

論文審査の結果の要旨

| | | | |
|---|--|----|-------|
| 報告番号 | 博（工）甲第3号 | 氏名 | 土肥 慶亮 |
| 学位審査委員 | 主査 柴田 裕一郎 副査 小栗 清 副査 喜安 千弥 副査 藤本 孝文 | | |
| <p>論文審査の結果の要旨</p> <p>土肥慶亮氏は、2011年4月に長崎大学大学院工学研究科博士後期課程に進学し、現在に至っている。同氏は、工学研究科博士後期課程に進学以降、当該課程の所定の単位を修得するとともに、FPGA(Field Programmable Gate Array)やGPU(Graphics Processing Unit)を用いた並列計算アクセラレータに関する研究を行い、その成果を2013年12月に主論文「A Study on Efficient Application Mapping on Parallel Computing Accelerators」として完成させ、参考論文として、学位論文の印刷公表論文29編（うち審査付き論文13編）、学位の基礎となる論文3編（うち審査付き論文2編）、その他の論文5編（うち審査付き論文1編）を付して、博士（工学）の学位を申請した。長崎大学大学院工学研究科教授会は、2013年12月18日の定例教授会において論文内容等を検討し、本論文を受理して差し支えないものと認め、上記の審査委員を選定した。委員は主査を中心に論文内容について慎重に審議し、公開論文発表会を実施するとともに、最終試験を行い、論文審査および最終試験の結果を2014年2月19日の工学研究科教授会に報告した。</p> <p>本論文はFPGAやGPUなどの並列計算アクセラレータへの効率の良いアプリケーション実装手法を確立し、その効果を明らかにすることを目的としており、以下の全9章から構成されている。</p> <p>まず第1章では、これまでのプロセッサアーキテクチャ技術の変遷を概観するとともに、主として電力密度の制約からFPGAやGPUなどを用いた並列アクセラレータが近年注目されるに至った経緯を整理している。また、これらのデバイスにおけるプログラミングモデルやプログラミング環境について述べた上で、アプリケーション実装の巧拙が性能や効率に直截に影響することや、アプリケーションの効果的な実装手法が必ずしも確立されていないという問題点を指摘し、本研究で解決すべき課題とその意義について明らかにしている。</p> <p>第2章では本論文の議論の対象となる並列アクセラレータが持つアーキテクチャの特徴や、それらのプログラミング環境および高位合成技術の現状について概観し、本論文の議論が立脚する技術的基盤を明らかにしている。</p> <p>第3章では、効率の良いアプリケーション実装を実現する基本戦略として、比較的小容量ではあるが高いバンド幅を提供可能な内部メモリへの並列アクセス性に焦点を当て、連続的なデータフェッチと均質で反復的な計算をオーバーラップさせるステンシル計算およびストリーム処理の設</p> | | | |

計原理と、その実装手法の指針を示すとともに、これらを一種のデザインパターンとして用いてアプリケーションをマッピングすることで内部メモリを効率的に利用することを提案している。

第4章では、第3章で示した設計原理を遺伝子解析などに利用されるローカルライメント法の一つであるSmith-Watermanアルゴリズムに適用し、GPUに実装した効果について評価している。特に内部メモリを有効利用するために並列スレッド間の同期操作を軽量化する工夫を行うことにより、4ユニット構成のプラットフォームにおいて最大43.05 GCUPS (Giga Cell Updates per Second) の性能を達成できることを示している。この性能は実装時点において世界最速値であったことから、本論文の手法の有効性は明らかである。

第5章では、FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法による3次元電磁界解析への応用とそのGPU実装について述べている。本アルゴリズムは典型的なステンシル計算の一種として知られるが、アンテナの特性解析等の実用に供するためには吸収境界条件の処理が必要となる。この処理は計算やメモリアクセスの均一性を著く損なうことから、直截にステンシル計算のデザインパターンを適用することは難しい。そこでこの問題を解決するために、吸収境界条件と周期境界条件を組み合わせた新しい境界条件の計算手法を提案している。これにより、3章で示した設計原理に適合する計算領域の範囲を大きくすることができ、境界条件処理による性能上のボトルネックを緩和できる。本プログラムを実際のアンテナ特性解析に応用したところ、計算値と実測値は良好な一致を示したことから、提案手法の実用性は明らかである。また、ピークメモリバンド幅に占める実利用メモリバンド幅の割合も55.8%を達成し、他の文献に報告されている値に比べて大きく改善できることを実証している。

第6章ではリアルタイム画像処理への応用について議論している。具体的には、HOG (Histograms of Oriented Gradients) 特徴量およびAdaBoost (Adaptive Boosting) 法に基づく動画像からの人検出アルゴリズムを、外部メモリを一切用いることなく、第3章で示したストリーム処理による深いパイプライン構成によりFPGAに実装している。また、組込みシステムへの応用を想定し、演算の固定小数点数化や三角関数の区間近似法などによって要求ハードウェア量を削減することで、入出力インタフェースも含めて中規模なFPGAへ単体実装することを可能にしている。歩行者画像データベースを用いた評価によれば、これらのハードウェアの単純化が検出精度へ与える影響は限定的である。実証実験の結果、640×480ピクセルの画像に対して62.5 FPS (Frames Per Second) の処理速度を達成できることを示し、また、カメラデバイスの性能制約が無ければ、最大112.5 FPSの処理速度を達成できることも明らかにしている。本研究は世界的に見ても最初期のリアルタイム人検出処理のFPGA単体実装であり、以降多くの研究チームに影響を与えていることから本手法の高い有効性が伺える。

第7章ではFPGA上のストリーム処理構成の性能モデルに関して議論している。高位合成技術の発展により、ソフトウェア的な抽象度の高い記述から自動でFPGA上に回路を構成することが可能となり、従来のハードウェア記述言語を用いたレジスタトランスファレベルによる設計に比較するとFPGAアクセラレータにおけるプログラムの設計生産性は格段に向上している。しかし、半導体プロセス技術の進歩に伴いFPGAの規模も拡大しており、回路合成、配置配線には依然として多大な時間を要する。ユーザから見ると、例えばパイプラインの並列数やメモリアクセス当たりの演算数など様々な設計パラメータの選択肢が有り得るが、どのようなパラメータを選択すれば良好な実装が得られるかは明らかではなく、すべてパラメータを網羅的に試して比較するのは設計時間の点

から現実的ではない。この問題を解決するために、設計パラメータと性能の関係を容易に分析できる性能モデルを構築し、システム由来の制約の中で性能を最大化する設計パラメータの選択法を具体的に示している。また、3次元熱拡散シミュレーションをベンチマークアプリケーションとしてモデルの妥当性を検証し、少ない合成試行回数で最適な設計パラメータを導けることを確認している。さらに、消費電力と設計パラメータとの関係についても網羅的な実装実験の結果に基づき考察しており、本ベンチマークアプリケーションについては性能向上とエネルギー効率の向上が両立することを明らかにしている。

第8章では、動画像への楕円推定処理をベースとしたリアルタイム視線検出アルゴリズムのFPGA実装について議論している。まず、入力画像中の瞳領域に映り込んだ反射光を除去し、Starburstアルゴリズムにより瞳の境界候補となる特徴点の抽出を行うが、これらの処理に若干の変更を加えることにより、すべてストリーム処理の形で実現できることを示している。後段ではRANSAC (Random Sample Consensus) アルゴリズムによる楕円推定に必要となる小規模連立方程式ソルバの高スループットな実現法について議論している。3種類のアルゴリズムを比較し、Gauss Jordan法やLU分解法などの一般的な手法に対して、ソフトウェア処理では非効率なことで知られるCramerの公式に基づく手法がリソースの使用量では良好な結果を示すなど興味深い知見を与えている。また、ハードウェア記述言語による設計と高位合成技術を用いた設計の比較を行い、性能についてはほぼ同程度の実装が得られるものの、ハードウェア量については高位合成ツールに依然改善の余地があることを示唆している。

最後に、第9章では本研究で得られた知見が整理され総合的に考察されるとともに、既存のアーキテクチャを前提としたアルゴリズムをそのまま用いるだけでなく、本論文で示されたデザインパターンに適合するように修正することの重要性が強調されている。

以上のように本論文は、これまで必ずしも明らかではなかった並列計算アクセラレータにおける高性能・高効率なアプリケーション実装手法の指針を与えるとともに、これが科学技術計算から動画認識までの幅広い応用分野において有効であることを実証したものである。本論文で示された優れた実装を与えるための具体的な設計戦略や技法、性能モデルには新規性および独創性があり、高い学術的価値を有するものと評価できる。

学位審査委員会は、土肥慶亮氏の研究成果が計算機工学の分野において極めて有益な成果を得るとともに、計算機工学の進歩発展に貢献するところが大きく、博士(工学)の学位に値するものとして合格と判定した。