

審査の結果の要旨

氏 名 ヘルム クリスティアン ドルフ

本論文は、「Discovery of Memory Performance Problems Using Hardware Instruction Sampling (命令サンプリングによるメモリ性能問題の検出手法)」と題し、並列計算機のプログラミングにおいてしばしば生ずる、メモリ性能の問題による性能劣化を、ハードウェア命令サンプリングによって発見する手法とツールを提案した論文である。全体は8章から構成され、英文で記述されている。

第1章「Introduction (序論)」では、並列プログラム開発において性能の解析が重要になること、特にDRAM主記憶のバンド幅とfalse sharingが、しばしば深刻な性能劣化をもたらすことを述べている。このために近年のマイクロプロセッサが提供している性能監視ユニット (Performance Monitoring Unit; PMU)、特に命令サンプリングが、アクセスしている命令のアドレスやアクセスされているデータのアドレスを提供し、したがって性能改善に資する情報を得るのに有用であることを述べている。その上で本論文の主な貢献が、上述した二つの問題を自動的に検出して問題となるデータや関数を提示する方法と、将来に渡って可搬性が期待できるツールの実装、その評価であると述べている。

第2章「Background (研究背景)」は以降の章を理解するための背景として、マイクロプロセッサのメモリ階層やキャッシュなど性能に影響を与える要素、性能プロファイリングの基本的な手法(シミュレーション、コード挿入、ハードウェアによる性能監視)、焦点を当てる2つのメモリ性能問題(false sharingとDRAM主記憶へのアクセス衝突)などについて述べている。

第3章「Related Work (関連研究)」では、関連する研究を概観、分類し、既存研究を、ある特定の問題の検出に焦点をあてたものか、可視化などによる人手による観察・発見を助けるものに大別している。前者についてはさらに焦点を当てる性能問題でそれらを分類し、Non Uniform Memory Architecture (NUMA) 関連、データ構造の配置関連、キャッシュミス関連、false sharing 関連の研究について述べている。後者はコマンドラインベースのツールや可視化ツールについて述べている。さらに、PMUデータの理解や解析に関する研究についても触れている。

第4章「Discovery of Memory Performance Problems (メモリ性能問題の検出)」では、上述した2つのメモリ性能問題について、その検出方法を述べている。始めに提案手法は共通のプロファイリング実行から得られるひとつのデータで両方の問題を解析できることについて述べている。false sharingに関してはCPUが提供するキャッシュミス時のHITMフラグと、プログラムのオブジェクト(メモリ割り当ての単位)とその寿命を組み合わせることで正確なfalse sharingの検出が行える手法を提案している。DRAM主記憶へのアクセス衝突については、それを検出するために、ロード命令が被った遅延を利用できることに注目し、衝突が起きていない状態の遅延よりも大幅に遅延が増加した際に主記憶へのアクセス衝突と判定する手法を提案している。また、主記憶とCPU間のデータ量を正確に計測するのに使用すべきPMUカウンタについても考察・調査している。

第5章「Tool Implementation and Features (ツール実装とその特徴)」では提案

手法を実装し、かつその他の手動解析のためのデータ取得も行えるツール PerfMemPlus の実装について述べている。特に、PMU 機能を用いたツールはハードウェア依存部分が多く、将来に渡る利用可能性がすぐに失われてしまうことに対して配慮し、Linux OS 標準の機能であり将来も維持されると期待される Perf を利用した実装方針について述べている。Perf に加え、オブジェクトの割当や寿命の取得、デバッグ情報を利用したアクセス時の文脈取得、それらを統合するための SQLite とその可視化ツールを組みあせて、PerfMemPlus が構成されていると述べている。

第 6 章「Reverse Engineering of Intel DRAM Addressing Using Performance Counters (性能カウンタを用いた Intel の DRAM addressing の reverse engineering)」では、物理アドレスから DRAM のチャンネル、ランク、バンクへのマッピングがどのように行われるかを性能カウンタを用いて調査する手法を提案している。これにより特定のチャンネルやバンクへのアクセス集中によって性能劣化が起きているかを知ることができるようになる。

第 7 章「Evaluation (評価)」では手法の評価について述べている。false sharing 検出手法の評価対象プログラムとして PARSEC、Phoenix およびいくつかの人工的なベンチマークが選ばれ、既存研究と比べ、高い精度で検出が行えることを示している。DRAM 主記憶へのアクセス衝突については、いくつかの人工的ベンチマークと、PARSEC を用いて評価がなされ、問題が知られている二つのアプリケーションで、実際に問題が検出されていることを示している。さらに PerfMemPlus を利用して、性能改善が得られたベンチマークやアプリケーションの事例が 4 つ述べられている。

第 8 章「Conclusion (結論)」では全体をまとめ、命令サンプリングが様々な問題の診断に有効であることを述べている。そして、DRAM 主記憶へのアクセス衝突に関しては遅延を元にすることで衝突の度合いが定量的に得られること、false sharing に関して偽陽性もなく、これまで知られていなかったケースも検出できていることを述べている。さらに将来展望についても述べており、問題の検出を、問題のある・なしの 2 値問題よりも、性能への影響として定量化することの有用性などを指摘している。

以上これを要するに、本論文は、並列プログラミングにおいてしばしばメモリアクセス性能を引き出せないことが問題となること、その原因を解析することが困難であるという重要な課題を解決するため、ハードウェアの PMU、特に命令サンプリングベースの手法に注目して、false sharing および DRAM 主記憶へのアクセス衝突という、多くのアプリケーションが影響を受けている問題を自動的に検出する手法、それらを利用しやすくかつ将来のアーキテクチャでも動作するようツールとして実装したもので、電子情報学の発展に寄与するところが少なくない。よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。