

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11928

研究課題名（和文）3次元形状の陰関数表現とシミュレーションへの応用

研究課題名（英文）Implicit representation of three-dimensional surfaces and its application to simulation

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） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目的は力学現象のシミュレーションに適した3次元形状表現の確立である。特に3次元曲面形状にかかわる基盤技術として複雑な3次元形状の生成技術と高速描画技術にかかわる取り組みを進めてきた。さらにその応用として、材料工学分野でのシミュレーションへの活用を見据えた3次元形状生成の技術開発に取り組み、特に内部に乱雑な気泡を含む発泡金属と呼ばれる材料の形状モデリング技術について、複数の新規の手法を開発、提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料工学を含む工学の広い分野では物理現象のシミュレーションが重要な役割を果たしており、シミュレーションの対象となる物体の3次元形状を正確に表現することが精度を決める主要因の一つとなっている。本研究は複雑な3次元形状をコンピュータ上で正確に表現すること、およびその形状を画面上で高速に描画することを目的としており、この技術を応用することで各分野におけるシミュレーションの高度化の促進を期待するものである。

研究成果の概要（英文）：The main focus of this work is to develop a method for representing three-dimensional surfaces in a manner suitable for physics-based simulation of three-dimensional objects like finite element method. More specifically, it targets principal issues related to data reduction and fast visualization of complex surface models. Additionally, the technique for generating three-dimensional surfaces has been developed aiming applications in material engineering simulations. In particular, several new methods have been introduced for shape modeling of materials known as foamed metals, which consist of solid metal with randomly distributed small holes.

研究分野：情報工学

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 形状モデリング

1. 研究開始当初の背景

有限要素法や粒子法のようなシミュレーション技術は、さまざまな物体の力学的分析に利用され、機械設計や材料特性分析において重要な役割を果たしている。一般に、解析対象の多くの形状のバリエーションを用意することで、形状と力学的特性の関係の分析が可能となる。3次元形状の表現はCAD形式が一般的であるが、場の関数に基づく形状表現には「距離の推定」「融合や穴あきのような位相変化」「形状を段階的に変化させるオフセット処理」といったシミュレーションに有利な性質が備わっている。粒子法流体シミュレーションでは障害物との距離を利用した効率的な計算ができるという利点を持ち、あるいは多くの気泡を有する発泡金属と呼ばれる材料の有限要素解析では複雑形状の生成や形状の制御が可能という利点を持つため、工業用途のいくつかの場面では強力なツールとなりえる。この特徴をシミュレーションに活用するためには「データ量の多さ」「描画の遅さ」「有限要素メッシュへの変換技術の難しさ」という課題があり、この3つの課題を解決することが望まれる。

一つ目は、少ないデータ量で複雑形状を表現できるかという問いである。複雑形状の表現にはデータ量の問題が付きまとうし、そもそも場の関数表現では形状表面だけでなく空間全体の情報が必要という根源的な要因があるためにデータ量が多くなりやすい。また、曲面形状は局所的な形状情報の組み合わせとして全体が構成されるため、形状の複雑さに応じてデータ量が増えしてしまう。

二つ目は、生成された複雑形状をリアルタイム描画できるかという問いである。ユーザが3次元形状を対話的に操作するためにはリアルタイム描画が必須であるが、場の関数で表現された3次元形状はリアルタイム描画に適さない。リアルタイム描画の条件は描画処理の単純化と効率的な並列処理の2つであるが、現状の技術ではいずれも十分に達成されているとは言えない。この2つの条件を満たすような描画アルゴリズムを構築できるかが問われている。

三つ目は、場の関数で表現された3次元形状から有限要素メッシュを生成できるかという問いである。例えば、発泡金属の形状モデリングでは気泡による穴あきのような複雑な変形も可能となるが、これを有限要素解析に活用するためには複雑形状を分割する有限要素メッシュを作る必要がある。3次元CADからの有限要素メッシュ生成のような従来手法ではなく、場の関数として表現された形状からいかに有限要素メッシュを生成するかが問われている。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、場の関数として定義される3次元曲面の表現とシミュレーションへの応用に関する技術開発である。具体的には、「(1) 場の関数として定義される3次元曲面を少ないデータ量で生成すること」「(2) 場の関数として定義される3次元曲面をリアルタイム描画すること」「(3) 発泡金属を想定した3次元形状モデリング」「(4) 場の関数として定義された発泡金属形状の多面体形状への変換」である。

3. 研究の方法

(1) 場の関数として定義される3次元曲面は、曲面上の情報だけでなく、空間的に分布する値を記録する必要があり、そのためにデータ量が多くなりやすいという課題がある。こうした状況では空間の適応的分割の効果が期待されるが、分割された各セルの境界面において場の関数が満たすべき数学的な制約がある。したがって、この問題の本質は、セル境界面で数学的な制約を満たす場の関数をどのように生成するかという点にある。本研究課題では、境界での連続性と滑らかさが担保されるスプラインという古くから知られている関数の性質を活用し、独自の適応的空間分割に対応したアルゴリズムを開発することでこの問題の解決を図った。これにより、複雑な曲面形状においても表現力を保ちつつデータ量を抑制することが期待される。

(2) 場の関数として定義された3次元曲面のレンダリングでは、典型的なCGの描画手法を適用することができないため、場の関数に特化した手法が必要となる。曲面描画の問題は、カメラからスクリーン上の各画素に伸びる直線と、前述の曲面との高低を求める問題ととらえることが可能であり、つまり直線と曲面の交点をいかに効率的に特定できるかがカギとなる。前述のように、多面体であることが前提となっている従来のCG描画技術は今回の問題には適用できないが、空間分割された直方体セルは多面体構造を持っているため、曲面を含む直方体セル自体を高速描画することは可能である。したがって本研究課題では曲面を含む直方体セルを従来のCG描画技術で投影したうえで、直方体セル内の曲面を探索する方法で目的達成を目指した。これにより、従来のCGの高速性と、曲面描画の正確性の両立を図る。なお、この考え方を実現するためにはグラフィックスハードウェアを活用する必要があり、グラフィックスハードウェアに特化したデータ構造の開発も同時に進めた。

(3) 発泡金属形状を表現する方法には多面体として表現する方法と場の関数として表現する方法の2通りがある。気泡の大きさなどの条件によって形状が大きく変化する発泡金属形状にお

いては通常の多面体表現では辺の接続情報の扱いが複雑になりやすい。一方、場の関数としての表現では接続情報という概念がなく、例えば気泡が大きくなることで壁面に穴が開くような変形が発生したとしても比較的制御が容易であるという特徴を持つ。したがって、本研究では場の関数による形状表現を採用することとした。また、発泡金属形状のバリエーションをユーザが制御できるようにするために、壁面の厚さの変更に加え、気泡同士の境界にできやすい金属のかたまり（以降、これを節とよぶ）の大きさの変更方法を提案した。

(4) 発泡金属形状は柱状の構造や面状の構造を網目のように組み合わせた複雑な形状を持ち、鋭利なエッジ状の形状も多く含んでいる。有限要素解析を行うためには形状を正確に多面体に変換する必要がある。場の関数として定義された形状を多面体に変換する手法はいくつかあるが、前述な鋭利なエッジ状の形状を含む複雑形状を多面体として抽出するためには専用の手法が必要となる。本研究課題で採用する発泡金属形状はポロノイ分割と呼ばれる空間分割手法を利用する手法であり、結果的に発泡金属の気泡に相当する空間はポロノイ分割と一対一対応の関係を有している。本研究課題ではこのポロノイ分割との対応関係を利用することで、気泡単位で多面体に変換する手法を開発し、これによって鋭利なエッジの再現や複雑形状を正確に反映させた多面体生成の手法の実現を目指した。

4. 研究成果

(1) 複雑な 3 次元曲面形状を場の関数として表現する場合のデータ量の削減について、本研究課題の取り組みを通して一定の解決を図ることができた。基本的な考え方としては 3 次元空間を適応的に分割するというシンプルな方針に基づくが、分割領域の境界において数学的な整合性をとれるという点が本提案手法のポイントであり、3 次元形状の表現力を失うことなくデータ量を大きく削減することに成功している。この手法では場の関数の数学的な性質を利用しつつ、コンピュータ上で適切に動作する関数生成アルゴリズムを考案したものであり、結果的に形状表現の精度を維持したままデータ量を大きく削減できることがいくつかのテストケースで確認されている。

(2) 場の関数として表現された 3 次元曲面を画面上で高速描画するために、適切なデータ表現の手法と描画処理の手法を開発した。従来の CG 技術では多面体の高速描画は可能であるが、場の関数として表現された形状の描画には適していなかった。本研究課題での手法では、曲面の表面を囲む多面体を用意し、その多面体を従来の CG 技術で高速描画処理を行ったあと、各画素において本来の曲面位置を探索するという考え方に基づいている。この考え方は従来の高速描画の技術を活用しつつ、本来の目的である曲面形状の描画を実現するものであり、このアイデアにより研究目的が一定水準で達成されたといえる。高速性と正確性の評価は複数のテストケースで行っており、高解像度スクリーンでのリアルタイム描画が可能であること、および形状の細部の再現性も高いことが確認されている。

(3) 発泡金属形状の表現については、形状表現の自由度と制御に関する課題についていくつかの改善を行うことができた。実際の発泡金属形状では、壁面の厚みや気泡同士の境界に相当する節の形状が、気泡の乱雑さによって大きく変化するという特性を持っており、この形状変化により材料特性も大きく変化する可能性がある。こうした形状のバリエーションをパラメータ制御することで、さまざまな特性を持った発泡金属形状の生成が可能となる。壁の厚みの制御については、形状のバリエーションとしてはいくつかの条件を課す必要があるが、そうした条件下においては、一度生成した発泡金属形状に対して、壁の厚みと節の大きさを表すパラメータをそれぞれ設定することで、全体の構造を保ちつつ壁の厚みと節の大きさを変更することが可能となっている。ここでは壁の厚みと節の大きさをそれぞれ独立に制御できることがポイントであり、実験的にも一定の再現性が確認されている。

(4) 発泡金属材料のシミュレーションのための形状モデリング技術については、前述の場の関数による形状生成が効果的であることが知られている。この形状を有限要素解析につなげるためには、場の関数として定義された発泡金属形状を三角形メッシュとして抽出する必要がある。本研究課題では、場の関数である発泡金属形状から、体積を持つ一つの多面体として形状抽出する方法、および体積を持たない平面の集合として形状抽出する手法の 2 つについて、幾何学的な性質を踏まえたアルゴリズムの開発を行い、その有効性を一定確認することができた。この 2 つの方法は有限要素解析におけるソリッドモデルおよびシェルモデルと呼ばれる形状表現に対応するものであり、いずれもシミュレーションへの応用において重要な役割を果たすものである。

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 Hanaoka Yuya, Itoh Taku, Tateyama Kohei, Nakata Susumu, Watanabe Keiko	4. 巻 132
2. 論文標題 Performance Evaluation of Electromagnetic Shield Constructed from Open-Cell Metal Foam Based on Sphere Functions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computer Modeling in Engineering & Sciences	6. 最初と最後の頁 43 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32604/cmesc.2022.016831	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 Ren Jiayu, Fujita Yoshihisa, Nakata Susumu	4. 巻 119
2. 論文標題 Interactive Restoration of Implicitly Defined Shapes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computational and Experimental Simulations in Engineering	6. 最初と最後の頁 165 ~ 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-02097-1_13	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 Ren Jiayu, Fujita Yoshihisa, Nakata Susumu	4. 巻 136
2. 論文標題 Interactive Restoration of Three-Dimensional Implicit Surface with Irregular Parts	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computer Modeling in Engineering & Sciences	6. 最初と最後の頁 2111 ~ 2125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32604/cmesc.2023.025970	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 Hanaoka Yuya, Itoh Taku, Tateyama Kohei, Nakata Susumu, Watanabe Keiko	4. 巻 8
2. 論文標題 Shape Modelling of Metal Foams of Open/Closed States and their Intermediates by Implicit Function	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 143 ~ 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15748/jasse.8.143	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Naoki Hamano, Taku Itoh, Kohei Tateyama, Susumu Nakata, Keiko Watanabe
2. 発表標題 Modeling of Metal Foams with Adjustable Wall Thickness in Targeted Direction
3. 学会等名 42nd JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Hamano, Taku Itoh, Kohei Tateyama, Susumu Nakata and Keiko Watanabe
2. 発表標題 Shape Modeling of Metal Foam Based on Implicit Surfaces Generated from Deformed Polyhedra
3. 学会等名 JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 工藤 雅也, 藤田 宜久, 仲田 晋
2. 発表標題 適応的な区分的多項式型陰関数曲面の生成
3. 学会等名 日本応用数理学会 2021年度 年会
4. 発表年 2021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
---------	---------