

CGによる炎の3次元シミュレーション

高倉 章 河合直樹 室田秀樹 茂出木敏雄

大日本印刷画像研究所

これまでに、炎の動きを粒子モデルの制御に置き換える手法が千葉らにより提案されてきた。本論文では、粒子モデルの制御を単純化するとともに、よりリアルな炎の画像を生成する手法を示す。炎粒子の動きの制御については、気流の効果、粒子の拡散効果、仮想温度による上昇効果により制御する手法を追試するとともに3次元に拡張した。個々の粒子の仮想温度の与え方、仮想温度と上昇力の関係などについては極力簡易な関数で定義づけている。さらに、炎画像生成方法は粒子を複数のポリゴンに置き換え各画素の色は、奥行き方向の粒子の密度により決定する。使いやすい炎の3次元シミュレーション手法の開発という観点からみると、興味深いものとなっている。

3D CG Simulation of Flames

Akira Takakura, Naoki Kawai, Hideki Murota and Toshio Modegi

Image & Information Reserch Institute

DAINIPPON PRINTING CO., LTD.

A simulation method which replaces the motion of frames with control of a particle model, have already proposed by Chiba at al. In this paper, we will simplify control of a particle model, and propose a method generating more realistic images. For the control of a particle, we will use a 3D control method taking into account an effect of an air stream, an effect of diffusion, an effect of ascending force used by imaginary temperature. We will define the method of imaginary temperature of individual particle, the relation between imaginary temperature and ascending force, etc by simple functions. We will replace a particle with the several polygons, and decide the color of each pixel according to the density along the depth direction. This point is one of the interesting features of our method.

1. はじめに

炎や煙などのガス状物体のシミュレーションは、種々のCGアニメーションに応用をもち、CGによる自然現象のシミュレーションという観点からもとりわけ興味深い課題である。そのため、これまでに多数の研究例がある（紙面の都合上、文献の引用については [村岡93] に詳しいので、そちらを参照されたい）。

これらの研究のうち、特に炎のシミュレーションに関するものとしては、particle system による花火のような炎のシミュレーション [Rec83]、炎の燃焼過程を考慮したモデリングとボリュームレンダリングによるろうそくやブゼンバーナーのような炎のシミュレーション [Ina90]、渦運動する大量の粒子を用いた紙が燃えるような炎のシミュレーション [Sim90]、2次元テクスチャと種々の加工操作を用いたたき火やろうそくのような炎のシミュレーション [大島91]、簡単な遷移規則をもつセル・オートマトンによるアルコールを燃やしたような炎のシミュレーション [安居院91] およびスペクトル乱流理論に基づく関数ベースのモデリング法による勢いよく燃え上がるような炎のシミュレーション [Sak92]、炎のゆらぎを粒子の動きに置き換えるもの [千葉92]、[村岡93] などが行われている。

さまざまな種類の炎のシミュレーションを行うためには、炎のゆらぎの制御が容易であることが、要求される。これまで提案されている手法のなかでも、文献 [村岡93] で提案されている渦場と粒子によるシミュレーション法が、この点において有効であると思われる。

本研究では、さまざまな炎のゆらぎの表現が可能な "3次元の炎" を目的に、渦場のシミュレーション法の開発について追試、検討を重ねてきた。また、可能な限り容易に炎画像を生成する手法の検討を行ってきた。

本論文では、まず2次元の炎の粒子の流れをシミュレーションする手法を追試し、3次元に拡張する手法について述べる。次に、粒子の移動軌跡から簡易に画像を生成する手法について述べる。最後に、シミュレーション結果を示し、その有効性と今後の課題について議論する。

2. 渦場によるシミュレーション法の追試と3次元への拡張

[村岡93] 渦場のシミュレーション法により、まず気流の効果として渦場を大小さまざまな渦の速度場の合成として発生させ、この渦場に従い粒子を移動させる。さらに粒子の行動規則に従い時間的に変化する粒子の動きを制御する。

ここでは、渦場のシミュレーション法を追試するとともに3次元に拡張する方法について述べる。なお、手法の詳細不明点においては、必ずしも文献 [村岡93] に一致しないことを断わっておく。

2.1 渦場の更新規則についての追試

この手法における渦の回転速度 $v(d)$ を以下のように定める。

$$v(d) = (v_{max} / const) \cdot d \quad (d < R < const)$$
$$v_{max} \cdot (1.0 - \sin \theta) \quad (const < d < R)$$
$$\theta = \pi / 2.0 \cdot (R - d) / R$$

ここで、 d は渦の中心からの距離、 R は渦の半径、 v_{max} は渦の最大回転速度、 $const$ は定数である (図1参照)。

このような渦から構成される渦場を次の更新規則に従い変化させる。

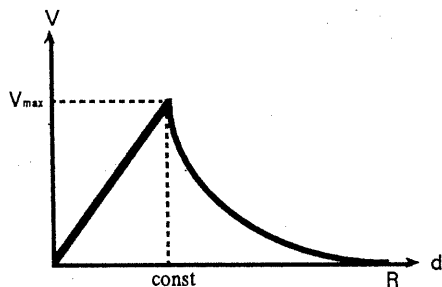


図1 渦
Fig.1 A vortex

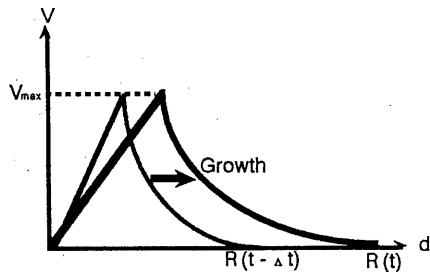


図2 渦の成長
Fig.2 The Growth of a vortex

(1)渦の発生

渦の発生は、その中心位置、半径、回転速度、回転方向をランダムに与える。ただし、渦の個数は意図的に決定する。

(2)渦の成長

渦の成長は発生後、渦の半径が計算ステップごとに一定の割合で増加すると仮定する。

$$R(t) = R(0) \cdot (1.0 + t/T)$$

ここで、 $R(0)$ は渦の初期半径、 T は渦の寿命時間、 t は任意の時間である(図2参照)。

(3)渦の衰退

渦の衰退は発生後、渦の回転速度が計算ステップごとに一定の割合で減少すると仮定する。

$$v(t) = v(0) \cdot (1.0 - t/T)$$

ここで、 $v(0)$ は渦の初期回転速度、 T は渦の寿命時間、 t は任意の時間である(図3参照)。

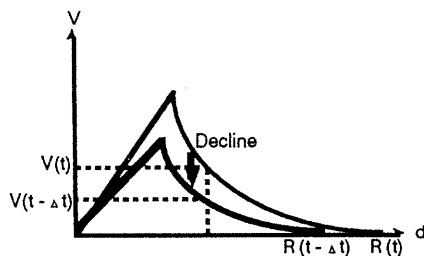


図3 渦の衰退
Fig.3 The Decline of a vortex

その他、渦場によるシミュレーション法では、渦の消滅、移動、障害物回避などの更新規則があげられているが、今回は考慮していない。

2. 2 炎粒子の行動規則についての追試

渦場のシミュレーション法における炎粒子の行動規則を以下に示す。

(1)粒子の発生

粒子は、任意に設定された発生源から1計算ステップごとに一定数発生する。

(2)粒子に働く力

粒子に働く力を、以下のようにする(図4参照)。

$F(t)$ 時刻 t での粒子に働く力
 $= F_r(t) + F_a(t) + F_s(t)$
 $F_r(t)$: 粒子間に働く力
 $F_a(t)$: 仮想的に与えられた温
 度に比例した上昇力
 $F_s(t)$: 渦場から受ける力

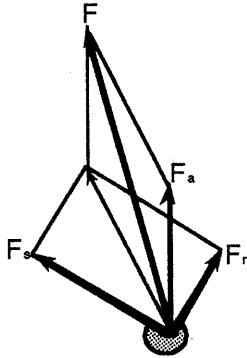


図4 粒子に働く力
 Fig. 4 Effective force on a particle

・粒子間に働く力 F_r について
 粒子間に働く力を以下のようにする。

$$\begin{aligned}
 F_{rn} &= -\sum F_{nm} \\
 F_{nm} &= (P_n - P_m) \\
 &\quad / |P_n - P_m|
 \end{aligned}$$

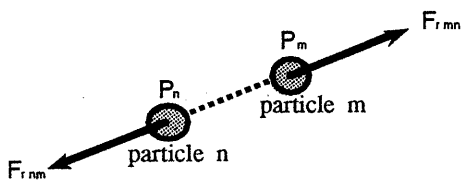


図5 粒子間に働く力
 Fig.5 Effective force on particles

ここで、 P_n は粒子 n の空間上の位置、 P_m は粒子 m の空間上の位置、 F_{rnm} は粒子 n と粒子 m の間に働く力、 F_{rn} は粒子 n に働く力である。

・上昇力 F_a について

粒子は、仮想的な温度をもち、温度に比例した上昇力をもつとする。仮想的な温度 e を次のようにする。

$$e(t) = e_{max} \cdot \exp(t/T - 1.0)$$

ここで、 t は任意の時間、 T は粒子の寿命時間、 e_{max} は仮想温度の最大値、 $e(t)$ は任意時間 t での仮想温度である。

また、上昇力 F_a を次式のようにする。

$$F_a(t) = (const \cdot e(t)) U$$

ここで、 $const$ は定数、 U は上向き方向の単位ベクトルである (図6参照)。

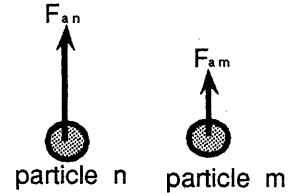


図6 粒子に働く上昇力
 Fig.6 Effective ascending force on a particle

・渦場により働く力 F_s について
 渦場により働く力の向きは、設定された個々の渦を仮想球とし任意の位置における渦の力の向きを渦の回転方向とその位置で決定される球の接線方向とする。

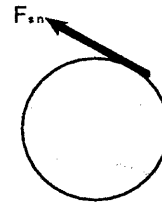


図7 粒子に働く渦の力
 Fig.7 Effective vortex force on a particle

(3) 粒子の消滅

粒子は、粒子の寿命時間を過ぎると消滅す

る。

2. 3 渦場によるシミュレーション法の3次元への拡張

(1) 3次元の渦場

渦場は、3次元空間上のある領域中にランダムな渦と、上昇気流効果のための固定した渦により構成される(図8参照)。

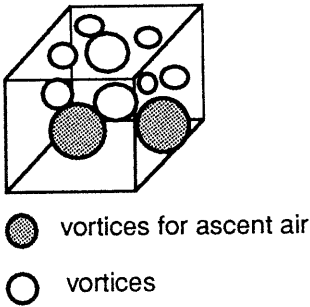


図8 3次元の渦場

Fig.8 A field of vortex in 3D. space

(2) 粒子の発生位置

粒子は3次元空間上のある領域に一定数(NxN個)配置する(図9参照)。

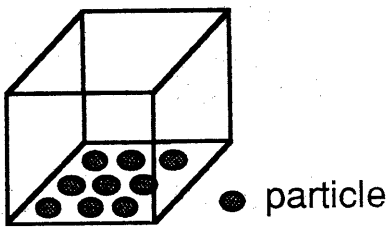


図9 粒子の発生

Fig.9 The Generation of particles in 3D. space

3. 画像生成法

第2章で述べた手法により得られた粒子の

移動軌跡から、炎の画像を生成する手法について述べる。

[村岡93]にあげられるように、粒子の移動軌跡から炎の画像を生成する上で、解像度に対して、より少ない粒子数ですむような補間方法が必要である。また、可能な限り単純なレンダリング方法という観点でみると、粒子をポリゴンに置き換え、炎の色を割り当てる手法が有効である。以下に炎画像生成の手法を示す。

(1) 粒子の色の定義

第2章で述べた粒子の仮想温度から個々の粒子の色を次のように決定する。

$$C_n = \begin{cases} C_{max} / e_s \cdot e & (0.0 < e < e_s) \\ C_{max} & (e_s < e) \end{cases}$$

ここで、 C_n は粒子 n の色、 C_{max} は最大輝度値、 e_s は定数、 e は任意の仮想温度である(図10参照)。

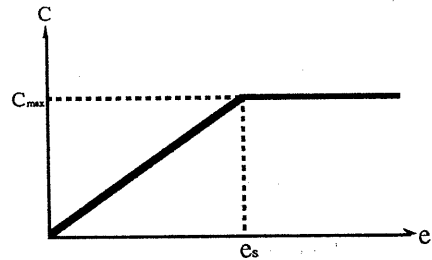


図10 仮想温度と粒子の色の関係

Fig.10 The relation between imaginary temperature and color of a particle

(2) ポリゴンの付加

第2章で得られた粒子の3次元空間上の座標点を1点とする三角形を複数個付加することにより、通常のポリゴンレンダリングを可能とする。

(3) 三角形の頂点色の割り当て

C_0 : (1)による粒子の色
 C_1, C_2 : 輝度値 0

3 角形の座標点 (P_0, P_1, P_2) に対する頂点色を (C_0, C_1, C_2) , 粒子の座標点を P_0 とする (図11参照) .

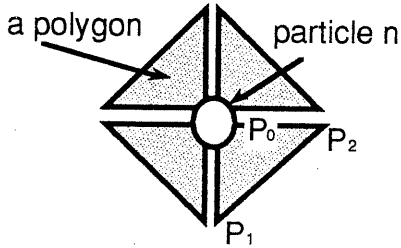


図11 粒子とポリゴンの関係
 Fig.11 The relation between a particle and a polygon

(4) 奥行き方向の色の加算

(2)で設定した複数の3 角形に対して、Zバッファリングを施さない Gouraud Shading を行う (図12参照) .

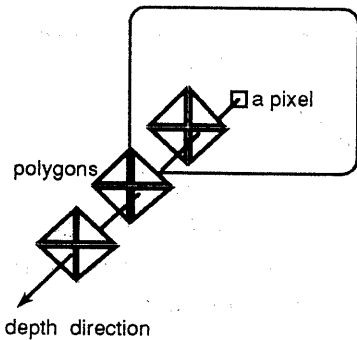


図12 ポリゴンの色の加算
 Fig.12 The Accumulation of the colors of polygons

4. 炎のシミュレーション例

図13にろうそくの炎のシミュレーション例 (平均粒子数80, 平均ポリゴン数800) を, 図14にたき火のシミュレーション例 (平均粒子数200, 平均ポリゴン数2000) を示す。粒子の寿命は, 10 計算ステップとした。

渦の配置, 渦の大小だけでなく, 粒子の発生位置によりろうそくの炎, たき火を使い分けられる。また, 粒子数が多くなるにつれ, 炎の色が白色に近づき, 写真で炎を撮影したような画像が得られる。

4. 1 シミュレーション結果の考察

ろうそくの炎, たき火のシミュレーションについて, 240 フレームのアニメーションを作成した。たき火のシミュレーションについては, "たき火"というよりも"神聖な炎"という表現があてはまる。また, 粒子の消滅に不自然さが残った。

ろうそくの炎のシミュレーションでは, 筆者らの主観ではあるが, 形, 動きともに, 自然な印象を受けた。

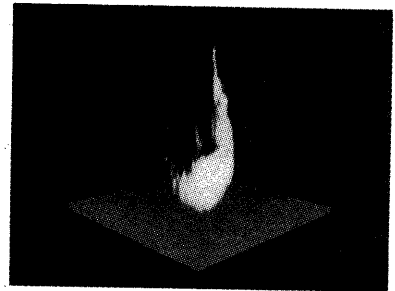




図13 たき火のシミュレーション
Fig.13 Simulation of a bonfire

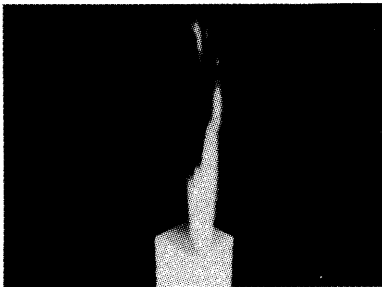
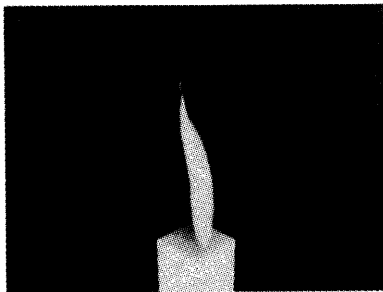
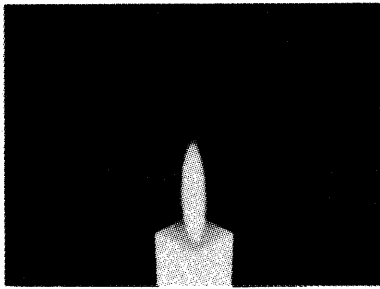


図14 ロウソクの炎のシミュレーション
Fig.14 Simulation of a candlelight

5. 画像生成の詳細検討

ここでは、第3章で述べた画像生成の手法について、少し詳しく議論する。

画像生成の特徴

(1)粒子をポリゴンに置き換える。

ポリゴンのサイズを変化させて、シミュレーションを行った。その様子を図15に示す。結果、サイズを小さくすると補間が不足し、不自然な印象を受ける。

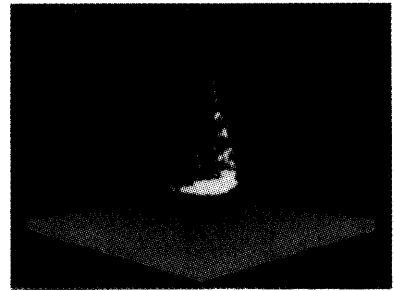


図15 ポリゴンのサイズが小さい場合の炎

Fig.15 Simulation of flames having small polygons

(2)奥行き方向に粒子の色を加算する。

奥行き方向にポリゴンの色を加算しないシミュレーションを行った。その様子を図16に示す。奥行き方向に色を加算することは、奥行き方向の粒子の数（粒子の密度）で炎の色が決定することになる。

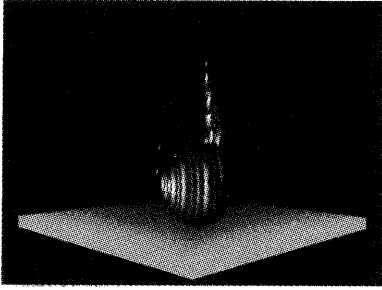


図16 奥行き方向に色を加算しない場合の炎
Fig.16 Simulation of flames having no accumulated color

6. おわりに

本論文では、まず [村岡93] の渦場のシミュレーション法に基づく3次元の炎のシミュレーション方法および炎の画像生成法を示した。そしてシミュレーション例を示した。さらに、使いやすい炎画像生成法について検討した。

今後の課題として、ガスバーナのような炎の色の実現、燃焼による炎の色の变化なども表現できるモデルの拡張があげられる。

謝辞

本研究に関して種々の御討論を頂いた、千葉則茂岩手大学教授に感謝する。また、種々のプログラム実験を試みて頂いた当研究所、飯沼輝明君に感謝する。

文献

- [村岡93] 村岡一信、千葉則茂、高橋宏道、三浦 守: "渦場と粒子による煙や炎の2次元シミュレーション", 電子情報通信学会論文誌、(D-II) J76-DII,8 pp.1735-1745 (1993)
- [千葉92] 千葉則茂: "煙や炎のシミュレーション", PIXEL, 11, pp.132-136 (1992)

- [Ina90] Inakage M.: "A Simple Model of Flames", CGI'90, pp.71-81(1990)
- [Ree83] Reeves W. T.: "Particle System - A Technique for Modering a Class of Fuzzy Objects", Computer Graphics ,17, 3, pp.359-376 (1983)
- [Sim83] Sims K.: "Particle Animation and Rendering Using Data Parallel Computation", Computer Graphics , 24, 4, pp. 405-413 (1990)
- [Sak92] Sakasu G. and Rudiger W.: "A Functional Approach to the Visual Simulation of Gaseous Turbulence", EUROGRAPHICS '92 pp.107-117(1992)
- [大島91] 大島登志一、板橋秀一: "2次元テクスチャを用いた炎の動的表現", 情報処理学会論文誌, 32, 4, pp. 435-447 (1991)
- [安居院91] 安居院 猛、河野雄三、中嶋正之: "コンピュータグラフィックスにおける火炎の2次元画像の生成", 信学論 (D-II), J74-D-II, 2, pp.184-189 (1991-02)