

論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨の公表

学位規則第 8 条に基づき、論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

フリガナ 氏名 (姓、名)	ブイ ティエン タイン BUI Tien Thanh	授与番号 甲 1534 号
学位の種類	博士(工学)	授与年月日 2021年 9月 25日
学位授与の要件	本学学位規程第 18 条第 1 項該当者 [学位規則第 4 条第 1 項]	
博士論文の題名	Boundary Treatment for Particle-based Fluid Simulation with Solid Wall and Open Boundary Conditions (粒子法流体シミュレーションにおける固定境界条件と開境界条件の設定方法)	
審査委員	(主査) 仲田 晋 (立命館大学情報理工学部教授)	田中 覚 (立命館大学情報理工学部教授)
	陳 延偉 (立命館大学情報理工学部教授)	
論文内容の要旨	<p>本論文の主要なテーマは、粒子法に基づく流体シミュレーションにおいて、障害物の影響を表す固定境界条件、および流体の流入流出を表す開境界条件の設定方法である。これらの境界条件の設定方法は粒子法流体シミュレーションの精度と計算コストに大きく影響するため、適切に設定することが求められる。本論文はこれらの境界条件に関わるいくつかの課題について、解決法を提示するものである。第 1 章では研究の背景と意義を述べ、第 2 章で粒子法流体シミュレーションの境界条件の現状をまとめている。第 3・4・5 章ではそれぞれ「(1) 開境界条件の計算モデルの複雑さとそれに伴う計算コスト」「(2) 陰関数形式で表現された障害物表面に沿った障害物粒子の生成」「(3) 陰関数形式で表現された障害物付近での粒子運動を効率的に決定する計算モデルの構築」の 3 つの課題に焦点を当て、解決法を提示している。第 6 章で研究成果をまとめている。</p> <p>(1) 開境界条件を含む流体シミュレーションに対し、流入領域内での流体粒子の運動を決定するための計算モデルを提案した。提案手法は局所的な周期境界条件を導入することで流入粒子の再配置を回避しつつ、効率的かつ高精度な計算を可能としている。さらに、流入領域の流体粒子の物理量推定モデルとして粒子法の内挿法を導入することで従来の複雑な外挿計算を不要とし、効率的な計算を可能としている。</p> <p>(2) 障害物形状が陰関数曲面として表現される流体シミュレーションにおいて、障害物表面に層状の障害物粒子を生成する手法を提案した。この手法は陰関数形式の特性である射影の理論を応用することで層状粒子を生成しており、障害物の影響による流体運動を適切に決定することを可能としている。</p> <p>(3) 障害物形状が陰関数曲面として表現される流体シミュレーションにおいて、流体粒子の偏りを防ぐ粒子シフト法の適用方法を提案した。この手法は粒子シフト法の影響の強さを粒子の場所に応じて制御することで実現される。従来の気体粒子に基づく手法に比して大幅に単純化された計算モデルであり、計算コストの削減に寄与している。</p>	

論文審査の結果の要旨

本論文の特徴は、粒子法に基づく流体シミュレーションにおける境界条件について、流体運動の妥当性と計算コストに関するいくつかの問題を解決している点にある。先行技術の課題として、計算領域の外側からの流入条件のモデル化、陰関数形式で表現される壁面上の障害物粒子の生成、流体が壁面に付着する現象のモデル化の3種類の問題を挙げており、それぞれ改善策が提案されている。

流入条件については、従来、大域的な周期境界条件、または流入部分と流出部分の計算領域を追加することで外部から流入する流体を表現することが一般的であるが、前者は流体運動の不安定性を招きやすいという問題、後者は流入領域における物理量推定に伴う計算の複雑さの問題がある。本論文では局所的な周期境界条件を導入することで不安定性の解消を図り、また、粒子法の内挿法の考え方に基づく物理量推定によって計算の簡略化が図られている。提案手法の有効性は流入と流出を伴う流体シミュレーションによって確認され、精度を保ったまま計算の簡略化が可能であることが示されている。

陰関数形式の壁面上の障害物粒子の生成については、陰関数形式における距離推定と法線推定の理論に基づき、曲面付近の粒子を曲面上に射影する手法が提案されている。また、粒子法では表面内側の一定範囲について層状の流体粒子を配置する必要があり、これも前述の法線推定の理論に基づく壁面粒子の多層化手法が提案されている。これにより、曲面に沿った層状の障害物粒子の生成が可能となり、生成された障害物粒子において流体粒子の適切な運動が得られることが確認されている。

流体が壁面に付着する現象については、従来は空気粒子を導入することで実現されていたが、空気粒子の導入に伴う計算コストの増加が問題となっていた。これを解決するために、本論文では粒子配置の均等化技術を応用した手法が提案され、空気粒子を用いずに流体粒子のみで壁面への付着効果が実現されている。具体的には、全流体粒子のうち障害物付近にある粒子を抽出し、その粒子に対して粒子配置均等化の影響を壁面からの距離に応じて付与することで、壁面付近に留まる効果を実現している。提案手法の粒子運動の妥当性はいくつかのシミュレーションにおいて確認されており、空気粒子を用いずに付着効果を付与できることが示されている。

公聴会での口頭試問結果を踏まえ、本論文は本研究科の博士学位論文審査基準を満たしており、博士学位を授与するに相応しいものと審査委員会は一致して判断した。

試験または学力確認の結果の要旨

本論文の審査に関して、2021年8月18日(水)15時から16時にオンライン(Zoom)にて(新型コロナウイルス感染拡大に対する立命館大学の行動指針に従って)公聴会を開催し、学位申請者による論文要旨の説明後、審査委員は学位申請者に対する口頭試問を行った。審査委員および公聴会参加者より、障害物付近での粒子運動の妥当性の評価、実問題やCGへの適用の可能性、粒子の分布状態を判断するパラメータの数学的意味などについて質問がなされたが、いずれの質問に対しても学位申請者の回答は適切なものであった。主査および副査は、公聴会の質疑応答を通して、学位申請者が十分な学識を有し、博士学位に相応しい能力を有することを確認した。

以上の諸点を総合し、審査委員会は、本学学位規程第18条第1項に基づいて、学位申請者に対し「博士(工学 立命館大学)」の学位を授与することが適当であると判断する。