

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23220003

研究課題名(和文) 10億並列・エクサスケールスーパーコンピュータの耐故障性基盤

研究課題名(英文) Fault Tolerant Infrastructure Toward Billion of Parallelization and Exa-scale Supercomputer

研究代表者

松岡 聡 (Matsuoka, Satoshi)

東京工業大学・学術国際情報センター・教授

研究者番号：20221583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 164,400,000円

研究成果の概要(和文)：エクサ(10の18乗)フロップス・10億並列のエクサスケール・スーパーコンピュータ実現には、規模の増大による故障率の増加に対応する必要がある。このための耐故障性基盤を確立することを目的として耐故障にかかわる複数の要素を対象とした複合的数理モデルの提案とそれを用いた軽量かつ高度な耐故障化手法を提案・評価した。また、開発したシステムの一部についてはオープンソースでの公開を行っている。

研究成果の概要(英文)：Fault tolerance has been recognized as an indispensable technique for exascale computing as supercomputers grow towards billion-way of parallelism. For future exascale supercomputers, we proposed advanced fault tolerant infrastructures. The advanced fault tolerant infrastructures include a scalable checkpoint/restart library, a fault tolerant messaging interface and a highly resilient burst buffer architecture. We validated the effectiveness based on mathematical statistics. We also released the software and made impact to the community.

研究分野：ハイパフォーマンスコンピューティング

キーワード：ハイパフォーマンスコンピューティング エクサスケールコンピューティング 耐故障性技術 データ圧縮 チェックポイント・リスタート バーストバッファ

1. 研究開始当初の背景

科学技術分野において、気象予報、地震および津波伝播予測などのシミュレーションは、理論・実験に続く「第3の手法」として盛んに行われ、大規模なシミュレーションではスーパーコンピュータ(スパコン)が不可欠である。近年、計算需要の指数関数的な増加とともに、スパコンの規模、スピードも指数関数的に上昇してきており、2018-2020年ごろには、エクサ(10の18乗)フロップス・10億並列のマシンが登場すると目されている。

2. 研究の目的

エクサスケール・スーパーコンピュータでは、搭載されるCPUやメモリなど、多種多様なコンポーネントが指数関数的に増加し、仮に各コンポーネントの信頼性が現在の数倍になったとしても、全体の障害発生率は数十倍近くとなる。これは、全てのコンポーネントが正常に稼働する時間間隔が平均で数十分以下であることに相当し、マシンが実質的に動作しなくなることを意味する。これを解決するために、様々な耐障害技術が提案されているが、エクサスケールシステムへの適用が難しい。我々は、東京工業大学のスーパーコンピュータTSUBAME2.0/2.5およびその後継として予定されているTSUBAME3.0を利用し、10億並列・エクサスケールコンピュータの耐障害性基盤の実現を目指す。

3. 研究の方法

10億並列規模のエクサスケール・スーパーコンピュータの耐故障性基盤を確立する。この目的を実現するために、(1)エクサスケールシステムに適した耐故障の複合的数理モデルおよびその検証、(2)超細粒度並列・ヘテロジニアス計算環境に適した新しい耐故障手法の確立、(3)耐故障システムのオーバーヘッドの削減、(4)エクサスケールシステムに対応し得る障害復旧機構の考案、(5)システム統合と性能評価を行う。

4. 研究成果

10億並列規模のエクサスケール・スーパーコンピュータの耐故障性基盤の確立のため、主に研究の方法(1)~(5)を実施した。アプリケーションに耐障害機能を提供する基盤として、チェックポイントデータのリード・ソロモン符号化とTSUBAME2.0などに搭載されたローカル・ストレージを活用することにより、スケラブルなチェックポイントを実現するFTI (Fault Tolerance Interface)を開発した。実際に、地震伝播アプリケーションSPECFEM3Dを用いて、東日本大震災を想定したシミュレーションを実際にTSUBAME2.0で実行し、実アプリケーションに於いてチェックポイントの有効性を検証した[8]。特に、ここでの研究成果は、SC11において、ベストペーパー賞に相当する

Special Recognition Award for Perfect Scoreを受賞した[受賞]。また、FTIを拡張し、メッセージロギング技術と統合した。メッセージロギング時のグループと、チェックポイントの冗長符号化時のグループを、ネットワークのトポロジーを考慮して階層的にグルーピングすることにより、従来に比べ細粒度超並列計算を要する津波シミュレーションコードにおいて、より効率的なチェックポイントを実現した[6]。ここで開発されたFTIは、オープンソースとして公開している

(<https://gforge.inria.fr/projects/fti/>)。さらに、FTIを含む本研究課題の成果を統合し、容易に自律的復旧機構を提供するために、多くの科学技術アプリケーションの並列化のために利用されているMPIをベースとした耐障害性・通信ライブラリFMI (Fault Tolerant Messaging Interface)を開発し、高速かつスケラブルな自律的復旧を実現した[5]。

一方、チェックポイントを保存する先となる並列ファイルシステムの用法について研究を進めた。一般に並列ファイルシステムは、チェックポイント先として最も信頼性が高い場所であるが、一方で並列ファイルシステムを用いた階層型チェックポイントでは、数百GPU実行において性能向上が飽和してしまい、エクサフロップに向けてのスケラリングは困難であった。しかしながら、計算とは非同期的に並列ファイルシステムへチェックポイントを書き出し、また、複合的数理モデルを用いて最適な頻度でチェックポイントを行うことにより、オーバーヘッドを削減した。実際に、津波のシミュレーションなど多くの流体計算でみられる等方メッシュの差分法による直接解法を行うHimenoベンチマークにおいて、従来型の階層型チェックポイントに比べ最大で1.1~1.8倍以上の効率化を実現した[7]。また、この最適頻度の自動化も行った。

チェックポイントの保存に関しては、共有ファイルシステムの用法だけでなく、ストレージまでの転送手法や、チェックポイント生成のためのアルゴリズムも大きな問題となる。将来の高信頼スーパーコンピュータの実現に向けて、バースト・バッファを備えた、階層型ストレージの信頼性やCoordinated、Uncoordinatedチェックポイントなどの既存手法の適用性を複数のシステムを対象とした検証実験を行った。これは、[7]の階層型チェックポイントの複合的数理モデルをベースとしており、これと制限付き自由文脈文法を用いたストレージ・モデルと組み合わせることで、より多くのアーキテクチャに対応可能なモデルへと拡張した。このモデルを用いた検証では、バースト・バッファとUncoordinatedチェックポイントを併用することにより、従来型のストレージ・アーキテクチャ及びチェックポイントに比べ、数十倍

の効率化が実現できることを定量的に立証した[4]。この研究の成果は、将来のスーパーコンピュータの設計に役立つと期待され、ベストペーパー賞を受賞した[受賞]。チェックポイントの生成アルゴリズムに関しては、非可逆圧縮などに用いられている量子化技術を応用した手法を開発した。チェックポイント取得時間を小さくすることは、多くのチェックポイントベースの耐障害機能すべてのコスト軽減につながる。この手法には、科学技術計算に特化したウェーブレット変換を用いている。これは、可逆圧縮の効率が落ちる浮動小数に対応する為の手法であり、チェックポイントに誤差を含んでしまう一方、高圧縮を実現できる。このため、元データの精度や計算結果の用途によって許容可能な誤差閾値を定めることにより、チェックポイントを効率よく圧縮し、チェックポイント保存時間の削減が可能となる。実気象アプリケーションであるNICAMを利用した評価では、誤差1.2%の状態、圧縮サイズは一般のgzipに対し80%程度となった[3]。

スーパーコンピュータは計算ノードだけでなく複数のコンポーネントを持っている。このため、これらのコンポーネント群とそれを結び付けているネットワークに対し、耐障害性を検討した。これは実行されているジョブの管理と、その配置を考慮しルーティングを適切に行うことによりスーパーコンピュータ内の通信を最適化するものである[1][2]。

最後に、ここまで提案してきた統合環境および、FMIを含むチェックポイント手法、耐故障に関する数理モデリングの検証を可能とする、故障発生器の構築を開始した。この故障発生器は、仮想化技術を用いており、従来のアプリケーションプロセスを対象としたものに加え、ハードウェアやOSに対して故障を挿入することが可能となり、計算環境全体を対象とした統合的なモデル検証を実現する。現時点では、主な故障種としてメモリ故障を対象とした実装を行っており、これまで対象としていたfail-stopな故障モデルに加え、メモリデータ化けによる誤った計算結果の出力(SDC: Silent Data Corruption)の再現も可能となっている。

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109件)

- [1] Jens Domke, Torsten Hoefler, Satoshi Matsuoka, "Routing on the Dependency Graph: A New Approach to Deadlock-Free High-Performance Routing", the 25th International Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing (HPDC '16), 2016, 査読あり, (to appear)
- [2] Jens Domke, Torsten Hoefler, Satoshi Matsuoka, "Fail-in-place network design: interaction between topology, routing algorithm and failures", International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC14), pp.597-608, 2014, 査読あり, DOI: 10.1109/SC.2014.54
- [3] Naoto Sasaki, Kento Sato, Toshio Endo and Satoshi Matsuoka, "Exploration of Lossy Compression for Application-level Checkpoint/Restart", In Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Symposium 2015 (IPDPS2015), pp.914-922, 2015, 査読あり, DOI: 10.1109/IPDPS.2015.67
- [4] Kento Sato, K. Mohror, A. Moody, T. Gamblin, B. R. de Supinski, Naoya Maruyama and Satoshi Matsuoka, "A User-level Infiniband-based File System and Checkpoint Strategy for Burst Buffers", International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid2014), pp.21-30, 2014, 査読あり, DOI: 10.1109/CCGrid.2014.24
- [5] Kento Sato, A. Moody, K. Mohror, T. Gamblin, B. R. de Supinski, Naoya Maruyama and Satoshi Matsuoka, "FMI: Fault Tolerant Messaging Interface for Fast and Transparent Recovery", International Conference on Parallel and Distributed Processing Symposium 2014 (IPDPS2014), pp.1225-1234, 2014, 査読あり, DOI: 10.1109/IPDPS.2014.126
- [6] L. Bautista-Gomez, T. Ropars, Naoya Maruyama, F. Cappello and Satoshi Matsuoka, "Hierarchical Clustering Strategies for Fault Tolerance in Large Scale HPC Systems", International Conference on Cluster Computing 2012 (Cluster'12), pp.355-363, 2012, 査読あり, DOI: 10.1109/CLUSTER.2012.71
- [7] Kento Sato, A. Moody, K. Mohror, T. Gamblin, B. R. de Supinski, Naoya Maruyama and Satoshi Matsuoka, "Design and Modeling of a Non-blocking Checkpointing System", International Conference on High

Performance Computing, Networking,
Storage and Analysis 2012 (SC12),
pp.1-10, 2012, 査読あり,
DOI: 10.1109/SC.2012.46

- [8] L. Bautista-Gomez, Naoya Maruyama, D. Komatitsch, S. Tsuboi, F. Cappello, Satoshi Matsuoka and T. Nakamura, “FTI: High Performance Fault Tolerance Interface for Hybrid Systems”, International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC11), pp.1-12, 2011, 査読あり,
DOI: 10.1145/2063384.2063427

〔学会発表〕(計 163 件)

Satoshi Matsuoka, “2022: Supercomputing Oddities”, Invited Talk (IEEE Sidney Fernbach Award Recipient Talk), Supercomputing 2014(SC14), Nov.19 2014, New Orleans USA

Kento Sato, “Extreme-Scale Resilience for Billion-Way of Parallelism”, ATIP Workshop: Japanese Research Toward Next-Generation Extreme Computing”, Supercomputing 2014 (SC14), Nov.17 2014, New Orleans USA

Satoshi Matsuoka, “Fault Tolerance/Resilience at Petascale/Exascale: Is it Really Critical? Are Solutions Necessarily Disruptive?”, Invited Panelist, Supercomputing 2013 (SC13), Nov.21 2013, Denver USA

Satoshi Matsuoka, “Resiliency in Exascale Systems - Rocket Science or Engineering?”, Invited Talk, International Supercomputing(ISC13), Jun.17 2013, Leipzig Germany

Satoshi Matsuoka, “TSUBAME2.0 Towards 3.0 and Exascale”, Keynote Talk, NEC User Group (NUG) Meeting, Jun.12 2012, Potsdam Germany

Satoshi Matsuoka, “From Petascale to Exascale Beyond Tsubame 2: Bridging the Gap from Petascale to Exascale”, Keynote Talk, HP-CAST 18, Jun.15 2012, Hamburg Germany

Satoshi Matsuoka, “We choose to go Exascale, Not because it's easy, but

because it's hard”, Invited Talk, TTI Vanguard The Advanced Technology Conference series, July 19 2012, Minato-ku Tokyo Japan

Kento Sato, Adam Moody, Kathryn Mohror, Todd Gamblin, Bronis R. de Supinski, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, “Design and Modeling of a Non-Blocking Checkpoint System”, Poster, In ATIP - A*CRC Workshop on Accelerator Technologies in High Performance Computing. May 8 2012, Singapore

Kento Sato, Adam Moody, Kathryn Mohror, Todd Gamblin, Bronis R. de Supinski, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, “Towards a Light-weight Non-blocking Checkpointing System”, Poster, In HPC in Asia Workshop in conjunction with the 2012 International Supercomputing Conference (ISC'12), Jun.18 2012, Hamburg Germany

〔図書〕(計 3 件)

Satoshi Matsuoka, Takayuki Aoki, Toshio Endo, Hitoshi Sato, Shinichiro Takizawa, Akihiko Nomura, Kento Sato “TSUBAME2.0: The First Petascale Supercomputer in Japan and the Greenest Production in the World”, in Chapter 20, Contemporary High Performance Computing From Petascale toward Exascale, Edited by Jeffrey S. Vetter, pp.525-556, Chapman and Hall/CRC 2013, Print ISBN: 978-1-4665-6834-1, eBook ISBN: 978-1-4665-6835-8.

小柳義夫 中村宏 佐藤三久 松岡 聡, 「岩波講座 計算科学 別巻 スーパーコンピュータ」(第4章 スパコンの進化とエクサフロップスに向けた今後の課題), 214 ページ, 岩波書店, 2012 年発行, ISBN978-4-00-011307-6 C3340

〔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〕
受賞

Leonardo A. Bautista Gomez, Special Certificate of Recognition for achieving a perfect score at the Supercomputing Conference 2011 (SC11) for the paper: "FTI: High Performance Fault Tolerance Interface for Hybrid Systems", Seattle USA, November 2011.

Kento Sato, Kathryn Mohror, Adam Moody, Todd Gamblin, Bronis R. de Supinski, Naoya Maruyama and Satoshi Matsuoka, the 14th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid2014) Best Paper Award for the paper: "A User-level InfiniBand-based File System and Checkpoint Strategy for Burst Buffers", Chicago USA, May 2014.

Satoshi Matsuoka, 2014 IEEE Computer Society Sidney Fernbach Award, New Orleans USA, November 2014.
<http://www.computer.org/portal/web/pressroom/Satoshi-Matsuoka-Recognized-with-2014-IEEE-Computer-Society-Sidney-Fernbach-Award>

ホームページ等

<http://matsu-www.is.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

松岡 聡 (Satoshi Matsuoka)
東京工業大学・学術国際情報センター・教授
研究者番号：20221583

(2)研究分担者

實本 英之 (Hideyuki Jitsumoto)
東京工業大学・学術国際情報センター・助教
研究者番号：00545311

(3)連携研究者

遠藤 敏夫 (Toshio Endo)
東京工業大学・学術国際情報センター・准教授
研究者番号：80396788

佐藤 仁 (Hitoshi Sato)
東京工業大学・学術国際情報センター・特任助教
研究者番号：00550633

丸山 直也 (Naoya Maruyama)
理化学研究所・計算科学研究機構・チームリーダー
研究者番号：60532801

滝澤 真一郎 (Shinichiro Takizawa)
理化学研究所・計算科学研究機構・研究員
研究者番号：80550483

佐藤 賢斗 (Kento Sato)
Lawrence Livermore National Laboratory・Postdoctoral Research Staff
研究者番号：50739696

(4)研究協力者

Leonardo Bautista Gomez
Barcelona Supercomputing Center・Senior Researcher

Jens Domke
Technische Universitat Dresden・ZIH・Research Associate