

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760066

研究課題名(和文) 3次元曲面モデリングを利用したメッシュフリー大変形解析とGPU並列化

研究課題名(英文) Meshfree large deformation analysis with three-dimensional shape modeling technique and its parallelization on GPU

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：メッシュフリー解析は物体の運動のシミュレーション技術であり、弾性体の変形や流体の運動を計算することができる。本研究課題では複雑な形状を含む空間でのシミュレーションを想定し、3次元形状モデリング技術を適切に組み合わせたメッシュフリー解析手法の開発を行った。大変形解析においてはメッシュフリー法と形状モデリング技術をそれぞれ適切に選択するとともに、独自の技術を新たに加えることで効率的な並列アルゴリズムの構築に成功している。流体についても適切な形状表現技術を採用し、障害物付近での流体運動の計算手法を新たに開発することで効率的な並列計算アルゴリズムを構築することができた。

研究成果の概要(英文)：Our research project is focused on the meshfree method for large deformation analysis of three-dimensional elastic solids and that for fluid simulation with three-dimensional obstacles. The aim of this project is to develop a meshfree simulation method in three-dimensional scenes with complex geometries. For this purpose, we appropriately combine the meshfree method with the three-dimensional shape modeling technique and develop a new algorithm for effective parallel computation on graphics processing units. We apply this idea to elastic solids for large deformation analysis and obstacles for fluid simulation.

研究分野：数値解析

キーワード：シミュレーション コンピュータグラフィックス

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題は主に「(1)メッシュフリー解析法」と「(2)3次元曲面モデリング法」の2つの独立した技術を背景としている。

### (1)メッシュフリー解析法

偏微分方程式の数値解法であるメッシュフリー解析法は1994年の初期の論文以降、数多くの研究がなされ、熱力学、電磁気学、構造力学などの多くの問題でその有用性が示されてきた。この手法は従来の有限要素法で必須であったメッシュ生成処理が不要、変形処理に有利などの特徴を持ち、その優位性を生かして様々な実用的な問題にも適用されている。その一方で計算コストが問題になるケースが多く、特に大規模問題になりやすい3次元の問題では適用範囲が限られていた。このような背景を踏まえ、申請者らはメッシュフリー法の高速計算アルゴリズムの提案、および並列計算による高速化の実現など、メッシュフリー法の計算量の問題解決にする研究を進めてきた。この高速化手法の有効性は構造解析や熱伝導解析などの実用的な問題においても確かめられており、他の問題への拡張も可能と考えられる。

### (2)3次元曲面モデリング法

コンピュータグラフィックスの分野では1990年代後半以降、実物体をレーザ計測して3次元曲面モデルを生成する手法が盛んに研究されている。最近の研究では数千万点の計測点群からの自動曲面生成も実現され、簡易的な3次元曲面モデリングを目的とした陰関数曲面の利用も提案されているが、その一方で、描画処理が遅いという欠点を持つ。申請者らはこれまで描画処理の高速化に関する研究を行い、リアルタイムでの描画を実現している。また、陰関数曲面モデリング技術を物理量の可視化に応用し、メッシュ構造を持たない分布量の可視化での有効性を示した。

以上の2つの技術を組み合わせることで、「実測値に基づくメッシュフリー構造解析」が可能となる。これまで申請者らは線形弾性解析を対象としたケースでは一部実現済みであるが、大変形を伴う非線形解析への適用は未完成であった。

## 2. 研究の目的

本研究課題は3次元曲面技術の手法を利用した大変形を伴うメッシュフリー解析の実現とそのGPU並列化アルゴリズムの開発を目的としている。これを実現するために、メッシュフリー解析法と3次元曲面モデリング法においてそれぞれ以下の技術を開発する。

### (1)メッシュフリー解析法

弾性体の大変形解析では物体の微小変化の変位を繰り返し計算する必要がある。特にメッシュフリー法では数値積分の計算量が多くなるためにアルゴリズムの工夫が必要となる。本研究課題においてはこの数値積分計算のアルゴリズムをGPU並列化に適した形

で構築する。さらに流体の運動についても3次元曲面モデリングとの組み合わせに適した計算手法、ならびにGPUに適した並列アルゴリズムを開発する。

### (2)3次元曲面モデリング法

メッシュフリー法に基づく弾性体や流体のシミュレーションに適した曲面モデリング技術の開発を目的としている。具体的にはメッシュフリー解析において複雑な形状を表現できる、境界付近において計算コストが抑えられる、あるいは並列化に適するという条件を満たす形状表現の手法を開発する。また、シミュレーションだけでなく形状の可視化手法についても高速性を満足する手法の開発が必要となるため、本研究課題の目的の一つとしている。

## 3. 研究の方法

### (1)メッシュフリー解析法

#### 弾性体のメッシュフリー大変形解析

本研究で開発するメッシュフリー法は「アルゴリズムとしての高速性」「効率的な並列計算」の2つの要求があり、この要求を満たすメッシュフリー法のアルゴリズムを新たに開発する必要がある。論点は以下の3つである。

#### •適切なメッシュフリー法は？

本研究課題で対象とする大変形解析においては、我々の研究グループが開発した修正 Radial Point Interpolation Method (RPIM) が適切と考える。非線形の問題を解くためには弾性体の領域における定積分を繰り返し計算する必要であり、被積分関数の演算量がボトルネックとなるという性質がある。Radial Point Interpolation に基づくメッシュフリー法は被積分関数の評価の計算コストが高く、この意味で非線形問題には適さないという問題が起こる。一方、修正 RPIM では被積分関数の評価に必要な計算コストを抑えることができ、本研究課題で対象とする非線形解析においても効率化が図れると考える。

#### •大変形解析の変位情報の扱いは？

物体の変位の表現法には「トータルラグランジュ法」と「更新ラグランジュ法」の2通りがあり、数学的には等価であるが、計算効率は変わりうる。本研究課題で採用するメッシュフリー法は物質内部に分布させた節点の位置に基づいて計算する手法であり、この場合は物質の基準位置が初期節点で固定される「トータルラグランジュ法」の方が計算効率の面で適切と考える。

#### メッシュフリー法に基づく流体シミュレーション

メッシュフリー法に基づく流体シミュレーションはこれまで数多くの手法が提案されてきた。本研究課題での主たる論点は障害物付近での流体運動のモデル化である。した

がって流体の離散化についてはもっとも基本的な Smoothed particle hydrodynamics (SPH) 法に加え、流体の非圧縮性を考慮した Moving-particle semi-implicit (MPS) 法の 2 種類を採用し、陰関数形式で表現された障害物が存在する空間での流体シミュレーションを実現する。

通常、流体シミュレーションでは障害物は粒子群または多面体として表現され、基本的には流体粒子と障害物粒子の 2 種類の粒子を用いて流体粒子の運動が決定される。障害物が多面体の場合は障害物粒子が定義されないために新たなモデルが必要となるが、障害物の領域に架空の障害物粒子を配置した場合と同様の作用を流体粒子に与える手法がすでに提案され、解決されている。本研究課題では障害物は陰関数形式で定義されており、既存の多面体のケースと同様の解決法を採用することとする。ただし、陰関数形式では流体粒子に近い障害物の位置の特定が難しいため、障害物までの距離と向きを近似的に求める手法を導入することで問題の解決を図る。

もう一つの課題として、障害物が変形している状況での流体シミュレーションの実現がある。障害物が変形する場合、流体シミュレーションのプロセスでは障害物の変形速度が必要であり、この障害物の変形速度を推定することで流体粒子の運動を適切に決定できると考える。

#### (2)3次元曲面のモデリングとレンダリング

弾性体や流体のシミュレーションにおいて、物体形状を陰関数形式として定義することが本研究課題の特徴である。この場合、3次元の形状を正しく決定すること、および決定した3次元の形状を正しく可視化することが求められる。

曲面の可視化について、本研究では直接可視化と点群可視化の2つのアプローチがある。直接可視化では描画のための計算コストの削減が重要な課題であり、さらに適切に並列化することでインタラクティブな操作ができるレベルでの高速描画の実現が期待される。このために本研究課題では曲面が存在する空間を矩形の小領域に分割し、各矩形領域において単純な多項式型で形状を表現する手法を提案する。関数の単純化により計算コストの削減を図り、さらに並列化に適したアルゴリズムを構築することで高速描画を実現する。

もう一つのアプローチとして、曲面上に密に生成された点群を描画する手法がある。この場合、密な点群を高速に生成することが求められるため、前述の多項式型の曲面表現を採用することでアルゴリズムとしての高速化と並列化効率の向上を図る。

本研究課題ではさらに曲面モデリングとしてインタラクティブに形状変形操作を行いながら力学的なシミュレーションを実現

するための技術も開発している。ユーザ操作に沿った形状変形を陰関数形式の特徴を利用することで実現し、形状変形と粒子運動の同時計算が可能になると考える。

#### 4. 研究成果

##### (1)メッシュフリー解析法

###### 弾性体のメッシュフリー大変形解析

本研究課題ではメッシュフリー法として修正 RPIM を採用することでアルゴリズムとしての計算量の削減と並列化効率の向上を図るとともに、変位の表現としてトータルラグランジュ法を採用することで時系列的なシミュレーションの高速化を図る。なお、並列計算は GPU 上で実装している。図 1 は大変形解析の例である。GPU を利用した並列計算により 14 倍程度の高速化を達成でき、時系列的な変形を効率的に計算できることが確認された。

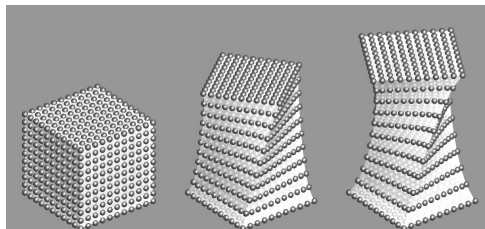


図 1. 修正 RPIM に基づくメッシュフリー大変形解析

##### メッシュフリー法に基づく流体シミュレーション

障害物が曲面の場合について、流体粒子の運動モデルを構築した。例えば流体粒子が障害物付近にある図 2 の状況において、障害物上の最近傍点を求め、この最近傍点を基準に障害物内部の仮想の粒子を配置することで流体粒子の運動を決定している。なお、最近傍点を近似的に求めるための定式化も導入している。なお、この仮想粒子の影響は前処理として計算可能であり、シミュレーションの段階では仮想粒子を動的に配置する必要はないため、アルゴリズムとしての計算の増加は相対的に少ない。最近傍点の決定には曲面を表す関数の評価が必要となるが、多項式型の単純な関数を採用することで計算量のロスを抑えることができる。また、多項式型の関数を利用することにより効率的な並列アルゴリズムの構築を可能としている。

形状が複雑な障害物を陰関数形式で表現し、前述の方法で流体シミュレーションを行った結果を図 3 に示す。我々の開発した粒子運動のモデルが適切に機能していることが確認され、さらに並列化によって 18 倍程度の高速化が達成された。なお、粒子法としては前述の SPH と MPS の両方を採用し、それぞれについて粒子運動の定式化を行っている。さらに、MPS に関しては障害物が変形する場合についても適切なシミュレーションの実現が確認された。

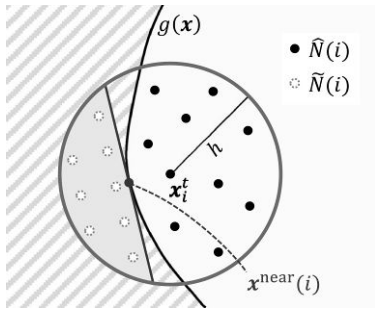


図 2. 流体粒子付近における仮想粒子配置と障害物上の最近傍点

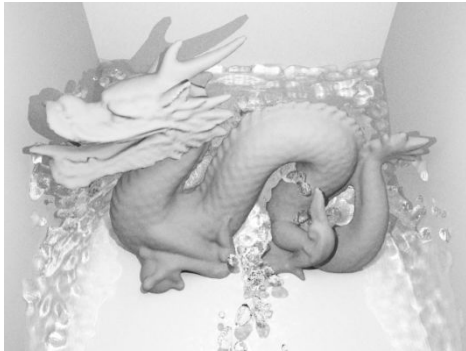


図 3. 流体シミュレーションの結果

(2)3次元曲面のモデリングとレンダリング  
 弾性体や流体のシミュレーションにおいて、物体形状を陰関数形式として定義することが本研究課題の特徴である。この場合、3次元の形状を正しく決定すること、および決定した3次元の形状を正しく可視化することが求められる。曲面形状の直接可視化については、関数表現の簡略化と並列化による高速化が達成された。これにより、ユーザが形状をインタラクティブに操作することが可能となっている。もう一つのアプローチは形状表面に点群を配置することによる可視化手法である。この点群配置についても直接描画と同様のアプローチで高速化を達成できた。さらに、ユーザが曲面形状をインタラクティブに変更しながら流体シミュレーションを行う技術の開発にも成功した。本研究課題では2次元でのシミュレーションにとどまっているが、原理的には3次元にも拡張可能な技術である。

#### 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3件)

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, 査読有, 2015, 掲載確定.  
S. Nakata, Y. Sakamoto, "Particle-

based parallel fluid simulation in three-dimensional scene with implicit surfaces," Journal of Supercomputing, 査読有, Vol.71, No.5, pp.1766-1775, DOI: 10.1007/s11227-014-1323-6, 2015.

S. Nakata, S. Aoyama, R. Makino, K. Hasegawa, S. Tanaka, "Real-time isosurface rendering of smooth fields," Journal of Visualization, 査読有, Vol.15, No.2, pp.179-187, DOI: 10.1007/s12650-011-0119-5, 2012.

〔学会発表〕(計7件)

Y. Kanetsuki, S. Nakata, "Particle based fluid simulation with implicitly defined deforming obstacles," International Conference on Simulation Technology, 2014/10/29, 北九州国際会議場(福岡・北九州).

Y. Kanetsuki, Y. Sakamoto, S. Nakata, "Moving particle semi-implicit method for fluid simulation with implicitly defined obstacles," International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, 2014/8/30, マドリード(スペイン).

S. Nakata, Y. Sakamoto, "Particle-based parallel fluid simulation in three-dimensional scene with implicit surfaces," International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering, 2014/7/5, カディス(スペイン).

M. Iwasaki, S. Nakata, S. Tanaka, "GPU-accelerated uniform sampling of implicit surfaces," 13th International Conference Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering, 2013/6/24, アルメリア(スペイン).

S. Nakata, Y. Sakamoto, "GPU accelerated fluid simulation with implicit surface obstacles," International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, 2013/5/25, シアトル(アメリカ).

S. Nakata, S. Ikuno, "Meshfree large-deformation simulation of solids using graphics processing units," The Third International Conference on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering, 2013/3/25, ペーチ(ハンガリー).

S. Nakata, "Fast meshfree radial point interpolation method for large deformation analysis," ICCES Special

Conference on Meshless & Other Novel  
Computational Methods, 2012/9/4, ブ  
ドヴァ (モンテネグロ).

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