

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11839

研究課題名(和文)位置ベース法によるマルチフィジクスシミュレーション

研究課題名(英文)Multi-physics simulation based on position based dynamics

研究代表者

藤澤 誠 (Fujisawa, Makoto)

筑波大学・図書館情報メディア系・准教授

研究者番号：90508409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではリアルタイム物理シミュレーション手法である位置ベース法に注目し、既存の技術では膨大な計算時間と膨大なパラメータ調整が必要となる多数の現象が影響し合うような複雑な自然現象(マルチフィジクス)のコンピュータシミュレーション技術の開発を目的としている。その成果として、位置ベース法に基づく毛髪の変形を含めた流体とのインタラクション手法、水と微粒子によって構成されるダイラタント流体の位置ベース法による表現手法、流体シミュレーションとパラシュートシミュレーションを組み合わせた昼花火のシミュレーション手法、そして、土砂内の浸透流まで考慮した土砂構造物崩壊シミュレーション手法などを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単一の現象のみを再現するのではなく、毛髪の変形と流体とのインタラクション、微粒子の摩擦と水の非圧縮性、煙とパラシュートの挙動、土砂と液体の挙動とインタラクションなど、複数の物質が互いに複雑に絡み合う複雑な現象を、主に位置ベース法や粒子法を用いる新たな手法を開発することで、コンピュータで高速にシミュレーション可能にした点に研究の学術的意義がある。また、シミュレーションするだけでなく、それをコンピュータグラフィックスとして可視化し、様々なシーンに適用可能なことも示しており、実際の現場に適用できるといふ点で社会的な意義も高い。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focus on the position-based method, a real-time physics simulation method, and aim to develop computer simulation technology for complex natural phenomena in which multiple phenomena interact with each other (multi-physics), which requires a huge amount of computation time and parameter adjustment in previous researches. The results of the research include: an interaction method for fluid and hair including plastic deformation based on a position-based method, a simulation method of dilatant fluid composed of water and fine particles based on position-based method, daytime fireworks simulation by combining fluid and parachute simulations, and a simulation method of soil-structure destruction with seepage flows etc.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：物理シミュレーション コンピュータグラフィックス マルチフィジクス 位置ベース法 粒子法

1. 研究開始当初の背景

物理法則に基づくシミュレーションはコンピュータグラフィックスや医用、設計など様々な分野に応用されており、近年の研究では流体や熱、磁場など複数の現象を同時にシミュレーションすることも可能となっている。そして、洪水、炎のような大規模なものから髪や衣服の挙動のような小規模なものまで、現実世界の物理現象のほとんどは単一の物理法則で再現できるものではなく、2つ以上の物理法則を同時に扱う必要がある。このように複数の物理現象を同時に扱うことをマルチフィジクスと呼ぶ。

既存のマルチフィジクスシミュレーション手法は基本となる2つの物理法則(支配方程式)の結合系を解くことになるため、計算が複雑になり、それ以上の物理法則を組み込むことが難しく、計算時間も膨大なものになる。この問題を解決するには、各物理法則によるシミュレーションをモジュールとしてとらえ、それらを独立してそれぞれに合わせた離散化手法で計算するとともに、それらの間の影響を相互作用として計算する方法が考えられる。この手法は特にコンピュータグラフィックス分野において様々な自然現象を再現するために使われている実績のある方法である。一方でこのような複数の物理法則の粗な組み合わせによるシミュレーションは、それぞれのモジュールに対して物理的なパラメータのほかに、計算を安定化させるためのパラメータ調整も多く必要となり、その膨大な量のパラメータ調整が実際の利用において大きな壁になっている。

2. 研究の目的

本研究ではリアルタイムシミュレーション手法である位置ベース法に注目し、力ではなく位置に基づく定式化によって、既存の技術では膨大な計算時間と膨大なパラメータ調整が必要となる多数の現象が影響し合うような、現実世界の複雑な自然現象のコンピュータシミュレーションを可能とすることを目的とする。このために位置ベース法や粒子法などの様々な現象を高速かつ安定的に計算できる手法をベースとして、これまでシミュレーションが難しかった様々な現象にも対応できるシミュレーション手法を開発する。安定かつパラメータ設定が容易な手法を開発することで、現実世界の多くの現象に対応しつつ、専門家ではない一般的なユーザにとっても使いやすいシミュレータの基盤となり、コンピュータシミュレーションが専門家ではなくても気軽に使えるものになることが期待できる。

3. 研究の方法

従来の力学をベースとしたシミュレーション手法に対して、位置ベース法は物体の位置や姿勢に対して制約条件を課すことで物理現象を再現する手法である。直接位置や姿勢を求めするため、速度や位置の時間積分による誤差の蓄積がなく、クリエータも位置変更による直感的な制御が可能である。そして、位置ベース法の大きな利点の一つとして、求めたいものを直接計算するという点から、シミュレーションを安定化させるためのパラメータが少なく、その調整も簡単であるという点が上げられる。また、ラグランジュ的手法である粒子法は、計算点が自由に移動するという点から、計算領域がグリッドやメッシュに限定されず、ユーザにとって使いやすい手法である。従来は計算のための近傍粒子探索に計算時間がかかっていたが、近年のGPUによる並列計算技術の発展により、リアルタイム用途においてもよく用いられている。

本研究ではこのような安定かつユーザにとって使いやすい位置ベース法や粒子法などをベースとして、複数の現象や物質に対して、それぞれシミュレーションを行うとともに、それらの間のインタラクションも実現することで、現実世界の様々な現象に対応したシミュレーション技術を開発した。

4. 研究成果

本研究では複数の現象や物質が絡むような現象を再現する技術として、(1)位置ベース法に基づく毛髪の塑性変形を含めた流体とのインタラクション、(2)水と微粒子によって構成されるダイラタント流体の位置ベース法による表現、(3)流体シミュレーションとパラシュートシミュレーションを組み合わせた昼花火のシミュレーション、そして、(4)土砂内の浸透流まで考慮した土砂構造物崩壊シミュレーション、の4つの研究成果を主にあげた。以下でそれぞれの成果について述べる。

(1) 位置ベース法に基づく毛髪の塑性変形を含めた流体とのインタラクション

毛髪は、CG分野においても、キャラクター表現をよりリアルにするために重要な要素の一つである。毛髪1本1本の形状自体は単純ではあるものの、人の頭部で10万本と言われているように、多くの毛髪が絡むような動きをクリエータが手動で作り出すことは難しいことから、物理シミュレーションが頻りに用いられている。毛髪は、曲げたり伸ばしたりすると元の形状に戻ろうとする弾性体としての性質と、変形した形状から元に戻らなくなる性質(塑性変形)を併せ持つ物体である。また、その重量の軽さから周囲の空気や水などの流れによってもその挙動が容易

に変化し、また、その内部構造により液体や温度変化などによって塑性変形するという特徴を持つ。

本研究では毛髪と水のような液体及び空気の流れ(風)との相互作用とそれによって生じる塑性変形シミュレーション手法を開発した。毛髪自体の挙動を位置ベース法における距離制約と曲げ・ねじれ制約を用いて表現し、塑性変形の原因となっている毛髪内部の側鎖結合を位置ベース法の制約条件で再現する手法を新たに提案した。さらに、毛髪変形の原因となる風によるなびきを再現するための渦を制御できる乱流シミュレーション手法、毛髪と空気・液体をそれぞれ粒子で離散化し、位置ベース法のアルゴリズムに組み込みそれぞれの物体間の相互作用現象を再現する方法も開発した。図1に風との相互作用シミュレーションの結果[1]、図2に液体との相互作用と毛髪の塑性変形シミュレーションの結果を示す[2]。

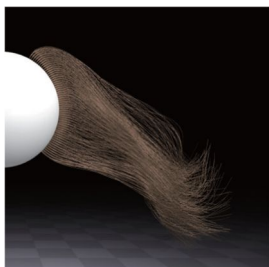


図1 毛髪と風の相互作用シミュレーション
(右は計算に用いている粒子を可視化したもの)

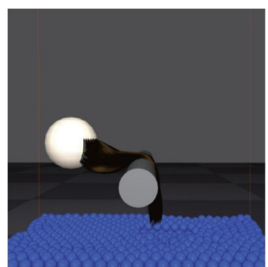
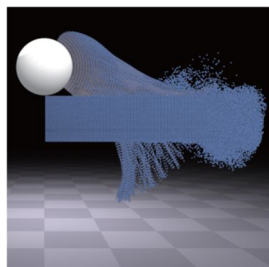


図2 液体との相互作用による毛髪の塑性変形

(2) 水と微粒子によって構成されるダイラタント流体の位置ベース法による表現

流体は粘度が一定であるニュートン流体と、与える力によって粘度が非線形に増減する非ニュートン流体に分けられる。本研究では非ニュートン流体の中でもかかる力が大きくなるほど粘度が増大するダイラタント流体に着目する。ダイラタント流体は、水溶性片栗粉や微少な砂で構成される砂浜の波打ち際など、液体と微粒子の混合体であり、衝撃を加えると微粒子同士が衝突し、摩擦やその形状によって微粒子のネットワークが形成されることで、硬化するような挙動を引き起こしている。

従来の研究では流体の粘っさを表す粘性係数をかかった力などにより制御することで非ニュートン流体の性質を表していた。しかし、この方法では、一つの非ニュートン流体が持つ性質すべてを一つのモデルで再現することは難しい。例えば、ダイラタント流体では微粒子が沈殿することで場所によって硬さが変化するなど、単純に力に対する粘性変化のモデルだけでは捉えられない現象がある。そこで、本研究では、外部から観測できる現象の変化に基づくモデル化ではなく、非ニュートン性を生み出す原理である、流体内部の微粒子の摩擦を位置ベース法の制約として再現し、さらに微粒子の体積分率の移動もモデル化することで、沈殿を含めたダイラタント流体の性質を再現できる手法を開発した。微粒子同士の摩擦を位置ベース法における摩擦制約として新たにモデル化し、微粒子を含む液体の性質を表す密度制約と組み合わせ、微粒子の体積分率に基づいて、制約の強さの割合を変化させることで、ダイラタント流体の性質を再現した。そして、図3、図4に示すような流体への物体の落下の比較実験[3]などを行い、ダイラタント流体の性質をシミュレーションによって再現できていることを確かめた。

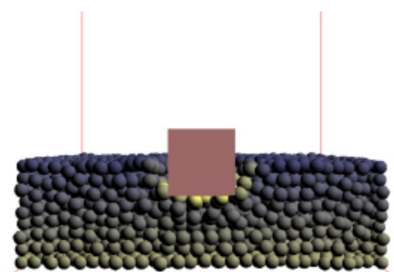


図3 ダイラタント流体への固体落下実験の結果

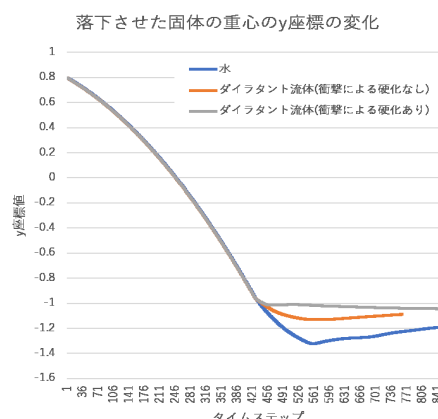


図4 落下による位置変化の比較結果

(3) 流体シミュレーションとパラシュートシミュレーションを組み合わせた昼花火のシミュレーション

音や光を楽しむコンテンツとして夜花火は、CG分野においても頻りに研究されている対象である。一方で、打ち上げ花火には昼に打ち上げる昼花火も存在する。昼花火は音や煙を楽しむコンテンツであり、本研究では昼花火の中でも煙竜に着目する。煙竜は、パラシュートに発煙筒をつけたものであり、打ち上げられた後パラシュートによって煙が螺旋状の複雑な軌跡を描くことが特徴である。

煙竜はパラシュート、煙、気流など様々な要因が絡む複雑な現象であり、本研究では、この煙竜をパラシュートのシミュレーションと煙のシミュレーションを組み合わせることによって再現する方法を開発した。パラシュートの屋根部分を航空力学的な力を考慮した円形パラシュートモデル、荷物部分を自由落下する質点としてモデル化し、間を繋ぐ紐についてはバネ・ダンパを用いて表現、そして、煙は格子法を用いた流体シミュレーションによって再現した。これらの複数の現象の間のインタラクションも考慮することで昼花火の再現を可能とした。図 5 にシミュレーションを行った結果を示す[4]。

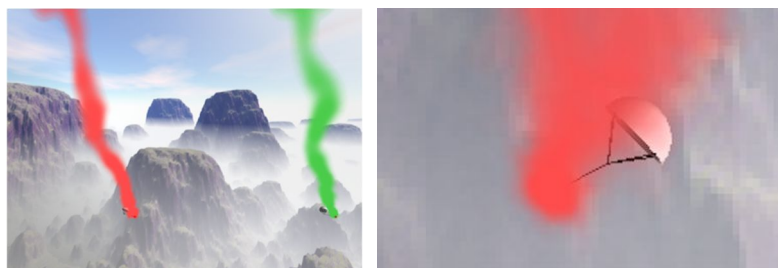


図 5 昼花火のシミュレーション結果(右はパラシュート部分の拡大図)

(4) 土砂内の浸透流まで考慮した土砂構造物崩壊シミュレーション

重力式ダムや堤防など土砂を積み重ねることによって水の流れを防ぐ土砂構造物は、水害の多い我が国においては身近なものであり、洪水などによる決壊をシミュレーションすることができれば、防災対策はもちろん、CG として可視化することによって、映像表現や教育目的にも応用できる。

本研究では、この土砂構造物の水流による崩壊を 2 つの粒子法:SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)とDEM(Discrete Element Method)の組み合わせによりシミュレーションする方法を開発した。土砂構造物の崩壊は、その内部に水が浸透して流れることによって起こる場合(内部浸透)と、内部に水が浸透せずに堤防などの上部を超えた水によって削られる場合(越流浸食)の 2 つに大別される。両者において重要なのは、土砂で構成された構造物内部における浸透流を再現することであり、提案手法では、SPH で計算される液体粒子とDEM で計算される土砂粒子を組み合わせるとともに、これら 2 種の粒子が互いに衝突せず、液体粒子が土砂粒子内部において自由に流れるようにし、その間の相互作用力として浮力と抗力をそれぞれ実験データに基づくモデル化によって計算することで、土砂内部の浸透流を計算できるようにした。また、液体表面張力による土砂粒子間の毛管力および土砂粒子内部への水の付着力も考慮することで、内部浸透から越流浸食まで幅広い決壊現象の再現を可能とした。図 6 に内部浸透および越流浸食による決壊をシミュレーションで再現した結果を示す[5]。

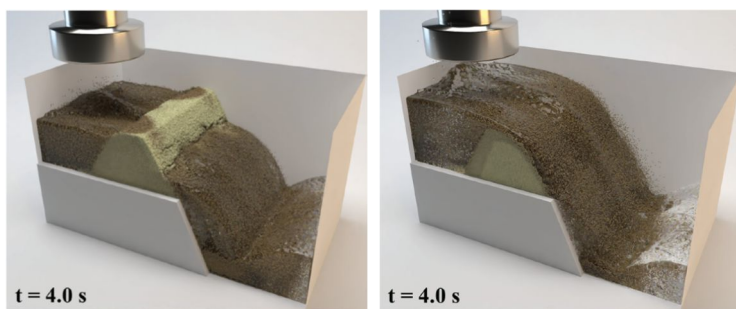


図 6 土砂構造物決壊シミュレーション結果(左:内部浸透, 右:越流浸食)

< 引用文献 >

- [1] 今井 翔輝, 出村 佑史, 藤澤 誠, 三河 正彦, "側鎖結合を考慮した毛髪 of 相互作用シミュレーション", 情報処理学会論文誌, Vol.64, No.6, 2023. (accepted)
- [2] Shoki Imai, Makoto Fujisawa, Masahiko Mikawa, "Position Based Hair Plastic Deformation due to Interaction with Liquid", Proc. IEVC2021, pp.2B-1:1-4, 2021.
- [3] 古川 翔大, 藤澤 誠, 三河 正彦, "摩擦制約に基づくダイラタント流体のシミュレーション", 画像電子学会第 301 回研究会, 2022.
- [4] 矢花 明莉, 藤澤 誠, 三河 正彦, "航空力学に基づくパラシュートを用いた昼花火のシミュレーション", 画像電子学会誌(ショートペーパー), Vol.51, No.4, pp.327-331, 2022.
- [5] Xu Wang, Makoto Fujisawa, Masahiko Mikawa, "Visual Simulation of Soil-Structure Destruction with Seepage Flows", PACMCGIT(Proc. SCA2021), Vol.4, No.3, pp.41:1-18, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 矢花 明莉, 藤澤 誠, 三河 正彦	4. 巻 51
2. 論文標題 航空力学に基づくパラシュートを用いた昼花火のシミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 画像電子学会誌	6. 最初と最後の頁 327-331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今井 翔輝, 出村 佑史, 藤澤 誠, 三河 正彦	4. 巻 64
2. 論文標題 側鎖結合を考慮した毛髪相互作用シミュレーション	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Xu, Fujisawa Makoto, Mikawa Masahiko	4. 巻 4
2. 論文標題 Visual Simulation of Soil-Structure Destruction with Seepage Flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques	6. 最初と最後の頁 1~18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3480141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤澤 誠, 佐々木 浩幸, 三河 正彦	4. 巻 49(4)
2. 論文標題 燃焼過程を考慮した炎のリアルタイムシミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 画像電子学会誌	6. 最初と最後の頁 284-292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 鈴木 龍, 藤澤 誠, 三河 正彦
2. 発表標題 並列計算に適したメッシュレス破壊シミュレーション手法
3. 学会等名 VC+VCC2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古川 翔大, 藤澤 誠, 三河 正彦
2. 発表標題 摩擦制約に基づくダイラタント流体のシミュレーション
3. 学会等名 画像電子学会 第301回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松浦 一輝, 藤澤 誠, 三河 正彦
2. 発表標題 樹木シミュレーションに基づくリアルタイム環境音合成システムの開発
3. 学会等名 画像電子学会 第301回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoki Imai, Makoto Fujisawa, Masahiko Mikawa
2. 発表標題 Positon Based Hair Plastic Deformation due to Interaction with Liquid
3. 学会等名 7th IEEEJ International Conference on Image Electronics and Visual Computing (IEVC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川 翔大, 藤澤 誠, 三河 正彦
2. 発表標題 置ベース法を用いたダイラタント流体のシミュレーション
3. 学会等名 VC+VCC2021(Visual Computing 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎 良祐, 藤澤 誠, 三河 正彦
2. 発表標題 糊化現象に基づく粘度変化を伴う流体シミュレーション手法の開発
3. 学会等名 画像電子学会 第299回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池畑 開斗, 藤澤 誠, 三河 正彦
2. 発表標題 ノッチ形成と堆積物を考慮した海岸地形生成手法の開発
3. 学会等名 画像電子学会 第299回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池畑 開斗, 藤澤 誠, 三河 正彦
2. 発表標題 位置ベース法を用いたクレーター地形生成に関する研究
3. 学会等名 Visual Computing 2020 (ショート発表)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎 良祐, 藤澤 誠, 三河 正彦
2. 発表標題 PBF法を用いた土砂流れシミュレーション手法の開発
3. 学会等名 Visual Computing 2020 (ポスター発表)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------