

セル画調の煙のモデリングおよびレンダリングシステムの開発

土橋 宜典¹ 安生 健一² 山本 強¹

¹北海道大学 ²OLM デジタル

近年、Non-Photorealistic Rendering (NPR)技術と呼ばれる CG 手法の映像製作現場への導入が盛んに行われている。その理由として、3次元 CG と NPR 技術を組み合わせれば、人手では作成困難な映像の作成が容易となることが挙げられる。本稿では、そのような研究の一つとして、セル画調の煙の映像を生成するためのシステムを提案する。提案システムでは、大まかな煙の動きや形状をユーザによりインタラクティブにモデリングすることができる。そして、指定された形状・動きを元に、パーティクルシステムと Perlin Noise を組み合わせてセル画調の煙の映像をリアルタイムにレンダリングする。提案システムによって、ユーザの意図する演出効果を表す煙のセル画調映像を簡便に生成できる。

A Modeling and Rendering System for Cartoon Smoke Animation

Yoshinori DOBASHI¹ Ken-ichi ANJYO² Tsuyoshi YAMAMOTO¹

¹Hokkaido University ²OLM Digital

Recently, non-photorealistic rendering (NPR) techniques developed in the field of computer graphics (CG) have been widely used in many animation production systems. One of the reasons for this is that NPR techniques combined with 3DCG make it easier to produce images that are hardly created by hand. In this paper, we propose a system for modeling and rendering cartoon smoke animations. The proposed system allows the user to model the overall shapes and motions of the smoke interactively. Based on the specified shapes and motions, the system renders the cartoon smoke in real-time by combining a particle system and the Perlin Noise. By using the proposed system, the user can easily create cartoon smoke animations bringing intended effects.

1. はじめに

セルアニメーションなどの映像生成において、Non-Photorealistic Rendering(NPR)と呼ばれる技術の導入が盛んに行われている。一般に、セルアニメーションは人手による製作が主であり、膨大な労力を強いられる。NPR 技術を導入することでその作業を大幅に軽減することができる。それだけでなく、NPR 技術の活用により、作業量の観点から実現が困難とされてきた映像表現やこれまでにない新しい映像表現も可能となりつつある。

セルアニメーションにおいて人手による描画が困難な対象として、煙や炎、水といった流体に関連した現象が挙げられる。本研究では、これらのうち煙の表現に焦点をあてる。煙はその形状および動きの複雑さから人手により生成できる映像に限界がある。例えば、視点位置が移動する場面において、複雑に形

状が変化する煙の映像を作成することは難しい作業の一つである。このような問題を解決するため、NPR 技術と 3次元 CG 技術を利用して煙のセル画調アニメーションを作成する手法がいくつか提案されている[1][2][3]。しかし、これらの手法ではユーザは煙の形状や動きを指定することはできない。そのため、ユーザの意図する効果を得るためには、試行錯誤的にパラメータを調整して映像を作成する作業を繰り返し行わなければならない。

本研究では、この問題を解決するためのインタラクティブなシステムを提案する。提案システムでは、スケッチベースのインターフェースを用いて、煙の形状と移動軌跡を直感的に指定することができる。そして、煙のセル画調映像はパーティクルシステムを用いてリアルタイムに生成する。提案システムにより、セル画調の煙の映像を直感的かつ簡便に生成することができる。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2節において、煙のセル画調映像に関する従来法について議論する。次に、3節において提案システムの概要を述べる。そして、提案システムにおける煙の形状および動きのモデリング部とセル画調の煙のレンダリング部について、それぞれ、4節および5節で説明する。6節では、提案システムによる映像生成例を示し、提案システムの有効性について検討する。最後に、7節において本論文のまとめと今後の課題について考察する。

2. 従来研究

Selleらは流体シミュレーション結果からパーティクルシステムを用いてセル画調の煙の映像を生成する手法を提案している[1]。この手法では、パーティクル位置にビルボードを配置し、煙の基本形状を表すテクスチャをマッピングして描画することでセル画調の映像を生成している。しかし、この手法では煙の影や陰影などを考慮した映像を生成することができない。また、ビルボードを用いているため、視点位置の移動に伴ってビルボードの入れ替えが生じ、アニメーションにチラつきが生じてしまう。これらの問題を解決するため、星野らはビルボードの代わりに球形パーティクルを用いた手法を提案している[2]。また、McGuireらはビルボードにマッピングするテクスチャに煙の3次元形状を表す奥行き情報も持たせることで、リアルタイムレンダリングが可能な手法を提案している[3]。しかし、これらの手法では各パーティクルに割り付けられる煙の基本形状が個別に認識されてしまい、不自然な映像が生成されてしまう。本研究では、パーティクルに割り付ける煙の基本形状を時間的に変化させることでこの問題を解決する。

一方、煙の形状や動きを計算する手法として、近年、数値流体解析を利用した手法が盛んに研究されている[4]。また、ユーザの指定した動きとなるようシミュレーションをコントロール手法も提案されている[5]。これらの手法により、ユーザの意図を反映したリアルな煙の動きを計算することができる。しかし、その反面、極めて高い計算コストを必要とするという問題がある。また、必ずしもユーザの意図した動きをすることは限らず、目的の演出効果を得るためには、各種パラメータを試行錯誤的に決定する必要がある、極めて煩雑な作業を伴う。そこで、本研究では、パーティクルシステム[6]を用いて、煙の形状および

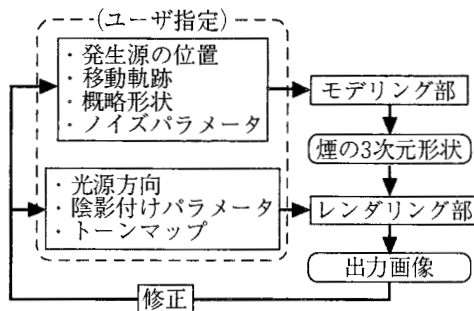


図1: 提案システムの概要

その移動軌跡を直接指定することでこの問題を解決する。

3. 提案システムの概要

提案システムによる映像生成の流れを図1に示す。提案システムは、煙の形状および動きのモデリング部とセル画調の煙のレンダリング部からなる。

モデリング部においては、煙の発生源位置、移動軌跡、概略形状および煙の基本形状のためのノイズパラメータを指定する。発生源位置は、3次元空間中の任意の点として与える。移動軌跡は発生源位置を始点とする折れ線近似された曲線として与える。この移動軌跡に沿ってパーティクルを発生させることで煙を生成する。各パーティクル位置には、煙の基本形状を表すプリミティブを配置する。基本形状プリミティブとして、Perlin Noise[7]を用いて球の表面を摂動させた形状を用いる。以降、これを煙パーティクルと呼ぶことにする。このとき、Perlin Noiseのパラメータを調整することで、煙の詳細な凹凸感をコントロールできる。煙パーティクルの大きさは、ユーザにより指定される概略形状を元に決定する。なお、モデリング部で生成した煙の形状はテンプレートとして保存し、コピーして複数配置することも可能である。

次に、レンダリング部について説明する。基本的には、モデリング部によって生成された煙の3次元形状に対して陰影計算を行い、セルシェーディングを施すことで映像を生成する。ここで、人手による煙の映像を観察すると、煙の輪郭線に沿って陰影が強調されている場合が多い。そこで、この効果を実現するため、デフォルトとして視点位置に光源を配置する。この光源に加えて、太陽など本来の光源からの陰影を考慮してセル画調の映像を生成する。さらに、陰影付けの度合いをコントロールするためのパラメータを指定する。

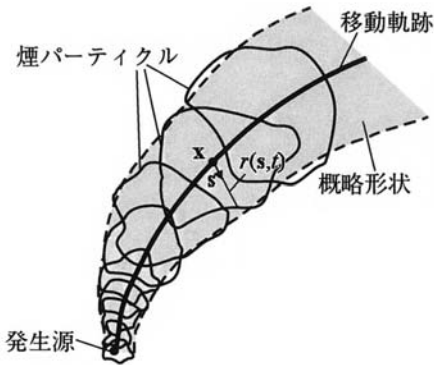


図2: 煙の3次元形状

また、セルシェーディングのためのトーンマップもインタラクティブに設定することができる。

提案システムでは、セル画調画像はリアルタイムにレンダリングされる。そのため、出力画像を確認しながら、煙の形状や動き、レンダリングパラメータをインタラクティブに編集することができる。また、提案システムでは、キーフレーム法を用いて煙の動きの時間変化を設定することも可能である。ここで、モデリング部およびレンダリング部で指定できる全てのパラメータはキーフレームとして保存できる。

4. モデリング部

図2に示すように、煙の3次元形状は移動軌跡上に煙パーティクルを配置することで決定する。煙パーティクルの大きさは指定された概略形状に応じて決定する。以下では、煙パーティクルについて説明した後、移動軌跡および概略形状の指定方法について述べる。

4.1 煙パーティクル

煙パーティクルは、Perlin Noise を用いて表面形状を摂動させた球である。すなわち、煙パーティクルの中心 x から s 方向の表面までの距離 d を次式で表す(図2参照)。

$$r(s, t) = R + \delta(s, t) \quad (1)$$

ここで、 R は基本とする球の半径、 δ は Perlin Noise による摂動量、 t は時間である。式(1)に示すように、摂動量 δ を時間的に変化させることで煙パーティクルの形状は動的に変化する。これにより、個々の煙パーティクルの形状が知覚されにくく、不自然な映像となることを避けることができる。

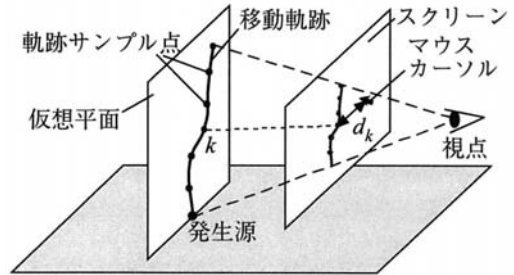


図3: 移動軌跡の指定方法

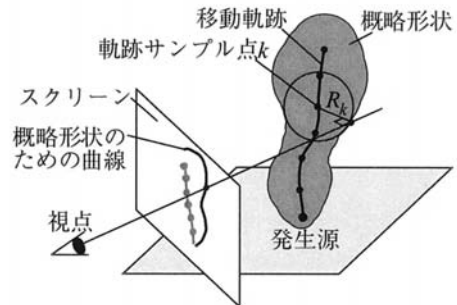


図4: 概略形状の指定方法

4.2 移動軌跡の設定

移動軌跡は、図3に示すように、視線に垂直かつ煙の発生源を含む仮想平面上で設定する。ユーザはマウスによりスクリーン上で曲線を描画して軌跡を指定する。ユーザにより描画された曲線を等間隔にサンプルし、これらのサンプル点を結んだ折れ線として軌跡を表現する。以下、軌跡上のサンプル点を軌跡サンプル点と呼ぶ(図3参照)。軌跡サンプル点 k には、煙の移動速さ v_k 、煙の大きさを表す半径 R_k 、煙の陰影を制御するための陰影オフセット c_k なる三つのパラメータが割り付けられる。これらのうち、煙の半径 R_k は煙の概略形状から決定する(4.3節参照)。また、煙の陰影オフセット c_k は、煙のセル画調レンダリングを行う際に使用する(5節参照)。以下では、煙の移動速さ v_k の設定方法について説明する。

煙は、煙パーティクルを軌跡に沿って移動させることでシミュレートする。このとき、煙パーティクルの速さは、各軌跡サンプル点に割り付けられた v_k から決定する。これによって、軌跡上での煙の移動の速さの変化を表現できる。 v_k はマウスを用いて以下のように設定する。図3に示すように、軌跡サンプル点 k をスクリーン上に投影した点とマウスで指定した点との距離 d_k を計算する。そして、この距離に応じた値 $\Delta v_k = \exp(-\alpha d_k)$ を v_k に加算もしくは減算する。加算するか減算するかは

ユーザにより指定できる。ただし、 $d_k > D$ のとき $\Delta v_k = 0$ とする。ここで、 D および α はあらかじめシステムに設定された定数とする。これにより、ユーザは、画面をペイントするように煙の速さを設定できる。

4.3 概略形状の設定

図 4 に示すように、ユーザは、スクリーン上で概略形状を設定するための 2 次元曲線をマウスにより描画する。ただし、この曲線は点列として表現される。また、概略形状の設定は、移動軌跡を設定した際の視点位置と異なってもよい。この曲線を用いて、煙の概略形状を以下のように決定する。

スクリーン上で指定された概略形状のための 2 次元曲線の任意の点と視点とを結ぶことで、曲面を構築することができる。概略形状は、煙の移動軌跡上の点とこの曲面との最短距離を半径とする球の集合として定義する。具体的には、各軌跡サンプル点においてこの球の半径を計算して記憶する。すなわち、図 4 に示すように、軌跡サンプル点 k と概略形状のための曲線を表す点列と視点とを結ぶ直線との距離のうち、最短となる距離 R_k を記憶する。軌跡上の任意の点での球の半径は、隣接する軌跡サンプル点に記憶されている球の半径から線形補間により求める。

5. レンダリング部

本節では、セル画調の煙のための陰影計算とセルシェーディング部分について説明する。

5.1 陰影計算

視点からみた煙の輪郭部分を強調するため、本来の光源とは別に、視点位置にも仮想光源を配置して煙パーティクルの輝度計算を行う。このとき、光源からの距離による光の減衰は考慮しない。また、煙パーティクルが別の煙パーティクルに落とす影も考慮しない。このとき、煙パーティクル上の点 P の輝度 I は、次式により定める(図 5 参照)。

$$I = (I_1 \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{s}_v + I_2 \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{s}_l) + c \quad (2)$$

ここで、 I_1 および I_2 は、それぞれ、視点位置に配置した仮想光源および本来の光源の輝度、 \mathbf{n} は点 P 単位法線ベクトル、 \mathbf{s}_v および \mathbf{s}_l は、それぞれ、点 P から視点方向および光源方向への単位ベクトル、また、 c は陰影オフセットである。

式(2)において、陰影オフセット c は、軌跡サンプル点に記憶された値から線形補間により求める。軌跡サンプル点に記憶する陰影オ

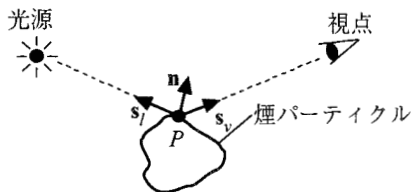


図5: 煙の陰影計算

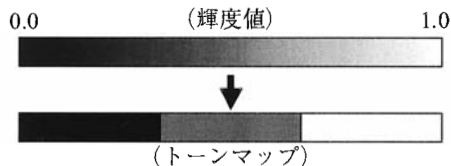


図6: セルシェーディング

フセットはユーザにより指定する。これは、4.2 節で述べた煙パーティクルの移動速度の設定と同様な方法により指定する(図 3 参照)。これにより、場所による煙の陰影の変化をインタラクティブにコントロールすることが可能となる。

5.2 セルシェーディング

前節の方法による陰影計算結果から、セル画調の画像に特有の段階的な色変化を持つシェーディング画像を生成する。この処理は、陰影計算後の煙パーティクルの輝度値に対してトーンマッピングを施すことにより実現できる。すなわち、図 6 に示すように、煙パーティクルの輝度値をテクスチャ座標とし、トーンマップを表す 1 次元テクスチャを煙パーティクルにマッピングすることで実現できる。このセルシェーディング用のトーンマップはインタラクティブに指定できる。また、テクスチャマッピングはグラフィックスハードウェアにより高速に処理できるため、ユーザは指定したトーンマップを適用した結果をリアルタイムに確認できる。また、セルシェーディング後の特定の色に対してグレアの効果を付加することも可能である。これにより、炎や爆発など明るい部分の輝きを表現できる。

6. 実装結果

提案システムを実装してセル画調の煙の映像を生成した例を示す。実装には、CPU として Intel Core2Duo (T7600) 2.33GHz を搭載し、メインメモリが 2.0 GB の PC を用いた。また、GPU として、nVidia GeForce 7600 を搭載している。ただし、煙パーティクルの移動や陰影計算などは CPU で行っており、GPU はセルシェーディングのための 1 次元テクスチャマ

ッピングおよび結果画像の表示にのみ用いている。

図 7 に提案システムによって単一の煙のモデリングを行っている様子を示す。図 7(a)は煙の移動軌跡および概略形状を指定した様子である。次に、図 7(b)は煙パーティクルに対し、陰影計算を行った結果の画像である。なお、移動軌跡および概略形状も併せて表示している。概略形状に沿った煙の形状が生成されているのがわかる。図 7(c)は図 7(b)に対し、セルシェーディングを施した画像である。図 7(c)下部に示すようなトーンマップを用いてセルシェーディングを行っている。図 7(d)は視点位置を変更した場合の画像である。この例から、提案システムによりユーザの意図する形状のセル画調の煙画像を生成できていることがわかる。

次に、提案システムを用いて被弾した戦闘機が煙を放出しながら飛行するアニメーションを作成した例を図 8 に示す。図 8(a)はアニメーション作成のために指定した煙の軌跡と概略形状を示している。図 8(b)および(c)はアニメーションからの画像である。この例では、グレアの効果を付加し、煙中に存在する炎による輝きの効果を表現している。

最後に、図 9 に煙パーティクルを応用して生成した爆発の映像の例を示す。戦闘機周辺で複数の爆発が生じているアニメーションを作成した。爆発については、概略形状を表す球の大きさおよび動きをユーザにより指定した。そして、この球表面に沿って煙パーティクルを移動させることで爆発をモデリングした。レンダリングは煙と同様の方法により行っている。図 9(a)から(c)は作成したアニメーションからの画像である。

以上の例から、人手によって描かれたセル画調の煙に類似した良好な画像が得られているのがわかる。提案システムで生成した煙の形状は、3次元であり煙の時間変化や視点位置を変更した場合の画像を容易に生成できる。

最後にモデリングに要した時間およびレンダリング時間について述べておく。本節で示した煙および爆発の形状はいずれも 10 分程度でモデリングすることが可能である。レンダリング時間は、煙パーティクルの個数にほぼ比例する。表 1 に図 8 および図 9 に示す画像の生成のためのレンダリング時間と煙パーティクル数(いずれも平均値)をまとめた。表 1 から、インタラクティブな編集には問題ない速度で画像を生成できていることがわかる。

表1: レンダリング時間

図	煙パーティクル数	レンダリング時間[秒]
8	150	0.32
9	1300	0.23

7. まとめと今後の課題

本稿では、セル画調の煙の映像をインタラクティブに生成できるシステムを提案した。提案システムでは、スケッチベースのインターフェースにより、ユーザの意図に応じた煙の形状を容易に生成できる。また、煙への陰影効果やセル画調変換のためのトーンマップもインタラクティブに設定できる。提案システムではセル画調映像はリアルタイムに表示されるため、ユーザは結果画像を確認しながら煙の形状やレンダリングパラメータを編集することが可能である。提案システムを用いてセル画調の煙・爆発の映像例を作成し、システムの有効性を確認した。

今後の課題として以下の事項が挙げられる。まず、提案システムにおける煙の動きは軌跡に沿った移動のみであるため、あまり複雑な流れを表現することは難しい。渦が存在する場合などより複雑な煙の動きを表現できるようシステムを拡張する必要がある。解決法の一つとして、流体シミュレーションなどの物理シミュレーションとの組み合わせが考えられる。また、煙パーティクル数に比例してレンダリング時間が低下するため、大量の煙をインタラクティブに生成することは困難となる。この問題を解決する方法の一つとして、GPUの利用による高速化が挙げられる。

参考文献

- [1] A. Selle, A. Mohr, S. Chenney, "Cartoon Rendering of Smoke Animations,," Proc. NPAR 2004, pp. 57- 60 (2004).
- [2] 星野, 土橋, 山本, "煙のセル画調レンダリング," 情報処理学会グラフィクスとCAD 第 116 回研究会研究報告, pp. 35-40 (2004).
- [3] M. McGuire, A. Fein, "Real-Time Rendering of Cartoon Smoke and Clouds,," Proc. NPAR 2006, pp. 21-26 (2006).
- [4] R. Fedkiw, J. Stam, H. W. Jensen, "Visual Simulation of Smoke,," Proc. SIGGRAPH 2001, pp. 15-22 (2001).
- [5] A. Treuille, A. McNamara, Z. Popovic, J. Stam, "Keyframe Control of Smoke Simulations,," ACM Trans. on Graphics (Proc.

SIGGRAPH 2003), Vol. 22, No. 3, pp. 716-723 (2003).

[6] W. T. Reeves, "Particle Systems—a Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects,"

ACM Trans. on Graphics, Vol. 2, No. 2, 91-108 (1983).

[7] K. Perlin, "An Image Synthesizer," Proc. SIGGRAPH'85, pp. 287-296 (1985).

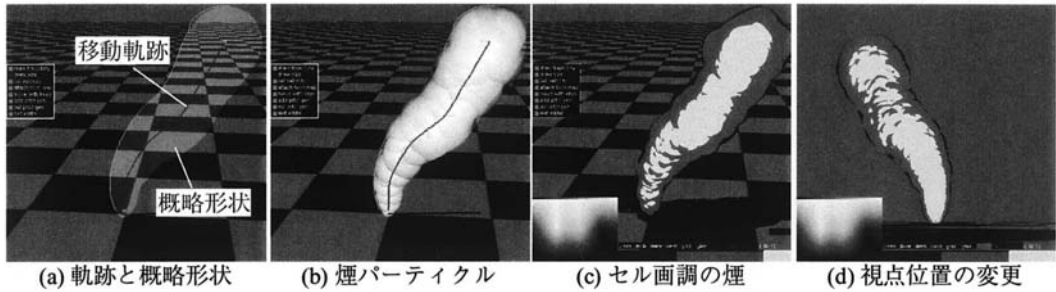


図7: 単一の煙の生成例

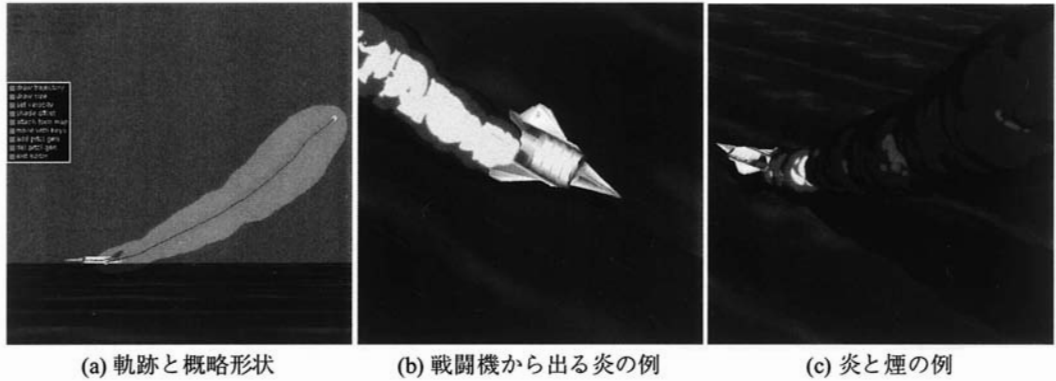


図8: 戦闘機から出る煙のアニメーション例

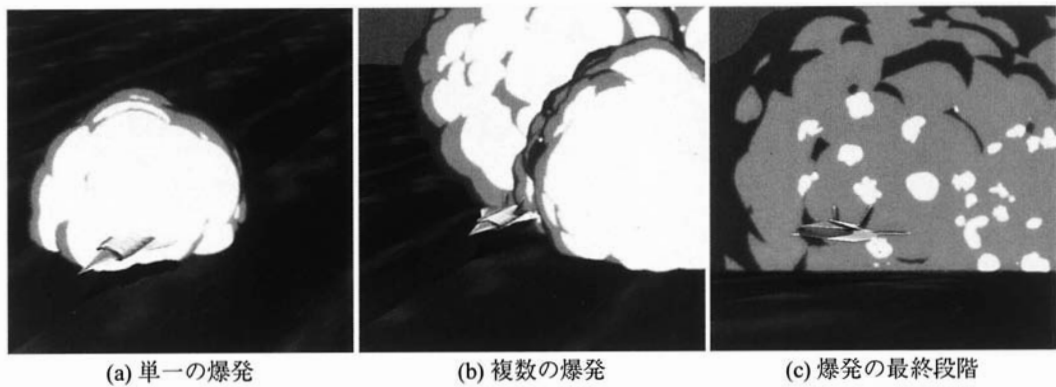


図9: 爆発のアニメーション例