレームあたり 25ms であり、これらのアニメーションをリアルタイム生成することが可能である。

5. むすび

3次元コンピュータグラフィックスを利用した煙のセル画調レンダリング手法について述べた。提案手法により、ボリュームデータで与えられた煙を、セル画調の画像として生成することが可能となった。また、

光源の位置に応じた陰影付けが可能となっている。さらに、最適化によりパーティクル数を少なくすることで、レンダリング時間も短縮することが可能となった。

今後の課題として、光源位置やパーティクル数など種々のパラメータをコントロールするための、インタラクティブなインターフェースの開発が挙げられる。

参考文献

- 1) Andrew Selle, Alex Mohr, Stephan Chenney, "Cartoon Rendering of Smoke Animations", *Proc. NPAR 2004 (Non-Photorealistic Animation and Rendering)*, pp.57-60 (June 2004)
- 2) Oliver Deussen, Thomas Strothotte, "Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration of Trees", *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp.13-18 (August 2000)
- 3) Ryoichi Mizuno, Yoshinori Dobashi, Tomoyuki Nishita, "Volcanic Smoke Animation using CML", *Proc. International Computer Symposium 2002 (ICS2002)*, Vol.2, pp.1375-1382 (December 2002)