

令和元年6月17日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00169

研究課題名(和文) データ駆動型手法による物理法則CGアニメーションの高精細化

研究課題名(英文) Data-driven approach for the refinement of physics-based CG animations

研究代表者

金井 崇 (Kanai, Takashi)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：60312261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：3DCG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、ゲーム等での利用においては、物理シミュレーションのために計算リソースを割くことができず、低解像度での計算を余儀なくされる。本研究では、機械学習によるアプローチをもとにしたデータ駆動型手法を物理シミュレーションに適用すること、および、低解像度のシミュレーション結果を高精細化するための手法を確立するための研究を行った。本手法により、リアルタイムCGにおいて物理シミュレーションによる高精細なアニメーションを低負荷で適用することで、より写実性の高い表現が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、リアルタイムCGにおいて、物理シミュレーションを利用した写実性の高い映像表現を低コストで行うための手法として大変有効なものであることが実証された。物理シミュレーション自体が計算量として大変高コストな処理であるが、データ駆動的な手法を用いることで、前処理に多少時間がかかるものの、従来よりも低コストでより写実的な表現がリアルタイム処理の中で可能となった。一番わかりやすいアプリケーションとしてはゲームがあるが、その他、リアルタイムCGを必要とする分野、例えば、映画や建築や医学、考古学といった分野で特に有効な、汎用的な技術となっている。

研究成果の概要(英文)：In order to obtain realistic images in 3D Computer Graphics, animation is created by physics-based simulation. However, for use such as in games and so on, it is not possible to allocate much computing resources for such simulation, and it is necessary to perform low-resolution simulation. In this research, we applied data-driven method based on machine learning approach to physics-based simulation, and established a method for the refinement of low-resolution simulation results. By applying high-resolution animation by physics-based simulation with low computational costs in real-time CG by this learning-based approach, more realistic representation is possible.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：コンピュータグラフィックス データ駆動型手法 液体シミュレーション 髪シミュレーション 弾性体シミュレーション 部分空間統合法 脆性破壊シミュレーション 回帰フォレスト

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

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いる。特に、ゲーム等の分野においては、物理的な挙動の計算を含めた、シーン全体の表示までの一連の計算をリアルタイムで処理することが必須条件である。そのような条件の下でも、ますます高精細な表現が必要とされている。

しかしながら、物理法則シミュレーションにおいては、時間毎に微分方程式を解くことによりその挙動が計算されることが多く、一般的には計算時間がかかる。特にモデルの解像度が高くなるほど、その傾向は顕著に現れる。一方で、リアルタイム表示が求められるようなアプリケーションでは、時間的な制約から物理シミュレーションの計算のために計算リソースを割くことのできない場合が多い。そのため、どうしてもモデルの解像度を低くして計算せざるを得ない状況にある。このことが、高精細な表現ができない一つの要因となっている。

この問題を解決するために、低解像度のモデルによる物理シミュレーション結果から、高精細な CG アニメーション映像を作成するための手法が過去に提案されている。ここでは、このような手法を「高精細化」と呼ぶこととする。特に流体シミュレーションにおける高精細化では、ノイズ関数を使って低解像度シミュレーションに付加する方法が過去に行われている。しかし、これらの手法による結果は、高解像度シミュレーションによる結果とは見た目が大きく異なり、写実性に乏しいという問題点が指摘されている。

ところで、近年では、データ駆動型手法として、機械学習によるアプローチが CG に限らず非常に多くの分野において盛んに研究されており、将来的にも有望なツールとして期待されている。機械学習の基本的なアプローチとしては、学習データをもとに分類モデルを作成し、未知のデータをクラスタに分類する、ということが挙げられる。

物理シミュレーションによって計算された挙動を観察すると、必ず、時間・空間的に異なる部分に、類似したパターンがあることが多いことがわかる。よって、このようなパターンを学習データとして分類することで、未知の動きをそれらのパターンに分類することができるものと考えられる。

この考え方をもとに、物理シミュレーションの高精細化ができないか、ということが、本研究における動機であり、アイデアの出発点となっている。

2. 研究の目的

ここでは、機械学習によるアプローチをもとにしたデータ駆動型手法を、物理シミュレーションの高精細化に適用できるかどうかを検討し、新しい手法を開発してその有効性を確立することを本研究の目的とする。

まずは、液体シミュレーションに注目し、データ駆動型手法による高精細化手法について検討する。液体シミュレーションについては、物理シミュレーションの中でも高精細な表現が難しい部類に属するものとされている。その理由としては、計算の際、水中、液面、しぶき、泡、空気など複数の状態層を考慮する必要があることが挙げられる。特に、細かなしぶき (スプラッシュ) を表現するためには解像度を高くする必要があり、莫大な計算量がかかる。したがって、液体シミュレーションにおいて高精細化が実現できれば、非常に有効性が高いものと考えられる。

機械学習についてはこれまでに多くの技法が提案されているが、ここではその中で数種類の方法を試してみた上で、様々な条件のもとでテストし、最も適切な手法を選択するようにしたい。データベースの作成方法についても同様に、様々なテストケースについて適用し、未知のデータを最も適切に分類できるようなデータベースの構築を目標とする。例えば、液体がぶつかる障害物の形が異なると、当然ぶつかる際の液体の動きも異なるものとなる。したがって、このような場合に対処するためには、障害物の形に応じた複数のデータベースを構築するか、あるいは、様々な障害物を扱うことのできる大規模なデータベースを構築する必要がある。

液体シミュレーションの高精細化がうまくいった場合、他の物理シミュレーションへの適用についても検討する。例えば、髪シミュレーションについて、その大まかな動きは、人間の頭の動きに合わせていくつかのパターンに分類できるものと考えられる。したがって、本手法の結果が適用できる可能性が高いものと推測できる。その他、弾性体シミュレーションや脆性破壊シミュレーションへの適用についても検討する。

3. 研究の方法

本研究では、データ駆動型手法を利用した物理法則シミュレーションの高精細化を、液体シミュレーション、髪シミュレーション、弾性体シミュレーション、そして脆性破壊シミュレーションの4つのシミュレーションを対象に行っている。しかし、データ駆動型手法については、その目的やシミュレーションによって大きく異なる。ここでは例として、主に液体シミュレーションの高精細化手法について説明する。その他のシミュレーションについては、次節の結果で少々触れることとする。

液体シミュレーションのための手法は数多く提案されているが、ここでは特に高精細な表現が可能とされる FLIP (Fluid-Implicit-Particle) 法をもとに高精細化手法を開発した。FLIP 法は、粒子法と格子法を組み合わせ、非圧縮性流体の支配方程式であるナビエ・ストークス方程式の数値解を計算する手法である。粒子によりしぶきなどの液体の細かな特徴が表すことができ、かつ、格子による安定した計算を行うことができることが特徴である。

FLIP 法において流体の流れを決めるのは、各格子に設定される速度ベクトル（速度場）である。よって、速度場を高精細化し、高精細化された速度場でより多くの粒子を移流させることで、より細かな流れを実現することができるものと考えられる。

高解像度のシミュレーションで得られる格子の速度場については、低解像度の速度場に容易に変換することができ、さらに、この変換により低解像度データと高解像度データとの対応づけを行うことができる。したがって、低解像度データのデータベースを作成しておき、未知のデータとのマッチングを行なう。低解像度データへのマッチングができると、対応する高解像度のデータへの置き換えをすることが可能となる。

本手順は主に、前処理とランタイム処理の2つに分けて行う。前処理のうち、まず訓練段階として、FLIP 法による高解像度液体シミュレーションを行う。各ステップにおける速度場を $n_b \times n_b \times n_b$ の大きさのブロックに分解し、ハードディスクに保存しておく。次に、データベース構築段階として、前処理で得られた速度場のブロックをすべて組み合わせて一つの行列を作成し、その行列に SVD (特異値分解) を施すことで、 m 個の主要な基底要素を抽出する。この抽出した基底要素を高解像度データベース (databaseH) に格納する。さらに、この基底要素に対し、ダウンサンプリングを施して得られる基底要素を低解像度データベース (databaseL) に格納する。

ランタイム処理では、低解像度液体シミュレーションを行い、各タイムステップの速度場を、低解像度データベースの基底要素を用いてアップサンプリングすることで、高解像度の速度場を得る。

4. 研究成果

ここでは、研究成果として、(1) データ駆動型手法を用いた液体シミュレーションにおけるスプラッシュ効果の強調、(2) ゲームキャラクタのためのデータ駆動型手法にもとづく詳細な髪のアニメーション、(3) 衝突を伴う弾性体変形のためのデータ駆動型手法による部分空間豊富化、(4) データ駆動型手法による脆性破壊曲面形状シミュレーション、について順次説明する。

4. 1 データ駆動型手法を用いた液体シミュレーションにおけるスプラッシュ効果の強調

図 1 に、データ駆動型手法による液体シミュレーションのスプラッシュ高精細化の適用結果を示す。(a)の低解像度の結果と比べ、本手法の適用結果(b)における液体の振る舞いは、高解像度シミュレーションの結果(c)により近いことが見て取れる。計算時間について、 80^3 の低解像度シミュレーションは300ステップの計算で約34分、 158^3 の高解像度シミュレーションが約643分、アウトオブコア SVD の処理に約342分かかった。そして、データ駆動型手法による

本手法の計算時間は約 45 分であり、低解像度シミュレーションの計算時間と比べそれほど相違がなく、その差分の時間は、主にアップサンプリングにかかった時間である。前処理において訓練にかかった時間は合わせて約 $643+342 = 958$ 分であり、一見するとかなり時間がかかっているように見えるが、訓練してデータベースを作成するのは一度だけで、後のランタイム処理で使い回すことが可能である。

また、機械学習におけるアンサンブル学習の考え方にもとづき、複数の高解像度シミュレーションの結果をデータベースとして利活用するための手法についても検討した。その結果、各ブロックの速度の平均ベクトル角にもとづきデータベースを分類し、ランタイム処理における低解像度シミュレーションにおいて、使うべきデータベースを取捨選択することで、より高品質な結果が得られることを実証した。

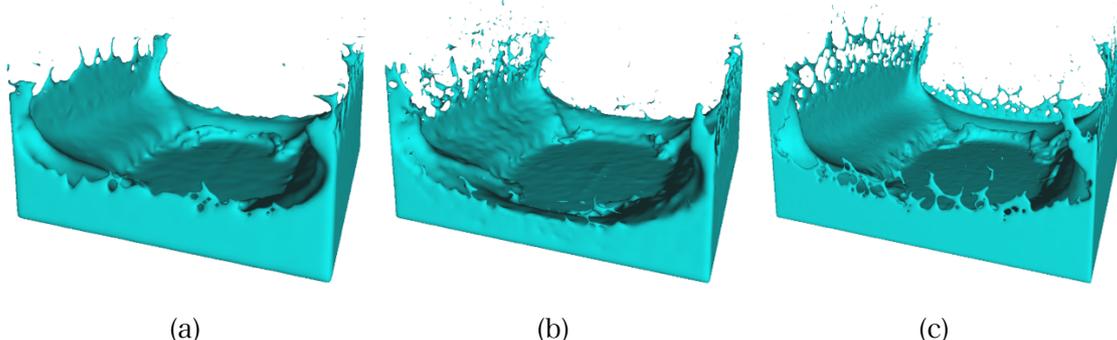


図 1: ダムブレイクの液体シミュレーションに対する本手法の適用結果. (a) 低解像度(80^3 グリッド)シミュレーション. (b) 本手法の適用結果(158^3 グリッド). (c) 高解像度(158^3 グリッド)シミュレーション. 前処理での訓練にも用いている。

4. 2 ゲームキャラクタのためのデータ駆動型手法にもとづく詳細な髪のアニメーション

データ駆動型手法に基づく高精細な髪のアニメーション生成法について研究を行った。特に、ゲームのようなインタラクティブなアプリケーションでの利用を想定している。ゲームキャラクタに特有の動きの特徴を考えると、ある程度の決まった動き（歩く、左右に曲がる、ジャンプ、など）を操作することが多い。よって、実際に現れる動きはある程度予測できるものとなる。そこで、髪の特徴を考慮したデータベースの構築手法、および、構築したデータベースを利用して髪動きを滑らかに接続する手法を開発した。データ量を削減するために、二つの髪動作の類似度を判定する必要があるため、そのための新しい評価手法についても開発した。

4. 3 衝突を伴う弾性体変形のためのデータ駆動型手法による部分空間豊富化

弾性体アニメーションに部分空間データベースを作成し利用することで、衝突変形の際の表現力を向上するための研究を行った。弾性体アニメーションにおいて、計算を効率化するために用いられる部分空間統合法（モデル削減法とも呼ばれる）では、その表現能力は全体空間のそれよりもかなり小さくなる。特に衝突変形については、表現力不足により現実的な変形結果を得ることができない。本手法は、まず全体空間での衝突シミュレーション計算を多数行い、それらを部分空間データベースとして格納する。ランタイムアニメーションでは、データベースから適切な基底ベクトルを選択し、衝突の変形に対する部分空間の表現力を向上させている。

4. 4 データ駆動型手法による脆性破壊曲面形状シミュレーション

境界要素法 (BEM) を用いた脆性破壊アニメーションについて、データ駆動型手法による高速化手法に関する研究を行っている。ここでは、機械学習手法の一つである回帰フォレストを利用し、脆性破壊アニメーションを回帰問題として定式化している。シミュレーション計算の際、次のフレームにおける変形量を物理量にもとづく予測によって求める。これにより、BEMの線形システムを計算する必要がなくなり、その結果、より高速に破壊形状を生成できることを実証した。また、ここで作成するデータベースは、破壊形状に依存しない汎用性を持つよう

に設計している。これより、シンプルなプリミティブ形状を破壊することで構築したデータベースを用いて、より複雑な別の形状の脆性破壊を予測できるようになっている。

4. 5 おわりに

本研究では、主に4つの物理法則アニメーションに関する研究トピックについて、機械学習手法を用いた高精細化に取り組み、その有効性を実証した。このようなアプローチをここでは、**データ駆動型物理法則 CG アニメーション**と呼ぶことにする。以上の研究を通じて、データ駆動型物理法則 CG アニメーションが、特にリアルタイムアニメーションの観点から極めて有効な手法になり得ることを確信している。

一方で、そのベースとなる機械学習手法は長足の進歩を遂げており、特に最近では深層学習が登場している。最近の研究を概観する限りでは、深層学習は、他の機械学習手法に比べても格段に良い予測結果を示していることから、自然な流れとして、今後は深層学習の適用にチャレンジしてみたいと考える所存である。

最後に、本補助金によるご支援のもと研究が進められたことに深く感謝の意を表したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計6件）

1. Yuhang Huang, Yonghang Yu, Takashi Kanai: “Predicting Brittle Fracture Surface Shape From a Versatile Database”, Computer Animation and Virtual Worlds, e1865, 2018. [査読有](#)
2. Takashi Kanai, Mengyuan Wan, Fumiko Enomoto: “Data-Driven Approach for Enhancing Splashing Effects of Liquid Simulations”, Journal for Geometry and Graphics, Volume 22, No.1, pp.115-127, 2018. [査読有](#)
3. Duosheng Yu, Takashi Kanai: “Data-driven Subspace Enrichment for Elastic Deformations with Collisions”, The Visual Computer (Special issue for CGI 2017), Volume 33, Issue 6, pp.779-788, 2017. [査読有](#)
4. Masato Ishimuroya, Takashi Kanai: “Adding Turbulence Based on Low-Resolution Cascade Ratios”, Lecture Notes in Computer Science 10072 (Proc. ISVC 2016, Part I), pp.67-76, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. [査読有](#)
5. 尾崎 弘武, 京田 文人, 金井 崇: “エッジ縮退法によるメッシュ簡略化のアウトオブコア拡張”, 画像電子学会誌, Vol.45, No.3, pp.318-328, 2016. [査読有](#)
6. Chenlei Wu, Takashi Kanai: “Data-Driven Detailed Hair Animation for Game Characters,” Computer Animation and Virtual Worlds (Special issue for CASA 2016), Volume 27, Issue 3-4, pp.221-230, May-August 2016. [査読有](#)

〔学会発表〕（計12件）

1. Takashi Kanai: “Accelerating Physics-Based Simulation for Computer Graphics by Data-Driven Approach”, International Symposium on Information and Intelligence Computing, Invited Lecture, Hangzhou, China, Nov. 2018.
2. Chihiro Suzuki, Takashi Kanai: “Viewpoint Selection for Liquid Animations”, ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation (2018) poster, pp.011-012, 2018.
3. Yonghang Yu, Yuhang Huang, and Takashi Kanai: “Data-Driven Approach for Simulating Brittle Fracture Surfaces”, ACM SIGGRAPH ASIA 2017 Workshop: Data-Driven Animation Techniques (D2AT), Article No.3, 2017.
4. Takashi Kanai, Mengyuan Wan, Fumiko Enomoto: “Data-Driven Approach for Enhancing Splashing Effects of Liquid Simulations”, Proc. 11th Asian Forum on Graphic Science (AFGS 2017), Article F31, 2017.
5. Masato Ishimuroya, Takashi Kanai: “Adding Visual Details Based on Low-Resolution Energy-Cascade Ratios for Smoke Simulation”, SIGGRAPH 2016 Posters, Article No.16, 2016.

6. 渡邊 魁人, 金井 崇: “実物実験の観察に基づく水と油の混合液体シミュレーション”, 映像表現・芸術科学フォーラム 2019 (Expressive Japan 2019) (映像情報メディア学会技術報告, vol. 43, no. 9, AIT2019-158, pp. 379-382), 2019.
7. 鈴木 千裕, 金井 崇: “液体アニメーションのための視点選択手法”, 映像表現・芸術科学フォーラム 2018 (Expressive Japan 2018) (映像情報メディア学会技術報告, vol. 42, no. 12, AIT2018-46, pp. 9-12), 2018.
8. 石室屋 正人, 金井 崇: “拡張されたラプラシアン固有関数を用いた流体シミュレーションの計算効率化”, 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第 169 回研究発表会 (情報処理学会研究報告 2018-CG-169(13),1-6 (2018-3-3)), 2018.
9. 黄 宇航, 于 永航, 金井 崇: “データ駆動法による脆性破壊曲面生成シミュレーション”, 画像電子学会 ビジュアルコンピューティングワークショップ 2017, 12 月, 2017.
10. 大竹 勇志, 金井 崇: “プレイヤー間の非対称条件を考慮したレーティングシステム”, 情報処理学会 第 37 回 ゲーム情報学研究会 (情報処理学会研究報告 Vol.2017-GI-37 No.1), 2017.
11. Duosheng Yu, Takashi Kanai: “Enhancing Subspaces for Elastic Deformation with Collisions”, 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第 165 回研究発表会 (情報処理学会研究報告 2016-CG-165(24),1-6 (2016-11-02)), 2016.
12. 石室屋 正人, 金井 崇: “低解像度のエネルギー遷移比を考慮した煙アニメーションの詳細付加”, Visual Computing / グラフィックスと CAD 合同シンポジウム, No.21, 2016.

〔図書〕 (計 2 件)

1. “ビジュアル情報処理 -CG・画像処理入門- [改訂新版]” (第 9 章の一部執筆), CG-ARTS 協会, ISBN 978-4-903474-57-1, 2017.
2. 鈴木 賢次郎, 横山 ゆりか, 金井 崇, 舘 知宏: “3D-CAD/CG 入門 [第 3 版]-Inventor と 3ds Max で学ぶ図形科学-”, サイエンス社, ISBN 978-4-7819-1389-6, 2016.

〔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

- 東京大学 金井崇研究室: <https://graphics.c.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。