

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23700028
 研究課題名（和文）ペタスケール時代の複合型計算システムを支える高効率化・高信頼化技術の確立
 研究課題名（英文）Technologies for realizing highly-efficient and highly-dependable heterogeneous computing systems in the post Petascale era.
 研究代表者
 滝沢 寛之（TAKIZAWA HIROYUKI）
 東北大学・大学院情報科学研究科・准教授
 研究者番号：70323996

研究成果の概要（和文）：

適材適所を考慮しながら、複数のプロセッサを OpenCL プログラム内では仮想的に一つに見せる技術を提案した。また、OpenCL 経由で、多数かつ多様な計算ノードで構成されるシステム向けのプログラミングの新しい形を提案した。高信頼化のために、OpenCL アプリケーションの透過的チェックポイントリスタート機能を実現した。さらには、近年急速に普及した OpenACC も評価対象として考え、その実用性や現時点での制約について明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

A virtualization technique has been proposed to hide the heterogeneous configuration of different processors, by automatic task allocation considering their strengths and weaknesses. OpenCL has also been applied to programming of large-scale systems of various computing nodes. For high dependability, a transparent checkpoint restart mechanism for OpenCL applications has been developed. This work also investigated the practicality and limitations of OpenACC.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：並列処理・分散処理、GPGPU、OpenCL

1. 研究開始当初の背景

高性能計算システムの演算性能を飛躍的に向上させる有力なアプローチの一つとして、性能や特長の異なるプロセッサを複数搭載する「システムの複合化」が挙げられる。しかし、そのようなシステムの性能を最大限に活用するためには、高度で複雑なプログラミングが要求されるばかりか、特定のシステム構成を仮定してコードをカスタマイズする必要もある。このため、特定のシステム向けに開発したアプリケーションプログラムが他のシステム上でも効率よく動作する性質(性能移植性)の維持が困難である。その結果、アプリケーションソフトウェアの短命化

や維持コストの増大など、極めて深刻な問題が生じている。

近年、複合型計算システム向けの標準プログラム開発環境として OpenCL が整備されつつある。従来のプログラム環境とは異なり、OpenCL では同一のインタフェースで多様なプロセッサをアクセラレータとして利用できる。しかし、CPU と GPU を同一のインタフェースで利用できるとしても、それらの持つ性能を最大限活用するためにはそれぞれのプロセッサ向けにコードを最適化しなければならない。さらに、CPU と GPU では得手不得手が異なるため、システムに搭載されている CPU と GPU の組み合わせが変わ

れば、両者の適切な役割分担も変化する可能性がある。したがって、次世代標準仕様と目されている OpenCL においても、高い実効性能と性能移植性の両立は依然として困難である。

多数の計算ノードで構成される大規模複合型計算システムの効率的利用を考える場合、問題はさらに複雑化する。システム中の CPU と GPU の割合は固定されている一方、アプリケーションの要求する CPU と GPU の割合は各アプリケーションによって異なる。このため、例えば GPU を数多く必要するジョブが多数投入されている時には、GPU が不足しがちとなる一方で CPU は遊休状態となり、システム全体としての利用効率が低下する。ハードウェア障害時にも、システム中の利用可能な CPU と GPU の割合が大きく変化する可能性があり、利用効率の著しい低下やジョブ中断などの深刻な問題を引き起こす恐れがある。したがって、大規模複合型計算システムの利用効率と耐障害性を高めるためには、その時点で利用可能な計算資源の中からジョブ実行に最適なものを選択し、ジョブ中のプログラムを選択された計算資源に最適化した上で実行する機構が必要である。そのような機構の構築が、次々世代高性能計算システムの効率的利用技術の確立という観点から学術的に意義深いと考え、本研究課題を計画に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マルチコア/メニーコア時代の標準プログラミングモデルで開発されるアプリケーションを対象として、その高い実行効率と耐故障性を両立する実行時システムを構築することである。現在、異種複数のプロセッサを混載する複合型計算システムの性能を活用するためには、特定のシステム構成を仮定してプログラムを高度に最適化する必要がある。この場合、他のジョブ実行や障害等の影響でシステム構成が仮定と異なった時に、実行効率の著しい低下や実行の中断を引き起こす恐れがある。このため、複合型計算システム中の異種複数のプロセッサを抽象化して適材適所で使い分けることにより、実行効率と耐障害性を高める実行時システムを構築する。

3. 研究の方法

OpenCL で利用される異種複数のプロセッサを抽象化し、アプリケーションから透過的に各種プロセッサを適材適所で使い分ける技術を確認すると共に、その実行時オーバーヘッドを最小化する手法を調査する。また、計算ノードのハードウェア構成によって各ジョブへの資源割り当てが制限されることを回避するために、他の計算ノードに搭載さ

れた計算資源をリモートからアクセスして利用する方法を検討する。リモートアクセスの場合にはネットワークを介して計算資源を利用するため、そのオーバーヘッドを隠蔽するためにネットワーク通信の効率化を検討する。さらに、OpenCL は各アクセラレータ用コードを実行時にコンパイルして実行することを想定しているため、そのコンパイル時にスレッドの粒度を調整するコード変換規則を検討し、その有効性を実用的な大規模アプリケーションを用いて評価する。

4. 研究成果

複合型計算システム向け次世代標準プログラミング環境として整備が進んでいる OpenCL を対象とし、OpenCL アプリケーションの高効率化の研究を行った。並列実行可能なタスクを多く含むアプリケーションを、異種複数のプロセッサを利用可能なシステムで実行する場合、それらのタスクを各プロセッサへと適材適所を考慮しながら割当てて必要がある。そのようなタスク割当てを実行時性能予測に基づいて自動化する研究を行い、複数のプロセッサを OpenCL プログラム内では仮想的に一つに見せる技術を提案した。そのようなタスク割当て機構を実装してその有効性を定量的に評価した結果、タスク割当てを自動化することによって、システムに依存したコードを書かずに各プロセッサを性能に応じて適切に利用できることが明らかになった。また、そのようなタスク並列性を利用したアプリケーションの開発を支援するための可視化ツールも開発した。

さらには、OpenCL 経由で遠隔のベクトル型スーパーコンピュータを利用する仕組みを構築し、多数かつ多様な計算ノードで構成される大規模複合型計算システム向けのプログラミングの新しい形を提案した。その結果、計算ノードに具備された GPU を扱い場合と同じインタフェースでリモートの大規模システムを利用できることが明らかになった。GPU では搭載メモリ量が数 GB 程度であるのに対して、SX-9 ベクトル型スーパーコンピュータでは計算ノードあたり 1TB のメモリを搭載している。そのようなシステムを、あたかも巨大な GPU のように扱うことができようになり、用途に応じて使い分けができる可能性を示した。

高信頼化のために、それまでは困難であった OpenCL アプリケーションのチェックポイントリスタート機能についても実現方法を検討し、少ない実行時オーバーヘッドでアプリケーションから透過的にチェックポイントリスタートを実現できることを示した。また、チェックポイントファイルをストレージに書き込む時間が時間的オーバーヘッドの大半

を占めることから、階層的ストレージシステムの有効利用によってオーバヘッドをさらに削減できることを示した。

最終年度には、複合型計算システム向けプログラミング環境として急速に普及したOpenACCも評価対象として考え、その実用性や現時点での制約について明らかにした。また、制約を緩和するための機能拡張方法についても検討した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① Hiroyuki Takizawa, Makoto Sugawara, Shoichi Hirasawa, Isaac Geladox, Hiroaki Kobayashi, and Wen-mei W. Hwu, cIMPI: An OpenCL Extension for Interoperation with the Message Passing Interface, 査読有, Multicore and GPU Programming Models, Languages and Compilers Workshop, May 2013 (accepted)
- ② 平澤将一, 滝沢寛之, 小林広明, ソフトウェア進化のための自動性能追跡システム, 査読有, 2013年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム, 巻数無, pp.113-116, January 2013.
- ③ Muhammad Alfian Amrizal, Shoichi Hirasawa, Kazuhiko Komatsu, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi, Improving the Scalability of Transparent Checkpointing for GPU Computing Systems, 査読有, 巻数無, pp.1-6, IEEE Region 10 Conference (TENCON 2012), November 2012.
- ④ 佐藤功人, 小松一彦, 滝沢寛之, 小林広明: OpenCLにおけるタスク並列化支援のための実行時依存関係解析手法, 査読有, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム (ACS), Vol. 5, pp. 53-67, January 2012.
- ⑤ Hiroyuki Takizawa, Ryusuke Egawa, and Hiroaki Kobayashi, A Prototype Implementation of OpenCL for SX Vector Systems, 査読無, High Performance Computing on Vector Systems 2011, 巻数無, pp. 41-50, December 2011.
- ⑥ 小山賢太郎, 佐藤功人, 小松一彦, 村田善智, 滝沢寛之, 小林広明: マイグレーションによる複合型計算システム向けジョブスケジューリング, 査読有, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム (ACS), Vol. 4, pp. 203-213, October 2011.

- ⑦ Katsuto Sato, Kazuhiko Komatsu, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi, "A History-based Performance Prediction Model with Profile Data Classification for Automatic Task Allocation in Heterogeneous Computing Systems, 査読有, 9th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications, 巻数無, pp. 135-142, May 2011.
- ⑧ Hiroyuki Takizawa, Kentaro Koyama, Katsuto Sato, Kazuhiko Komatsu, and Hiroaki Kobayashi, CheCL: Transparent Checkpointing and Process Migration of OpenCL Applications, 査読有, 25th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium, 巻数無, pp.864-876, May 2011.

[学会発表] (計17件)

- ① Hiroyuki Takizawa, Muhammad Alfian Amrizal, Shoichi Hirasawa, and Hiroaki Kobayashi, "Autotuning for Improving the Fault Tolerance of Large-scale Simulations," Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High Performance Scientific Computing, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, March 28, 2013.
- ② Shoichi Hirasawa, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi, An Automatic Performance Tracking System for Scientific Software Evolution, Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High Performance Scientific Computing, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, March 27, 2013.
- ③ 滝沢寛之, "GPU向けプログラミング環境の現状と将来展望" シミュレーション科学セミナー, 金沢, January 30, 2013.
- ④ Muhammad Alfian Amrizal, S. Hirasawa, K. Komatsu, H. Takizawa, H. Kobayashi, "A Multi Level Checkpointing Approach for Heterogeneous Computing Systems.", ITRC セミナー/INI 仙台 2012 秋・第3回先進的情報通信工学研究会合同ワークショップ, 仙台, December 25, 2012
- ⑤ 菅原誠, 平澤将一, 小松一彦, 滝沢寛之, 小林広明, "ナノ粒子群形成アプリケーションの OpenACC による実装と性能評価", 数値流体力学シンポジウム (CFD2012), 代々木, December 18-20,

- 2012.
- ⑥ 小松一彦, 曾我隆, 江川隆輔, 滝沢寛之, 小林広明. 大規模計算システムにおける Building Cube Method の性能評価. In 第 26 回数値流体力学シンポジウム CFD2012, 代々木, December 19, 2012.
- ⑦ Kazuhiko Komatsu, Ryusuke Egawa, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi. Toward High Performance-Portabilities on Modern HPC Systems. In 16th Workshop on Sustained Simulation Performance, HLRS, Stuttgart, Germany, December 11, 2012.
- ⑧ Kazuhiko Komatsu, Ryusuke Egawa, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi. Performance of Practical Applications on Modern Supercomputing Systems. In SC12 NEC booth presentation, Salt Lake City, USA, November 12, 2012.
- ⑨ 菅原誠, 小松一彦, 平澤将一, 滝沢寛之, 小林広明, "ナノ粒子群形成アプリケーションの OpenACC による実装と性能評価," 第 136 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 那覇, October 3, 2012.
- ⑩ 平澤将一, 滝沢寛之, 小林広明, "統合開発環境と連携するポータブルなビルドシステム", 情報処理学会 第 136 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 那覇, October 3, 2012.
- ⑪ Hiroyuki Takizawa, "Software Evolution for System Architecture Revolution," IEEE International Symposium on Embedded Multicore SoCs, Aizu, September 21, 2012.
- ⑫ Kazuhiko Komatsu, Takashi Soga, Ryusuke Egawa, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi, "Performance Evaluation of a CFD using Cartesian Meshes on Various Supercomputing Systems," In NUG XXIV, Potsdam, Germany, June 13, 2012.
- ⑬ 滝沢寛之, 佐藤功人, 小松一彦, 小林広明, "OpenCL アプリケーションの実行時自動チューニング" 計算工学講演会, 京都, May 30, 2012.
- ⑭ 小松一彦, 滝沢寛之, 小林広明, Build Cube Method による非圧縮性流体解析のマルチプラットフォーム評価, 第 6 回次世代 CFD 研究会, 仙台, March 9, 2012.
- ⑮ Muhammad Alfian Amrizal, Katsuto Sato, Kazuhiko Komatsu, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi,

Evaluation of a scalable checkpointing mechanism for heterogeneous computing systems, 第 7 回情報処理学会東北支部研究会, 仙台, March 2, 2012.

- ⑯ Katsuto Sato, Kazuhiko Komatsu, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi, An Automatic Task Assignment Method for Heterogeneous Computing Systems, International Conference on Flow Dynamics 2011, Sendai, November 10, 2011.
- ⑰ Jiali Yao, Kazuhiko Komatsu, Ryusuke Egawa, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi, A Patch-Based Bit Mask Filtering Method for Micropolygon Rasterization, High-Performance Graphics 2011, Vancouver, Canada, August 6, 2011.

[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 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織
(1) 研究代表者

滝沢 寛之 (TAKIZAWA HIROYUKI)
東北大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号 : 70323996