

CG による燃焼の表現

小倉石裕二・島田 英之・塩野 充・宮垣 嘉也

岡山理科大学工学部情報工学科

(1998年10月5日 受理)

1. ま え が き

コンピュータグラフィックス（以下 CG）が生まれて約30年が経ち、日常的に CG という用語が使われるようになった。最近では、コンピュータ及びグラフィックスハードウェア性能の向上と、仮想空間（Virtual Reality）等におけるさまざまな研究の成果から、実写と区別がつかない photorealistic な画像から、スケッチ画や絵画のような non-photorealistic な画像も創り出せるようになってきた。

今日では、かつて大学や企業等の研究機関のみの専売特許だった3次元 CG のモデリングやレンダリング技術も、コンピュータの市販のソフトウェアにより、簡単に入手することもでき、映画の特殊効果や TVゲームなど、我々にとって身近な技術となってきている。

そして人工物だけに留まらず、自然界の様々な現象を CG を用いて表現しようとする試みも行われている。これまでも、CG による自然対象物の表現について、すでに多くの研究が報告されており、その中には煙、雲に代表される不定形自然対象物の CG も多く見られる。

本研究では不定形自然対象物である炎に注目し、炎自体の CG 表現法と燃え広がりについて検討した。先ほど述べたように、炎のモデリングは既に様々な研究が報告されており、様々な手法が提案されている。しかし、これらの既存のモデリングの手法では描画速度が非常に遅く、莫大な量の計算と時間を要する。また、研究の報告も炎自体のモデリングまでに留まっており、炎による延焼の表現といった研究は数少ない。

そこで本研究では炎自体のモデリング法および、燃焼による延焼の表現のモデル化の手法について提案する。これより提案する手法は、既存の手法と比較しても高速であり、表示結果もリアルタイムで見ることができる。これにより、将来的には仮想空間での火災シミュレーションへの応用が考えられる。

2. モデリング

2.1 炎のモデリング

2.1.1 パーティクルシステム

炎のように時間と共に形状を不規則に変化させる不定形自然対象物はあらかじめ与え

られたポリゴンデータで描画するのは非常に困難である。そこで炎を非常に多くの粒子の集合と考えて描画し、個々の粒子を動かし、炎を表現することにする。この手法はパーティクルシステム¹⁾ (Particle System) と呼ばれている。しかし、このパーティクルシステムには、

- 各粒子を点で描画すると一つ一つが非常に小さいため莫大な量のデータが必要になり、計算時間、メモリーを多く消費する。
- 物体を拡大したときは隙間ができてしまう。
などの欠点が存在する。

2.1.2 粒子のポリゴン表示

前述の問題の解決の手段として、炎の粒子を点ではなく図1(a)に示すような、ある一定の大きさを持ったポリゴンで描画するという手法が挙げられる。

- 中心部が明るい
- 外に向うほどだんだん薄くなり暗くなっていく

といったことをポリゴンで表現し、これを炎の粒子とする。炎の粒子を点とポリゴンで描画した時の違いを図1(b), (c)に示す。

粒子の中心が輝いている状態をイメージすると、中心部は色が濃いいため透明度を低くし、中心から外に向うほど透明度を高くしていき、最も外側は完全な透明とすればよい。これはスムーズシェーディングで実現できる。これで境界の部分は完全な透明なので目立たなくなり、しかも炎の持つ独特な色のにじみ具合が表現できる。今回用いた混合規則は、

$$\alpha_w : \alpha_f = 1 : 1 - \alpha \quad (1)$$

α : 透明度

α_w : 書き込む色の輝度値

α_f : フレームバッファの輝度値

で表される規則を使用した。

2.1.3 粒子の疑似立体表示

炎の粒子は平面状のポリゴンで構成しているため、斜めあるいは横から見た場合には板状の物体になり、立体的な炎には見えなくなってしまう。そこで、粒子の面の向きを視点の方向に対して常に垂直になるようにアフィン交換を施し描画を行うようにする。

(図2)

このように、立体的な粒子を平面で表すことで、ポリゴン数を削減でき、描画の際の不自然な現象を無くすことができる。

2.1.4 粒子のパラメータ

各炎の粒子には座標、熱量(寿命)、色、透明度、大きさ、渦場から受ける力をパラメー



図1 炎の粒子

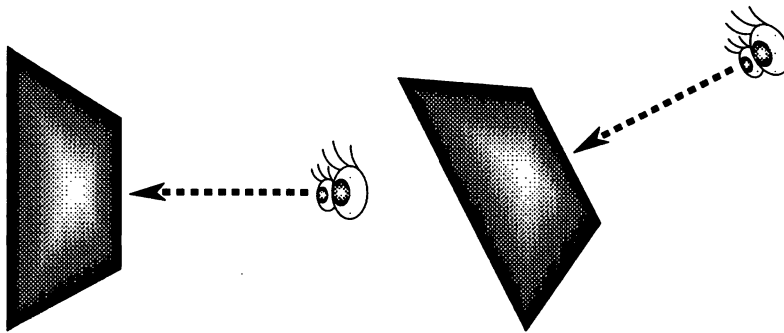


図2 炎の粒子の疑似立体表示方法

タとして与えておく。

2.1.5 乱流場

炎のゆらぎは、粒子が移動していく軌跡²⁾で表現する。その粒子が移動する為の力は、温度による上昇気流やその空間の気流の流れにより生じる。

炎の粒子はその地点の乱流の影響を受けて移動していくものとする。乱流の速度場を時間的に変化する大小様々な渦の合成で作成する。炎の挙動は、炎の構成要素である粒子を渦場から得られる速度場に従って移動させて作成する。

炎の動きを支配する乱流場を作り出す渦は、図3で示すような速度分布をもつランキン渦を使用した。

発生させる渦には座標、回転軸の傾き、寿命、渦の力、渦の半径をパラメータとして与えておく。

2.1.6 渦場の更新

渦場を構成する渦もまた、他の渦から力を受けて移動していく。この計算も、前章の炎の粒子と同様に行う。

また、各渦には寿命をパラメータとして与えているので、寿命の減少と共に、力の大きさも減少していき、寿命が尽きた渦は消滅する。そして、渦が消滅する際には再び新

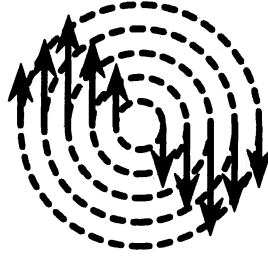


図3 ランキン渦

しい渦を発生させる様にする。このようにすることで絶えず乱流場が更新されていく。

2.2 燃焼物体のモデリング

2.2.1 物体の形状

物体の形状は無限に存在していると考えられるが、それらを大別して次の3つに分けることにする。

- 針金，糸などの線の物体
- 紙，板などの面の物体
- 木材などの中身が存在する物体

本研究では境界表現法を用いることにした。これは、物体の境界（表面）の形状を無数の面で表現する方法で、本研究で必要となる物体の様々な場所の変形や変色，高速で滑らかな表示を行うのに最も適しているからである。

2.2.2 頂点データの作成

頂点データは次のような項目で作成する。

- 座標
- 色
- 法線ベクトル
- 接続している頂点のリスト
- 接続している面のリスト
- 物体の重心からの位置ベクトル
- 燃焼パラメータ群

2.2.3 面データの作成

燃焼物体はポリゴンで表示する。そのためにポリゴンを構成する頂点の並びデータが必要である。面のデータとしては次の項目を用意する。

- 面を構成する頂点リスト

面を構成する頂点の並びをリストとして登録する。その際、ポリゴン表示と法線ベクトルの計算の都合を考え、面の表向きに対して反時計回りになるようにリストを構成する。

- 面の法線ベクトル

面を構成する頂点から計算して、単位長の法線を求める。その後、頂点毎の法線ベクトルを計算するために使用する。

2.2.4 燃焼パラメータ

物体の燃焼のシミュレーションに必要なパラメーターは、各頂点ごとに持たせる。燃焼パラメーターは次の項目を用意する。

- 最大燃焼量
- 燃焼量
- 発火熱量
- 伝熱量
- 収縮率
- 最大変形量
- 現在の熱量
- 現在の燃焼量

これらのパラメータは厳密な物理法則から求めたものではないが、それに近い動作をさせることは可能である。また、各パラメーターを任意に設定することで、可燃物と不燃物の設定をすることや、特定の経路を燃え移らせるなどのシナリオに沿ったシミュレーションが可能になる。

2.2.5 物体の重心を用いた変形

燃焼している物体の頂点は、その燃焼量によって頂点の位置を物体の重心方向へ移動³⁴⁾させていく。これにより、物体が焦げてへこんでいく様子を表現する。平面状の物体には、この変形法則は用いず、次節で述べる収縮率を用いた変形のみを行う。

具体的な移動位置の求め方は、燃焼量が最大燃焼量に達したときの物体の変形割合が最大変形量であるので、次の式で頂点の座標を更新する、

$$POS(x, y, z) = V_p \times \frac{B_{max} - D_{max} \times B}{B_{max}} \quad (2)$$

$POS(x, y, z)$: 頂点座標

V_p : 重心からの位置ベクトル

B : 現在の燃焼量

B_{max} : 最大燃焼量

D_{max} : 最大変形量

2.2.6 収縮率を用いた変形

物体には熱で縮む性質のものが存在する。プラスチックやセルロイドなどがその代表例で、そのような物体の変形の度合を表すのが収縮率である。方法としては、頂点間に

熱量差がある場合、低い温度の頂点が高い温度の頂点に対して移動するというもので、頂点パラメータの収縮率はその移動の割合を表している。図4に燃焼により収縮する物体の一部を示す。

具体的な変形の求め方は、移動させる発火頂点を基準頂点、接続している頂点を接続頂点として、

$$POS(x', y', z') = POS(x_0, y_0, z_0) + \frac{1}{N_c} \sum^{N_{au}} V_o R \frac{D_H}{H} \quad (3)$$

$POS(x', y', z')$: 移動後の座標

$POS(x_0, y_0, z_0)$: 基準頂点の座標

N_{au} : 全ての接続頂点の数

N_c : 接続頂点の数

V_o : 基準頂点からの接続頂点から基準頂点までの位置ベクトル

R : 収縮率

D_H : 接続頂点と基準頂点の熱量の差

H : 全ての接続頂点と基準頂点の熱量の差の和

の式で求める。

2.2.7 燃焼物体の変色

多くの物体は燃焼することにより、焦げてだんだんと黒く変色していく。これは、頂点が燃焼するに従い、頂点の色をだんだんと黒くしていくことで表現する。また、炎の粒子を発生する度に、単純に色の各輝度値に0.99などの数値を掛けていくだけでも十分である。ただし、この方法だと変色の度合は燃焼量でなくフレーム数に依存する。さらに不燃物体に関しても、すすが付いて黒くなる、といった表現が考えられるため、この変色は有効である。その際は、不燃物体の頂点が熱を与えられる度に、0.995などといった数値を、輝度値に掛けていくだけで表現できる。また、実際には燃えている点の周辺も熱による色の変化が起こっているので、同時に隣接する頂点の色も微妙に変化させる

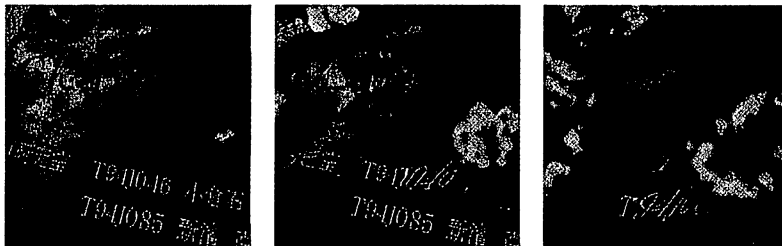


図4 燃焼物体の収縮率を用いた変形

と効果的である。図5に可燃，不燃物体のそれぞれの変色の様子を示す。

2.2.8 同一物体上の延焼

同一の物体上での延焼では，前述した頂点データの持つ頂点と頂点の繋がりを利用して行う。その延焼規則は以下の通りである。

- (1) 発火している頂点は，燃焼によって燃焼熱量分の熱を発生し，現在の熱量に加算する。
- (2) 発火している頂点の隣接している頂点をリストから得て，その中の未発火の頂点に，現在の熱量から伝熱量⁵⁾だけを与える。
- (3) 熱を与えた頂点のもつ熱量が，その頂点の発火に必要な熱量を越えたら，その頂点を発火状態にし，次のターンから炎の発生を行う。
- (4) 熱は，隣接する未発火頂点に移動するだけでなく，空気中にも拡散し逃げていく。この逃げる熱量は炎の粒子が奪っていくとし，現在の熱量を一定割合で減らす。
- (5) これらの過程で，頂点の熱量が発火に必要な熱を下回ったら炎の発生を行わない（下火状態）。
- (6) 下火状態になった頂点は，未発火状態として扱い，回りから熱を受け取ることで再び発火する。

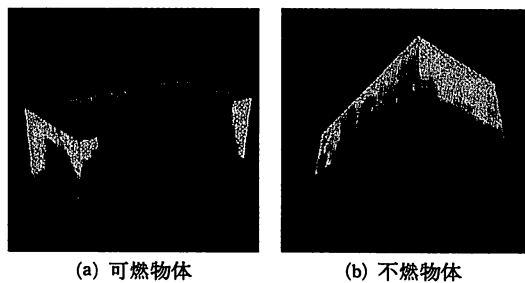


図5 燃焼による物体の変色

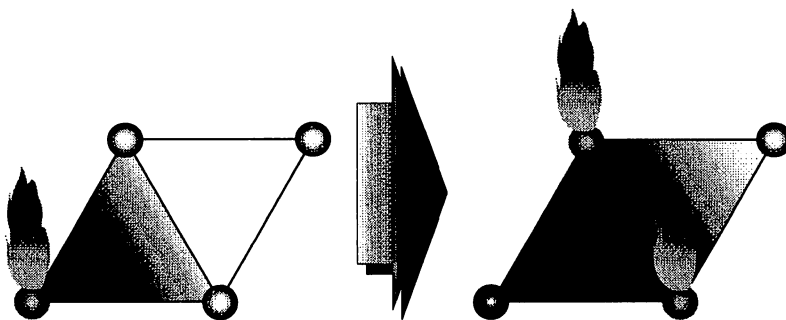


図6 同一物体での延焼規則

(7) 燃え尽きた状態になったら、以降処理は行わない。

炎の延焼は、このようにパラメータの変動が起りあって起こっている。(図6)

2.2.9 他の物体への延焼

炎は現実では、同一物体の上だけで燃え移るのではなく、飛び火などによって他の物体へも燃え移るものである。前述した物体上の延焼では、熱量を隣接する頂点に対して移動させることで延焼を表現した。炎からの延焼も同様に、炎の接触した頂点に、炎の熱量を移動させることで他の物体への延焼の表現を行う。そこで、それらの現象を表現するための手法を次に述べる。

- (1) 最初に、炎の粒子がどの頂点に接触しているかを調べるが、そのためには通常大量の比較計算が必要である。しかし前述のように、同一空間要素内に存在する頂点とは常に接触していると仮定すれば、空間要素の頂点リストを探索するだけで接触している頂点分かる。
- (2) 同一空間要素内に頂点が存在していなければ、熱の移動はない。
- (3) 同一空間に頂点が存在したら、その頂点に対して炎の粒子から頂点の伝熱量だけの熱量を与える。その結果その頂点の熱量が発火熱量を越えたら発火状態にする。
- (4) 炎の熱量は、頂点へ移動する以外にも、空間（大気）中へと逃げていく。その逃げる熱量は、全体で一定の値にする。
- (5) 熱量が無くなった粒子は消滅させる。

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション空間全体の構成

3.1.1 シミュレーション空間

本研究での物体の燃焼シミュレーションは、ある一定の空間内でその内部に存在している様々なデータがお互いに影響し合っている。その過程では、

- ・どのデータがどのデータに影響を与えているか
- ・特定の空間の内部にはどのようなデータが存在しているか

といったデータ処理が頻繁に行われている。

これらの処理は通常は冗長な比較によって行われるが、空間に特殊なデータ構造を持たせることで、様々な処理を速く、かつ簡潔に行えるようになる。

3.1.2 空間の構造とテーブル

図7のようにシミュレーション空間はあらかじめ細かい同サイズの空間に分割し、分割された各空間にはその内部の情報を持たせておく。この分割された一つの空間に対応したデータの集合を空間要素と呼び、すべての空間要素の集合を空間テーブルと呼ぶことにする。

そして分割する空間の形状は通常立方体としておく。

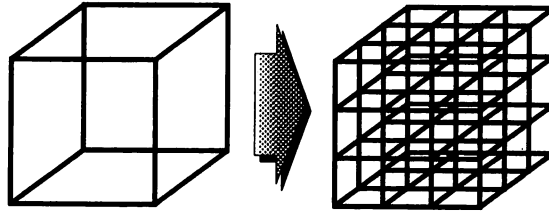


図7 シミュレーション空間

今仮に、シミュレーション空間がX軸、Y軸、Z軸、の方向に X_L, Y_L, Z_L だけ分割されているとすると、空間は $(X_L \times Y_L \times Z_L)$ 個に分けられている事になり、この個数の空間要素が必要となる。これは動的割り付けの簡単化の為、1次の配列で作成する。この空間テーブル *WORLD* は

$$WORLD[X_L \times Y_L \times Z_L] \quad (4)$$

の1次元配列で確保することができる。

3.2 燃焼物体のデータの作成

燃焼物体と空間テーブルを作成する。燃焼物体は空間要素の幅に合わせた面分割を行い、各頂点と空間要素との接続を行う。

シミュレーション開始前の状態の表示のため、全ての頂点の法線の計算も行っておく。

3.3 発火

物体の燃焼は頂点データで行う。シミュレーションを開始するには、まず頂点を発火させる必要がある。それには発火させたい頂点の燃焼パラメータ、「現在の熱量」を、発火に必要な熱量以上にしておく必要がある。

熱量は、隣接する頂点に分散したり、空気中に分散したりしてすぐに減少するので、発火熱量ぎりぎりを与えた場合、すぐに発火熱量を下回り、燃え上がりにくくなる。そのため、ある程度高い熱量を与えるか、継続して熱量を与える必要がある。

3.4 燃焼物体の頂点リスト

燃焼物体の頂点の燃焼状態は、以下の3つが存在する。

- 燃えてない状態
- 燃えている状態
- 燃え尽きた状態

これらの状態のなかで、様々な計算が行われるのは「燃えている状態」の頂点のみである。そのため、物体の頂点数が非常に多い場合、燃焼している頂点を全頂点から探索する作業はかなりの負担となり描画速度の低下につながる。そこで、燃焼状態にある頂点を登録するためのリストを作成し、発火状態になったらリストの先頭に登録し、燃え尽きたらリストから削除する。これにより、燃焼の計算はリストに保存している頂点に対してのみ

行えば良いので、最小限の計算量に抑えることができる。

3.5 炎の発生

「燃えている状態」の頂点は、炎の粒子を発生する。この発生する粒子の限界量は頂点パラメータの最大燃焼量が表している。発生した粒子の量は現在の燃焼量として記憶しておき、この量が最大燃焼量を上回ったら、その頂点は燃え尽きた状態となりそれ以降は燃焼計算は行わない。つまり、最大燃焼量は物体の頂点の寿命の役割も果たしている。

3.6 炎の移動と回避表現

頂点と接触して熱量を与えた粒子は、その地点の形状に応じ向きを変え、物体を回避していくようにする。そうしなければ、炎は物体に当たっても、そのまま内部を付き抜けていってしまい、余りにも不自然である。

頂点に接触した粒子は、前章で述べた粒子の存在する空間の法線ベクトルによって移動する向きを変え、その物体を回避していく。向きの変更方法は、頂点に接触した時点での、粒子の移動ベクトルを、空間の法線方向と、それに対して垂直な方向へと分解し、垂直方向のベクトルを新たな移動ベクトルとする。そのため、粒子が物体の壁にぶつかった時の角度によって、その後の粒子の移動速度も変化する。(図8)

3.7 炎の熱量によるパラメータの変更

炎の粒子は、持っている熱量によって以下のパラメータを変更する。

- 粒子の色は、基本となる色の値を熱量の減少と共に徐々に暗くしていく。
- 粒子の透明度も、初期の値より熱量の減少と共に透明に近付けていく。
- 粒子の幅は、最大では空間要素の幅に一致するが、これも熱量の減少に対応して小さくしていく。

3.8 光源処理

画像の最も重要なポイントは、シーンの光源である。それは光源の使い方によって、物

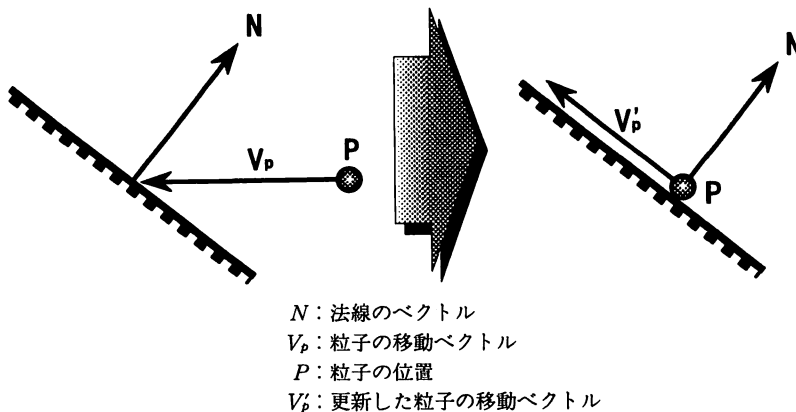


図8 物体の回避表現

体の立体感や質感が全く違って来るからであり、炎も同様に光源の処理が重要になってくる。光源の設定の有無による外観の比較を図9に示す。

一般に光源には、全ての場所に同じ向きの光を与える「平行光源」と、ある点から放射状に光を発する「点光源」の2種類がある。平行光源は太陽の光などであり、点光源は電球などである。そして炎自身は点光源として機能するものなので、炎の粒子の位置全てに点光源を配置するのが理想的である。

4. 実験結果

凹凸を付けた平面状の燃焼物体にテクスチャとして新聞の画像を張り付けた画像を図10に示す。

実際の部屋をモデルとして燃焼物体を配置した仮想空間での火災シミュレーションの様子を図11に示す。

5. まとめ

5.1 炎のモデリング

炎は4枚の三角形ポリゴンにスムーズシェーディングを施したものを粒子としたパーティクルシステムを用いて表現した。炎自体の揺らぎは3次元に拡張したランキン渦を使用し

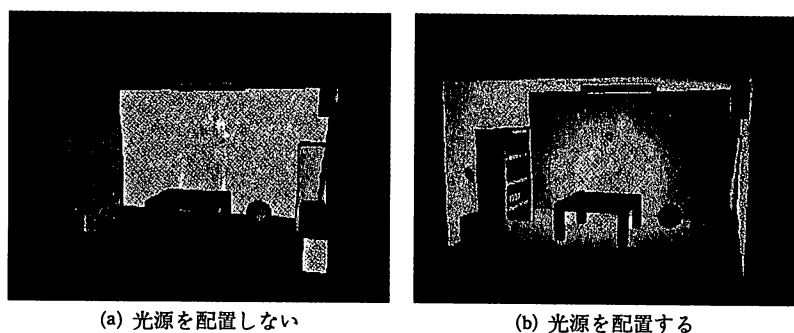


図9 光源の設定

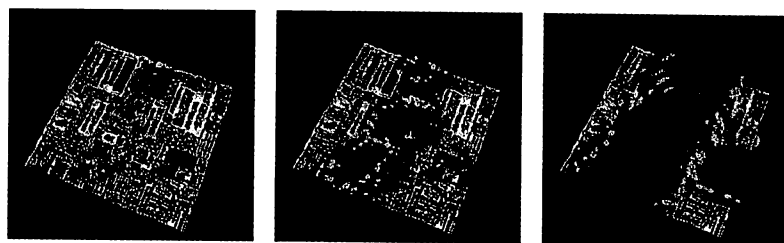


図10 新聞画像の燃焼

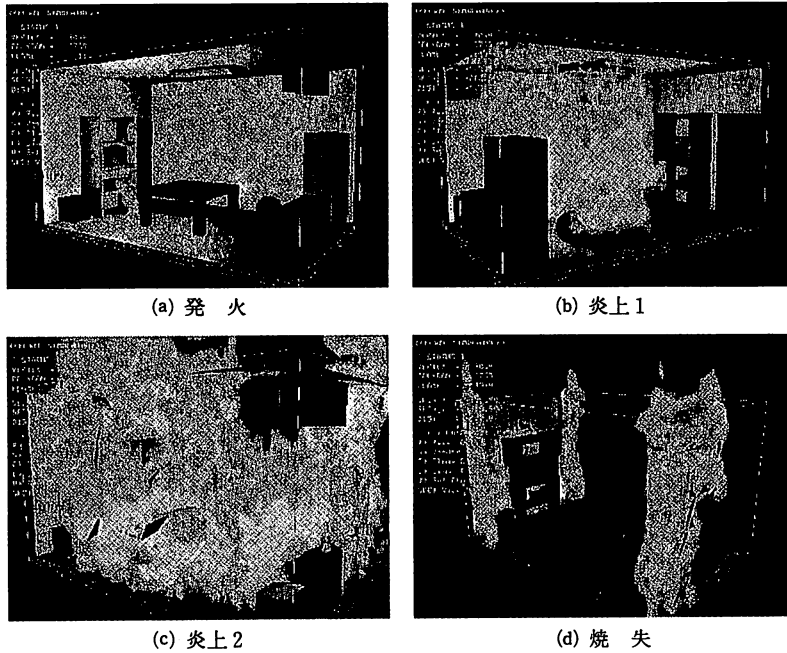


図11 仮想空間での火災シミュレーション

乱流場を創りだし炎の粒子をその中で泳がせることにより表現した。主観的な判断ではあるが、それらしい炎を表現することができたと思われる。炎の種類としては、与えられたパラメータを変化させることにより炎の色、揺らぎ具合、炎自体の大きさなど様々な炎の描画も行える。

5.2 燃焼物体のモデリング

本研究では燃焼物体はすべて、セルラオートマンの原理を利用し燃焼規則を持たせた平面状のポリゴンで描画している。燃焼物体の追加も形状、大きさ、位置のパラメータ、燃焼用パラメータを与えるだけで容易に行える。また、様々なパラメータを与えることにより、木材、プラスチック、紙、など多くの種類の燃焼物体を描画することも可能となった。その他に、任意にパラメータを与えることにより、延焼経路を指定し描画することも可能だが、火災シミュレーションを行う上では無意味かもしれない。

5.3 シミュレーション

本研究では実在の部屋を仮想空間内にモデル化して火災シミュレーションを行った。簡単な火災シミュレーションを行えるシステムを構築したが、燃焼物体ごとのパラメータの設定が完全でなく、主観的、客観的にみても少々不自然さがみられ、完成された火災シミュレーションとまでは至らなかった。これらは、厳密な物理計算の省略により生じるものと思われる。

6. 結 論

本研究では火災シミュレーションを最終目的として、CG による燃焼の表現を行ってきた。以下に本研究で作成したシステムの特徴を挙げる。

- (1) 燃焼物体はすべてセルラオートマンの原理を利用した燃焼規則を持たせた平面状のポリゴンで描画した。
- (2) 各パラメータを変更することにより様々な種類の炎の表現を可能とし、また可燃、不燃、収縮の有無、燃焼速度の変更など、種々の燃焼物体の表現を可能とした。
- (3) リアルタイムでのシミュレーションの描画を可能とした。

さらに今後の課題として、

- ・様々な形状のオブジェクトの描画
- ・GUI, CAD などの機能の追加
- ・燃焼による形状の変化の追加
- ・引火による爆発の表現
- ・厳密な物理計算の導入

などを挙げ、本論文の結びとする。

謝 辞

本研究を進めるにあたりまして、多大な御協力を頂きました平成9年度本学卒業生の新濱直樹氏に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 千葉則茂・土井章男：“新情報教育ライブラリ M-10 3次元 CG の基礎と応用”，株式会社サイエンス社 (1997)。
- 2) 村岡一信，千葉則茂，高橋宏道，三浦 守共著：“渦場と粒子による煙や炎の2次元 CG シミュレーション”，電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. J76-D-2 No.8 pp. 1735-1745 (1993)。
- 3) 小堀研一・春日久美子共著：“基礎から学ぶ図形処理”，株式会社工業調査会 (1996)。
- 4) 佐藤政次：“テレビジョン・画像情報工学ハンドブック”，オーム社 (1990)。
- 5) 鈴木信夫著：“理科年表国立天文台編”，丸善株式会社 (1993)。

An Expression Method of Burning by CG

Yuji KOKURAISHI, Hideyuki SHIMADA, Mitsuru SHIONO,
and Yoshiya MIYAGAKI

*Graduate School of Engineering,
Department of Infomation & Computer Engineering,
Faculty of Engineering,
Okayama University of Science,
Ridai-cho 1-1, Okayama-shi 700-0005, Japan.*

(Received October 5, 1998)

Several methods to display flames by CG have been presented. However, these methods need a long time to draw a flame, and it is impossible to display the result in real time.

In this papaer, we describe the way to display the spread of fire in real time. By changing a parameter, the operator can display all sorts of flames and burning substances. Moreover, it is possible to arrange a burning substance voluntarily. In this way we can simulate the behavior of flame in imaginary space under limited condition.