

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330142

研究課題名(和文)CGにおける流体シミュレーションの効率的なフロー制御手法の開発

研究課題名(英文)Development of An Efficient Flow Control Method of Fluid Simulation for CG

研究代表者

金井 崇 (Kanai, Takashi)

東京大学・大学院情報学環・准教授

研究者番号：60312261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：CGにおいてリアルな映像を得るために、物理シミュレーションによるアニメーション作成が行われている。しかし、映像制作者の観点から見るとこれらは必ずしも扱い易いものではなく、物理パラメータの調整とシミュレーションの再計算の繰り返しによる試行錯誤を行う必要があり、映像制作に莫大な時間がかかる要因となっている。本研究では、物理法則にもとづく非圧縮流体シミュレーションへの、手続き的手法による効率的なフロー制御方法の開発を主な目的とし研究を行った。本研究により、制作者にとって制御性を高めつつよりリアリティの高い映像を作り出すことができるようになった。また、提案手法の計算部分は大変高速であることも示した。

研究成果の概要(英文)：To obtain the realistic images in Computer Graphics, the animation is created by using physics-based simulation. However, from the video creator point of view, such simulations are not always easy to use, since the repetition of adjustments of physical parameters and re-simulations is required. This is one of reasons why a video production takes huge time. In this research, we developed an efficient flow control method based on procedural approach to a physics-based incompressible fluid simulation. By this research, we showed that our method enables high controllability of fluid simulation and can create more realistic images at the same time. We also showed that our computational cost is not so high.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：流体シミュレーション 可視化 爆発シミュレーション プルーム 巻き込み現象 SPH 曲面再構築 GPU

1. 研究開始当初の背景

近年では、映画やテレビ、CM、ゲーム等において3DCG(3次元コンピュータグラフィックス)による映像を利用することが一般的になっている。中でも、より現実に近い映像を得るために、物理法則にもとづくシミュレーション技術を利用してアニメーションを作成することが多くなっている。例えば、物体が落下していく様子を得るための剛体シミュレーションや、水や煙の動きを表現するための流体シミュレーションなどは、すでに商用のCGソフトウェア上で実装され、利用できるようになってきている。

しかしながら、一般的にシミュレーションの知識を持たない映像制作者の観点から見ると、これらのソフトウェアは必ずしも扱い易いとは限らないのが現状である。物理法則シミュレーションを利用する場合、まずは初期の物体の位置や姿勢を決め、物理パラメータを設定した後に、シミュレーション計算を行うことで、物体の動きを決定する。このとき、制作者が思い通りの映像を作成したい場合には、物体の位置や姿勢を修正するか、あるいは、物理パラメータを調節するしかない。さらに、これらの調整は、すべてシミュレーション計算の前段階で行う必要がある。一般的には、高精度なシミュレーション計算をするには計算時間がかかる。よって、制作者によるこれらの物理パラメータの調整とシミュレーションの再計算の繰り返しによる試行錯誤を行う必要があり、このことが、映像制作に莫大な時間がかかる一つの要因となっている。したがって、物理シミュレーションを映像制作で手軽に利用できるようになるための編集手法の開発が重要な課題となっている。

過去に、物理法則シミュレーションにおける物体の動きを制御するための研究が行われてきた。しかしながら、それらの研究成果が実用的に利用されているとは言い難い状況である。物理シミュレーションの制御に関する研究としては、主にフィードバック制御を利用した方法と、最適化手法による方法に大別することができる。これらの手法では主に、ターゲットとなる形になるように外力を加えることを基本としている。ただし、意図する形状に沿った修正をすることを主眼としている反面、得られた動きはリアリティを損なう傾向にある。

一方で、上記とは全く異なるアプローチとして、物理法則にもとづく流体シミュレーションの一つである爆発シミュレーションを対象とし、流体のフロー(流れ)を意図通りに誘導し、かつ、物理的な動きの特徴を維持することのできる、手続き的な手法を開発した。この方法は、爆発現象が圧縮性流体から

非圧縮性流体への変遷であることを利用したもので、圧縮性流体の現象の中での高速流体のフローを物理的な性質を利用してあらかじめ手続き的に作成しておき、この動きを、非圧縮性流体シミュレーションに融合している。

以上の手続き的な手法を利用することで、制作者は以下のような利点を得られる。

- 物理パラメータを気にすることなく、フローの方向を示す曲線を編集するだけで良い。
- フローの編集はCGソフトウェア上で実装されており、ソフトウェアの操作に慣れた製作者ならば非常に扱い易い。

ただし、この研究は主に圧縮性流体のフローの制御のみを対象としたものであり、一般的な非圧縮性流体に対しては今後の検討の余地があるものとする。

2. 研究の目的

過去に行ってきた爆発シミュレーションにおけるフローの制御手法の開発を通じて、1節で述べた手続き的手法が、より一般的な非圧縮性流体に適用できるだけでなく、物理的な性質を手法にうまく組み込むことで、リアリティを保ちつつ動きの制御を行うことができるものと確信している。ここでは、物理法則にもとづく非圧縮流体シミュレーションへの、手続き的手法による効率的なフロー制御方法の開発を主な目的とする。研究期間においては、主に以下の三つのテーマについて取り組む。

爆発の圧縮性の側面で生じた火炎は、ある時点で伝播が収束して非圧縮性となる。その後、火炎が高温であることから、空気との間の密度差より生じる浮力により上昇する。この非圧縮性の側面における上昇する火炎と煙は、プルームと呼ばれる。本研究では、このプルームの動きや形状を制御するための手法を開発する。

次に、水を含む液体シミュレーションに関しては既に様々な研究が行われ、また、商用のCGソフトウェア上での実装も行われている。しかし、液体の進む方向を指定するなど、動きを制御することは現状では難しい。ここでは、液体の進むフローの方向を指定することを基本とし、液体シミュレーションのフローの動きや形状を制御する手法を開発する。

3. 研究の方法

爆発現象の非圧縮性の側面における上昇する火炎と煙は、プルームと呼ばれる。平成

25年度に関しては、主に爆発シミュレーションにおけるブルームの動きや形状を制御するための手法を開発する。しかしながら、ブルームの動きと形状の生成手法に関しては、CGの分野においてはこれまでほとんど研究例がない。そこでまず、ブルームが生成される過程における物理現象から、形状や動きを生成するためのモデル化を行う。ここで構築されたモデルに基づき、動きと形状を制御するための手法を開発する。

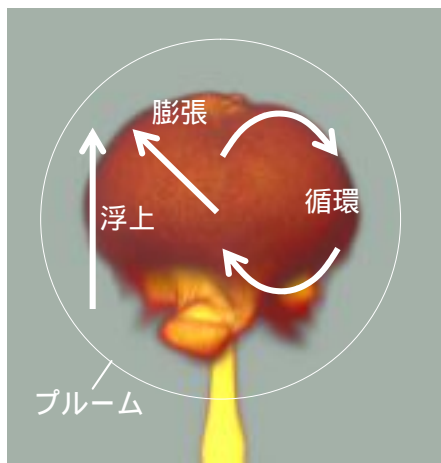


図1:ブルームにおけるの巻き込みの概念図

ブルームは、上昇するにつれて周囲の空気を巻き込むことでその密度や温度等が大きく変化し、さらにその形状や動きが変化していく。この物理現象は巻き込みと呼ばれる。この巻き込みにより、上昇、膨張、循環の三つの特性が起こり、ブルームの形状が形成されていくことになる(図1)。

上昇は、ブルーム中に巻き込まれた空気の種類含有率が高くなることでブルームの密度が高くなり、周囲の空気との密度差によって、上昇する力が生まれることで起こる。**膨張**は、同様に空気の種類含有率が高くなることで、ブルームの体積が徐々に大きくなることで起こる。**循環**は、ブルームの上部における空気抗力、および、ブルームの下部におけるブルーム内外の圧力差により、ブルームの中心部からの渦のような流れが生成される。すなわち、ブルーム上部では、中心から外側への流れが起こり、ブルーム下部では、逆に外側から中心への流れが起こる。

本研究においては、これらの三つの特性を利用してブルームの形状生成モデルを構築する。実際には、三つの特性は互いに影響し合うものと考えられるが、ここでは簡単のため、それぞれの特性の相互関係を分離し、独立したものとして扱う。すなわち、それぞれの特性からもたらされるフローを関係式から手続的に求め、流体シミュレーションと合成することで、ブルーム形状を生成する。

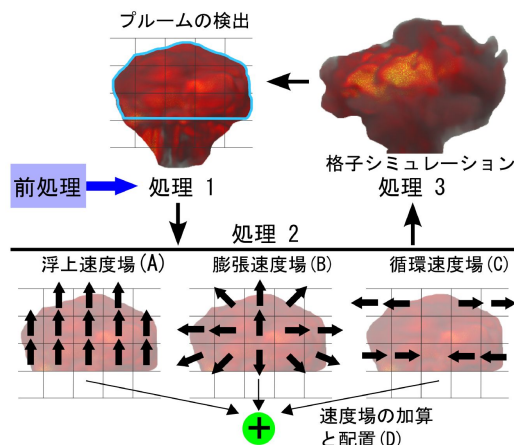


図2:全体アルゴリズム

図2に本手法の全体のアルゴリズムを示す。本アルゴリズムは、前処理、および、処理1から処理3までのステップ毎の繰り返し計算により構成される。本アルゴリズムにより、上昇速度、大きさ、循環渦の強さや位置が制御されたブルームを生成する。

- **前処理**では、上昇、膨張および循環の各処理を行う時間をユーザが決定し、また、ブルームの初期温度も入力する。ステップ毎の含有率を算出する。また、ブルーム源の密度場や速度場もここで入力する。
- **処理1**では、現在のステップにおけるブルームを検出する。
- **処理2**では、現在のステップにおける上昇、膨張、及び循環を表現する速度場をそれぞれ算出する。そして、これらの速度場を、格子シミュレーション空間におけるブルームに加算する形で配置する。
- **処理3**では、BFEC法による格子シミュレーションを1ステップ実行することで、格子全体の場を計算する。ここで、格子シミュレーション空間は、制御終了までブルーム全体を網羅するようなものを考える。

4. 研究成果

- (1) 巻き込み現象を考慮した爆発シミュレーションにおけるブルームの制御

図3の左列は、上昇及び膨張を適用して調整しながら、壁の間で発生するブルームの挙動を制御した例である。これにより、起爆後しばらくは壁の間の空間を上昇し、その後は壁と干渉せずにこの空間よりもブルームが大きくなるように制御できていることが分かる。図3の右列は、上昇及び循環を適用して調整しながら、高い壁に挟まれた狭い空間で発生したブルームの挙動を制御した例である。継続的に循環渦を生じながら、かつ、

細い空間を浮上し続けていることが確認できる。これにより、隣接する壁に大きな影響を受けることなく、検出したブルーム領域に対して循環渦を速度場によって制御できることが分かる。



図3: 本手法によるブルームの制御結果

本手法では、最初に浮上、膨張の順に調整して、ブルームの挙動を決定し、それぞれ複数回の試行錯誤が必要になる。膨張については特に、パラメータとブルームの大きさの関係を参考にしながら、比較的少ない回数で所望の結果を得られた。そして、循環の挙動を追加した。このようにすることで、試行錯誤の回数を少なくすることができる。また、吸収と発散の速度場の強度が近い場合には、循環はブルームの大きさや上昇速度への影響が特に小さい。エネルギー保存や理想気体の方程式を解くことで計算コストが大幅に増えることなく、ほぼ格子シミュレーションのみの時間で、ブルームの挙動を制御して得られることも本手法の利点である。

(2) 液体シミュレーションのための高速な適応的曲面再構築手法の開発

効率的なフロー制御手法を液体シミュレーションへ適用すべく、特に、インタラクティブな処理のための、SPH (Smoothed-Particle Hydrodynamics) 流体のGPUを利用した高速な液体表面形状生成手法を開発した(図4)。

この中で、もっとも大きな貢献としては、SPH 流体のための適応的 GPU 上での曲面再構築アルゴリズムを開発したことである。このような流体シミュレーションの表面を構築する主な手法として、流体の密度場に対して距離場を計算し、その距離場の等値面を抽出する方法が一般的である。しかし、詳細な表面形状を作成するには、距離場の格子を細かくとる必要があり、そのため表示速度がかかるためインタラクティブ処理におけるボトルネックの一つとなっていた。

まず、距離場を生成するグリッドとして、疎密に応じて3段階レベルの格子グリッドを用意する。3段階のどのレベルの格子を使うかは、各格子でのSPH粒子の密度や速度から決定する。次に、各レベルの格子からMarching Cubes法を用いて面を生成する。ここでの問題は、隣接する格子のレベルが異なると、その境界の箇所で穴が開いてしまうことである。この問題を回避するために、ここではあらかじめ異なるレベル間でできる穴を埋めるためのパターンを定義しておき、その場でパターンマッチングを行う。これら一連の処理は、GPUを用いて効率に行うことができる。

これらの手法を実際にいくつかの流体シミュレーションに適用し、シミュレーションの計算を含む一連の処理をすべてGPUの中で行い、インタラクティブ処理が行えるほどの計算時間で表示が行えることを実証した。

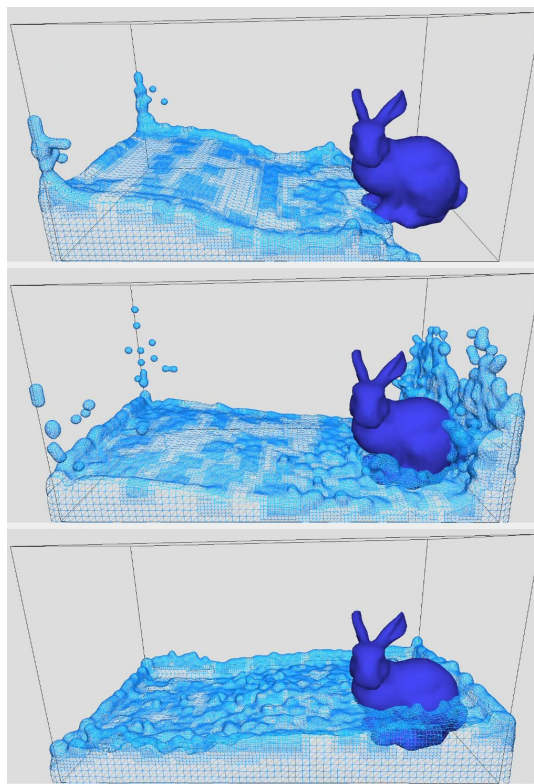


図4: GPU 上での適応的な液体表面再構築

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

1. Hiromu Ozaki, Fumihito Kyota, Takashi Kanai: “Out-of-Core Framework for QEM-based Mesh Simplification”, Proc. 15th Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization (EGPGV 2015), pp.87-96, 2015. 査読有. DOI: 10.2312/pgv.20151159
2. Genichi Kawada, Takashi Kanai: “Controlling the Shape and Motion of Plumes in Explosion Simulations”, Proc. 11th Workshop on Virtual Reality Interaction and Physical Simulation (VRIPHYS 2014), pp.69-78, 2014. 査読有. DOI: 10.2312/vriphys.20141225
3. Shuchen Du, Takashi Kanai: “GPU-based Adaptive Surface Reconstruction for Real-time SPH Fluids”, Proc. WSCG 2014, pp.141-150, 2014. 査読有.
4. Yusuke Tokuyoshi, Takashi Sekine, Tiago da Silva, Takashi Kanai: “Adaptive Ray-bundle Tracing with Memory Usage Prediction: Efficient Global Illumination in Large Scenes”, Computer Graphics Forum, Vol.32, No.7, pp.315-324, 2013. 査読有. DOI: 10.1111/cgf.12239

[学会発表](計3件)

1. Chenlei Wu, Takashi Kanai: “Animating Detailed Hairs for Game Characters using Enhanced Secondary Motion Graph”, 14th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry (VRCAI 2015) Posters, ニチイ学館神戸ポートアイランドセンター(兵庫県神戸市), 2015. 査読有.
2. Yusuke Tokuyoshi, Tiago da Silva, Takashi Kanai: “Directionality-Aware Rectilinear Texture Warped Shadow Maps”, SIGGRAPH 2014 Posters, Article No.94, Vancouver (Canada), 2014. 査読有.
3. 川田 玄一, 金井 崇: “巻き込み現象を考慮した爆発シミュレーションにおけるブルームの制御”, グラフィクスと

CAD / Visual Computing 合同シンポジウム, No.47, 青森市文化会館(青森県青森市), 2013. 査読有.

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]
ホームページ等
<http://graphics.c.u-tokyo.ac.jp/hp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金井 崇 (KANAI TAKASHI)
東京大学・大学院情報学環・准教授
研究者番号: 60312261

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし