

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23611021

研究課題名(和文) 編集可能な流体造形モデルの研究

研究課題名(英文) user-controllable fluid simulation model for computer graphics

研究代表者

鶴野 玲治 (tsuruno, reiji)

九州大学・芸術工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10197775

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：水をパーティクルとして離散化する際、密度を可変(アダプティブ)にすることで再現性と計算効率の両方の問題の解決を行った。さらに、流体を正確にシミュレートするだけでなく、インタラクティブに目標形状を与えて意図的にコントロールする手法を開発した。水をパーティクルで離散化した後、ターゲット形状を与える。この形状のポリゴンモデルとユーザが指定した対象領域からコントロールパーティクルを動的に生成し、Shape Matching 法によって attraction force と velocity force の二種類で制御する。流体の動きと形状は Navier-Stokes 方程式と制御粒子の両者によって決定させた。

研究成果の概要(英文)：We developed an adaptive and controllable particle-based fluid simulation method for computer graphics. First, we developed a new algorithm for preserving fluid sheets with an adaptively sampled particle method. This method is the extended FLIP(Fluid-Implicit Particle) model with an anisotropic position correction to improve the particle spacing. Next, we propose an interactive method to control fluid behavior by using a target shape. To achieve the desired motion, we define the additional forces by using control particles employing the Navier-Stokes equation. Control particles are generated from a fluid area chosen by the user, and their behavior is sequentially determined by using a shape-matching method referring to the target shape. Our method enables one to interactively simulate fluid animation, which is gradually deformed to the target shape based on physics.

研究分野：時限

科研費の分科・細目：デザイン学

キーワード：コンピュータグラフィックス 流体造形 流体コントロール

1. 研究開始当初の背景

流体を伴う現象は私たちの日常風景と密接に関わっている。流れる水、大海原、空を流れる雲、我々の呼吸する大気は地球に現存する物質の3分の2を占め、コンピュータグラフィックス (CG) 界において最も美しくかつ重要な現象の1つであると認識されている。流体の挙動は、コンピュータが登場した1940年代より工学的な研究がなされている。これらは **Computational Fluid Dynamics (CFD)** と呼ばれ、航空機の風洞実験、津波の伝搬を予測するために発展してきた。CGにおける流体の研究は80年代に映画の特撮技術として始まった。現在、CGの流体研究は映画制作やビデオゲームに利用され、近年は工学分野の計算結果の可視化にも寄与している。CGにおける流体は、巨大で複雑な流体モデルをどのように効率よく扱うか、処理量を減らすかが焦点になる。たとえば計算精度を落とす、物理モデルを簡略化する、などを行っている。それでも現状では、コンピュータで計算出来る流体領域には限界があり、1立方メートルの液体の挙動を再現するのに、複数の計算機を使って一週間かかることもある。本問題は今日も根強く残っており、多くの研究者が解決に取り組んでいる。

CGでは液体の挙動は大きく(1)格子法、(2)粒子法、(3)格子+粒子法の3つの手法が用いられている。格子法は空間を有限の格子に区切り、各格子間での物理方程式を近似する工学分野で最も用いられている手法である。計算コストが低い液体表面の追跡が厳しく、たとえば「飛沫」を伴う現象を苦手とする。粒子法は液体を大量の粒子で近似し粒子同士の干渉を計算して液体の動きを追跡する手法である。歴史的には格子法と変わらないがCGへの応用は比較的新しく、Mullerらによる2003年の研究が有名である。飛沫を扱える一方で計算コストが高くなる。格子+粒子法のハイブリッド法は2005年に登場したもので、流体を大量の粒子で近似し、圧力計算は格子を用いて計算する。両手法の利点を備えていることから現在、注目を浴びている。

これらは言い換えればコンピュータの計算量の制約の中でどこまで表現力を上げられるかという課題に対する取り組みである。正確さやリアリティを追究するには計算時間が犠牲となり、計算速度やインタラクティブ性を求める時には正確さが犠牲になる。したがって、本研究の目的である美しい流体パターンをリアリスティックかつインタラクティブに生成また編集することは極めて難しい問題である。これを解決するために、流体計算方法だけでなく精度や計算対象の効率化が必要であり、また、思考イメージを直感的に反映させるようなユーザーインタフェースが必要になる。

2. 研究の目的

本研究では、水や風のような美しい流体のパターンをCG(コンピュータグラフィックス)でリアリスティックかつ自由に生成し、さらに制御や編集加工できるようなモデルを生成する。従来から提案されてきた方法を見直し計算単位を周波数成分に分解して階層化し、流体としてのリアリティを改良する。また、操作系の実現のために処理方法の効率化とGPUを使った並列化によって高速化し、さらに全体の造形を編集するための操作系を計算モデルに合わせた形で実現する。

流体をコントロールする方法はこれまで数多く提案されてきた。しかしながら高い計算負荷や事前計算に対する依存といった点があるため、既存の手法ではインタラクティブに流体の形状をコントロールすることが困難である。この問題に対し、流体の概形を形成するcontrol particle(制御粒子)を介在させることで、この影響力を使って間接的にコントロールする方法を提案、実現する。流体のシミュレーション計算と、コントロール機能の両方によって、リアリスティックでかつ制御や編集が可能な流体形状を生成することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

新しい流体の計算方法と、ユーザーインタフェースの二つによって構成する。前者では計算方法を次のように設定する。格子法+粒子法を発展させ、流体の動きを低周波成分と高周波成分に分けて計算する。それぞれの特性を活かし、概形の部分と飛沫や複雑な表面波の部分とをハイブリッドに計算すれば計算量の削減とディテールの再現が見込めるはずである。その他、GPUへの実装や実際の水の挙動との比較などを考えている。後者のユーザーインタフェース部分は、粒子法と格子法それぞれで異なるアプローチが必要であると考え、研究計画の時点では流体内の粒子や格子の直接的間接的な制御に加え、ノード点や境界曲面を手がかりにする方法を考えていた。その後、さまざまな群コントロールを試行したあとで、コントロールパーティクルを使ったshape matching法が有効と考え、この方法を進めることにした。全体の概形や流れの方向性を加味したエディット方法などの問題の解決を目指す。

これら、流体をコンピュータで取り扱うための離散化、その挙動を表現するための方程式の再検討、これを有限な計算環境の中で実現するための方法、流体特有の複雑かつ大きな変化をとともう動きへの対応、リアリティを持った映像化、任意形状へのコントロールなどの問題解決をデータと計算モデルの両方から行う。本研究は大きく二つのテーマによって構成されている。アダプティブFLIP粒子を使った薄膜形状の保持と深さに合わせた計算密度の可変性、

制御粒子を使った **shape-matching** 法による流体形状のコントロール法の提案である。

4. 研究成果

本研究は流体としてのリアリティの改良と操作系の実現のための処理方法の効率化、高速化、操作系の実現などによって構成される。三年間の研究期間で、以下のように進展が得られた。

・2011年度(平成23年度)

流体計算方法ではリアリティの改良に重点を置いた。ある瞬間の流体の形状を求めるためにこの流体の計算単位を高周波成分と低周波成分に分けて考えた。低周波成分とは流体の大きな動きの部分であり、高周波成分とは水面の細かな波や飛沫などノイズのような動きである。流体領域の計算単位は格子法と粒子法に分類されるが、前者は低周波成分、後者は高周波成分に向く。一方で後者は粒子の粗密が発生しやすく、瞬間的に発生する水の膜や意図をひいたような液体特有の粘性感をもった形状を再現するのが難しい。そこで、粒子密度が疎となる時に補間粒子を発生させ、それらをつなぐサーフェスパッチを生成させた。これによって瞬間的に発生する水膜や水系が生成され、より粘性感をもった瞬間形状を生成できるようになった。粒子を用いていることからアルゴリズムもシンプルである。この成果は2011年夏のSCA2011(ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation)で採択され、論文発表を行った。発表とディスカッションのあと、審査委員から論文賞(award)を授与された。

操作系ではイメージベースのものを試行した。画面上でペンや指を使って仮想空間内の空気を動かし、風を使って間接的に水を制御する方法を進めた。水面が波立つという動きを表現するために、粒子や格子でない周期関数の重ねあわせによる波モデルを適用した。これは芸術科学会 NICOGRAPH でポスタ発表を行った。低周波成分のみのコントロールになる。

・2012年度(平成24年度)

前年度に引き続き粒子法によるシミュレーション計算の再発生する粒子の離散に起因するアーティファクトの軽減を行った。GPUによる並列計算などを加え、高速化も試行した。前年度のSCA2011で採択された論文に改良を加えてIEEEに投稿した論文が採択された。

流体形状の制御や編集の方法については先行あるいは現行の関連研究調査を行いながらさまざまな方法を試行した。水を仮想的に制御するような先行研究は少ないが、流体を粒子法で計算しているため、ナビエ-ストークス方程式の外力項を制御することが有効

と考え、目的形状をキーフレームとするフレーム制御法として、動物の群れのように個々の粒子に意思を持たせてポテンシャル場を使って群制御する方法、弾性体を制御する方法である **shape matching** モデルを適用し、制御粒子を与えて間接制御する方法を試行した。特に後者が制御しやすいことがわかった。なおこの研究は口頭発表の際に優秀発表賞を頂いた。

・2013年度(平成25年度)

前年に引き続いて **shape-matching** 法の効果的な適応方法をさぐった。いくつかの方法を試行した中でユーザーイメージを反映させやすいと感じられたのが、インタラクティブに目標形状を与えて意図的にコントロールする方法である。具体的には水を粒子で離散化した後、目標形状をポリゴンモデルで与える。目標形状に向かう水の領域を指定し、この領域の中に **control particle** を動的に発生させる。 **shape matching** 法によって周囲の水粒子に制御力(**control force**)を発生させる。この制御力は **attraction force** と **velocity force** の二種類とする。流体の動きと形状は **Navier-Stokes** 方程式と **control particle** の両者によって決定される。以下はこの方法による流体形状のコントロール結果である。

本研究によって得られた成果の画像を次に示す。図1はアダプティブFLIP粒子を使った粘性感を持った水の表現結果、図2は **control particle**、図3は **shape matching** 法を使ったインタラクティブな流体形状コントロールの結果である。

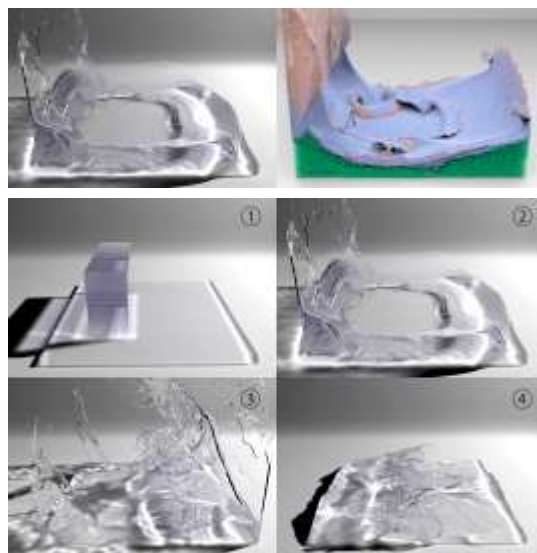


図1 アダプティブFLIP粒子を使った水の形状計算

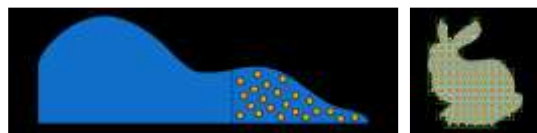


図2 control particle

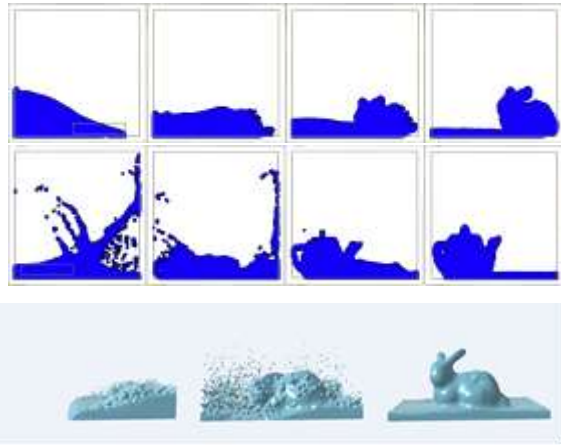


図3 shape matching 法を使った形状コントロール

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3件)

- ① Jun Yoshino, Reiji Tsuruno : Interactive Shape Control for Fluid Animation, Nicograph International 2013, 108-114, Nicograph International proceedings DVDROM, pp.108-114, 2013, 2013.06., 査読有り
- ② Ryoichi Ando, Nils Thurey, Reiji Tsuruno : Preserving Fluid Sheets with Adaptively Sampled Anisotropic Particles, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, IEEE, 18, 8, 1202-1214, 2012.08, doi:10.1109/TVCG.2012.87, 査読有り
- ③ Ryoichi Ando, Reiji Tsuruno : A Particle-based Method for Preserving Fluid Sheets, SCA '11 Proceedings of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, ACM New York, NY, USA ©2011, 2011.08., 査読有り

(投稿中1件あり。条件付き採録, 再査読中)

[学会発表] (計3件)

- ① Jun Yoshino, Reiji Tsuruno : Interactive Shape Control for Fluid Animation, Nicograph International 2013, 2013.06.03., 福岡 (査読あり)
- ② 吉野潤, 鶴野玲治 : 流体形状のインタラクティブなコントロール, 映像表現・芸術科学フォーラム, 画像電子学会研究会予稿 12-04-34, 2013, 2013.03.15., 横浜
- ③ 勇太智, 鶴野玲治 : 外形制御による魚群

アニメーションの生成, 映像表現・芸術科学フォーラム, 画像電子学会研究会予稿 12-04-40, 2013, 2013.03.15., 横浜

④ 富田康之, 鶴野玲治 : インタラクティブな波モデルの合成による水面写真の動画化, NICOGRAPH (芸術科学会), 2011.09.05. 東京 (査読あり)

6. 研究組織

研究代表者

鶴野玲治 (TSURUNO Reiji)

九州大学・芸術工学研究院・准教授

研究者番号: 10197775

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし