

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
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。ここでは、GPUやCPUでは性能不足となる処理の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の利用方法を提案し、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。

2. 研究成果の内容

本研究では、Cygnusを中心とするGPUとFPGAを用いた多重複合型演算加速システムに関し、以下の研究成果を得た。

(1) GPUとFPGAの両デバイスによる演算加速プログラムをOpenACCのみで統一的に記述するコンパイラMHOATのプロトタイプを開発を行った。同コンパイラでは、OpenACCに独自ディレクティブを追加し、どの部分をどの演算加速装置にオフロードするかをユーザが指定可能とし、GPU用のプログラムとFPGA用のプログラムに分離した上で、両デバイス用のバックエンドコンパイラを呼び出す。それらが生成するオブジェクトを互いのシステムが抵触することないように整合性を取って実行するランタイムシステムを開発し、Cygnusの単一ノード上で動作することを確認した。本研究の成果は国際会議HLPP2020において査読付論文として発表された。

(2) FPGA間通信システムCIRCUSを開発した。CIRCUSの基本システムは昨年度の研究で開発したが、通信プロトコルにフローコントロールを入れる等の改良を加え、プログラム例として数値流体計算ベンチマークであるHimeno Benchmarkを用い、性能評価を行った。また、宇宙物理学コードであるARGOTの中のART法計算をFPGA向けに実装し、これをCIRCUSを用いて並列化した。それぞれのプログラムで、FPGA台数にほぼ比例する性能向上が得られることを確認した。本研究の成果は情報処理学会論文誌、国際ワークショップAShES2020及びR2HCにおいて査読付論文として発表された。

(3) GPU・FPGA間DMA通信機構を開発し、ノード上でCPUを介さない直接通信

を実現することで PCIe 上のマルチデバイス間での高速通信とレイテンシ削減を実現した。また、GPU と FPGA の両者に対する適当な機能分散を行うことで、宇宙物理学コード ARGOT が GPU のみの場合より大幅に性能向上することを示した。本研究成果は情報処理学会論文誌及び国際会議 ASAP2020 において査読付論文として発表された。

(4) 計算科学研究センターにおいて地球環境研究部門が開発中の地域気象詳細シミュレーションコード City-LES について、GPU による演算加速を実現した。昨年度までの共同研究では建物・植生なしの基本モデルの GPU 化を実現したが、今年度は建物・植生・太陽光の時間移動の全てを含む詳細モデルの GPU 化を行い、基本的に CPU のみによるバージョンと同等の機能を GPU によって 6 倍以上高速化することに成功した。本研究の成果は国際会議 ISPDC2020 において査読付論文として発表された。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

GPU と FPGA を混載する世界初のスーパーコンピュータ Cygnus は、本研究を実施する上で理想的なプラットフォームであり、これなしでは最先端の GPU+FPGA マルチデバイス演算加速のためのシステムコードとアプリケーションの開発は不可能だった。Cygnus の利用により、次世代の演算加速システムにおけるソリューションの一つを示すことに貢献している。

4. 今後の展望

Cygnus 上でのシステム及びアプリケーションソフトウェアの開発は佳境を迎えており、R03 年度の学際共同利用で継続されている。また、これまでの研究成果に基づき、R03 年度より 4 年間、科研費基盤研究(A)を獲得した。今後、同テーマの研究をより一層推進し、特にアプリケーションに関して充実していく予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

・藤田典久, 小林諒平, 山口佳樹, 上野知洋, 佐野健太郎, 朴泰祐, "OpenCL プログラミングを用いた並列 FPGA 処理システムの性能評価", 情報処理学会 ACS 論文誌, 13(3), pp.13-28, 2020 年 11 月.

・Ryohei Kobayashi, Norihisa Fujita, Yoshiki Yamaguchi, Taisuke Boku, Kohji Yoshikawa, Makito Abe, Masayuki Umemura, "Multi-Hybrid Accelerated Simulation by GPU and FPGA on Radiative Transfer Simulation", 情報処理学会論文誌, Vol.28, pp.1073-1089, 2020 年 12 月.

(2) 学会発表

- ・ Ryuta Tsunashima, Ryohei Kobayashi, Norihisa Fujita, Taisuke Boku, Seyong Lee, Jeffrey S. Vetter, Hitoshi Murai, Masahiro Nakao, Mitsuhisa Sato, "OpenACC unified programming environment for GPU and FPGA multi-hybrid acceleration", Proc. of Int. Conference on High Level Parallel Programming (HLPP) 2020, 20 pages, Jul. 2020.
- ・ Daisuke Tsuji, Taisuke Boku, Ryosaku Ikeda, Takuto Sato, Hiroto Tadano, Hiroyuki Kusaka, "Parallelized GPU Code of City-Level Large Eddy Simulation", Proc. of ISPDC2020, 10 pages, Jul. 2020.
- ・ Ryuta Kashino, Ryohei Kobayashi, Norihisa Fujita, Taisuke Boku, "Performance Evaluation of OpenCL-Enabled Inter-FPGA Optical Link Communication Framework CIRCUS and SMI", Proc. of HPC Asia 2021, 10 pages, Jan. 2021.
- ・ Norihisa Fujita, Ryohei Kobayashi, Yoshiki Yamaguchi, Taisuke Boku, Kohji Yoshikawa, Makito Abe, Masayuki Umemura, "OpenCL-enabled Parallel Raytracing for Astrophysical Application on Multiple FPGAs with Optical Links", Proc. of Int. Workshop R2HC (in SC20), 8 pages, Nov. 2020.
- ・ Norihisa Fujita, Ryohei Kobayashi, Yoshiki Yamaguchi, Tomohiro Ueno, Kentaro Sano, Taisuke Boku, " Performance Evaluation of Pipelined Communication Combined with Computation in OpenCL Programming on FPGA", Proc. of AShES2020 (in IPDPS2020), 10 pages, May. 2020.

(3) その他

- ・ 小林諒平, 藤田典久, 朴泰祐, OpenACC と OpenCL の混合記述による GPU-FPGA デバイス間連携, 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC) 2020-HPC-177(12), pp.1 - 7, 2020 年 12 月.
- ・ 小林諒平, 藤田典久, 朴泰祐, OpenACC と OpenCL の混合記述による GPU-FPGA デバイス間連携, 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC) 2020-HPC-177(12), pp.1 - 7, 2020 年 12 月
- ・ 小林諒平, 藤田典久, 山口佳樹, 朴泰祐, 吉川耕司, 安部牧人, 梅村雅之, 宇宙幅射輸送コード ARGOT の OpenACC による GPU 実装, 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC) 2020-HPC-175(7), pp.1 - 7, 2020 年 7 月.
- ・ 柏野隆太, 小林諒平, 藤田典久, 朴泰祐, "OpenCL 対応 FPGA 間光リンク接続フレームワーク CIRCUS と SMI の性能評価", 情報処理学会研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC), 2020-HPC-175(16), pp.1-8, 2020 年 7 月 31 日.
- ・ Fan Ruochong, Ao Yun, Yamaguchi Yoshiki, Boku Taisuke, "A study of an FPGA-based cluster computing with high-speed serial links", 電子情報通信学

会信学技報, CPSY2020-11, DC2020-11, pp.1-7, 2020 年 7 月 31 日.

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
Oakforest-PACS		0	0
※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。			