

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K19945

研究課題名（和文）コンピュータグラフィックスにおける液体の流れの高精細化に関する研究

研究課題名（英文）A Study for Synthesizing High-resolution Liquid Flow in Computer Graphics

研究代表者

佐藤 周平（Sato, Syuhei）

富山大学・学術研究部工学系・助教

研究者番号：90815599

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究期間の初年度に、煙を対象としてユーザが所望する流れの通りに高解像度シミュレーションを制御する、流れのガイド手法を提案した。この手法は従来の類似手法よりも高速に計算ができ、物理的でない入力に対してもガイドが可能であることを示した。この研究はコンピュータグラフィックスのトップカンファレンスおよびトップジャーナルに採択された。そして最終年度にてこのガイド手法を拡張して液体へ適用することで良好な結果が得られるとことを確認し、国内の学会にて発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

煙のガイド手法では、従来手法において流体シミュレーションよりも大幅に計算時間がかかっていたが、従来よりも解く問題のサイズを大きく削減し、シミュレーションと同等のコストで計算ができる枠組みを提案した。また、常に物理法則のうちの1つを満たすこともでき、CGにおける流体の映像生成において、技術的に世界へ貢献した。また、そのガイド手法を拡張した液体への適用は良好な結果が得られており、本研究の目的としている世界で初の液体の流れの高精細化の実現が期待できるものである。

研究成果の概要（英文）：In the first year of this supported period, I proposed a guiding method of smoke flows which controls a high-resolution simulation according to a user-desired flow. This method is sufficiently faster than previous similar methods, and non-physical inputs can be used to the method. This method was presented at the top conference and published in the top journal on computer graphics. Then, in the final year, I extended the smoke guiding method and applied to a liquid simulation. I presented this at a domestic conference.

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 高精細化 流れ関数 流れのガイド

1. 研究開始当初の背景

近年のハードウェアや計算技術の進歩により、流体（水や煙、炎など）の動きの物理的なシミュレーションは現実的な時間で精度の高い計算が可能となっており、物理的な精度の問われる災害シミュレーションから映画やゲームといった映像制作に至るまで様々な分野で利用されている。しかし未だその計算コストは非常に大きく、映画やゲームなどの映像制作現場では安価にリアルな映像を作成する方法が今もなお必要とされている。加えて、そのシーンや演出に合った水や煙の動きを作成することも求められる。このような映像を制作する際には、シミュレーションにおいて物理方程式に含まれる係数などのパラメータを調整し所望の流れを作成するが、一度の計算で所望のものが得られることはほぼ無く、パラメータ調整とシミュレーションの実行とを繰り返す必要がある。そのため、計算コストの高さから映像制作全体の時間が膨大となる。

この流れのデザインを含む映像制作における問題に対し、流れの高精細化のアプローチ（例として図1に文献[1]の結果を示す）は有効であることが知られており[1,2,3,4]、特に[1]の研究は映像制作現場に広く普及している3DCGソフトに標準で搭載されている。またその著者は[1]の論文の功績でアカデミー賞を受賞するなど、実際の現場での需要の高さは明白である。このアプローチでは、大まかな流れのデザインと詳細な動きの付加という2つのプロセスを経て映像を作成する。ではシミュレーションの解像度を下げた状態でパラメータの調整とシミュレーションの実行を繰り返し、大まかな流れをデザインする。解像度を下げた状態では細かい動きが生成されずぼやけた映像（図1の左）となるが、高精細な映像を作成する場合よりもはるかに高速に計算ができる。映像制作では、全体の大まかな動きをデザインしたい場合が多く、この部分を高速に繰り返すことができれば満足のいく映像を短時間で作成できる。続いて、で作成した流れにで細かい動きを追加する。の方法が研究の主要な対象であり、ノイズを用いて細かい動きを生成する手法[1]や、細かい動きを含む別のデータから合成する手法[3,4]など複数種類が提案されている。この時、何も考えずに動きを追加すると、おかしな流れが生じるなど見た目に違和感のある結果となるため、どの方法もの流れに従って追加する動きを決める。以上のアプローチにより、劇的に映像製作時間を短縮でき、通常数十時間かかるものが、数十分まで短縮される場合もある。

このように有用な方法だが、これまで煙に対する手法は多く提案されているにも関わらず、広く利用される液体（主に水）に関しては成功例がまだ報告されていない。

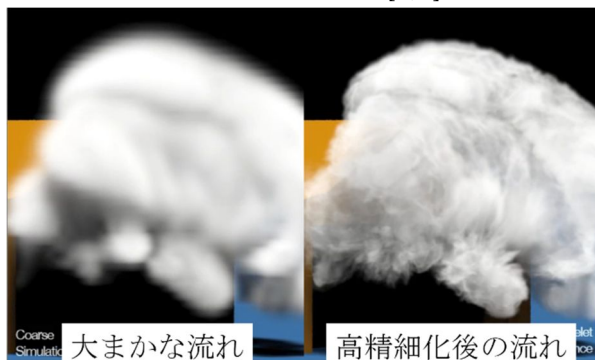


図1：煙の高精細化の例（文献[1]）

2. 研究の目的

本研究ではいまだ成功例のない液体の流れに対する高精細化を目的とする。煙の高精細化はこれまでいくつかの方法が提案されている[1,2,3,4]。一方、液体が煙に比べまだ手法が確立されていない理由として、その動きの性質の違いが挙げられる。

煙の場合、煙の噴出する強さや噴出口の形、風など様々な要因によって複雑な流れを生じ、その流れの複雑さによって煙の見た目も変化する。ただし、同一の条件であれば、細かい流れも含め、煙全体は似た流れとなるため、全体的な流れの強さや方向から尤もらしく見える複雑な細かい流れを得ることは可能である。現に、煙全体の大まかな流れから尤もらしい細かい動きを新たに生成し付加する方法が提案されている[1,2]。申請者も煙全体の動きをたよりに、細かい動きを

例示ベースで合成することに成功している[4]。申請者の方法では、図2左の大まかな流れのデータと中央下の細かな流れを持つデータとの間で流れの類似度を小領域単位で計算し、類似箇所の細かな流れのみを抽出して左の大まかな流れへ付加する。しかし、ただ付加したのみでは物理法則を満たさずおかしな流れとなるため、物理法則を保ちながら付加する最適化手法も考案した。これにより、従来の方法[1,2]と比べより現実に近い煙

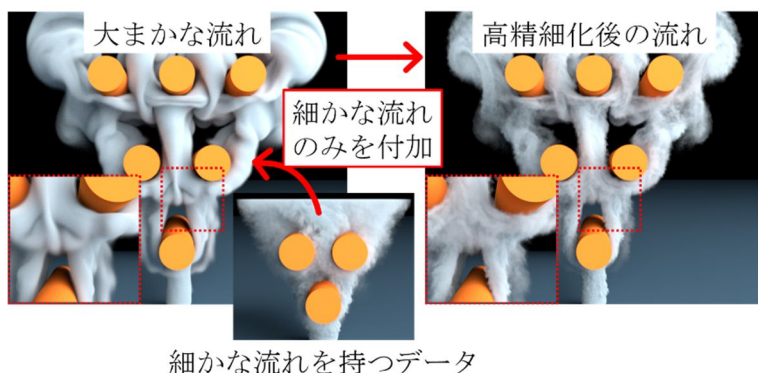


図2：文献[4]の方法の概要

の流れの合成を実現した。

一方液体の場合、風などの影響で水面に現れる細かい波の動きと水中の水の動きとの間には、水中の比較的水面に近い部分でも、ほぼ相関がないことが知られている。そのため、大まかな流れから尤もらしい細かい動きを求めることは難しく、これまでそれを実現した方法は存在しない。またこの性質はCG流体分野の他の目的の論文でも議論されており、煙で成功した方法でも液体には効果がないことが報告されている[5]。

加えて、激しく波打つような液体では液体の表面からいくつかの水滴が飛び出て飛沫となる。この飛沫は煙では全く生じない現象であり、液体と煙との大きなもう一つの違いである。飛沫は高精細な流れになるほど細かく複雑なものが生じ、大まかな流れのみを持つデータでは飛沫はほぼ含まれない。特に、大まかな流れを低解像度のシミュレーションで作成する際、その粗さから飛沫が発生するような大まかな流れすら存在しない場合がある。そのため、高精細な流れだけでなく、大まかな流れも併せて合成する必要がある。この高精細化の際の飛沫の合成も、これまで実現した方法は存在しない。

以上を踏まえ本研究では、液体の表面のみではなく、飛沫まで含めた液体の流れ全体を高精細化することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の開始当初は、流れの事前計算したデータを利用して煙の高精細化を行う方法[4]をベースとして、機械学習を用いて拡張し、液体への適用を計画していた。しかし、文献[4]の方法を適用する段階で、計画していた方法では流れに不連続が発生するなど良好な結果が得られず、またその後も何度か手法を再検討し実験を行ったが、データを利用しての液体の高精細化を実現するには至らなかった。

そこで、データを利用する方法は取りやめ、これまでに提案されている他の高精細化アプローチを基に、液体の高精細化が可能か検討した。上記データを利用した方法での実験において流れの不連続が問題となっていたため、高精細化のアプローチの中でも、ユーザが所望する流れの通りに高解像度シミュレーションを制御する流れのガイド手法に注目し、これを基に液体の高精細化手法を考案する方向に転換した。

まずは、扱いが比較的簡単な煙に関してガイド手法を考案することから始め、研究開始初年度において流れ関数(3次元ではベクトルポテンシャル)の空間で動作するガイド手法を提案した[6]。これは従来のガイド手法[7]に比べ十分問題のサイズを削減し、かなり高速に計算が可能である。我々の方法では、任意の入力の速度場を流れ関数へ変換し、高解像度のガイドされた流れ関数を最適化により求める。そして最終的な速度場はシンプルにカールを取るのみで算出され、結果は非圧縮性を常に満たす。従来手法と同様に、我々は最小化問題として定式化するが、我々の流れ関数による定式化は、入力の流れ関数と単純なスケール関数との積として表現することで、問題の複雑さを削減する。そして、入力の流れに似た高解像度の複雑な流れを生成するような、最適なスケール関数の場を求める。

上記の方法をベースに、液体への拡張を2年目に行った。液体の流れは、流れ関数の算出方法が煙の場合とは異なることが知られている[8]。そこで、文献[6]の手法におけるガイドされた流れ関数を算出するための最小化問題の式に、文献[8]の考え方に基づいて液体の密度を導入することで液体に適するよう拡張した。

4. 研究成果

初年度は上記に記載した、煙のガイドについて世界において最新の手法[6]を提案し、その論文がコンピュータグラフィックス分野のトップカンファレンスであるSIGGRAPH2021に採択され、トップジャーナルであるACM Transactions on Graphicsに採録された。

また、2年目にはそのガイド手法を3の最終段落に記載した方法で液体へ拡張し、レベルセット法による2次元の液体シミュレーションに対して良好な結果が得られることを確認した。この手法については国内の研究会で発表済みであり、現在は3次元への拡張と国際会議への投稿を計画している。

・参考文献

- [1] T. Kim et al. "Wavelet turbulence for fluid simulation", ACM Transactions on Graphics Vol. 27(3), Article No. 50, 08/2008
- [2] T. Pfaff et al. "Synthetic turbulence using artificial boundary layers", ACM Transactions on Graphics Vol. 28(5), Article No. 121, 12/2009
- [3] M. Chu et al. "Data-driven synthesis of smoke flows with CNN-based feature descriptors", ACM Transactions on Graphics Vol. 36(4), Article No. 69, 07/2017
- [4] S. Sato et al. "Example-based turbulence style transfer", ACM Transactions on Graphics Vol. 37(4), Article No. 84, 08/2018
- [5] X. Zhang et al. "Restoring the missing vorticity in advection-projection fluid solvers", ACM Transactions on Graphics Vol. 34(4), Article No. 52, 08/2015
- [6] S. Sato et al. "Stream-Guided Smoke Simulations", ACM Transactions on Graphics

Vol. 40(4), Article No. 161, 08/2021

[7] M. B. Nielsen et al. "Improved Variational Guiding of Smoke Animations", Computer Graphics Forum Vol. 29(2), pp. 705-712, 06/2010

[8] R. Ando et al. "A stream function solver for liquid simulations", ACM Transactions on Graphics Vol. 34(4), Article No. 53, 08/2015

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sato Syuhei, Dobashi Yoshinori, Kim Theodore	4. 巻 40
2. 論文標題 Stream-guided smoke simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Graphics	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3450626.3459846	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐藤 周平
2. 発表標題 格子法による液体シミュレーションのガイドに関する一実験
3. 学会等名 情報処理学会コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学研究会 第185回研究発表会, No. 6
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hyuga Saito, Syuhei Sato, Yoshinori Dobashi
2. 発表標題 A Liquid Sound Retrieval using History of Velocities in Physically-based Simulation
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH ASIA 2021 Posters, Article No. 31 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤 彪雅, 佐藤 周平, 土橋 宜典
2. 発表標題 物理シミュレーションにおける速度の履歴を用いた液体の音データの検索手法
3. 学会等名 情報処理学会コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学研究会 第184回研究発表会, No. 24
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大場 誉幸, 佐藤 周平, 土橋 宜典
2. 発表標題 地形の変形に伴う水シミュレーションの変形に関する考察
3. 学会等名 情報処理学会コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学研究会 第184回研究発表会, No. 9
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 周平
2. 発表標題 流れ関数を用いた煙のガイドシミュレーション
3. 学会等名 Visual Computing + VC Communications 2021 SIGGRAPH招待講演セッション2 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 周平
2. 発表標題 流体の流れをデザインするポストプロセス技術の研究最前線
3. 学会等名 CEDEC2021 SIGGRAPH Asia x CEDECコラボセッション (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 周平, 土橋 宜典
2. 発表標題 流れ関数を用いた流体の流れのガイド手法
3. 学会等名 情報処理学会コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学研究会 第179回研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Stream-Guided Smoke Simulations
http://nishitalab.org/user/syuhei/StreamGuidedSmoke/streamguided_smoke.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Yale University			