

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25730069

研究課題名(和文) 数値シミュレーションにおける高精細表面生成技術の確立

研究課題名(英文) Study of High-quality Surface Generation Technology for Numerical Simulation

研究代表者

藤澤 誠 (FUJISAWA, Makoto)

筑波大学・図書館情報メディア系・助教

研究者番号：90508409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：数値シミュレーションとは現実世界の現象を数値計算によりコンピュータ内で再現する技術である。本研究では、従来から重要視されていたものの未だ発展途上であった数値シミュレーション結果の可視化部分を技術的に向上させるために、水などの明確な境界(表面)を持つ物体のシミュレーションを対象として、波の先端等の鋭い特徴と滑らかな表面を両立する手法を開発した。さらに粒子法において高精細な表面を生成する際に問題となる粒子の不均一さを解決する手法も開発した。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulation is an important technique to predict behavior of real phenomenon in a computer. In this research, we developed a method to allow surface representation of both smooth and sharp features for liquid simulations which has defined border between liquid and gas. As a result, we archive more high quality visualization for the numerical simulation. Moreover, we solved a problem of non-uniform distribution of particles that will affect quality of the surface.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：数値シミュレーション 可視化 コンピュータグラフィックス 粒子法 液体表面生成

1. 研究開始当初の背景

本研究の学術研究分野を数値シミュレーションと呼ぶ。数値シミュレーションとは、現実世界の現象を支配方程式でモデル化し、コンピュータを用いた数値計算でその現象の挙動を予測することである。数値シミュレーションは工業製品の設計はもちろん、医療現場における手術シミュレータ、映画やゲームなどでのコンピュータグラフィックス(CG)アニメーションなど様々なシーンにおいて利用されており、その重要性は年々高まっている。その中でも流体现象を対象とした流体シミュレーションは、自動車や航空機、船舶などの設計、気象予測、洪水や津波などの予測、あるいは、複雑な流体现象をCGで再現したいアニメーションスタジオやゲーム会社など、今後の日本における様々な技術の発展に大きく寄与するであろうことが予想される。

数値シミュレーションは大きく分けると数値計算部と可視化部の二つのパートが存在する。数値計算部ではグリッドやパーティクルなどの離散要素により離散化されたシーンを支配方程式に基づき数値解析により解く。可視化部では解かれた結果を人間が見ることができる形式に変換する。例えば、空気の流れならばベクトル場を直接矢印で描画し、煙のように流れは密度場として可視化される。液体や固体のようなはっきりとした境界を持つ物体が対象の場合、その表面を関数で表現して、シミュレーションにあわせて追跡・描画する。数値計算部に関してはコンピュータの発展と共に様々な手法が提案されており、実際の問題に適用可能なレベルまで発展している。特に物体をパーティクルで近似する粒子法は並列計算により高精度と高速性を両立する計算法として大きな発展を遂げている。一方で可視化に関してはこれまで二の次にされており、CG分野での成果を適応するだけにとどまっている。

シミュレーション結果をどのように人に見せるかということは先に述べた製品設計、気象予測においても、コンピュータで計算された結果をより深く理解し、新しい知見を得るために非常に大事なことである。例えば、洪水シミュレーションでは結果として得られる水流の速度や圧力を数値としてみせるだけでなく、液体表面を抽出し、CGで描画することで、地形中でどのように流れが起る、どこに被害が起きるかを一目で把握できるようになる。さらに数値シミュレーションに不慣れな他の分野の専門家にとって分かりやすい結果を提示することで、様々な分野のコラボレーションによる効果的な対策が可能になると考えられる。これらのことから本研究では、流体シミュレーション、特に近年その計算速度の速さから注目されている粒子法において液体表面をCGで表現するための手法を検討していく。その中で、近年の表示装置の高解像度化により要求される、より

高精細な特徴を捉えることのできる方法を開発する。

2. 研究の目的

本研究課題では従来から重要視されていたものの未だ発展途上であった数値シミュレーション結果の可視化部を技術的に大幅に向上させることを目的とする。液体などの明確な境界を持つ物体のシミュレーションを対象として、境界の詳細な特徴を維持しつつ、必要となるデータ量を大幅に減少させる技術を開発する。

3. 研究の方法

粒子法では粒子の集合により液体などの物体を表現し、粒子間相互作用によりその挙動を計算する。粒子自身が物体形状を表し、これを可視化する際にはそこから表面を抽出しなければならない。従来手法では粒子ごとにガウス関数のような点広がり関数を定義し、その合成と閾値により表面において値が0となる陰関数場を生成する。この方法はメタボールと呼ばれる。さらにそこから表面を覆うポリゴンメッシュを作り、描画する。

この従来手法を使った場合、1) 粒子の形状が表面形状に現れ、結果として平らになるべきところが凸凹形状となり、波の先端などがった形状部分が丸みを帯びる、という形状の問題点と、2) 陰関数場の形状を精細に描画するために非常に多くのポリゴンメッシュを必要とする、という性能の問題点がある。

これらを解決する表面生成技術として、本研究では、1) 陰関数曲面フィッティングによる表面領域的なアプローチ、2) 3D-2D空間変換による超高速レンダリング手法、をそれぞれ開発して統合することで数値シミュレーションの結果から高速かつ高精細に表面を抽出する。また、研究過程において高精細な表面生成のためにはベースとなる粒子法における粒子分布が重要となることも明らかになったため、特に分布が不均一になる固体境界付近における新しい粒子密度計算法を改良し、均一な粒子分布を実現する。

4. 研究成果

本研究では高速で高精細な表面生成技術として、(1)陰関数曲面フィッティングと2Dスクリーン空間を用いた表面レンダリング手法の開発、(2)固体境界付近における粒子分布の改良、の2つの大きな研究成果をあげた。また、(3)ベースとなる粒子法の改良・高速化も行った。以下でそれぞれの成果について述べる。

(1) 陰関数曲面フィッティングと2Dスクリーン空間を用いた表面レンダリング手法の開発

流体を粒子の集合で離散化し、支配方程式に基づいて粒子の運動をシミュレーション

する方法を粒子法という。本研究では、粒子法の一つである SPH による液体シミュレーションの結果に対して、陰関数曲面フィッティングを用いて液体表面を可視化する手法を開発した。カーネル関数を用いたメタボールによる手法ではなく、ポイントベースレンダリング分野で用いられている陰関数曲面の点群へのフィッティング技術をパーティクル法に適用し、従来表現しきれなかった液体表面の特徴である波の先端のような鋭い形状と滑らかな平面の両立を可能とした。

我々はまず、2D の粒子法の結果に対して、ポイントベースレンダリングで用いられるフィッティング手法を適用した。手法の手順を図 1 に示す。粒子法で得られた粒子配置から表面の向きを表す法線を算出し、同時に表面を形成する粒子を抽出する。抽出された表面粒子を法線の向きに従ってグループ分けし、グループ毎に最小自乗法によって多項式曲線をフィッティングさせ、それらをグループ中心からの距離に基づく重み付き和により統合することで最終的な陰関数場を得る。陰関数場からは従来のメッシュ化手法を用いて区分線形曲線として表面を抽出する。

図 2 に従来の点広がり関数の合成に基づく方法と提案手法の結果を示す。流体シミュレーションのシーンとして代表的なダム崩壊シーンをを用いた。赤線で示された曲線が表面曲線であり、提案手法ではさらに表面粒子を青丸で描画した。図 3 が図 2 中段のフレームの拡大図である。図 3 を見てわかるように、既存手法では難しかった鋭いエッジが現れており、かつ、粒子分布が滑らかなところでは平滑な表面が得られていることがわかる。

3 次元シミュレーションにおいてもほぼ同様の方法で表面生成を行うが粒子法で得られた粒子分布によっては閉じた液体表面が作られず、結果として不完全な表面メッシュが生成されてしまう。たとえば、薄いシート上の液体では粒子が一層しか存在しないため、片面にしか表面が生成されない。また、3 次元シミュレーションではより多くの粒子が必要となり、それによる計算時間の増大も問題となった。そこで我々は 2D スク

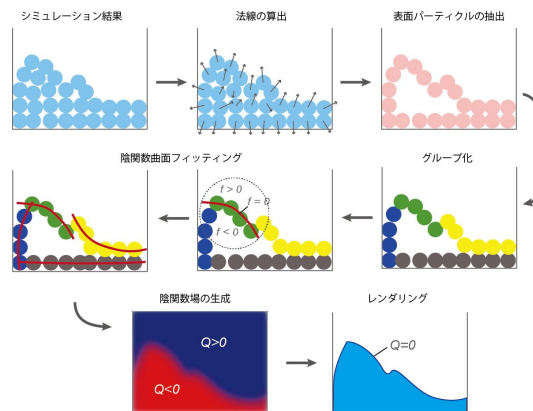


図 1 手法全体の流れ

リーン空間に粒子を投影し、その空間内で表面を生成する手法を開発した。

スクリーン空間を用いた方法の結果を図 4 に、その拡大図を図 5 に示す。この方法では視点から可視な表面しか生成されないという問題はあるものの前述の問題を解決でき、破綻の内表面が生成されていることがわかる。

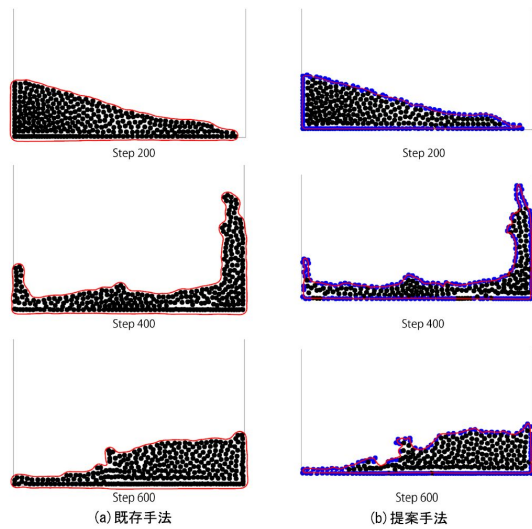


図 2 ダム崩壊シーン(2D)の結果比較

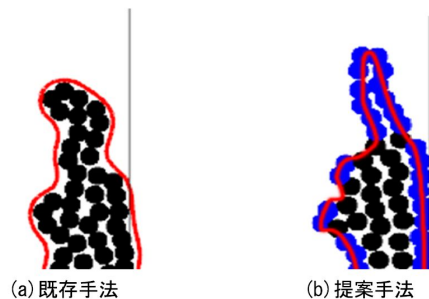


図 3 ダム崩壊シーン(2D)の結果比較 (拡大図)

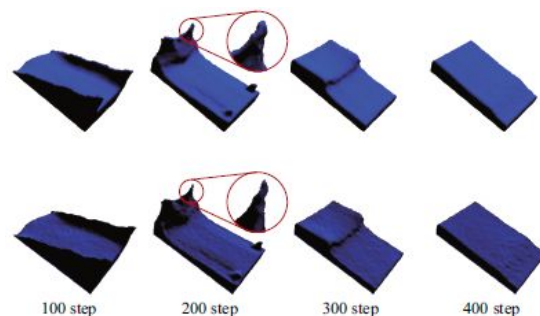


図 4 ダム崩壊シーン(3D)の結果比較(上段が既存手法で下段が提案手法)

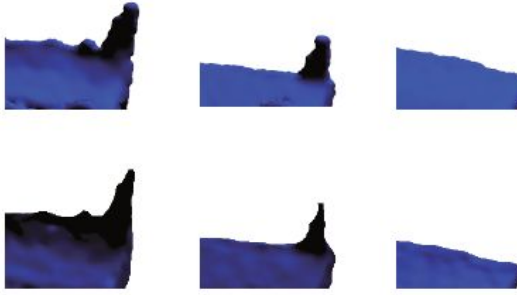


図5 ダム崩壊シーン(3D)の結果比較
(拡大図)

(2) 固体境界付近における粒子分布の改良

粒子法において高精細な表面を得るためには粒子の分布も重要となる。不均一な分布は表面法線や表面粒子の抽出精度に大きな影響を及ぼし、さらに元のシミュレーションの精度も低下させる。粒子法でも非圧縮性を再現するために粒子分布を均一にする方法が多数提案されているが、ほとんどの方法では粒子分布を一定にすることを強制するため、近傍粒子数が少なくなってしまう境界付近で粒子が密集する結果となっていた。これを解決するために、粒子法の一つである SPH における密度計算式を見直し、境界内でのカーネル関数の積分を用いて密度を補正した。さらに、コンピュータグラフィックスにおいて最もよく用いられている表面表現であるポリゴン表現についてこの積分を近似的ではあるが効率的に計算できる方法を開発した。

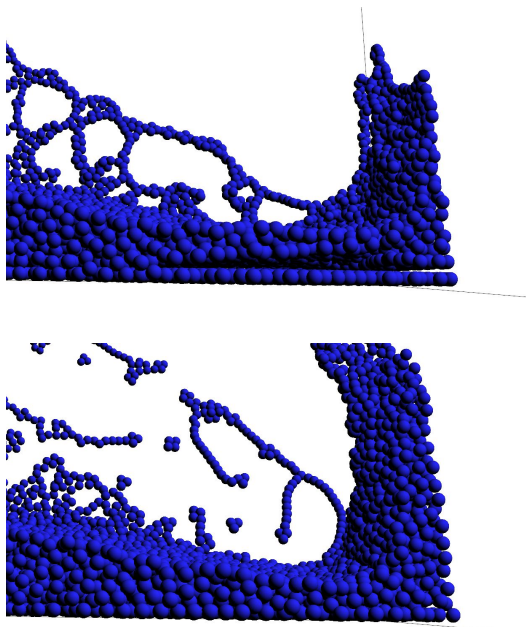


図6 既存手法(上段)と提案手法(下段)の結果比較(断面図)

図6にダム崩壊シーンの結果を示す。図6上段が既存手法の結果であり、左下境界付近で粒子の密集が発生し、その上部に不自然な空間が生まれている。これと比較して、図6下段の提案手法では粒子が密集することなく、均一な分布を実現できている。

既存手法でも境界内部に固定した粒子を配置することで同様の分布が得られるが、ポリゴン等で表現された境界を粒子で近似する必要がある。一方で提案手法ではそのような特殊な粒子を使うことなく、ポリゴン境界から直接補正係数を算出しているため、粒子数を増やすことなく精度よく均一な分布が得られる。図7、図8により複雑な境界を伴うシーンの結果を示す。

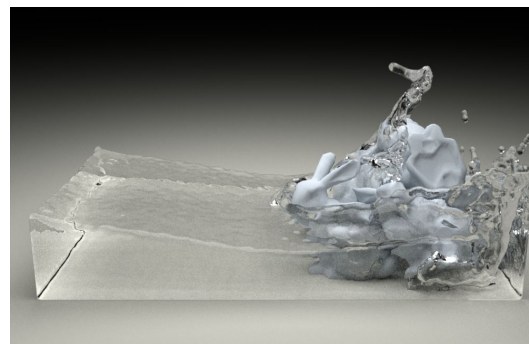


図7 複雑な境界を含むシミュレーションの結果1

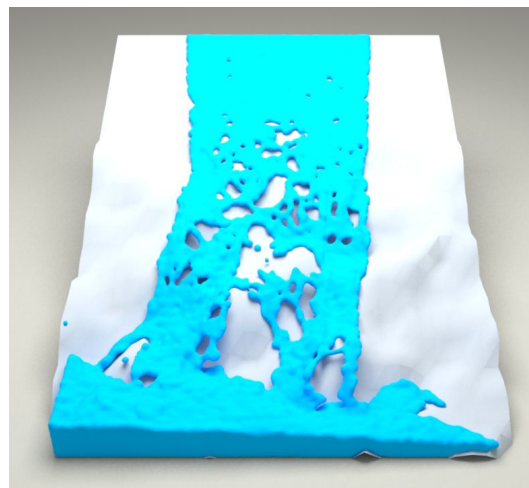


図8 複雑な境界を含むシミュレーションの結果2

(3) ベースとなる粒子法の改良・高速化

シミュレーション結果をインタラクティブに確認するためには表面生成が高速であるだけでなく、ベースとなる粒子法そのもの

も高速でなければならない。本研究では2次元シミュレーションと3次元シミュレーションを組み合わせることによる高速な粒子法シミュレーションと適応的に粒子のスケールを変更することでより高精細なシミュレーション結果を得る方法も併せて開発した。

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2件)

Makoto Fujisawa and Kenjiro T. Miura, "An Efficient Boundary Handling with a Modified Density Calculation for SPH", Computer Graphics Forum (Proc. Pacific Graphics 2015), 34(7), pp.155-162, 2015, 査読有, DOI: 10.1111/cgf.12754.

Makoto Fujisawa, Yojiro Mandachi, Kenjiro T. Miura, "Calculation of Velocity on an Implicit Surface by Curvature Invariance", Journal of Information Processing, 21(4), pp.674-680, 2013, 査読有, DOI: 10.2197/ipsjip.21.674.

[学会発表](計5件)

仲田 拓也, 藤澤 誠, 三河 正彦, "SPH法とShallow Waterモデルによる高速な流体シミュレーション", 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会 第158回研究発表会, 2015年2月27日, 理化学研究所 和光本所(埼玉県和光市).

Ken Taketani, Makoto Fujisawa, Masahiko Mikawa, "Surface Extraction Method for Particle-based Simulation Using Implicit Function Fitting", In Proceedings of The Fourth International Workshop on Image Electronics and Visual Computing (IEVC2014), October 8, 2014, Samui, Thailand.

藤澤 誠, 三浦 憲二郎, "SPH法における固体境界インタラクションの改良", グラフィクスとCAD/Visual Computing 合同シンポジウム 2014 予稿集(口頭発表), 2014年6月30日, 早稲田大学国際会議場(東京都新宿区).

Arno in Wolde Luebke, Makoto Fujisawa, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, "Adaptive Particle Splitting Based on Turbulence Energy for Fluid Simulations on GPUs", 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会 第152回研究発表会, 2013年9月9日, 穂の国とよはし芸術劇場プラット(愛知県豊橋市). 竹谷 健, 藤澤 誠, 三河 正彦, 田中 和

世, "陰関数曲面フィッティングを用いたパーティクル法における表面可視化手法の開発", グラフィクスとCAD/Visual Computing 合同シンポジウム 2013 予稿集(ポスター発表), 2013年6月23日, 青森市文化会館(青森県青森市).

[図書](計1件)

藤澤 誠, CGのための物理シミュレーションの基礎, マイナビ, 240p, 2013.

[その他]

ホームページ等

<http://slis.tsukuba.ac.jp/~fujis/research.html> (研究成果の動画等を公開)

<http://slis.tsukuba.ac.jp/~fujis/cgi-bin/wiki/index.php> (研究で作成したコードの一部を公開)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤澤 誠 (FUJISAWA Makoto)

筑波大学・図書館情報メディア系・助教

研究者番号: 90508409