

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：32601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21796

研究課題名（和文）流動表現学の萌芽

研究課題名（英文）Toward optical and mechanical modeling of complex fluids

研究代表者

楽 詠コウ（Yue, Yonghao）

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：30612923

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：我々の身の回りには、（ゴマとすりつぶした野菜からなる）サラダドレッシングや（ひき肉とトマトからなる）パスタソースなどのように、さまざまな要素で構成された興味深い流体状物質がたくさんある。このような物質のアニメーションを再現するには、その光学および力学的特性を推定し、得られた特性に基づいてシミュレーションを実行する必要がある。しかし、個別の構成要素を一つずつモデル化するのは非常にコストがかかり非現実的である。そこで、このプロジェクトでは、こうした物質について、その光学および力学的特性を連続体として効率的かつ効果的にモデル化するための方法論を研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでも複雑流体を扱うための手法は多数あるが、基本的には流体の構成要素がマイクロメートルオーダーのものが対象である。構成要素としてより大きなスケールを含むものがあると、既存の装置ではその特性を測定できなかったり、既存の理論では観測結果と性質が合わなかったりするなどの問題がある。本研究では、より大きなスケールの構成要素を扱えるようにするための方法論を構築することで、身の回りにある（性質が必ずしも理想的でない）多様な現実的な流体をカバーするための土台を作ったことに意義がある。また、得られた手法は、映像制作だけでなく、工学等関連諸分野での物性推定や物性モデリングにも応用できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：There are many intriguing fluid-like materials consisting of various elements, like a salad dressing (consisting of sesame and mashed vegetables) or a pasta sauce (consisting of minced meat and tomato). To reproduce the animations of such a material, we need to be able to acquire their optical and mechanical properties as well as to perform simulations using the acquired properties. However, modeling individual elements one by one can be quite costly and impractical. In this project, we investigated methodologies for efficiently and effectively modeling such a material (for their optical and mechanical properties) as a continuum.

研究分野：コンピュータグラフィクス

キーワード：複雑流体 力学モデリング 光学モデリング

1. 研究開始当初の背景

流動物質の動きと見た目を再現するには、対象物質の力学特性や光学特性を推定し、連続体力学や放射輸送方程式などの支配方程式によって、速度や輝度などの時間変化や空間分布を計算する。比較的単純な物質については、既に様々な手法が存在しているが、我々の身近には、サラダのドレッシングやパスタソースのように、目視できるサイズのゴマや肉片等の様々な混入物を含む流体が普遍的に存在しており、これらの動きや見た目を再現できるようにする、いわば流動表現できるようにするための理論的枠組みを検討したいことが、研究開始当初の背景である。これら流体中に多数存在している混入物を個別の要素として扱うと、モデル化とシミュレーションの双方で膨大な時間が必要となるため、特にそれら混入物と背景流体との混合体を単一の連続体として扱うための手法を検討したい。また、力学と光学の双方に包括的に取り組むことで、写実的な映像表現をできるようにしたいという狙いがある。

2. 研究の目的

複雑流体の力学特性を測定するための装置としてレオメータが知られているが、レオメータでは流動性を測定するために、試料を理想的な流動条件下において、せん断速度とせん断応力との関係を調べる。精度の高い測定には、流動条件が理想状態に近いことが求められるが、目視できるレベルの混入物が存在すると、理想的な流れが得られなくなり、測定精度を担保できなくなる。このようにレオメータでうまく計測できない物質についても流動性を推定できるようにし、その動きを再現できるようにすることが一つの目的である。特に、我々の身近に存在する一般的な流体は、実効粘性がせん断速度に依存して変化しうる非ニュートン流体であり、広範な非ニュートン流体に適用できるようにしたい。

物質の光学特性については、通常的手法では、物質中での直進距離に応じて光が指数的に減衰する指数媒質モデルが用いられる。非均質な指数媒質について、その空間的に変化する光学パラメータを観測結果から推定する手法について研究することを一つの目的とした。

また、指数媒質モデルでは、光を散乱する粒子が物質中に互いに独立に存在することを仮定しており、これは微小な粒子が希薄に存在する系では妥当であるが、それ以外の場合には、粒子同士が互いに重なることができない効果や、様々な要因で粒子同士が互いに反発しあう効果や、逆に凝集する効果によって、粒子間に相関が生じ、減衰特性が指数則から離れる非指数型の減衰特性が現れる。そこで、混入物を含む様々な複合的な流体を扱うために、非指数型の減衰特性をモデル化するための方法を検討することをもう一つの目的とした。

3. 研究の方法

レオメータで測定できる身近にある様々な流体状食品や化粧品について、その流動性を測定したところ、せん断速度とせん断応力との間の関係が、現象論モデルの一つであるハーシャルバルクレイモデルで精度良くフィッティングできることがわかった。ハーシャルバルクレイモデルには、降伏応力と一貫性パラメータ、指数パラメータの三つのパラメータがあり、これら三つのパラメータを推定することで、物質の力学特性の推定を行う。混入物を含む物質に理想的な流動条件を課するのは難しいので、厳しい流動条件を課す代わりに、一定領域内に閉じ込めた流体が自由に流出できるようにした簡易的な実験設定によって、流体が流れる様子を動画映像として撮影し、ハーシャルバルクレイモデルのパラメータを未知数として、シミュレーション結果を最適化するというアプローチをとる。予備実験では、この最適化の結果から、最適化されたパラメータによるシミュレーション映像と撮影動画とが良い一致を示すにもかかわらず、最適化結果と真値との値に大きな差があるケースも見られた。その原因を解析していくと、パラメータの変動に対してシミュレーション結果(物理的流動性)がほとんど変化しない場合があることが、数値計算からも理論計算からもあることがわかった。これを踏まえて、パラメータの推定結果の確定しやすさに関する理論を構築した。シミュレーションに対するパラメータの感度を定量化し、さらに、実際にシミュレーションを行うことなくその感度を推定する方法を構築した。得られた解析結果から、実験設定を変えることで、パラメータごとの感度を変えることができることがわかった。このことをもとに、複数の実験設定を自動的に選択することで、推定性能を高めるアルゴリズムを構成した。また、実物に対する測定を行うための実験装置の試作を行い、身近な複雑流体に対して測定を試みた。

物質の光学特性について、古典的な指数媒質モデルを仮定して、非均質な媒質の光学特性を推定するための方法として、媒質の光学パラメータ分布をグリッドによって表現し、光学シミュレ

ーション(レンダリング)と最適化を組み合わせることによって推定する手法を試みた。レンダリングにはモンテカルロ積分に基づく経路追跡法を利用し、最適化では損失関数としてノイズに寛容なものを用い、最適化技法には Adam を利用した。また、CUDA を用いた GPU 実装を活用した。一定範囲内の媒質については良好な推定結果を実用的な時間で得ることができた。

また、非指数型媒質のモデル化については、媒質内の粒子分布のモデル化や粒子分布と光の減衰特性(自由行程分布)との関連性について取り組んだ。相関まで含めた粒子分布を考慮するには、概念的に粒子の同時確率密度を考慮することができる。この同時確率密度は、そのフーリエ変換を考慮することで、フーリエ級数の係数によって様々な相関モードをモデル化することができる。また、この同時確率密度をもとに、一定距離進んだ際に最初の粒子に当たる確率密度(自由行程分布)を定式化した。相関のあり・なしに応じて、得られる自由行程分布が指数型・非指数型になることが解析的に確かめられた。また、数値実験によって、実際に粒子に対して光線を飛ばして交点計算をし、得られる交点間距離をもとに自由行程分布を推計すると、理論で予測される分布に一致することが確かめられた。こうしてモデル化した減衰特性を用いて、(放射輸送方程式を拡張したものである)ボルツマン方程式を解くことによって、実際にレンダリングを行うためのフレームワークを構築した。簡易的な三次元媒体を用いたレンダリング実験の比較により、様々な異なる減衰特性を表現できることが確認できた。

4. 研究成果

複雑流体の力学特性の推定については、図 1 に示すように、レオメータで測定できる試料(乳液、とんかつソース、中濃ソース)を用いて、せん断速度とせん断応力の関係について、開発した手法による推定結果(複数の実験設定を用いた結果を赤い線、単一の実験設定を用いた場合を青い線で示した)とレオメータによる測定結果(黒点線)を比較したところ、単一の実験設定を用い

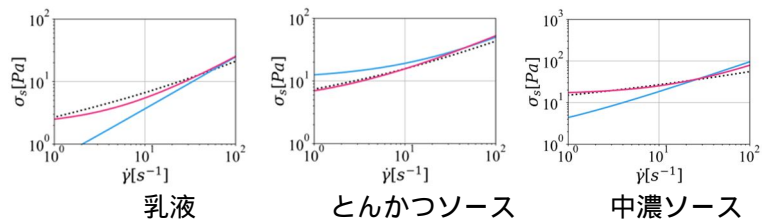


図 1. レオメータで流動性を測定できる物質による流動性推定性能の評価。



図 2. ポモドーロソースに対して、開発した手法で流動特性を推定し、非ニュートン流体としてシミュレーションしてアニメーションを作成した例。

た場合には合わない場合があること、複数の実験設定を用いるとよく一致することがわかった。これを踏まえて、混入物を含むパスタソースについて、開発した手法で流動特性を推定し、図 2 に示すようなアニメーションを作成することができた。

非均質媒質の光学特性推定については、推定の初期値が真値から離れすぎると十分に収束しないなどの問題があるが、適切な初期値から始めた場合には、パラメータについて 5% 以下の誤差で推定できることがわかった。より頑健な推定法を構築することは今後の課題である。

非指数型媒質のモデル化について、粒子間の相関関係を無相関とした場合や様々な種類の相関に設定した場合について、光の自由行程分布をそれぞれ導出した上で、映像生成(レンダリング)した結果を図 3 に示す。無相関の場合には古典的な指数媒質モデルとなり、光の直進距離に対して指数的に減衰がかかるが、相関がある場合には、それより減衰が遅くなることでより遠くまで透き通る見え方が現れ、逆に減衰が速くなることで物体の厚みの増大と共に急激に見えなくなる効果が現れる。このような効果を表現することが可能となった。

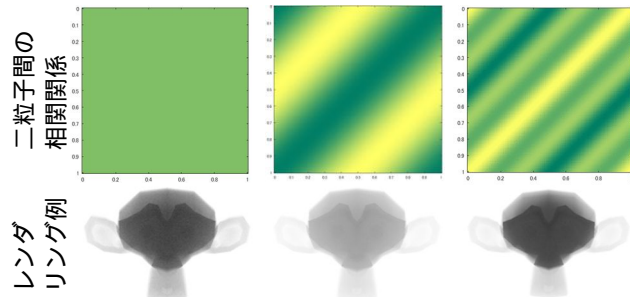


図 3. 上段に示した相関関係をもとにして、光の自由行程分布を計算し、下段の媒質に適用して映像を生成した。左の無相関の場合に比べて、相関の種類に応じて、より遠くまで透き通るように見える場合(中央)や、逆に急激に見えなくなる場合(右)を作り出すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------