

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540049

研究課題名(和文) ストレージ階層化時代のチェックポイント・リスタート技術の新展開

研究課題名(英文) Checkpoint restart technologies for hierarchical storages

研究代表者

滝沢 寛之 (Hiroyuki, Takizawa)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：70323996

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：アプリケーション実行中にその状態を定期的に保存する状況を想定し、それを階層的なストレージに書き込む際の頻度などを自動調整する方法について検討した。また、その書き込みに要する時間を短縮する方法について検討した。そのためには、将来書き込まれる蓋然性の高いデータを投機的に書き込んでおくアプローチが有効であることから、その予測方法についても考察した。その予測のためには対象アプリケーションのメモリアクセスパターンを調べる必要があるため、メモリ解析ツールを開発した。大規模システムのジョブスケジューリングのシミュレータを開発し、これらの手法の効果を検証した。

研究成果の概要(英文)：Assuming that the state of an application is periodically saved during its execution, we have considered an automatic tuning method for the frequency of saving the state to a hierarchical storage system, and also have discussed a way for reducing the time for writing the state to the storage. A promising approach to the reduction is to speculatively write data that will be written in the future at a high probability. Hence, one technical issue is how to predict such data. For the prediction, we need to analyze memory access patterns of the target application. Hence, we have developed a performance analysis tool for the purpose. The validity and effectiveness of these proposed methods are evaluated based on job scheduling simulation of a large-scale computing system.

研究分野：高性能計算

キーワード：高性能計算 耐障害性 チェックポイントリスタート

1. 研究開始当初の背景

科学技術分野における数値シミュレーションの重要性は言を俟たない。その常に増大し続ける高性能化・大容量化の要求に対応するために、高性能計算(HPC)システムも大規模化の一途をたどっている。その結果として、システムの部品点数の増加、微細化によるソフトウェア確率の増大、システムソフトウェアの複雑化など、様々なシステムの不安定要因が顕在化している。仮定によっては、将来のエクサスケールのシステムの平均故障間隔(Mean Time Before Failure, MTBF)が数分程度になるという試算すらある。したがって、長時間を要する数値シミュレーションを最後まで正常に実行するためには、故障発生時にそれまでの計算を無駄にしない「耐故障性」を実現する高信頼化技術が必要不可欠である。

チェックポイント・リスタート(CPR)は、計算途中の状態を定期的にチェックポイントファイル(CPF)として保存しておき、故障時にはその保存された CPF から状態を復元し、計算を再開する技術である。故障時に計算を最初からやり直すのではなく、故障前の状態から計算を再開することができるため、CPRは大規模 HPC システムの高信頼化のための最も有望な技術の一つとして知られている。しかし、将来の超大規模化した HPC システムにおいては、CPF の取得に現在よりもさらに長い時間を要するにも関わらず、故障頻度の増加に対応するために CPF 取得の間隔も短くしなければならない。その結果として、総実行時間に占める CPF 取得時間の割合が大きくなり、数値シミュレーションの高速化を妨げる深刻な問題となる。

2. 研究の目的

高性能計算システムの大規模化に伴い、科学技術計算の途中でシステムの一部が故障する確率は今後さらに高まることが確実視されている。多くの場合、故障時には計算の全体や一部を故障前の状態に戻す(リスタート)必要があるため、計算の状態を何らかの方法で定期的に保存(チェックポイント)する必要がある。本研究の目的は「どのデータを、どのタイミングで、どこへ保存するか」を自動チューニングするチェックポイント・リスタート技術を開拓することである。ビッグデータ時代の深く階層化したストレージシステムを活用し、各階層の特性を考えてチェックポイントデータを自動的かつ効果的に分散配置する技術を確立する。

本研究では、CPR の高効率化に焦点を絞り、将来の大規模 HPC システムの高信頼化に資する技術の確立を目指す。将来の大規模 HPC システムでは、ストレージシステムが深く階層化することが予想される。各階層でストレージの I/O 性能、容量、アクセス可能範囲等の特性が異なることを考えると、CPF を適切に保存する方法は自明ではない。大規模 HPC

システムのごく一部が故障した場合には、その一部の状態を復元するだけで計算を再開できる可能性がある。一方、システム全体におよぶ故障に対しては、システム全体の状態を復元する必要がある。前者のような故障の頻度は高いため、高速で局所的なストレージに高い頻度で CPF を保存すべきである。一方、後者のような故障の頻度は低いが、低速な大域的ストレージに CPF を保存する必要があるため、CPF 取得の頻度をできる限り低く抑えるべきである。このように様々な要因を考慮して効率的な CPR を実現するために、本研究では数値シミュレーションの「どのデータを、どのタイミングで、どこへ保存するか」を自動チューニングする技術を研究する。その結果として、階層的チェックポイントティング[1]、インクリメンタルチェックポイントティング[2]、投機的チェックポイントティング[3]などの高度な CPR 高効率化技術をアプリケーションから透過的に利用するためのプログラミングインタフェースおよび実行環境を研究開発する。

- [1] Moody et al. "Design, Modeling, and Evaluation of a Scalable Multi-level Checkpointing System," SC10, 2010.
- [2] Naksinehaboon et al. "Reliability-Aware Approach: An Incremental Checkpoint/Restart Model in HPC Environments," CCGRID2008, 2008.
- [3] Matsuoka et al. "Speculative Checkpointing: Exploiting Temporal Affinity of Memory Operations," HPC Asia, 2009.

3. 研究の方法

本研究ではチェックポイント効率(E)を次式で定義し、一定以上の耐故障性を確保した上で効率を高めることを考える。

$$E = T_{sim} / (T_{sim} + T_{cpr}) = T_{sim} / T_{total}$$

ここで T_{sim} は数値シミュレーション実行に要した時間の合計、 T_{cpr} はシミュレーション中の CPR に要した時間の合計であり、 T_{total} は総実行時間である。本研究ではインクリメンタルチェックポイントティング(ICPR)、階層的チェックポイントティング(HCPR)、投機的チェックポイントティング(SCPR)やデータ圧縮などの技術を利用した場合のチェックポイント効率をモデル化する。ICPR と HCPR を組み合わせることにより、メモリデータの差分のみを高速なローカルストレージに高頻度で保存し、グローバルストレージ上の CPF を更新する頻度を抑える等、階層的ストレージの有効活用を期待できる。さらに SCPR を組み合わせることにより、CPF を保存するタイミングを早めることが可能である。逆に、データ圧縮によって、CPF を保存するタイミングを遅らせる代わりにデータサイズを削減す

るとも可能である。このように、CPF の階層的ストレージへの分散配置を空間的、時間的に調整可能とし、性能モデルに基づいて適切に自動チューニングすることが、本研究の学術的に挑戦的な点である。

4. 研究成果

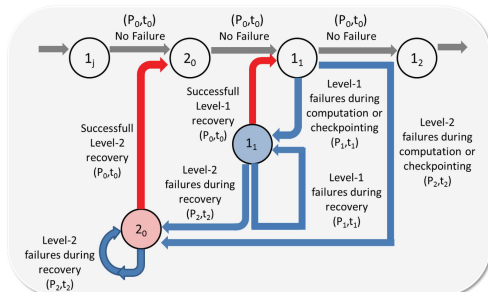


図1 階層的チェックポイントの実行モデル

図1に示すように、アプリケーション実行中にその状態を定期的にCPFへ書き込む状況を想定し、それを階層的なストレージに書き込む際の頻度などを自動調整する方法について検討した。CPFの書き込みのオーバーヘッドを削減するために、特にSCPRの有効活用の検討を進めた。すでに更新され、しかも近い将来に再度更新される可能性の低いメモリページ(ダーティページ)をCPFに書き込んでおくことにより、定期的なCPFへの書き込みに要する見かけ上の時間の短縮を期待できる。しかし、予測を誤った場合にはCPFへの書き込み回数が増加するため、その予測方法が効率に与える影響は大きいため、その予測方法について検討した。その結果、大きな配列に逐次アクセスするような規則的なメモリアクセスを検出することで、SCPRの効果の向上が見込めることが明らかになり、その効果を定量的に評価、検討した。

また、近い将来更新される蓋然性の低いダーティページを予測する手法の構築を目的として、アプリケーション解析ツール Exana に対して、アプリケーションから実行時にアクセスしたメモリに関するトレース情報を取得するとともに、ダーティページの推定に有用な時間情報を付加する機能の追加を行った。

さらには、評価用のジョブシミュレータを構築した。本シミュレータでは、実運用で得られた統計情報に基づいて生成したジョブミックスを使用し、例えばCPRを組み込んだスケジューリングアルゴリズムの評価や、ノード故障が発生した場合のスケジューリング性能の評価等を実施することができる。SCPRを行った場合には継続的にファイルアクセスが発生するため、その効果はファイルシステムのバンド幅に依存していることがわかった。

本研究で性能モデルの検討を進めたところ、性能や上述の効率に着目した場合と、消費エネルギーに着目した場合にCPF書き込み

の間隔の最適値が異なることが明らかになった。このため、それぞれに関して適切な間隔を決めるための手法を提案した。

また、その提案手法の大規模システムでの有効性を検証するために、大規模システムのジョブレベルのシミュレータを開発した。シミュレータ上でCPF書き込み間隔を変化させて効率や消費エネルギーを算出することにより、提案手法の有効性を明らかにした。

さらに、アプリケーションの性能解析ツール Exana のさらなる機能拡張を行い、SCPRにおいて比較的単純な予測モデルを用いて高速にメモリアクセスパターンの大まかな予測を行うことの妥当性を議論した。

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1件)

M.A. Amrizal, S. Hirasawa, H. Takizawa, and H. Kobayashi, "Automatic Parameter Tuning of Hierarchical Checkpointing," Lecture Notes in Computer Sciences, vol.8969, pp. 298-309, 2015, 査読有。

〔学会発表〕(計3件)

Y. Sato and T. Endo, "Dynamic Compilation for Transparent Data Locality Analysis and Memory Subsystem Tuning," Workshop on Architectural and MicroArchitectural Support for Binary Translation and Dynamic Optimization (AMAS-DO 2016), Barcelona, Spain, 2016年3月13日。
M.A. Amrizal and H. Takizawa, "Toward Effective Checkpointing for HPC Applications," IPDPS 2015 PhD Forum, Hyderabad, India, 2015年5月26日。
M. Sato, R. Egawa, H. Takizawa, and H. Kobayashi, "On-chip Checkpointing with 3D-Stacked Memories," IEEE 3D System Integration Conference 2014, Cork, Ireland, 2014年12月1日。

6. 研究組織

(1)研究代表者

滝沢 寛之 (Hiroyuki Takizawa)
東北大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号：70323996

(2)研究分担者

宇野 篤也 (Atsuya Uno)
理化学研究所・計算科学研究機構・チームヘッド
研究者番号：10359218

(3)連携研究者

小林 広明 (Hiroaki Kobayashi)

東北大学・サイバーサイエンスセンター・
教授
研究者番号：40205480

(4)連携研究者

江川 隆輔 (Ryusuke Egawa)
東北大学・サイバーサイエンスセンター・
准教授
研究者番号：80374990

(5)連携研究者

佐藤 幸紀 (Yukinori Sato)
東京工業大学・学術国際情報センター・特
任講師
研究者番号：30452113