

博士論文要旨

論文題名：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

立命館大学大学院情報理工学研究科
情報理工学専攻博士課程後期課程

ブイ ティエン タイン
BUI Tien Thanh

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、および流体の流入と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。本論文では (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の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ための計算モデルの構築の3つの課題に焦点を当て、その解決法を提案した。提案手法は粒子法流体シミュレーションの計算モデルの単純化、およびそれに伴う計算コストの削減を可能としている。

(1) 開境界条件を含む流体シミュレーションに対し、流入領域内と流出領域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。提案手法は流入領域における流体の質量保存則を満たす単純な計算モデルであり、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、流入領域と流出領域における流体粒子の物理量推定モデルとして粒子法の内挿手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。

(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。この手法は流体粒子の影響範囲に応じた層状の障害物粒子を生成することで、障害物の影響による流体運動を適切に決定することができる。本手法は鋭角な形状においても適切な障害物粒子の生成が可能である。

(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大きく寄与している。

Abstract of Doctoral Dissertation

Title : Boundary Treatment for Particle-based Fluid Simulation with Solid Wall and Open Boundary Conditions

Doctoral Program in Advanced Information Science and Engineering
Graduate School of Information Science and Engineering
Ritsumeikan University

ブイ ティエン タイン
BUI Tien Thanh

Open boundary conditions and solid wall boundary conditions are main topics of boundary treatment in particle-based fluid simulation. Appropriate boundary conditions (BCs) can significantly enhance the simulation results and reduce computation costs. This thesis mainly deals with three issues related to BCs of particle-based fluid simulation: (1) the complication in implementing open BCs, (2) the challenge in generating wall particles along implicit surfaces and (3) the difficulty of efficient determination of appropriate particle motion around free surfaces and implicit surfaces. These works aim to develop simplified schemes related to BCs that achieve fast computation without loss of accuracy.

On the first topic, a simplified scheme for open BCs with inflow and outflow boundaries is proposed. This approach is based on periodic boundary condition that contributes to conservation of total mass and insertion of inflow particles without re-arranging process. In addition, a formulation that estimates physical quantities at inflow/outflow zones using standard scheme of smoothed particle hydrodynamics is developed. This scheme can avoid complicated extrapolation process and contributes to simple and fast estimation.

On the second topic, we proposed a scheme for generation of layered boundary particles along implicit surfaces. Two central problems related to wall boundary penetration and the truncated support of kernel function have been overcome. The techniques provide full treatment for complicated geometries even though at sharp corners without any additional treatment.

On the third topic, new formulations for particle shifting that prevents tensile instability and for solid BCs with implicit surfaces are proposed in order to achieve stability at the interaction of fluid and obstacles. This approach is based on the idea of controlling the effect of particles shifting and it can be a significant breakthrough to minimize costly processes related ghost particles in the computation.