

課題名 (和文) FPGA-GPU 混載プラットフォームにおける HPC アプリケーションとシステム・ソフトウェアの開発

課題名 (英文) HPC application and system software development on FPGA- GPU combined platform

朴泰祐

筑波大学・計算科学研究センター

1. 研究目的

本研究では、FPGA の持つ潜在能力を HPC システムに最大限適用するため、これを GPU 等の演算加速装置と連携させ双方を相補的に利用し、さらに最新 FPGA の持つ高性能通信機能も含めた統合的な複合演算加速システムを実現する。GPU では十分な演算加速ができないアプリケーションについて、部分的な FPGA オフローディングと、高速並列通信を組み合わせた新しい FPGA の利用方法を実装・評価し、具体的な実アプリケーションを適用することにより、次世代の統合的演算加速並列システムの枠組みを構築しその有効性を実証する。本研究課題では、これらの実証に必要なプログラミング環境、ライブラリ、アプリケーションの全てに関して研究開発を行い、実アプリケーションでの本提案の有効性を示す。

2. 研究成果の内容

R3 年度までの研究で、FPGA 間通信ネットワーク基盤、GPU・FPGA 間高速 DMA 機構、OpenACC のみによる統合的な GPU・FPGA 混載プログラム記述環境のプロトタイプ開発を行ってきた。R4 年度ではこれらのフレームワークを利用し、実アプリケーションに基づく GPU・FPGA 混合アプリケーションの記述性の評価及び性能評価を行い、本研究で提唱する GPU・FPGA 統合計算コンセプト CHARM (Cooperative Heterogeneous Acceleration with Reconfigurable Multidevices : 再構成可能な複数の異種混合型デバイス協調による演算加速) の有効性を実証できた。

GPU・FPGA 統合プログラミング環境 MHOAT のプロトタイプ上で宇宙物理アプリケーションである ARGOT コードが実行可能であることを示し、さらに FPGA オフロード部分の最適化を OpenACC レベルで実現することで、最終的に GPU

(NVIDIA V100) 単体実行に比べ、GPU・FPGA 混合実行 (同じ GPU に加え Intel Stratix10 FPGA) で 9.9 倍もの極めて高い高速化を実現した。さらに、従来の CUDA (GPU) + OpenCL (FPGA) での記述に比べても 1.4 倍高速化した。これは GPU 部分の実行効率が CUDA に比べ向上したことによる。

FPGA 間通信システムの高度化では、これまでに開発した FPGA 間通信システム CIRCUS を集合通信に対応させ、小規模システムでその有効性を実証した。4 ノード

までの並列通信において、ツリー型の Allreduce を Reduction+Broadcast で実装した通信アルゴリズムが、設計通りに log オーダーの通信時間で実現できることを実証した。また、従来の CIRCUS にフロー制御を組み込むため、長崎大学で開発された Kyokko システムを Cygnus に対応させ、動機で用いられている Stratix10 H-Tile (100Gbps ポート x4) でも十分な性能が出るように下位モジュールを改変し、フロー制御付きでも物理性能の 99%以上が実現できることを示した。

また、Cygnus で用いられている DDR DRAM のみを搭載した FPGA に対し、今後の HBM 搭載型への移行とユーザ利便性のため、HBM のサブメモリチャネルをユーザが直接プログラムしなくてすむよう、FPGA 上の BRAM をアドレスラブルキャッシュとして使い、HBM をカーネルから容易にアクセス可能とする API を開発した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用プログラムによって Cygnus 環境をこれらの研究開発に用いることができ、本研究チームが提唱し開発する CHARM コンセプトに基づく新しい GPU・FPGA 複合型演算加速の成果が出つつある。また、世界無二の多重複合型演算加速スーパーコンピュータ Cygnus が稼働し、こういった先進的研究に役立っていることも世界にアピールできている。エクサスケール時代の HPC に演算加速装置は不可欠であるが、現状の GPU に頼った weak scaling 性能は消費電力や大規模化の限界を迎え、今後は strong scaling が十分できなければ性能向上が頭打ちになると考えられる。本研究はこういった問題に対する新しいアプローチを与えるものであり、世界的にも注目されている。

4. 今後の展望

R4 年度に ARGOT コードによる実証実験ができ、実アプリケーションでの CHARM コンセプトが極めて高速な計算を実現できる可能性を示せた。GPU のみの実行に比べ約 10 倍の性能が得られることには大きなインパクトがある。これまで積み重ねてきた、プログラミング環境、通信環境等の基礎的な研究を統合し、GPU・FPGA 融合による複数ノードの並列実行での CHARM コンセプトによる性能評価が目標である。また、最終的に各種分野で、GPU のみの性能向上に限界があるケースについて CHARM コンセプトを適用していく予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(査読付き論文誌)

- ・ Riadh Ben Abdelhamid, Yoshiki Yamaguchi, Taisuke Boku, "A scalable many-core overlay architecture on an HBM2-enabled multi-die FPGA", ACM

Transactions on Reconfigurable Technology and Systems, June 2022.

(査読付き国際会議論文)

- Kohei Kikuchi, Norihisa Fujita, Ryohei Kobayashi, Taisuke Boku, "Implementation and Performance Evaluation of Collective Communications Using CIRCUS on Multiple FPGAs", Proc. of IXPUG Workshop 2023, Workshop of HPC Asia 2023, pp. 15-23, Singapore, Feb. 2023.
<https://doi.org/10.1145/3581576.3581602>
- Ryohei Kobayashi, Norihisa Fujita, Yoshiki Yamaguchi, Taisuke Boku, Kohji Yoshikawa, Makito Abe and Masayuki Umemura, "GPU-FPGA-accelerated Radiative Transfer Simulation with Inter-FPGA Communication", Proceedings of the International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region 2023 (HPC Asia 2023), pp. 117-125, Singapore, Feb. 2023.
<https://doi.org/10.1145/3578178.357823>
- Ryohei Kobayashi, Norihisa Fujita, Yoshiki Yamaguchi, Taisuke Boku, Kohji Yoshikawa, Makito Abe and Masayuki Umemura, "Accelerating Radiative Transfer Simulation on NVIDIA GPUs with OpenACC", Proc. of 23th Int. Conf. on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT2022), Sendai, Dec. 2022.
- Taisuke Boku, Norihisa Fujita, Ryohei Kobayashi, Osamu Tatebe, "Cygnus - World First Multihybrid Accelerated Cluster with GPU and FPGA Coupling", Proc. of 2nd Int. Workshop on Deployment and Use of Accelerators (DUAC2022), with ICPP2022, Bordeaux (on-line), Aug. 2022.
<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3547276.3548629>
- Norihisa Fujita, Ryohei Kobayashi, Yoshiki Yamaguchi, Taisuke Boku, "Implementation and Performance Evaluation of Memory System using Addressable Cache for HPC applications on HBM2 equipped FPGAs", Proc. of 20th Int. Workshop on Algorithms, Models and Tools for Parallel Computing on Heterogeneous Platforms (HeteroPar2022), with EuroPar2022, Glasgow, Aug. 2022.
- Yuka Sano, Ryohei Kobayashi, Norihisa Fujita, Taisuke Boku, "Performance Evaluation on GPU-FPGA Accelerated Computing Considering Interconnections between Accelerators", Proc. Int. Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies 2022, Tsukuba-shi, Jun. 2022.

(2) 学会発表

- ・ Kohei Kikuchi, "Implementation and Performance Evaluation of Collective Communications Using CIRCUS on Multiple FPGAs", IXPUG Workshop 2023, Workshop of HPC Asia 2023, Singapore, Feb. 2023.
- ・ Ryohei Kobayashi, "GPU-FPGA-accelerated Radiative Transfer Simulation with Inter-FPGA Communication", International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region 2023 (HPC Asia 2023), Singapore, Feb. 2023.
- ・ Ryohei Kobayashi, "Accelerating Radiative Transfer Simulation on NVIDIA GPUs with OpenACC", 23th Int. Conf. on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT2022), Sendai, Dec. 2022.
- ・ Taisuke Boku, "Cygnus - World First Multihybrid Accelerated Cluster with GPU and FPGA Coupling", 2nd Int. Workshop on Deployment and Use of Accelerators (DUAC2022), with ICPP2022, on-line, Aug. 2022.
- ・ Norihisa Fujita, "Implementation and Performance Evaluation of Memory System using Addressable Cache for HPC applications on HBM2 equipped FPGAs", 20th Int. Workshop on Algorithms, Models and Tools for Parallel Computing on Heterogeneous Platforms (HeteroPar2022), with EuroPar2022, Glasgow, Aug. 2022.
- ・ Yuka Sano, "Performance Evaluation on GPU-FPGA Accelerated Computing Considering Interconnections between Accelerators", Int. Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies 2022 (HEART2022), Tsukuba-shi, Jun. 2022.

(3) その他

(特になし)

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus	○	10,000	0
Wisteria/BDEC-01			
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			