

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04766

研究課題名(和文)変形物体の陰関数表現と流体シミュレーション

研究課題名(英文)Fluid simulation with implicitly defined deforming obstacles

研究代表者

仲田 晋(Nakata, Susumu)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：00351320

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：流体の運動をコンピュータ上で計算する技術として流体シミュレーションがある。本研究課題は障害物が変形する状況でこの流体シミュレーションを実現することを目的としている。この目的を達成するために、変形物体を表現するための技術の開発、変形物体を障害物とする流体シミュレーション技術の開発、およびその結果を目視で確認するための可視化技術の開発を行った。最終的に、3次元空間において、流体シミュレーションを実行しながらユーザが障害物を変形する技術を開発した。また、流体シミュレーションの結果は粒子の集合であり、これを適切に可視化するためにCGの高品質描画の技術の導入に成功している。

研究成果の概要(英文)：Fluid simulation is an important technique in many fields including mechanics. In this project, we developed a new technique for fluid simulation with deforming obstacles. For this purpose, we proposed implicit surface representation techniques for three-dimensional shape deformation, fluid simulation techniques for particle-based computation with the deforming implicit surfaces and visualization techniques of particles with global illumination. As a result, we developed a tool that enables users to perform fluid simulation and interactive shape deformation of obstacles. In addition, we developed a visualization technique of three-dimensionally distributed particles with global illumination techniques in computer graphics in order to help users capture three-dimensional structure of the particles.

研究分野：シミュレーション

キーワード：コンピュータグラフィックス 流体シミュレーション 数値解析 可視化

1. 研究開始当初の背景

本研究課題は「陰関数形式による変形形状の表現」と「粒子法に基づく流体シミュレーション」の2つの技術に基づいている。

(1) 変形物体の表現はコンピュータグラフィックス(CG)の基本的な問題であり、機械分野における固体の大変形解析や医療分野における臓器の変形とも関連する技術である。陰関数形式は3次元形状の定義法の一つであり、位相変化を伴うような複雑な変形の表現に適する、あるいは空間的・時間的な滑らかさを確保できるなど、変形物体の表現における重要な特徴を持っている。この陰関数形式による形状表現に関して、研究代表者は研究開始当初、次のような予備的な結果を得ていた。

高速処理に特化した形状モデリング手法として、区分的多項式型の陰関数表現による3次元曲面の生成技術を開発した。陰関数表現は関数の値の符号によって物体の内外を定義する方法であり、この関数の評価のための計算量を削減することで形状の可視化の高速化に成功している。さらに、この形状表現技術を流体シミュレーションの障害物の表現に応用する手法の開発も行っており、障害物付近での流体計算の高速化にも貢献することが確認されている。

3次元形状の大変形解析をメッシュレス法により実装し、性能評価を行った。この大変形解析は陰関数形式で形状表現された変形物体にも適用可能である。大変形解析はメッシュレス法を利用しているため、有限要素法に比べて形状の内部構造の定義のための前処理を大幅に単純化できることが特徴である。

(2) 流体シミュレーションはだまかに格子法と粒子法の2通りのアプローチがあり、このうち流体を粒子群として表現する粒子法は機械・CG・生体・災害対策などの分野で実績のある技術である。近年では物理現象としての正確性を追求して多くの改良がなされ、実用的な手法として大きな進展が見られた。CG分野ではシミュレーションの計算速度も重要であり、流体シミュレーションと高品質描画を実時間で達成する画期的な手法が開発され、ユーザ操作を伴う流体シミュレーションが可能になるなど、新たな局面を迎えている。一方、流体の障害物の扱いは長年の課題となっており、この問題の解決法として研究代表者は次の予備的な結果を得ている。

陰関数曲面を障害物とする流体シミュレーションについて、障害物付近における流体運動の適切な定式化を目指し、複数の方法を開発、比較検討し、適切な障害物処理の方法を明らかにした。並行して、障害物付近での粒子法的高速処理についても一定の成果が得られている。

以上2分野での背景を踏まえ、変形物体の表現手法の確立と、流体シミュレーションにおける障害物の扱いを改善することはそれぞれの分野で重要であり、さらにこれらを組み合わせることで本研究課題の目的である「変形物体を障害物とする流体シミュレーション」の達成を目指す。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、「変形物体の形状表現」と「流体シミュレーション」の技術の組み合わせによる「変形物体を障害物とする流体シミュレーション」の実現である。変形物体の表現に陰関数曲面技術を、流体シミュレーションの手法に粒子法を適用することで、変形物体に適した流体シミュレーション手法の確立を目指す。具体的には、陰関数形式による変形物体の適切な表現手法の開発、変形する陰関数曲面を障害物としたときの流体シミュレーションの実現、および適切な可視化の実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究課題を達成するために、以下6点の要素技術についての問題解決に取り組んだ。

(1) 2つの異なる曲面を連続的に補間する曲面の自動生成

変形物体の表現のための一手法として、2つの異なる形状が与えられたときに、それを補間する形状を自動で生成するための手法の開発に取り組んだ。形状表現は陰関数形式とし、対応する部位を自動で検出することで適切な変形の表現を目指す。

(2) 3次元曲面形状の対話的変形

陰関数形式の形状の変形表現として、押し出し処理と曲げ変形処理の実現を目指す。ここではユーザによる対話的操作を想定し、高速処理が可能な手法の開発を目標とする。本研究課題ではこの変形物体を流体シミュレーションに利用するため、シミュレーション空間内の1点から障害物までの距離と、障害物表面の速度がわかるという前提で定式化を行う。

(3) 変形物体を含む空間での流体シミュレーション

障害物が陰関数形式で表現され、かつその物体が変形しない状況において、粒子法による流体シミュレーションの手法はすでにある。ここでは物体が変形する場合を想定し、流体シミュレーションの定式化を適切に行うことを目指す。具体的には、物体表面の移動速度を導出し、従来の粒子法シミュレーションに反映させることで実現を目指す。

(4) 部分的な流体の追跡のための粒子法

粒子法に基づく流体シミュレーションでは流体全体を粒子に置き換えることが基本

となる．ここでは流体の一部のみを粒子で表現し，流体全体を格子法で置き換えることで計算量の削減を図る．重要な課題は格子法で得られた物理量をどのように粒子に反映させるかということである．関連技術として流体付近の空気の情報を流体粒子に反映させる Ghost SPH と呼ばれる手法があり，これを応用することで目的達成を目指す．

(5) 障害物付近での流体運動の精度向上

前述のように，障害物が陰関数形式で表現された空間における粒子法流体シミュレーションはすでに実現されている．一方，障害物付近で流体運動の精度が落ちるといった課題があり，この解決を目指す．具体的な問題点は2つあり，1つは障害物付近で本来存在しない抵抗力が生じてしまうこと，もう1つは曲面を局所的に平面で近似する操作を含んでいることである．前者を解決するために，従来の抵抗力が生じる流体運動の定式化に代わる新たな定式化を導入する．後者を解決するために，平面で近似する従来法に代わる新たな手法として曲面形状をそのまま反映させつつ，計算量の増加を抑える計算手法を開発する．

(6) 粒子群の可視化と視認性の向上

流体シミュレーションの結果を目視で確認する際，粒子群の可視化が求められる．大量の粒子を高速に描画すること自体は技術的には難しくないが，奥行き感を含む立体構造を把握することが困難である．これを解決するには陰影を適切に描画に反映させることが必要である．本研究課題では，高速性を担保しつつ，粒子が他の粒子に落とす影（シャドウイング）と，粒子に囲まれた領域を暗くする処理（アンビエントオクルージョン）を導入することで立体構造の視認性を確保する．一般の形状では高速性を担保することが難しいが，描画対象が粒子（球体）に限定されることを利用し，球体独自のシャドウイングとアンビエントオクルージョンの描画手法を開発することで高速性を担保する．

4. 研究成果

前述の研究の方法の6項目に対応して，以下の成果が得られている．

(1) 変形形状の表現のための要素技術として，対応部位を考慮した曲面変形について，以下の成果が得られている．曲面変形の前段階として，2次元の曲線に対し適切な変形過程を生成するための技術開発を行った．2つの形状表面の数点について対応点を指定し，指定された対応点に基づいて形状全体の対応を自動的に決定，さらにその対応に基づく連続的な形状変形を実現した．現時点では2次元のケースにとどまっているが，3次元の曲面変形への拡張を前提として手法開発を進めているため，将来的に3次元の流体シミュレーションへに適用する際にも同様の手法が適用できる．

具体的には，2つの異なる曲面に対し，対応する部位を検出することで連続的な変形過程を自動的に生成することに一部成功している．我々の提案する手法では2物体間の変形過程を時刻のパラメータとして制御する．つまり2物体間の中間形状は初期形状と最終形状の間の時刻を指定することで定義され，時刻を連続的に変化させることで連続的に推移する変形形状が定義される．この変形的位置関係をベクトル場として定義し，検出された対応関係に基づいてベクトル場を適切に生成することが問題の本質であり，これが一定レベルで達成されたと考える．現状では対応関係の検出精度に課題が残っているが，その後の変形処理については良好な結果が得られている．

(2) 対話的なシミュレーションにおける3次元形状の変形では，簡易的な操作でユーザの意図を正しく反映できることが求められる．これを達成するために，3次元形状の押し出し処理と曲げ変形の技術を開発した．ここでは形状は陰関数形式で表現されるものとし，さらに，シミュレーションでの利用のために曲面までの距離を推定できるという条件下での技術開発を行った．押し出し処理に関してはハードウェアの特性を生かした高速アルゴリズムの導入に成功し，対話的な変形処理を達成した．曲げ変形に関しては高速化が十分でないという点で課題が残ったが，単純なユーザ操作により適切な曲げ変形が行えることを2次元の簡易的な実験を通して確認した．具体的には，ユーザが指定した関節情報に応じて一つの形状モデルを2つの形状モデルに自動的に分割し，一方を傾けた状態で再度1つの形状モデルに融合するような理論的枠組みを構築することで問題解決を図った．

(3) 変形する障害物を含む空間での流体シミュレーションのための要素技術として，流体シミュレーションを実行しながら障害物に対話的に変形するための技術開発を進めた．2次元において性能評価を行い，その後，3次元への拡張も行っている．障害物を変形した際には障害物と流体との衝突処理が問題となり，特に流体粒子と障害物の距離の推定が重要であるが，我々は高精度な距離推定が可能な計算モデルを開発し，対話的な流体シミュレーションにおいて効果的に機能することが実験的に確かめられた．対話的処理のためには変形の処理速度も重要であり，計算コストを抑えるために我々は高速処理に適した独自の形状表現手法を開発した．この形状表現手法ではユーザのマウス操作に基づく障害物の追加・削除を高速に処理し，特に2つの形状の融合や分離といった位相変化を伴う変形をサポートしている点が大きな

特徴である。

2次元の流体シミュレーションにおいてはシミュレーションの実行中に対話的に障害物を操作できることを確認した。現状では簡易的なシステムであるものの、ユーザが障害物を操作し、ユーザ操作の結果をシミュレーションに反映させることができている。また、3次元においても実装を行い、障害物を対話的に変更できることが確認されている。障害物の形状は閉曲線または閉曲面が前提であり、流体のシミュレーションにおいて曲線の障害物が水の流れに与える影響を定式化し、この定式化が適切に機能することが確認されている。速度については2次元では十分確保されているが、3次元ではさらなる高速化が望まれる。

(4) 流体の追跡問題に対し、本研究課題では追跡対象となる小領域のみを粒子法で計算する手法の開発を行った。これは追跡精度の向上を目指した新しい試みであり、簡易的な問題に対して手法の有効性を確認した。この技術の基本的なアイデアは、広域的な流体の運動を計算量の面で有利な格子法で計算し、その一部分の流体の運動を追跡の面で有利な粒子法で計算するというものである。広域的な情報を局所的な粒子に反映させるために、情報伝達の媒体となる仮想粒子という概念を導入し、その仮想粒子を自動で生成することにより局所的な流体粒子の運動の計算を可能とした。

(5) 流体運動の計算では障害物付近での運動のモデル化が重要であり、本研究課題ではこの運動モデルの適切化を目指した。具体的には、流体が障害物付近で密着する効果を追加し、さらに流体と障害物に働く摩擦を適切に反映させることで、より実態に合った流体運動をモデル化し、陰関数形式の障害物において流体運動の精度向上が確認された。この問題については障害物の表面に対して垂直な成分と水平な成分で異なる運動としてモデル化することが重要であり、陰関数形式の障害物において適切なモデル化が実現されている。

(6) 対話的なシミュレーションにおける可視化では描画速度と立体構造の視認性が要求される。本研究課題では、流体粒子の描画について、速度と立体構造視認性を両立する描画手法を開発した。立体構造の視認性のためにCGの手法であるアンビエントオクルージョンとシャドウイングの効果を付与し、これを描画用のハードウェアに適したアルゴリズムとして記述することで高速性も達成している。高速化のポイントは描画対象が球体に限定されることであり、球体独自のアンビエントオクルージョンとシャドウイングのモデル化に成功した。実験的にもその有効性を確認することができたため、高いレベル

で目的を達成できたと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

[1] Y. Kanetsuki, J. C. Wells, S. Nakata, Efficient local smoothed particle hydrodynamics with precomputed patches, *International Journal of Computer Mathematics*, pp. 1-9, 2018. (査読有)
doi: 10.1080/00207160.2018.1425799

[2] Y. Kanetsuki, J. C. Wells, S. Nakata, Smoothed particle hydrodynamics method with partially defined fluid particles, *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2016. (査読有)
doi: 10.1002/mma.4252

[3] T. Itoh, S. Nakata, Fast generation of smooth implicit surface based on piecewise polynomial, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 107, pp. 187-199, 2015. (査読有)
doi: 10.3970/cmcs.2015.107.187

[4] Y. Kanetsuki, S. Nakata, Moving particle semi-implicit method for fluid simulation with implicitly defined deforming obstacles, *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering*, Vol. 2, pp. 63-75, 2015. (査読有)
doi: 10.15748/jasse.2.63

[5] S. Nakata, Y. Sakamoto, Particle-based parallel fluid simulation in three-dimensional scene with implicit surfaces, *Journal of Supercomputing*, Vol. 71, pp. 1766-1775, 2015. (査読有)
doi: 10.1007/s11227-014-1323-6

〔学会発表〕(計6件)

[1] S. Nakata, Y. Yokoyama, T. Itoh, G. Chen, S. Ikuno, Interactive finite difference time-domain simulation for designing multichannel photonic crystal waveguides, *International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2017.

[2] Y. Kanetsuki, S. Nakata, Acceleration of particle based fluid simulation with adhesion boundary conditions using GPU, *AsiaSim2017*, 2017.

[3] Y. Kanetsuki, J. C. Wells, S. Nakata, Efficient local smoothed particle hydrodynamics with precomputed patches, *International Conference Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering*, 2017.

[4] H. Fujita, Y. Mitsutome, K. Watanabe, S. Nakata, Automatic generation of 3-dimensional shape model having the structure of foamed aluminum, *JSST Annual Conference International Conference on*

Simulation Technology, 2016.

[5] G. Chen, T. Itoh, S. Nakata, S. Ikuno, Interactive shape optimization of waveguide for electromagnetic wave using GPU-OpenGL, JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, 2016.

[6] K. Makishima, S. Nakata, Real-time particle-based fluid simulation with interactively deformable obstacles, JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, 2015.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

仲田 晋 (NAKATA, Susumu)
立命館大学・情報理工学部・教授
研究者番号 : 00351320

(2)研究協力者

金築 康友 (KANETSUKI, Yasutomo)