T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	GPUスパコンにおける動的負荷分散を用いた大規模粒子法シミュレーション
Title(English)	
著者(和文)	都築怜理
Author(English)	Satori Tsuzuki
出典(和文)	学位:博士（理学）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10097号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青木 尊之,末包 哲也,長崎 孝夫,肖 鋒,横田 理央
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10097号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	創造エネルギー　　専攻	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士　（　理学　） Doctor of
学生氏名： Student's Name	都築怜理	指導教員（主）： Academic Advisor(main)	青木尊之 教授
		指導教員（副）： Academic Advisor(sub)	

要旨（和文 2000 字程度）
Thesis Summary（approx.2000 Japanese Characters ）

粉体や流体、その連成問題の解析に対して、粒子法による大規模シミュレーションを行う重要性は広く認識されている。近接相互作用に基づく粒子法は計算コストが高く、高精度計算では多数の粒子を必要とするため、GPU(Graphics Processing Unit) を演算加速器として多数搭載する GPU スパコンが必要な問題である。しかし、粒子法の複数 GPU 計算では、計算領域を均等に分割した場合、粒子分布が時間的・空間的に偏ることにより生じる GPU メモリの枯渇、計算負荷の不均一による並列化効率の著しい低下、通信の繰り返しによる GPU メモリの断片化などが問題となり計算の続行は困難になる。本研究では階層的なメモリ構造をもつ GPU スパコンに適した動的負荷分散法を提案し、 GPU スパコンにおける近接相互作用に基づく粒子法の大規模シミュレーションの高効率な計算を実現する。これにより、粉体や流体及び連成問題に対し、 GPU スパコンを用いて粒子法による詳細な解析が可能になることを明らかにする。

粉体や流体、流体構造連成のための近接相互作用に基づく粒子法の数値計算手法である個別要素法と改良型SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法を導入し、単一 GPU を用いた高速化手法を示した。セル分割法を用いた近傍粒子探索により粒子間の相互作用計算の計算コストを粒子数に対して線形増加に抑え、空間格子のメモリ使用量をLinked-list 法により削減する高速化手法を GPU 上で導入し、さらに、CPU 側からセル番号によるソートを定期的に実行することで GPU に特徴的な 32 連続アドレスずつのデータ・ロードの高効率化を試み、改良型SPH法による 3 次元流体計算に対して大幅な高速化を達成することができた。一方、複数 GPU を用いた粒子の移動計算において、GPU 間の頻繁な粒子データの通信により GPU のメモリの使用範囲が断片化し計算時間が急増する問題に対し、定期的に粒子データを再整列することで断片化を抑制することができることを明らかにした。さらに再整列のコストと計算時間の関係について調べ、再整列の最適頻度の数理モデルを提案した。これらにより粒子法の長時間計算が可能になった。

近接相互作用に基づく粒子法の複数GPU計算では、粒子が時間的に移動することで粒子分布が空間的に偏ることにより生じる GPU メモリの枯渇、計算負荷の不均一による並列化効率の著しい低下が大規模計算を阻む問題がある。これに対し、スライスグリッド法、及び 3 種類の空間充填曲線を用いた木データ構造による領域細分化に基づく動的負荷分散法を複数 GPU 計算に適用する方法を示し、東京工業大学の TSUBAME スパコンを用い 3 次元ダムブレイク問題の計算に対して GPU 数を増加させて強・弱スケーリングを調べ、各手法の並列化効率を比較した。スライスグリッド法では領域形状のアスペクト比が高くなり並列化効率が 256GPU から 512GPU で著しく低下することが分かり、空間充填曲線を用いる方法では領域分割の局所性により領域接続数が減少し、特にヒルベルト曲線とペアノ曲線は曲線が計算領域内で交差しないため、並列化効率が大幅に向上することが明らかになった。

粉体や流体、及びその連成問題の実問題への適用例として、64 GPU を用いて 1,670 万個の粒子によるゴルフ・バンカーショットの粉体シミュレーション行い、ゴルフボールへの運動伝達解析を可能した。また、4 種類からなる流木 945 個と7 棟の建物を含む256GPUを用いた津波シミュレーションでは、水の動圧よりも流木の衝突による衝撃圧が圧倒的に大きいことを示した。さらに大規模な 1 億 1,750 万個の粒子を用い 12 種類から成る 10,368 個の瓦礫を含む 256GPU を用いた津波シミュレーションを実行し、計算結果の解析を行うとともに提案する計算手法が実際の規模の自然災害のシミュレーションに適用できることを示すことができた。

以上のように、本論文では粉体や流体、その連成問題に対し、近接相互作用に基づく粒子法による大規模シミュレーションをGPUスパコンにおいて高効率に実行する動的負荷分散法を提案し、さまざまな問題に適用することでその有効性を実証することができた。本研究成果により粉体や流体、その連成問題に対し、GPU スパコンを用いた粒子法による詳細な解析が可能であることを明らかにできた。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	創造エネルギー　　専攻	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士　（　理学　） Doctor of
学生氏名： Student's Name	都築怜理	指導教員（主）： Academic Advisor(main)	青木尊之 教授
		指導教員（副）： Academic Advisor(sub)	

要旨（英文 300 語程度）
Thesis Summary（approx.300 English Words ）

The importance of particle-based simulation is widely recognized in granular mechanics and fluid dynamics, however, the restriction of problem size is critical issues for many years.

We propose an effective method to realize large-scale short-range interaction based particle simulations on GPU-rich supercomputer. Discrete Element Method (DEM) for granular materials, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) for fluids, and the combination of DEM with SPH for flows interacting with objects are introduced.

The fragmentation of GPU memory used for particles happens during the time-integration and the frequency of de-fragmentation is examined by taking account for computational load balance and the communication cost between CPU and GPU. Our de-fragmentation method realizes the long-time computation of particles.

By applying domain re-decompositions, we maintain the same number of particles in each sub-domain. The performance scalability of the SPH simulation are examined on the TSUBAME 2.5 supercomputer with GPUs (NVIDIA Tesla K20X) with using two different ways of dynamic load balance; slice-grid method, and the hierarchical domain decomposition method using the space filling curve.

The strong scalabilities are studied for the 3D dam break problem. The performance keeps improving in proportion to the number of GPUs in case of using the space filling curve. In particular, Hilbert curve and Peano curve show good scalability due to that they can keep the number of neighboring sub-domains regardless of the increases in GPU number. The spatial jump in Morton curve cause the increase in neighboring connections and the slight performance degradation. Some sub-domains have shapes with high-aspect ratio and particles move across the boundary easily, so the amount of data communication increases and the total performance gets worse with using slice-grid method.

We applied our proposal method to a practical problems; simulations using 16.7M particles for various swing trajectories 64 GPUs, A large-scale debris flow simulation interacting with 10,368 rubbles with using 117 Million particles on 256 GPUs are successfully carried out on TSUBAME 2.5 at Tokyo Tech.

By the findings of this research, we clarified an efficient method to realize large-scale particle-based simulations for the analysis of granular materials and the complex free surface flows interacting with objects on GPU supercomputer.

備考 ： 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).