

# 線香花火の3D ビジュアルシミュレーションに関する研究

2003MT026 伊藤 圭祐

2003MT067 長尾 吉晴

2003MT069 永田 智和

指導教員 金 知俊

## 1 はじめに

近年 CG の技術は実写との区別がほとんどつかない映像を作れるまでに進歩している。CG が使われる用途として、架空映像の作成や実写への特殊効果がある。代表例としてアニメーション、映画、背景シミュレーション、CAD など多くの例があり、その技術の進歩がますます重要なテーマとなっている。CG の有効な利用例のひとつに花火のシミュレーションがある。花火の試作・試打には莫大なコストと危険が伴うので、コンピュータによる実写的な花火の挙動計算・映像生成による試作・試打コストの大幅減、設計製造・打上の効率化、安全性の向上が期待されている。しかし、それらの大部分は打ち上げ花火を対象としており、線香花火のシミュレーションは少ない [1]、[2]。線香花火を実現するにあたっては、身近でかつ人間とのインタラクションが重要な位置を占めるものと考えられ、非常に興味深い題材であることから、研究の余地があると考えた。また、花火の CG はゲームや映像への利用も期待されている。以上より線香花火のビジュアルシミュレーションを行うことにした。

なお、永田と伊藤は主にモデル部分を、長尾は主にプログラム部分を担当した。

## 2 線香花火のメカニズム

線香花火は大きく分けて長手牡丹とスポ手牡丹の 2 種類がある。長手牡丹は私達に馴染深い線香花火で、火薬を和紙に入れこよりのように燃ったものであり、火花の飛び散る範囲が大きく遠くに飛ぶという特徴がある。一方のスポ手牡丹はイ草に火薬を塗ったもので、長手牡丹



図 1: スポ手と長手牡丹

に比べ火花の数は多いが飛ぶ距離は小さい。

図 1 の左はスポ手牡丹で、右は長手牡丹の写真である [5]。本研究では長手牡丹のシミュレーションを行う。

### 2.1 線香花火の燃焼過程

線香花火は点火から火が燃えつきるまで、4 つの過程をたどる。

**牡丹** 線香花火に火を付けると、火が和紙から火薬に届き、火の玉が出来る。この火の玉の表面は硫黄が溶けた状態で皮膜を形成し、その中で火薬が不完全燃焼をしている。また、まだ表面の皮膜が完全ではなく、すき間から火薬の火が飛び出している (図 2a)。

**松葉** 火花がぱっぱと威勢良く飛び散る最盛期。火の玉の中の炭素の固まりが押し出され、空気中の酸素で燃えて散った状態。炭素が弾き飛ばされる原因として、火の玉の中の炭素が酸化して二酸化炭素になるときの衝撃が原因だとする仮説がある (図 2b)。

**柳** 松葉の後、火の玉が萎み始め炭素が押し出され、火の玉の中で硫黄と共に酸化され落ちていく (図 2c)。

**散り菊** 線香花火の終演で、ちよろちよると火花が散る。和紙も燃えているので、火花には和紙の成分も含まれている (図 2d)。

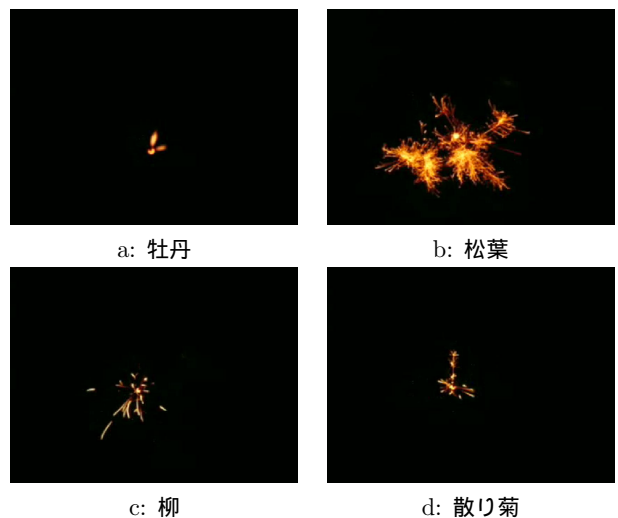


図 2: 線香花火の写真

### 3 関連研究

鈴木らは、仮想空間で線香花火を実現するシステムを開発した [1]。ホストコンピュータ、液晶シャッター眼鏡、3D デジタイザを用いてハードウェアを構成し、火花を線分、玉を球として表現している。動作に関する構成として、火花の落下・分裂などの物理現象の模擬を行う計算部、CG による液晶シャッター眼鏡を介した表現を行う表現部、操作側の動作に関する情報を線香花火の位置情報として計算部に渡す働きを行う操作部の 3 つのサブシステムからなっている。このシステムは、線香花火を行う様々な仮想環境のシミュレーションが可能である。また、色、規膜、寿命等の設定の変更により、様々な模様を観察することができる。

小玉らは、製造に結びつく花火の設計支援と閃光・煙を含む写実的な映像生成をインタラクティブに行える技術の開発を目的として、一般消費者向け小型花火の設計・表現シミュレーションも可能なシステムを開発した [2]。このシステムでは、花火を剛体と粒子の複合体として考え、撃力ベース手法とペナルティ法を併用した手法を用いる。モデリング部とレンダラーが密接に関わりあっているシステムとなっており、あらかじめ定められた視点方向にのみポリゴンを配置し、光源の写真の一部をそのポリゴンにテクスチャマッピングすることにより、従来より遥かに少ないポリゴン数で高速移動する光粒子の画像を生成することを可能としている。以上のシステムにより、花火を 30frame/sec で生成することが可能となり、自然な動きを再現している。

文献 [3] と文献 [4] は JAVA を使用して線香花火を表現しているが、論文として報告されておらず詳細な手法は不明である。

本研究では文献 [1] と文献 [2] のモデルを参考にし、表現手法には独自の手法を考案した。

### 4 統計による線香花火の状態変化

シミュレーションにおけるパラメータを決定するため、線香花火の各状態の平均時間と、時間毎の火薬の放出される勢いを調べ、統計をとった。

#### 4.1 4 つの状態の平均時間

燃焼の様子をビジュアルシミュレーションを行うにあたって、状態推移の時間は必要不可欠な要素である。そこで、線香花火とカメラを固定し撮影した後、点火時間、牡丹開始時間、牡丹終了時間、松葉開始時間、柳開始時間、散り菊開始時間、散り菊終了時間、終了時間を計測し平均をとった。この時、火種が線香花火から離れた時間を点火時間、点火の際の炎が静まり玉の形が完成した時間を牡丹開始時間、玉が完成し炎が飛び出なくなった時間を牡丹終了時間、再び火花が勢い良く飛び出し始めた時間を松葉開始時間、分裂する火花よりも分裂しない火花の割合が増えたと思われる時間を柳開始時間、分裂する火花がほとんど無くなった時間を散り菊開始時間、

火花の放出が終わった時間を散り菊終了時間、光が完全に消えた時間を終了時間とした。また、途中で玉が落下した場合もその時間を終了時間とした。

その結果、状態推移の平均時間は、点火から玉の完成までが 8.2 秒、牡丹が 11.7 秒、牡丹と松葉の間が 4.8 秒、松葉が 20.0 秒、柳が 6.5 秒、散り菊が 5.5 秒、完全鎮火までが 1.7 秒となった。

#### 4.2 時間毎の火花の放出量

玉から放出される火花の長さ・個数、分裂した火花の長さ・個数を統計しプログラムに反映させるため、以下の方法で時間毎の火薬の放出される勢いを求めた。撮影した動画から中心より半径が 3、8、12 の割合で同心円を描き、それらを 8 等分した領域を考える。小さい円から順に分割された領域を a~h、A~H、A1~H1 とする。

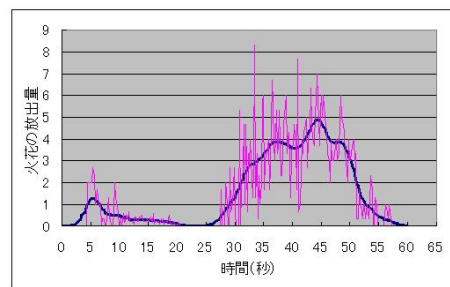


図 3: 各時間での火花の放出量

1/15 秒毎に a~H1 のどの領域が光ったかを調べ、中心からより離れた領域が光った場合は火薬の放出される量が大きいと見え、a~h を 1、A~H を 2、A1~H1 を 3 と値に重みをつけて集計を行う。1/15 秒毎に上記の値を合計し、各時間での火花の放出量を算出しグラフにする (図 3)。この結果を基に、シミュレーションにおける火花の放出量を決定することにした。

### 5 シミュレーション手法

#### 5.1 火花経路の生成

線香花火の火花の動きは、火の玉からの斜方投射運動であるとして計算する。初速度は火花 1 つに対し、火の玉を原点とおいた、 $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸に一樣な乱数を使用して与え、火花の発射方向にばらつきを持たせる。火花に与えられた初速度を使い、斜方投射運動に基づいた単位時間ごとの位置  $P_n$ 、速度  $V_n$  を、以下の式で決定する。

$$P_n = P_{n-1} + V_{n-1}dt \quad (1)$$

$$V_n = V_{n-1} + gdt \quad (2)$$

$P_{n-1}$ 、 $V_{n-1}$  は前回の線分の終点での値であり、次の線分を生成するときの始点となる。初期値は各方向成分ともに 0 であり、位置は火の玉の中心である。 $g$  は重力加速度であり、常に  $y$  軸負方向を向いている。 $dt$  は単位時間である。

## 5.2 各燃焼過程の描画

**牡丹** 開始と同時に火薬部分に沿って半透明のビルボード (5.6 参照) を使用した炎を上昇させ、火の玉を生成し徐々に大きくする。炎が通過した後の火薬部分は、発光している様子を表現するために、2本の半径の大きさが異なり同一の軸を持つ円柱を使用し描画する。火の玉からは炎を放出させる。

**松葉・柳・散り菊**

火の玉から発した火花の位置を計算する。あらかじめ火花の寿命を計算回数として与え、寿命が尽きた時点で求められた位置を円柱で結んだものを3回に分けて描画する。円柱は牡丹と同様に2本の半透明の円柱を使い、火花の分裂の有無、初速度を変換することで「松葉」、「柳」、「散り菊」を表現する。「松葉」の時は、3回の描画のうち2回目と3回目には、先端に分裂する火花を描画する。

## 5.3 風の影響

線香花火は軽量であり、火の玉は不安定なものであるため、外力による影響を非常に受けやすい。実際に線香花火をする際、外力は火花の移動経路や火の玉の寿命に大きな影響を及ぼす。また、外力の影響は避けられないものであるため、線香花火を視覚的に表現するためには重要な要因である。よって、本研究では風による火花の生成経路、火の玉の落下、棒への影響を表現する。

## 5.4 風の生成

自然に吹く風は強くなったり、弱くなったりして絶えず揺らいでいる。この揺らぎは、 $1/f$  のゆらぎと呼ばれる揺らぎ方を示しており、規則性とランダム性との中間的な性質を示している。 $1/f$  のゆらぎを示すアルゴリズムには、さまざまなものがある。例えば、セルオートマトン、間欠カオス、 $1/2$  階積分法などである。

本研究では、より計算量が少なく簡潔に風の揺らぎを表現できる方法として、次式で求める間欠カオスによる  $1/f$  のゆらぎを使用する [7]。

$$\alpha_{i+1} = \begin{cases} \alpha_i + 2\alpha_i^2 & (\alpha_i < 0.5) \\ \alpha_i - 2(1 - \alpha_i)^2 & (\alpha_i \geq 0.5) \end{cases} \quad (3)$$

但し  $\alpha_i$  は  $0 < \alpha_i < 1$  とする。

本研究では、風を  $x$  軸の正方向のみに与える。(3) 式で求められた値が 0.5 以上の場合に、大きさに応じた値を火花の経路生成に加えることで、火花への影響を表現する ((4) 式)。さらに、 $1/100000(1 - \alpha_i)$  の確率で火の玉を落下させることで、火の玉への影響を表現する。線香花火の棒を 10 分割し、火の玉に近い円柱ほど大きな変化を与え棒をしならせることで、風の影響を表現する。

$$V_n = V_{n-1} + (g + \alpha_i x) dt \quad (\alpha_i > 0.5) \quad (4)$$

ここで  $x$  は、 $x$  軸正方向を向く単位ベクトルである。

## 5.5 火薬量

本研究では火薬量の違いにより、燃焼過程が変化する様子を表現している。火薬量は標準的な量を 100 として、コマンド引数により 50 から 120 の範囲で与えるこ

とが可能である。100 を与えると最も平均的な時間変化をする。また、110 よりも大きな値を与えると、「松葉」の状態になる前に、火の玉は落下する。線香花火の火薬が入っている部分は与えた火薬量に応じて長さが変化し、100 を与えると 5cm になる。火花が出始めると同時に火薬量は減少していく。火の玉は燃焼開始と同時に生成され、火薬部分を取り込み終えた状態が最大となり、火薬量の減少に応じた半径を与えることで徐々に小さくなる。火薬量が多いほど火花の分裂は多く発生し、速い初速度をもつ火花が出現する。火薬量が少なくなるにつれて火花の分裂は起きにくくなり、初速度の遅い火花の割合が増加することで、「松葉」「柳」「散り菊」の燃焼過程の変化を表現している。

## 5.6 ビルボード

炎のような半透明の物体を描く方法として、ビルボードやポリウムレンダリング等の手法がある。ビルボードとは 3 次元の複雑な物体を 2 次元の画像で簡易的に表現する手法であり、これを使用することで、3 次元モデルに比べてデータ量が大幅に軽減される。ビルボードは常に視点の方向に向いており、視点が変わると同時にビルボードは回転し視点の方向に向く。ビルボードはリアルさの点で不十分な場合があるが、ポリウムレンダリングは計算量が多いという問題があるので、本研究では点火から牡丹に至るまでの時の和紙部分の燃焼の様子、および牡丹の状態の火の玉から出る炎を表現するために計算量の少ないビルボードを使用した。本研究では五角形の半透明の板を炎に見立てており、ビルボードが重なる事で炎の色が濃くなり、自然な炎を表現することができる。

## 6 シミュレーション結果

### 6.1 燃焼過程の再現

実際の線香花火の「牡丹」の動きは、線香花火の先端に火を着けると、一時的に火薬部分を炎が包み、火薬部分は発光する物質へと変化する。その後、火の玉が形成され、火薬部分を吸収しつつ大きくなる。火の玉は形成された直後から炎を四方八方に放出し、やがて火の玉だけの状態となる。

また、実際の線香花火の火花の動きは、火の玉から四方八方に放出されており、ある程度進んでから消滅する。出現から消滅は一瞬であり高速な変化を示す。「松葉」の時は、火花の先端に分裂する火花が出現する。時間が経つにつれて分裂する火花の出現は減少していき、分裂の起きない火花の出現の割合が多くなる。火花の数は、はじめは時間が経つにつれて増加していき、その後徐々に減少していく。火花の長さは、はじめは勢いが強く分裂する移動距離の長い火花が出現しており、徐々に勢いが弱いものに変化している。

一方、本研究で「牡丹」を描画したものをみると、開始と同時に炎が火薬部分を包み上昇していく。炎が通過した火薬部分は、色が変化している。火の玉の大きさは、徐々に大きくなり、火薬部分を吸収している。火の玉が

らは、炎が放出されており、やがて火の玉だけの状態になる。

次に火花の動きを見ると、火の玉から方向にばらつきを持った火花が出現しており、その後消滅する。火花の出現・消滅は一瞬であり、高速な運動を表現できているとみることができる。はじめは先端で分裂の起きる火花が出現しており、徐々に分裂しない火花の出現が多くなる。火花の数は、時間が経つにつれて増加し、その後徐々に減少している。火花の長さも、はじめは移動距離の長いものが出現しており、徐々に移動距離の短い火花の出現が増える。

以上より、本研究で作成した線香花火は実際のものとは比べ、特徴をとらえた線香花火の動きを再現できたと考えられる。生成手法を実行した結果を過程別に以下の図4に示す。

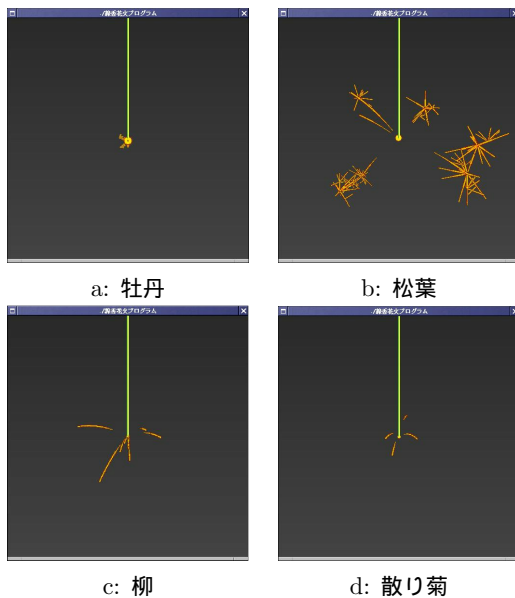


図 4: 実行結果

## 6.2 風の影響の再現

間欠カオスによる風を画面の左から右へと吹かせた結果を図5に示す。

図5aをみると、線香花火の棒のしなりと揺れにより、風が吹き揺らいでいる様子を確認できる。火花は右方向に曲がり、右方向に多くより長い火花が確認できることから、風の影響を受けている様子を表現できている。幾度か実験を繰り返した結果、燃焼過程の途中での火の玉の落下が確認できた。本研究では、求めた風の値を棒、火花、火の玉へ直接数値を与え変化させているので、実際の空気の流れにより起こる風を再現してはいない。また、右方向のみに与えているので、気流の方向変化に対応していない。しかし、実際の動画像と比較したところ、風による線香花火の棒と火花の生成経路への影響は、本物に近い動きを示していた。また、火の玉の落下への影響を風の強さに応じた確率で表現したことから、風によ

る線香花火への影響を適切に表現できていると考える。

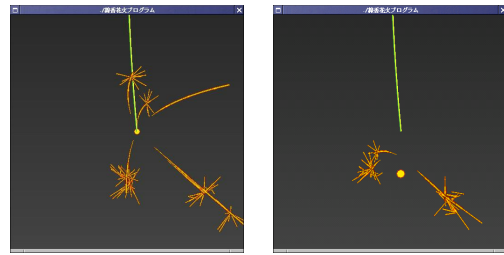


図 5: 風の影響

## 7 おわりに

本研究では、線香花火の燃焼の様子や風の有無の違いによる火花の経路の変化について、CGで再現することを目的とした。手法として、線香花火の燃焼を4つの状態に分け、各状態での平均時間と火薬の放出される勢いを線香花火動画の解析を行うことにより、統計データとして算出した。次に、統計データから抽出した特長を基にしてプログラムを作成した。火花の表現方法において、全ての燃焼過程で火花の量、分裂の様子を的確に再現できた。風による火花の経路の変化については、より計算量が少なく簡潔に風の揺らぎを表現できるものを考え、間欠カオスによる  $1/f$  のゆらぎを使用した。その結果、風による線香花火への影響を表現できた。改善すべき点としては、線分の長さ・分岐の数など統計の要素を細かく分類することでよりリアルな燃焼の様子を作ることができると思われる。また、発光体の表現可能なレンダリング手法を用いることでよりリアルな花火が表現できるであろう。さらに、分裂した火花の表現においても、実際の分裂のように様々な変化を表現する必要がある。これらの点が今後の課題として挙げられる。

## 参考文献

- [1] 鈴木 唯史、米倉 達広：光源制御の効果を用いた仮想線香花火システムの試作、電子情報通信学会総合大会講演論文集、基礎・境界、pp.406 (1997.3.6).
- [2] 小玉 浩平、鈴木 克幸、大坪 英臣：花火のインタラクティブアニメーション、日本機械学会第16回計算力学講演論文集、Vol.2003 No.16、pp.15-16 (2003.11.22).
- [3] Koji Yamoto: <http://www1.jawink.ne.jp/koji-y/>
- [4] <http://www.knock.ne.jp/~moly/java/Senko/Senko.html>.
- [5] デジタル一眼レフで写す夏の夜、線香花火偏、<http://ammo.jp/monthly/0508/>.
- [6] 株式会社 太田煙火製作所、<http://ota-hanabi.net/>.
- [7] カオス現象における  $1/f$  ゆらぎの観察、電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集、基礎・境界、pp.24 (2002)