

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月10日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16064

研究課題名(和文) 専用計算機を用いた宇宙空間用電気推進器シミュレーションの高速化

研究課題名(英文) An acceleration of hall thruster simulation

研究代表者

宮島 敬明 (Miyajima, Takaaki)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・特別研究員

研究者番号：90770850

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究での研究成果として、MPS法の計算時間の短縮が挙げられる。MPS法はこれまで難しかった雨滴や流水をシミュレーションできるが、カーネル部分の計算時間が非常に長いことが知られている。本研究では、先端的な並列計算機を用いてMPS法の物理的特性を考慮した最適化手法を提案し、各種並列計算機で計算時間の評価を行った。その結果、計算時間は、CPU(Xeon Gold 6150x2)で35.1[ms]、GPU(P100NVL)で6.8[ms]、KNL-7210で104.1[ms]であった。また、GPUクラスターを利用したスケーリングの測定を行い、さらなる最適化が必要であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、提案手法を各種並列計算機に実装し、MPS法の計算時間を短縮した。その結果、GPUでは最先端のCPUの5分の1の以下の時間で同じシミュレーションを実行できるようになった。MPS法は雨滴や流水をシミュレーションすることが可能であり、応用先は土木や航空工学などの多岐にわたる。学術的意義としては、本手法は物理的特性を考慮しており、別の手法への適用も可能な適用範囲の広い手法であることが挙げられる。また、社会的意義としては、提案手法により短時間でシミュレーションが可能になることで、設計や試験がより短時間で完了させることができる点が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：Contribution of this research is present a technique that shortens the processing time of the MPS method. MPS method can simulate raindrops or flowing water which were difficult in the past. It is known that the kernel of the MPS method is time-consuming. We proposed an optimization technique which takes physics of MPS method into consideration to reduce the processing time. On top of that, we implemented and evaluate a proposed technique on multiple parallel processing machines. Processing time on CPU(Xeon Gold 6150x2) is 35.1[ms], GPU(P100NVL) is 6.8[ms], and KNL-7210 is 104.1[ms], respectively. We also conducted a preliminary evaluation on the GPU cluster and found that additional optimizations are required to achieve better scalability.

研究分野：高性能計算

キーワード：MPS法 高性能計算 数値流体力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ホールスラストの設計開発には計算機を用いた複雑数値シミュレーションが必須であるが、その計算負荷は非常に高く、128 コアのクラスター環境でも 1 ケースに 1 週間程度の計算時間が必要である。これは近似などのモデル化を最小限にした、第一原理のような支配方程式を直接解く粒子法をベースとした手法が用いられているためである。更に、推力の向上に直結するスラスト内部の非常に複雑かつ未解明な物理現象を理解・予測するために、物理モデル開発者によって新しい物理モデルの試用や導入が継続的に行われている。しかし、複雑なシミュレーション・プログラムにプログラミングの専門家でないモデル開発者が目的の動作をする最適化されたコードを追加するのは簡単でなく、新規物理モデル導入の障害となっている。このように、本ホールスラスト・シミュレーションは、新規物理モデルの導入から計算結果を得るまでの TAT の短縮が必要とされている。

2. 研究の目的

研究の目標は、JAXA が研究開発中のホールスラスト用シミュレーション・プログラム NSRU-Full PIC の TAT を短縮する複数デバイス (GPU, FPGA) に対応したフレームワークの研究開発である。計算時間の短縮とコード自動生成手法を用いた物理モデルの記述簡単化に課題を分け、本研究期間内の重点目標として次の問題に取り組む。1. シミュレーションの実行時間の短縮を目的に、高速化を阻害する主要因である不規則メモリアクセスや Read After Write ハザードなどを GPU 上で解決する手法を提案し実装 2. 新規物理モデルの導入を簡単化を目的に、数学的記法のような物理モデル開発者にもわかりやすい記法を GPU のプログラム言語に変換する、コード自動生成手法の開発、である。

3. 研究の方法

本研究では、計算機科学的な観点から PIC 法と手法が類似している MPS 法の高速度化を重点的に行った。MPS 法の計算時間の短縮が挙げられる。MPS 法はこれまでは難しかった雨滴や流水などの非圧縮性流体をシミュレーションできるが、カーネル部分の計算時間が非常に長いことが知られている。本研究では、まずは計算機科学的な特性を理解した後に、先端的な並列計算機を用いて MPS 法の物理的特性を考慮した最適化手法を提案し、各種並列計算機で計算時間の評価を行った。

MPS 法の計算機科学的な特性は次のようなものであった。背景格子の構造体と各物理量の配列を各ループで間接参照し、それぞれが非連続的なメモリアクセスを行っている。物理量の配列への非連続的なアクセスは、定期的な粒子のソートにより連続的なアクセスへと改善する手法が存在する。最内部ループについては、各バケット内の粒子数が異なるため不定数ループとなっているため、そのままではベクトル化が難しい。また、粒子の位置は各タイムステップで変わるため、キャッシュの利用率を上げることも簡単ではなかった。

非圧縮性流体をシミュレーション対象とするという、物理的背景を利用し二種類の最適化手法を考案した。

最適化 1: 1 スレッド / 1 バケット: 本最適化では、図 2 に示すように各バケット (loop-1 の 1 イテレーション) を CPU/GPU の各スレッドに割り当てる。loop-2~4 は各スレッドによって逐次的に処理される。CPU の場合は各スレッドあたりのキャッシュサイズは、16,200 bytes より大きい。しかし、Tesla P100 の場合、L1 データキャッシュは 32 CUDA スレッドで共有されるため、CUDA スレッドあたりのキャッシュサイズは 445 bytes である。これは必要なキャッシュサイズを満たさない。また、全 CUDA スレッドが処理を行うため Occupancy は高いが、スレッドブロック内の CUDA スレッドの処理が不均衡になるため、同期待ちのコストが大きくなる。

最適化 2: 1 スレッドブロック / 1 バケット本最適化では、図 7 に示すように各バケットを GPU の各スレッドブロックに割り当てる。loop-2 の同じバケットの各粒子が同じスレッドブロックの CUDA スレッドに割り当てられる。loop-3 と 4 は各 CUDA スレッドにより逐次的に実行される。これにより、各 CUDA スレッドは同一の隣接バケット内の粒子にアクセスするため、スレッドブロック内での処理のパラッキと同期待ちはなくなる。また、スレッドブロック内で物理量を共有することができる。

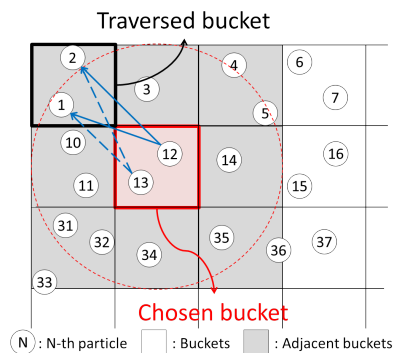


図 1: MPS 法のカーネル

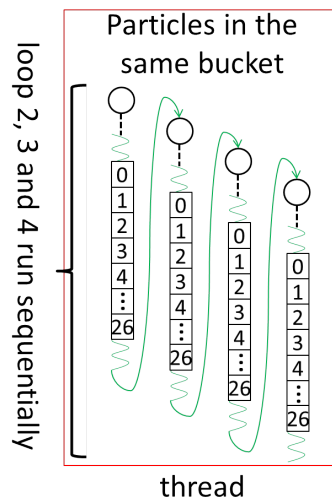


図 2: 1 スレッド / 1 バケット

最適化手法を Intel Xeon SkylakeSP, Intel Xeon Phi KNL, NVIDIA Tesla P100(NVlink, PCIe)に適用した際の評価を図 4 に示す。P100 (NVlink) が最も高速であり、Xeon Gold 6150 の 5.2 倍、KNL 7210(推測値)の 7.8 倍ほど高速である。Xeon と KNL7210 のどちらもベクトル化を行っていないため、P100 と同様な単に多数のスレッドを持った計算ユニットとして利用しているにすぎない。最内ループを単にベクトル化しても、粒子の物理量へのランダムアクセス (gather/scatter) がボトルネックとなることが予想される。

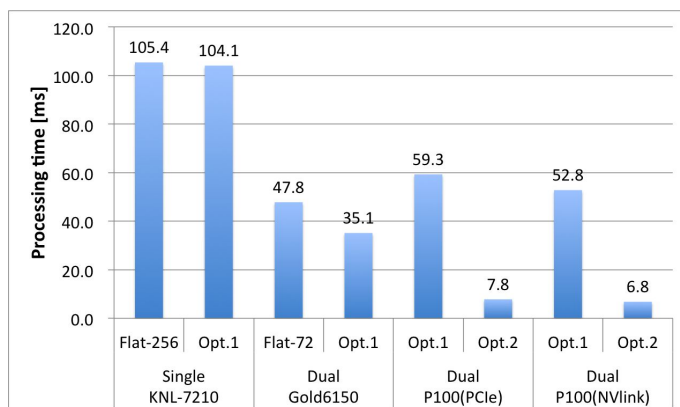


図 4: 各計算ノードの最速の値の比較

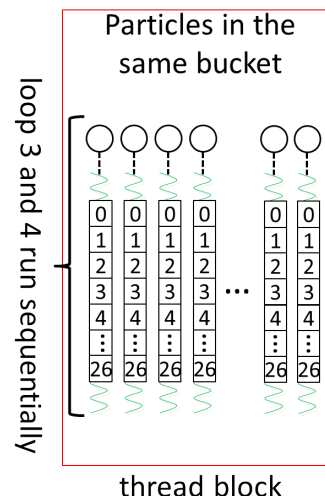


図 3: 1 スレッドブロック / 1 バケット

4 . 研究成果

本研究では、計算機科学的な観点から PIC 法と手法が類似している MPS 法の高速化を充実にいった。本研究での研究成果として、その結果、計算時間は、CPU(Xeon Gold 6150x2)で 35.1[ms], GPU(P100NVL)で 6.8[ms], KNL-7210 で 104.1[ms]であった。学術的意義としては、本手法は物理的特性を考慮しており、別の手法への適用も可能な適用範囲の広い手法であることが挙げられる。また、社会的意義としては、提案手法により短時間でシミュレーションが可能になることで、設計や試験がより短時間で完了させることができる点が挙げられる。また、GPU クラスタを利用したスケーリングの測定を行い、さらなる最適化が必要であることを示した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 0 件)

[査読あり国際学会](計 5 件)

1. Hiroyuki Noda, Manfred Orsztynowicz, Kensuke Iizuka, Takaaki Miyajima, Naoyuki Fujita and Hideharu Amano, "An ARM-based heterogeneous FPGA accelerator for Hall thruster simulation", 10th International Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies (HEART 2019), Nagasaki, Japan, (2019/06)
2. Takaaki Miyajima, Keiichi Kubota and Naoyuki Fujita, "An optimization of search for neighbour-particle in MPS method for Xeon, Xeon Phi and GPU by using directives ", 1st International conference series on HPC technologies in Asia Pacific region CFD (HPC Asia 2018), Tokyo, Japan, (2018/1)
3. Takaaki Miyajima, Naoyuki Fujita, "A porting and optimization of search for neighbour-particle in MPS method for GPU by using OpenACC", 8th International Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies (HEART 2017), Bochum, Germany, (2017/06)
4. Takaaki Miyajima, Naoyuki Fujita, "A porting and optimization of search for neighbor-particle in MPS method for P100, KNL and Skylake", GPU Technology Conference Japan 2017, Tokyo, Japan, (2017/05)
5. Ryotaro Sakai, Naru Sugimoto, Takaaki Miyajima, Naoyuki Fujita, Hideharu Amano, "Acceleration of Full-PIC simulation on a CPU-FPGA tightly coupled environment", Proc. of IEEE 10th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc), Lyon, France, (2016/09)

[査読なし国内研究発表](計 5 件)

1. 宮島敬明, 窪田健一, 藤田直行, "連結リストを用いた MPS 法における近傍粒子探索の高速化と並列計算機への移植", 情報処理学会 HPC 研究会, 熊本, 日本, (2017/12)
2. 宮島敬明, 藤田直行, "OpenACC を用いた MPS 法の近傍粒子探索の最適化", 情報処理学会 HPC 研究会, 神奈川, 日本, (2017/03)
3. 宮島敬明, 藤田直行, "OpenACC 最適化戦略の提案", GPU コンピューティング研究会, 東京, 日本, (2016/10)
4. 酒井諒太郎, 宮島敬明, 杉本 成, 藤田直行, 天野英晴, "Zynq を用いた衛星エンジンシミュレーションの高速化の検討", 情報処理学会 CPSY 研究会, 長野, 日本, (2016/08)
5. 宮島敬明, 張 科寅, 藤田直行, "GPU をもちいたホールスラスト・シミュレーションの割り付け処理の高速化の検討", 情報処理学会 CPSY 研究会, 東京, 日本, (2015/12)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/view/takaaki-miyajima-about-me/research>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。