

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月5日現在

機関番号：12601
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2011～2012
課題番号：23650041
研究課題名（和文） 流体と弾性体を融合した統一的物理法則アニメーション手法の開発研究
研究課題名（英文） Research and development of integrated physics-based animation combining fluids and elastic bodies
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

研究成果の概要（和文）：

3DCG において異なる材質の連成・融合アニメーションなどが求められているが、シミュレーション手法が未だ確立されておらず、実用的な利用には程遠いのが現状である。本研究では、複数の異なる材質を一つの手法で賄うための、統一的物理法則アニメーション手法を開発した。流体と弾性体のシミュレーション手法を融合することで、高速かつ安定的に中間的な材質の表現を得ることができた。また、GPU やマルチコア CPU による並列化も行うことができた。

研究成果の概要（英文）：

In 3DCG the coupled or integrated physics-based animation of different materials is required. However, the simulation method has not been established, and is far from practical use. In this research, an integrated physics-based animation method is developed to handle several different materials as a unified approach. By combining simulation methods of fluids and elastic bodies, we achieve a fast and robust simulation of intermediate materials such as viscoelastic objects. The parallelization of such a method using GPUs or multi-core CPUs is also achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：グラフィクス，物理法則アニメーション，粘弾性体，SPH 法，シェイプマッチング法，GPU，マルチコア CPU

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たアニメーションを生成することが多くなっている。代表的なものとして、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がCGソフトウェア上で実装され、様々なシーンの中で利用されている。

その一方で、シミュレーション技術で生成したい映像表現はますます複雑化・多様化してきている。制作現場からは、粘土やゼリーなどの粘弾性物体の表現や、異なる物性を持つ物体同士（例えば流体と固体など）の連成シミュレーション、もしくは、CG特有の表現として、一つの材質から別の異なる材質への滑らかな補間などの現象を扱いたい、という要求が高まっている。しかしながら、個々の材質のシミュレーションに関しては独立して手法が確立されており、異なる材質による複雑かつ多様な映像表現を得るには、異なるシミュレーション手法を複数用意する必要がある上に、これらのシミュレーション手法を連成するための手法が別途必要となる。このことが、実際の現場における利用を阻害する主な要因となっている。

2. 研究の目的

ここでは、複数の異なる材質を一つの手法だけで賄うための統一的な物理法則に基づくアニメーション手法を開発する。研究期間内においては、流体と弾性体を融合することを考える。すなわち、一つの物体に対し1回のシミュレーションを実行するだけで流体と固体の両方を表現できることや、二つの材質間を滑らかに補間すること、さらに、その中間的な材質である粘弾性物体などを表現することを目指す。本研究では、特に映画やCM、ゲームなど、CGの主な分野での利用を想定している。このため、それほど高いシミュレーション精度を必要とするものではないが、これらの分野での利用に適したシミュレーション手法の高速化、安定化について視野に入れる。

まずは、ここでのアイデアの元となっている材質の捉え方について述べる。連続体力学からの知見によると、固体（弾性体）と流体

の違いは、本質的には弾性力、すなわち、物体に力を加えたときに、もとの状態に戻ろうとする力の有無である。さらに流体を基準として考えると、流体の振る舞いに対する弾性力の割合の大小によって、その中間的な性質を持つ材質を表すことができる。例えば、弾性力が全くない場合は流体（水のような材質）を表し、弾性力が大きくなるにつれて、弾性体としての性質（ゴムのような材質）が強くなる。すなわち、弾性体と流体をその対極として、それぞれ中間的な性質を持つ粘弾性体（パン生地、粘土、歯磨き粉、粘液などの材質）を1つの軸上に並べることができる。

ここでのアイデアは、流体としての力と弾性体としての力をそれぞれ別に求め、それらの値を補間することで、中間的な性質を持つ材質を一つのパラメータで表現することである。ただし、このアイデアを具現化するためにチャレンジすべき課題として、CGの分野でのシミュレーション研究における異なる材質の表現方法を如何に統一するかが挙げられる。すなわち、弾性体のシミュレーションにおいては、内部構造が常に不変であることから、主に有限要素法で用いられるような内部構造を持つメッシュ表現（例えば四面体メッシュ）が用いられてきた。一方で流体のシミュレーションにおいては、内部構造が常に変化するような状態を扱うために、ボリューム表現を用いて空間場の属性値として計算を行い、陰的に表れる表面形状を抽出する方法が用いられる。あるいは、粒子法で用いられるような点群表現が利用されることが多い。本研究での異なる材質を統一的に表すためには、これらの形状表現においても統合的に扱う必要がある。

3. 研究の方法

統一的物理法則アニメーション手法を開発するにあたり、基本的には流体シミュレーションと弾性体シミュレーションを融合する形で進めていく。融合する上で考慮しなければならない要素は以下である。(1) 二つの手法を同じ形状表現の下で実行できること。特に、流体を扱う上で必要な内部構造の変化に対応できるような表現であること。(2) 表面形状の品質が高いこと。このことは、CGの分野での利用において最終的な映像を出力する上で非常に重要である。特に、計算のために利用する表現と表示のために利用する表現が異なるような場合は注意が必要となる。

流体シミュレーションについては、粒子法の一つであり宇宙物理の分野での数値計算のために考案された SPH (Smoothed-Particle Hydrodynamics) 法を利用する。SPH 法は、粒子の集合体により場を表現し、各粒子の動きを運動方程式に従って解く方法であり、主に点群表現に対して適用される。流体現象を比較的簡単かつ安定的に計算することができ、さらに点群表現を使っているために内部構造の動的な変化にも対応できる。

一方で、弾性体シミュレーションについては、SPH 法を弾性解析に応用した研究が過去に提案されている。しかし、安定に計算するためにはタイムステップを小さくする必要があり、そのため計算時間がかかり、現状では実用的な方法ではないという問題がある。ここでは別の方法としてシェイプマッチング (Shape Matching, SM) 法による形状変形手法について検討する。SM 法は、現在位置に対する目的位置を各ステップで計算し、その目的位置に引き寄せられる力を用いて現在位置を更新することで変形を行う方法である。この方法は物理法則にもとづく方法ではないが、弾性力を模倣したものであり、弾性体のような動きを高速かつ安定的に実現できる。オリジナルの SM 法は格子状の形状に対して適用された方法であるが、原理的には自由に配置が可能な点群表現に対して拡張することが可能である。

これら二つのシミュレーション計算を次のように統合する。あるステップにおける現在位置の点群において、それぞれ流体もしくは弾性体と考えた場合の力の計算を行い、更新速度および更新位置を求める。それぞれ別に計算された二つの更新位置を一つのパラメータにより線形補間することで、二つの材質の中間的な振る舞いとなる挙動を実現する。

シミュレーションのための形状表現としては点群表現を用いることとする。上記二つのシミュレーション手法はいずれも点群表現について適用することが可能である。特に、流体の振る舞いに近い動きの場合は内部構造が動的に変化するため、点群表現にすることの利点は大きい。さらに、弾性体に近い動きの場合においても、破壊や破砕が起こる場合には、内部構造の位相変化を考える必要がある。点群表現を用いることでこれらの現象をも実現できるものと期待される。

表示のための表面形状に関しては、各表示ステップにおいて、点群に対して陰関数曲面を割り当て、陰関数曲面が構成する空間距離場の等値面を抽出することでポリゴン形状

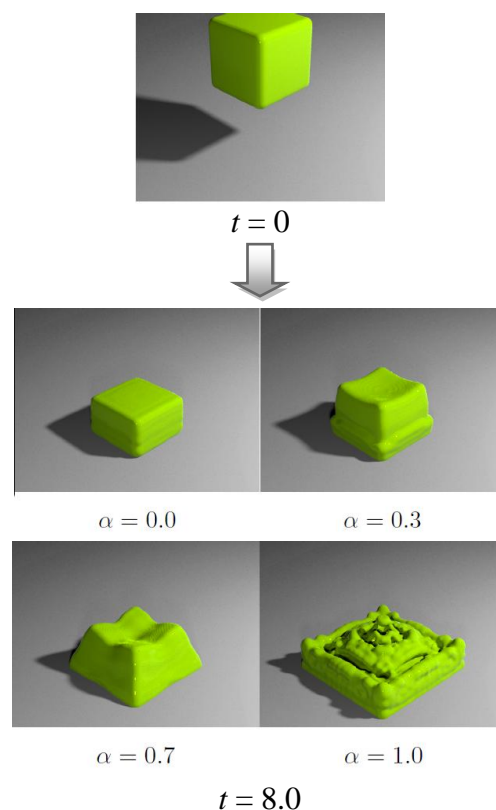


図 1: 立方体の落下におけるパラメータの違いによる挙動の変化

を得る。

4. 研究成果

- (1) 流体と弾性体を融合した高速かつ頑健な粘弾性体アニメーション

本手法では、パラメータ α を変えることで流体と弾性体との異なる物性を持つ材料を表現できる。図 1 は、立方体を自由落下させた場合の床にぶつかったときの形状を、異なるで観察した結果を示している。 α が 0 に近い場合は弾性体としての動きが強く働き、逆に α が 1 に近い場合は流体に近い振る舞いをするようになる。 α が中間的な値の場合は、物体の粘弾性的性質が良く表われる。図 1 において、 $\alpha = 0.3$ のときは、より弾性体としての性質の強い粘弾性体が表れ、ちょうどゼリーのような材質となる。 $\alpha = 0.7$ のときは逆により流体としての性質の強い粘弾性体となり、ちょうど歯磨き粉のような材質を表現できる。

図 2 に、本手法を様々な例題に対して適用した実験結果を示す。図 2(a) は 3,764 点からなる Moai モデルの落下シーンの結果である。 $\alpha = 0.0$ としている。この図から見て取れるように、動きは弾性体に近く、床との衝突で

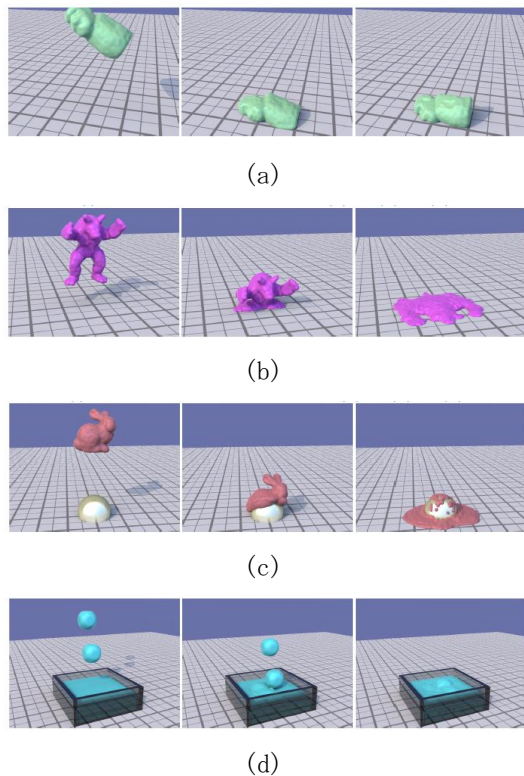


図 2: 様々な例題に対する実験結果

跳ねた後も、もとの形状が保存されている。図2(b)は4,157点からなるArmadilloモデルの落下シーンの結果である。 $\alpha = 0.8$ としている。この図より、動きは弾性体に近いが流体の性質も併せ持っている。よって、床にぶつかった後に徐々に広がっているものの、形状は完全には崩れないことが確認できる。図2(c)は4,185点からなるBunnyモデルと球の衝突シーンの結果である。 $\alpha = 0.85$ である。その動きは流体に近いが、弾性も少し持ち合わせている。このモデルは、分割と結合が実現する様子を表している。一旦、球にぶつかった後大きく形を変えながら分割し、床に到達してから結合が行われていることが確認できる。図2(d)は4個のボールをプールに落とす例である。点数は4個のボールとプールを合わせて8,264点である。 $\alpha = 0.9$ であり流体にかなり近い粘弾性体としての物性を持つ。ボールがプールに突入するところで、結合が行われている。

なお、計算時間に関しては、主にSMに起因する処理に最も時間を費やし、特に近傍粒子が多くなるとそれが顕著になる。しかしそれでも、本手法ではインタラクティブな利用に耐え得るほど十分に高速に計算できることを実証した。

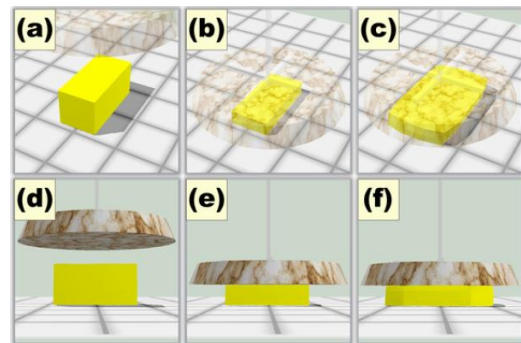


図 3: 直方体の押しつぶしにおける体積保存を考慮した結果

(2) SM法の体積保存を考慮した拡張

オリジナルのSM法は幾何学的に導出された手法であり、現実の弾性体の動きを表現することはできない。特に、体積が保存されていないことにより、物体の押しつぶしや引き伸ばしの際に非現実的な動きをすることがわかっている。

そこで本研究では、SM法に対し体積保存をするための拡張を行った。図3に、直方体の押しつぶしにおける体積保存の適用結果を示す。(a),(b),(c)は俯瞰視点から、(d),(e),(f)は真横からの視点から眺めた図である。(a),(d)は初期状態、(b),(e)はSM法の変形のみ、(c),(f)は提案手法による体積保存を考慮した結果を示す。図より、SM法による変形のみでは、押しつぶす方向以外の形状には変化がなく、体積が縮小している様子が伺える。一方、今回の提案手法による結果では、押しつぶす方向と直交する方向に形状が膨らむことで、体積が保存できていることが確認できる。これは、より現実に近い自然な結果を示していると言える。また、他の物体への干渉も起こっていないことが確認できる。

なお、体積保存処理を行うことにより、計算速度が平均して18%程度低下することが確認されたが、それでもインタラクティブ処理には十分な速度が確保できることを実証した。

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7件)

- ① Hiroaki Kawata, Takashi Kanai: “A Projection Operator for Representing Sharp Features using Visibility”,

Computer-Aided Design and Applications, Vol.10, No.1, pp.33-44, 2013. 査読有.

DOI: 10.3722/cadaps.2013.33-44

- ② Vanna Sam, Hiroaki Kawata, Takashi Kanai: “A Robust and Centered Curve Skeleton Extraction from 3D Point Cloud”, Computer-Aided Design and Applications, Vol.9, No.6, pp.869-879, 2012. 査読有.
DOI: 10.3722/cadaps.2012.869-879
- ③ Hiroaki Kawata, Takashi Kanai: “Robust MLS Projection Operator for Point Clouds”, The Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan, Vol.40, No.4, pp.558-567, 2011. 査読有.
DOI: 10.11371/iieej.40.558
- ④ 高松 賢二, 金井 崇: “シェイプマッチング法による体積保存を考慮した形状変形手法”, 画像電子学会誌, Vol.40, No.4, pp.549-557, 2011. 査読有.
DOI: 10.11371/iieej.40.549
- ⑤ Genichi Kawada, Takashi Kanai: “Procedural Fluid Modeling of Explosion Phenomena Based on Physical Properties”, Proc. ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation 2011, pp.167-175, 2011. 査読有.
DOI: 10.1145/2019406.2019429
- ⑥ Kenji Takamatsu, Takashi Kanai: “A Fast and Practical Method for Animating Particle-Based Viscoelastic Fluids”, The International Journal of Virtual Reality, Vol.10, No.1, pp.29-35, 2011. 査読有.
- ⑦ 金井 崇: “デジタル幾何形状処理の基礎 -データ構造と基本処理-”, 日本計算工学会誌, Vol.16, No.2, pp.2519-2522, 2011. 査読無.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 金井 崇: “CGにおける物理シミュレーション研究の動向と研究紹介”, CEDEC 2012 パネル&ラウンドテーブル企画「物理シミュレーション最前線!», 横浜, 8月, 2012. 査読無.
- ② Sam Vanna, 川田 弘明, 金井 崇: “A Centered Curve Skeleton Extraction from 3D Point Cloud”, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会, 東京, 3月, 2012. 査読無.
- ③ 川田 弘明, 金井 崇: “可視点判定にもとづく角の表現が可能な投影オペレー

タ”, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会, 東京, 3月, 2012. 査読無.

- ④ 高松 賢二, 金井 崇: “高速かつ頑健な点群ベースの粘弾性体アニメーション”, グラフィクスと CAD / Visual Computing 合同シンポジウム, No.16, 松江, 6月, 2011. 査読有.
- ⑤ 川田 玄一, 金井 崇: “物理モデルを考慮した爆発のモデリング”, グラフィクスと CAD / Visual Computing 合同シンポジウム, No.20, 松江, 6月, 2011. 査読有.

[図書] (計 1 件)

- ① 鈴木 賢次郎, 横山 ゆりか, 金井 崇: “3D-CAD/CG 入門 [第 2 版]-Inventor と 3ds Max で学ぶ図形科学-”, サイエンス社, 2012.

[その他]

ホームページ等

<http://graphics.c.u-tokyo.ac.jp/~kanai/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし