３次元グラフィックスにおける インタラクティブな炎の表現

公共・公益システム事業部
マルチメディアソリューションセンター
山中　政彦
Masahiko Yamanaka

３次元グラフィックスにより、多様な自然現象の写実的な再現をコンピュータ上で試みるとき、そこには常により高いリアリティが要求される。

リアリティの向上には、画像の「写実性」、画像の更新速度や操作者入力に対する応答速度といった「速度」、視点位置やレンダリング対象の状態に対する「自由度」の３つの要素を向上させることが不可欠である。しかし、これら３つの要素は相互補完の関係にあると同時に、多くの場合トレードオフの関係にあり、１つの要素でも許容範囲を外れて低下することで全体の極端なリアリティ低下が起こるため、３つの要素を向上させるにあたっては、そのバランスの考慮も重要である。

ここでは数ある自然現象から「炎」を採りあげ、インタラクティブな３次元グラフィックスでリアリティに与える影響の強い「写実性」、「速度」、「自由度」の３つの要素をバランス良く向上させる試みと、得られた成果をごみ焼却炉の操業訓練システムに応用した例について紹介する。

1. はじめに

遍在する光と影、投石や風によって水面に広がる波紋、雲や炎など、我々を取り巻く自然環境には、視覚に訴える現象が無数に存在する。広範な技術領域をもつ３次元コンピュータグラフィックスの中でも、そうした自然現象を写実的に再現しようとする領域は最も興味深いものの１つであり、そこではリアリティを追求する数多くの画像生成技術が活発に研究されている。

それらの画像生成技術は、生成する画像の利用目的によって大きく２つに分類できる。１つは映画を始めとする分野で利用される静的な画像生成の技術、もう１つは各種トレーニング用シミュレータやゲームを中心とする分野で利用されるインタラクティブな画像生成の技術である。

静的な画像では、「写実性」の高さがリアリティの大部分を決定付ける。そのため、多くの静的な画像生成の技術は写実性を高めることに主眼を置いており、各種シミュレーション計算やレンダリングに比較的時間がかかるものの、非常に高い写実性を実現する。

一方、インタラクティブな３次元グラフィックスでは、写実性に加えてインタラクティビティの高さがリアリティに強く影響する。インタラクティビティには、画像の更新速度、操作者入力に対する応答速度といった「速度」や、視点位置やレンダリング対象の挙動、状態に対する「自由度」の要素が含まれる。

これらの「写実性」、「速度」、「自由度」といった３つの要素は、たとえば静止画として非常に写実的な画像であるにもかかわらず、フレームレートが低いために動作が不自然でリアリティが損なわれること、対策としてフレームレートの向上を図るためにレンダリングの解像度を落としたら写実性が損なわれてしまったというような、トレードオフの関係に陥ることも多い。

したがって､インタラクティブな画像生成の技術は､「写実性」、「速度」、「自由度」の３要素をバランス良く向上させて、総合的なリアリティを高めることを目的としたものが中心となる（図１）。幸いなことに、最近では著しく進化したPC用グラフィックスカードが一般向けの市場に次々と登場し、かつては非常に高価なハイエンドワークステーションが必要だった、これら３要素のバランスのとれた向上を、比較的手軽に実現できるようになっている。

ここでは、数ある自然現象の中でも、我々にとって身近で応用範囲の広い「炎」を採りあげ、これまで静的な画像生成の技術として培われてきたものの１つであるパーティクルシステムの手法を応用して、インタラクティブな世界で「写実性」、「速度」、「自由度」のバランスをとりつつ、かつその全てにおいて妥協のない高いリアリティを備えた炎を実現する試みと成果を報告する。

図１　リアリティの３要素

なお、ここでの成果は、ごみ焼却炉の操業訓練および一般向け紹介のシステムに応用され、プラント建設中の操業訓練によるスムーズな稼動開始や、一般見学者に向けた焼却炉の効果的な説明に活かされている。

2. 背景

３次元グラフィックスによる炎の表現に関しては、これまでもさまざまな試みがなされている。

高速なレンダリングを必要とする炎のインタラクティブな画像生成では、多くの場合、炎を撮影した実写の動画像をテクスチャとしてポリゴンに適用している（図２）。この方法は、実写動画像をそのまま利用し、かつレンダリングをポリゴン１つで済ませるため、写実性とレンダリング速度の双方を高めることができる。しかし、「自由度」が低いという弱点をもつ。

まず視点の自由度については、基本的に撮影時のカメラ視点で対象の炎を観察することになる。立ち上る炎を横方向から撮影した動画像を使用する場合、ポリゴンが、鉛直軸を中心として常に視点の方向へ向くように回転するしくみを利用することで、あらゆる横方向からの観察は可能となるが、上からの観察は、上から撮影した動画像が存在しない限り困難である。また、炎の動きや色を任意に制御することも、撮影した動画像からでは難しい。

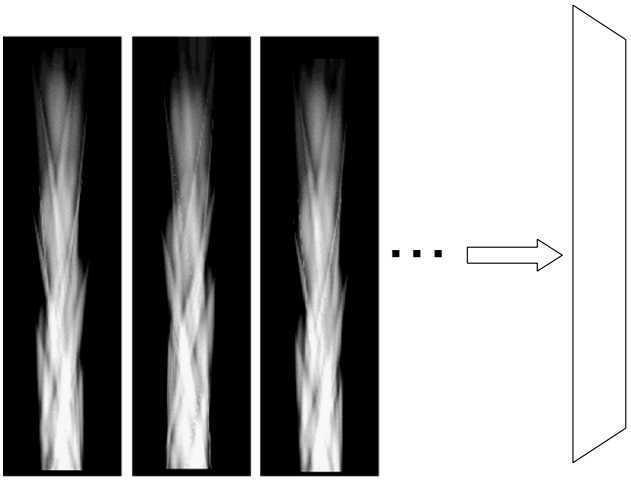

図２　撮影動画像を用いた炎

これらは、あらゆるカメラ位置、あらゆる炎の状態を撮影した動画像を用意することで、一応は回避可能と言える。しかし、そのためには膨大なテクスチャメモリ領域が必要となる。適切にサンプリングされた画像のみを利用して、サンプリング間は画像補間により生成する方法を用いることで、必要となるメモリ容量を削減する方法も考えられるが、補間画像に不自然さを生じたり、補間処理に時間がかかるといった問題がある。さらに、場合によっては実写撮影そのものが不可能、あるいは困難な場合も考えられる。

これに対して静的な画像生成の技術では、炎の表現にパーティクルシステムを応用することが一般的である。パーティクルシステムとは、空気や水といった流体のベクトル場に多数の粒子(パーティクル)をばらまき、そのパーティクル群の動きを観察することで流体の動きを間接的に捉える手法である。

パーティクルの形状や色を適切に制御し、炎における空気のベクトル場に放つことで、パーティクルの集合として視覚的な炎の表現が可能で、視点位置や炎の挙動に対する自由度が高い。

しかし、このパーティクルシステムをインタラクティブな画像生成に適用する場合、一般にパーティクルの挙動、すなわち流れの場を計算すること、その結果から大量のパーティクルをレンダリングする処理に時間のかかることが問題となる。さらにこの処理時間は、写実性を高めようとする場合に増加する傾向があり、特に炎の場合には「動きの滑らかさ」も炎らしさに対して強く影響するため、処理時間の短縮は重要な課題となる。

ここではパーティクルシステムをベースに、その高い写実性や自由度といった長所を損うことなく、インタラクティビティに必要なレベルの処理時間短縮を図るアプローチを採り、インタラクティブな炎として従来にないレベルのリアリティを備えたものを実現する。

3. 基本的な試み

パーティクルシステムをインタラクティブな画像生成に適用するとき、大きな問題となるのは、ベクトル場のシミュレーション計算に時間のかかることと、大量のパーティクルをレンダリングすることにやはり時間のかかることの２点である。

まずベクトル場については、炎の挙動を決定する要因を２つに分類して考える。１つは大局的な挙動、すなわち、炎全体の形状を決定する、風などの外部要因や対流を始めとするもので、もう１つは、炎のゆらめきを決定する、内部で生じる複雑な熱による要因である。

ここでは、前者の炎全体の形状を決定するベクトル場に、あらかじめ決められたものを使うことで対処し、後者の炎のゆらめきは、この大局的なベクトル場で決定された進行ベクトルを軸とする小さな単純回転運動を利用することで表現する。結果として、各パーティクルはベクトル場を螺旋状の動きで進行することとなる。

また、ベクトル場による速度や、回転運動の半径、角速度は、乱数によりパーティクルごとにバラツキをもたせることで、規則的な動きによる不自然さを回避する。

次にレンダリングについて、写実性や、ベクトル場の制御を除く自由度を損なわずに負荷を下げ、インタラクティビティの確保に十分なレンダリング速度を実現する方法を考える。大量のパーティクルをレンダリングする際に生じる高い負荷を下げようとする場合、近傍のパーティクルを適切にまとめて、大きなパーティクルとして、テクスチャを適用した少数のポリゴンを用いて表現することで、パーティクル数を減らす方法が効果的である。このとき、「大きなパーティクル」として採用するテクスチャやポリゴンの選択、工夫が重要である。

ここでは、炎全体をモヤ状のパーティクルが大量に重なったものと考え、パーティクルとして、透明度をもつモヤ状のテクスチャを四角形ポリゴンに適用したものを採用する（図３）。ただし、あらゆる方向からの観察に対応するために、ポリゴン面が常に視点方向を向くような制御を行う。

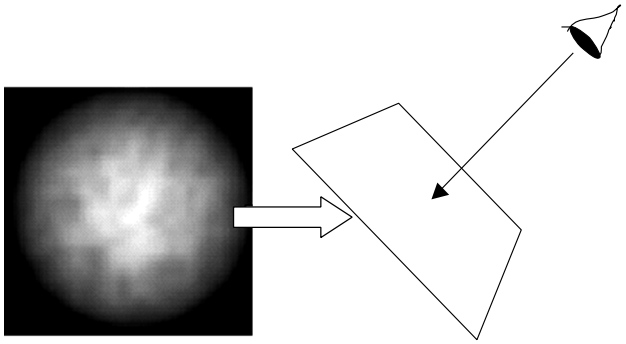

図３　モヤ状の球パーティクル

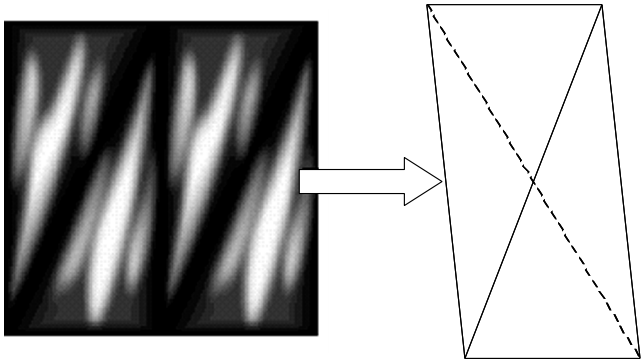

図４　四面体パーティクル

テクスチャのデザインについては、たとえば縦線状のモヤというような方向性をもたせてしまうと、横からの観察では自然だが上からの観察で不自然になるといった弊害が生じるため、方向性をもたない円状のデザインを採用する。

また、各パーティクルにはバラツキを持たせた寿命を設定し、ベクトル場の移動に従ってパーティクルの色を薄く、サイズを小さくするような制御を行う。

これらの工夫により、以下の条件を同時に満たすリアリティの高い炎を実現した。

・ゆらめきを表現した高い写実性
・インタラクティビティに十分な速度
・全方向からの観察を可能とする、視点位置の自由度
・炎の勢い、色、大きさの制御を可能とする、炎の状態制御に対する自由度

4. 詳細度の向上

先の基本的な試みで得られた成果は、テクスチャメモリ容量やレンダリング速度などのハードウェアリソースが比較的限られる条件下でも有効で、広く適用しやすく汎用性に富む利点をもっている。しかし、炎の詳細を表現したい場合には問題がある。

たとえば、炎の内部に視点が置かれるような状況で画面全体がオレンジ一色で塗りつぶされたような画像になること、パチパチと鋭い炎を表現する場合に、小さくて大量のパーティクルを必要とするといったことが起こる。

これらの問題を引き起こす最大の要因は、パーティクルが方向性をもたないよう、球状のモヤで定義されていることにある。この球状のモヤは、常に視点方向を向くよう制御された四角形ポリゴンに、円状のモヤをイメージしたテクスチャを適用することで実現している。そこで、ここではポリゴンの形状とテクスチャのそれぞれに着目して、方向性をもつパーティクルの実現方法について考察する。

まずポリゴンの形状に着目すると、常に視点方向を向く四角形ポリゴンの代わりに、向きの制御を行わない立体をパーティクルとして利用することが考えられる。この場合、最も軽い負荷でレンダリング可能な四面体が候補となる（図４）。

１つの四面体は６頂点を指定してレンダリング可能であり、四角形の４頂点と比べ１つのパーティクルに要するレンダリング負荷は1.5倍となる。しかし、四面体が立体であることによる裏面のレンダリングを考慮すると、１つの四面体パーティクルは２つの四角形パーティクル相当と考えることもできる。この点、テクスチャデザインの自由度が上がることもあわせると、同じ詳細度に対するレンダリング負荷を、むしろ低下すると言える。また、ポリゴンが視点方向を向く制御の負荷が消失することもレンダリング負荷の低減につながる。これにより、速度や自由度を損うことなく詳細度を高めた炎を実現できる。

ただし、このとき四面体を構成するポリゴンを真横に近い場所から観察する際に、不自然な直線が現れるという、写実性に対する弱点が発生する。しかし、パーティクルを常に自転させることで、直線が直線のまま移動することを防ぎ、炎がパチパチと弾ける様子として直線の出現を利用することもできる。

したがって、この立体を利用する手法は、直線が生じる不自然さを許容、あるいは適切に活用でき、少しでも速度や詳細度を向上させたい場合に有効な手法と言える。

次にテクスチャに着目すると、常に視点方向を向く四角形ポリゴンを用いる手法は、そのままに、その視点方向に応じてテクスチャを切り替える方法が考えられる(図５)。この場合、テクスチャデザイン、すなわちパーティクルの形状に対する自由度が飛躍的に増し、リアリティに対するほかの要因に影響を与えずに詳細度を向上させ、高い写実

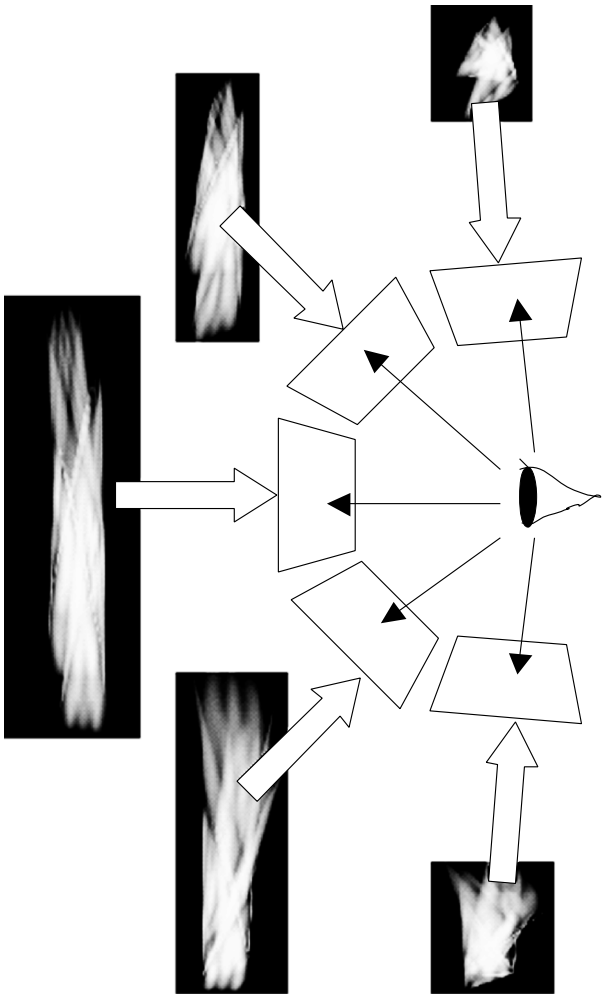

図5　テクスチャ差し替えパーティクル

性を実現できる。

ただし、全方向からのテクスチャを用意するのは、テクスチャの作成に手間がかかり、実行時のテクスチャメモリ容量を相当量消費する。一般的には、炎以外にもさまざまなテクスチャを適用した3次元モデルを表示する必要があり、炎に十分なテクスチャメモリ容量を割くことが困難な場合は多く、その対処としてテクスチャ量を圧縮するために、画像のサンプリング幅を広くとるなどの調整が必要となる。

テクスチャを切り替える手法は、そのテクスチャ群を用意できるので、多くのテクスチャメモリを炎に割くことが可能な場合には、優れた手法と言える。

5. ごみ焼却炉

ごみ焼却炉内の燃焼を、インタラクティブな3次元グラフィックスを用いて再現することは、プラントが完成する前の操業訓練や、一般見学者にプラント内部の様子を説明するなどの用途に有効である。ここではこれらの用途を想定し、火格子によるごみ撹拌機能を備えた焼却炉について、一般向けに販売されているグラフィックスカードを装備したWindows PCにて行う。

表示が必要となる3次元モデルは、以下の通りである（図6）。

- 炎
- 炉体(焼却炉外壁)
- 中間天井
- ごみ
- 火格子
- 給塵装置

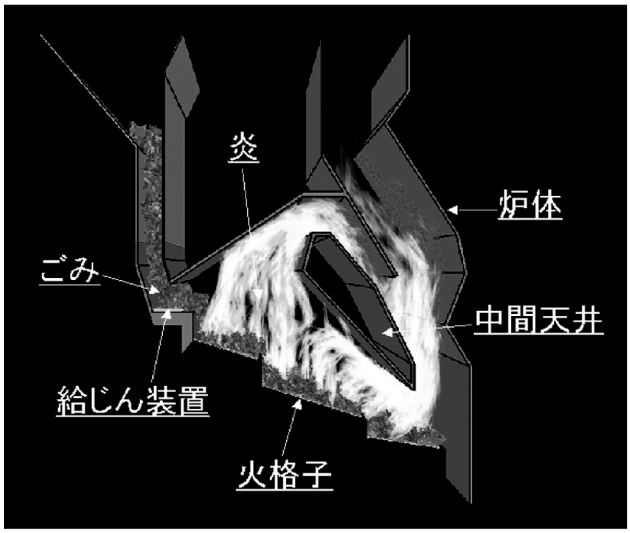

図6　ごみ焼却炉全体図

炎の表現手法には、近傍での観察があり得ること、炎以外の表示物でもテクスチャを利用すること、炎がパチパチと弾ける様子を演出したいことから、四面体パーティクルを用いた手法を採用する。

給塵装置により火格子上に放出されたごみは、撹拌されながら燃焼し、炎パーティクルを発生し続ける。発生した炎パーティクルは、焼却炉内で適切に設定されたベクトル場に沿い中間天井を回り込んで排気口へと進み、寿命に従って消滅する。

ここで、ある広がりをもった火格子上でごみが燃焼し、そのそれぞれが炎パーティクルを生成することで相当数の炎パーティクルが発生することにより、2つの問題が生じる。すなわち、パーティクル数の増加によるレンダリング負荷の増大と、多数のパーティクルが重なることによって

図７　自由な視点位置

炎の色が白く飽和してしまう現象の発生である。

これらを同時に解決する方法として、異なるごみから生じた近傍の炎パーティクルを、まとめて一つの大きなパーティクルに置き換える手法を用いた。

その結果、焼却炉内にさまざまな大きさの炎パーティクルが存在することとなり、より自然な画像を得て写実性をさらに向上することとなった。

自由度についても、写実性や画像の更新速度を損なうことなく、あらゆる方向からの、そして近傍からの観察が可能である（図７）。また、火格子を大きく４つの領域に分割して、炎の色や勢い、寿命に基づく長さを領域ごとに制御できるようになっている。

6. おわりに

ここで紹介したごみ焼却炉へ適用した成果は、実際にいくつかのごみ焼却炉に活かされており、実プラントと同様の操作卓に触れることで、シミュレーション計算により炎の色や勢いなどが制御されるようになっている。

今後は、ここでは固定であったベクトル場を、簡易的なシミュレーション計算でリアルタイムに更新すること、複数のベクトル場を用意して切り替えるなどの方法で、制御可能とすることが考えられる。また、テクスチャの圧縮技術を採り入れるなどで、潤沢なテクスチャメモリ領域を使えるようにし、今回採用を見送ったテクスチャを切り替える方式を応用する展開も考えられる。さらに、日々進化するグラフィックスハードウェアの技術を活用して、炎の発する光が周囲に及ぼす影響を考慮することが、さらなる写実性向上に向けた改良点として挙げられる。

インタラクティブな３次元グラフィックスによる炎は、ここでのごみ焼却炉以外でも、焚き火や火災時の非難シミュレーション、そのほか、さまざまな場面の特殊効果として応用が期待できるので機会を捉えて活用するとともに、ここで得た知見をほかの自然現象表現へも広げていければと考えている。

＜問い合せ先＞
公共・公益システム事業部
マルチメディアソリューションセンター
Tel.　044-540-2151　山中　政彦
E-mail：masahiko-yamanaka@exa-corp.co.jp