

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330084

研究課題名(和文) マルチスレッドプログラムの実行時間と消費エネルギーを削減するスケジューリング機構

研究課題名(英文) Multi-thread scheduling mechanism for reducing execution and energy consumption

## 研究代表者

日下部 茂 (Kusakabe, Shigeru)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・准教授)

研究者番号：70234416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：マルチスレッドアプリケーションに対して、実行時効率の観点から望ましくないイベントを削減するようなスケジューリングを行うことで、実行時間だけでなく消費エネルギーの削減も目指す。これまでに開発してきたスケジューラのフレームワークにヘルパースレッドを組み込み、振る舞いを制御できるパラメータを設定できるようにしたインタフェースを準備した。ヘルパースレッドは、パフォーマンスカウンターをモニターし、適宜振る舞いを調整し、スレッドスケジューラが最大限の効果を発揮できるように試みる。単一指標に基づく推定だけでなく、複数指標に基づく推定も行った。単一ノード計算機だけでなく並列分散処理環境にも適用した。

研究成果の概要(英文)：We propose a thread scheduling framework to reduce energy consumption as well as execution time. In this research, we developed different versions to experiment our framework. We added the helper thread which monitors performance counters and adjusts the behavior of the scheduler through the API to try to maximize the effectiveness of the scheduler. We developed from a simple version to more complex ones which change the monitoring target. As our extension, we apply our framework to a large-scale parallel and distributed processing framework, Hadoop. We also tried extending our framework to accommodate other targets such as fairness in addition to energy efficiency.

研究分野：ソフトウェア

キーワード：マルチスレッド スケジューラ 省エネルギー

### 1. 研究開始当初の背景

クロック速度の高速化での消費電力の問題や、命令レベル並列性の活用の限界といった問題から、命令レベルよりも粒度が粗いスレッドレベルの並列性を活用して性能向上を図ることが重要となっていた。このような傾向を踏まえ、我々は汎用計算機システムでのマルチスレッドアプリケーション実行を効率化するスケジューラの研究を行ってきた。このスケジューラは、実行コンテキストを共有しているスレッドの実行優先度を一定の閾値内で調整し集約的な実行を試みるものであった。

そのスケジューラはメモリ階層を有効に活用しコンテキスト切替等によるオーバーヘッドを削減して実行効率を向上させるもので、その主な特徴は以下の通りであった：

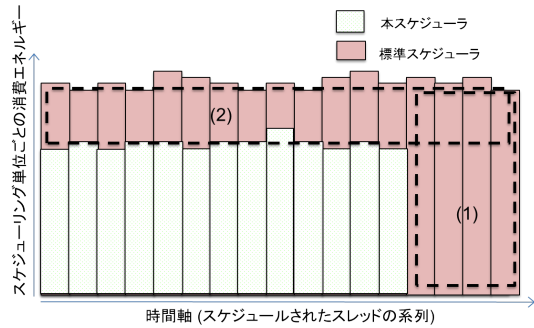
- メモリ階層(典型的にはメインメモリとキャッシュメモリ)がある計算機システムに有効
- マルチプロセスのオペレーティング・システムが、スレッドをプロセス同様のスケジューリングキューで処理する、(ユーザスレッドではなく)カーネルスレッドを対象とする
- 特定のアプリケーションを選択して提案スケジューリング方式の対象に出来る(選択しなかったものは通常のスケジューリングで制御される)
- マルチコアシステムでは時間軸方向に加えコア空間での集約実行も可能
- 集約のさせ方は API を通して制御可能で、公平性とのトレードオフなどを調整できる

### 2. 研究の目的

マルチスレッドアプリケーションを実行する際の、省エネルギー化と実行時間短縮を自律的に両立させる汎用計算機システムのスケジューリング機構を実現することが目的であった。

高クロック化の消費電力問題や命令レベル並列処理の限界などからスレッドレベル並列処理が着目され、マルチスレッドアプリケーション実行最適化の重要性が増していた中で、研究を行っていたスレッドスケジューリング機構は、実行時間短縮だけでなく消費電力削減にも有望である見込みを得ていた。本研究では、実行時間短縮や消費電力削減と関連が深いプロセッサ内イベントを特定した後、対象イベントの発生状況をモニタリングしながらスケジューリング機構の動作を最適化するヘルパースレッドを開発し、自動的な実行時間短縮や消費電力削減を実現することを目的としていた。

適切なパラメータ値を与えることで、スケジューラは同時に実行している他のアプリケーションに悪影響を与えずに、対象のマルチ

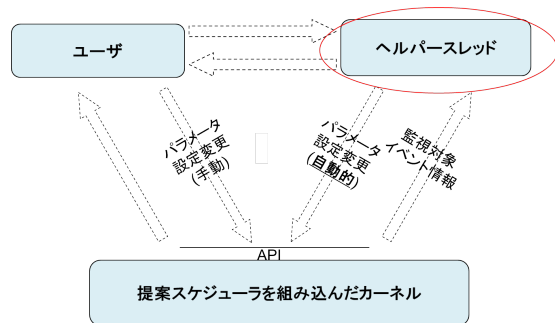


スレッドアプリケーションの実行効率を向上させる。この実行効率の向上は、実行時間だけでなく、消費エネルギーの削減にも有望と考える。上図にその概念を示す。図の(1)はオーバーヘッド削減に伴う実行時間短縮によるエネルギー削減を示し、(2)は実行オーバーヘッド削減による単位時間当たりのエネルギー削減の集積を示している。

### 3. 研究の方法

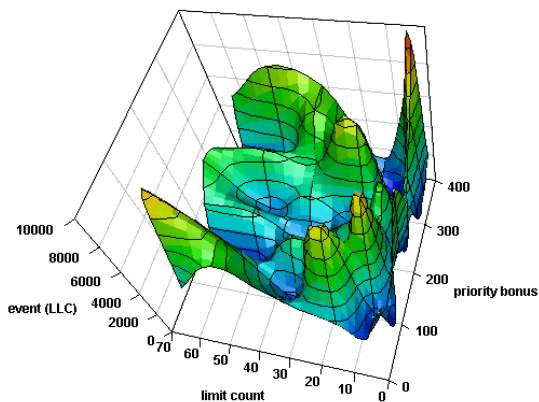
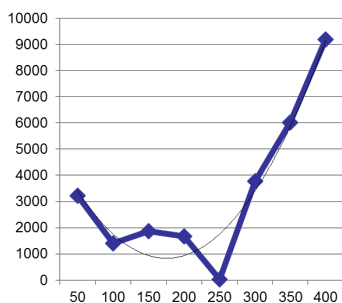
前述のような効果を得るための集約実行の適切な設定値は、対象アプリケーションの特性だけでなく並行して動作するアプリケーションの影響も受けるため、事前に静的に決定すること難しい。本研究は、これまでの研究をベースに、特定の内部イベントをモニタリングしながら、集約実行の制御値の設定を自律的に行い、自動的にマルチスレッドアプリケーションの実行効率を向上させ消費エネルギー削減を実現する機構を開発することを旨とした。

より具体的には実行時間短縮と消費エネルギーの低減を自動的に行う機構を実現するため、追加的なオーバーヘッドを抑えつつ可能な限り高い精度でイベントの発生状況を見ながらスケジューリング機構の集約実行制御値を調整するようなヘルパースレッドを実現することである。自動的なスレッドスケジューリング制御機構の概要を下図に示す。図の下部に示すような既提案の集約スケジューリングの基本機構を組み込んだカーネルが、外部から集約実行を制御するためのAPIを通して制御されるような構成を基本とした。

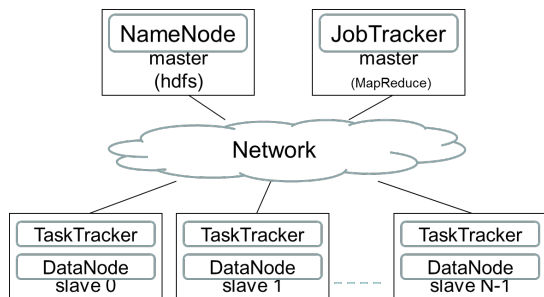


スレッドスケジューラのフレームワークにヘルパースレッドを組み込み、さらにインタフェースを準備した。エネルギー消費と公平

性を両立するなどといった観点から好ましくないイベントが削減できるように、振る舞いを変えるパラメータを設定できるようにした。ヘルパースレッドは、パフォーマンスカウンタをモニターし、スレッドスケジューラが最大限の効果を発揮できるように制御パラメータを変更しながら適宜振る舞いを調整する。以下の図のように、静的な設定に基づく調整だけでなく、指標に基づいて推定を行いながら動的に設定値を変更したり、段階を分け複数の指標に基づいて推定を行なって設定値を変更するなど、複数の方式でエネルギー消費量の最適化を目指した。

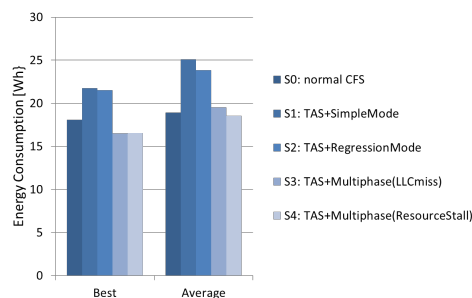


また、単一ノードの計算機システムへの適用に加え、以下のようなプロセス構造を持つ、大規模分散並列フレームワークであるHadoopのシステムに提案のスレッドスケジューリングフレームワークを適用した。



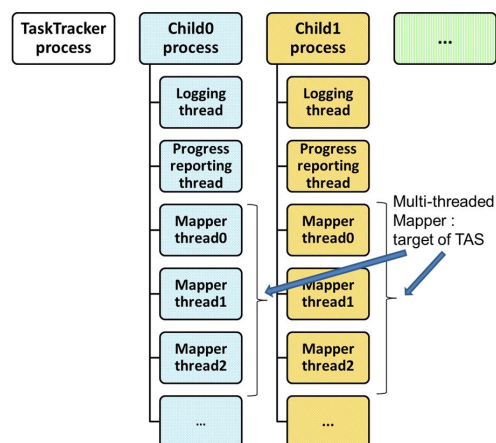
#### 4. 研究成果

追加的なオーバーヘッドを抑えつつ可能な限り高い精度でイベントの発生状況をモニタリングしながらスケジューリング機構の集約実行制御値を調整するようヘルパースレッドを実装し実験を行った。スレッドスケジューラを使わないデフォルトの方式、静的な設定値に基づいてスケジューリングする方式、動的にモニタリングした結果に基づいて最適な設定を推定する方式、動的にモニタリングする対象を段階ごとに替える方式について実験した。



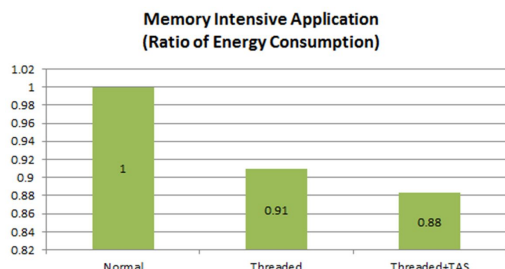
実験の結果、上の図のような結果が得られた。左のグループが最善の場合、右のグループは平均の結果である。最善も平均も、提案方式の中では、ステージを分けてモニタリングする指標を変えて最適設定を推定する方式の効果が良かった。平均ではデフォルト方式と比較して効果が出たとは言えないものの、最善の場合は、デフォルトよりエネルギー消費量の削減が実現できた。今後の課題として、安定して高い効果を出すような改善が必要である。

Hadoopのシステムに提案のスレッドスケジューリングフレームワークを適用した際は、Mapperをデフォルト実行およびスレッド実行し、さらにスレッド実行の場合は、提案スレッドスケジューリングを使う場合と使わない場合の三通りで実験した。



アプリケーションは、提案方式の効果が期待できる、メモリ集約型の処理を行うものを使った。以下に示すように、今回の実験ではスレッド化だけでも効果があり、さらに提案ス

ケジューラを使うことで、さらに効果が高まった。



また、エネルギー消費量の削減だけでなく、公平性など別の目標を設定可能にする取り組みも行った。

#### 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5件)

1. S. M. Mostafa, S. Kusakabe, Towards Maximizing Throughput for Multithreaded Processes in Linux, International Journal of New Computer Architectures and their Applications (IJNCAA) 4(2): 70-78, The Society of Digital Information and Wireless Communications, (ISSN:2220-9085), 2014年7月

[学会発表](計15件)

1. Samih M. Mostafa, Shigeru Kusakabe, Hirofumi Amano, Fairness Scheduler for Multithreaded Programs in Virtual Machine Environment, Fourth International Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers (JEC-ECC2016), 2016年6月
2. H. Takasaki, S. M. Mostafa and S. Kusakabe, Monitoring Hadoop by Using IEEE1888 in Implementing Energy-Aware Thread Scheduling, Proc. of The 14th IEEE International Conference on Scalable Computing and Communications (ScalCom-2014), In CD, 2014年12月
3. S. Nagashima, and S. Kusakabe, Preliminary evaluation of eco-threading framework for commodity platform, Proc. of IEEE International Green Computing Conference (IGCC 2013), 2013年6月

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

日下部 茂 (KUSAKABE, Shigeru)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・准教授  
研究者番号：70234416