

氏名(本籍)	Changdao Du		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第 9805 号		
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	Exploring High-Level Synthesis to FPGA-based Highly Efficient Stencil Computation (FPGA を用いた高効率なステンシル計算を実現する高位記述に関する研究)		
主査	筑波大学 教授	工学博士	朴 泰祐
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	安永 守利
副査	筑波大学 教授	工学博士	丸山 勉
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	山口 佳樹
副査	理化学研究所 チームリーダー	博士(情報科学)	佐野 健太郎

## 論文の要旨

審査対象論文「Exploring High-Level Synthesis to FPGA-based Highly Efficient Stencil Computation (FPGA を用いた高効率なステンシル計算を実現する高位記述に関する研究)」は、計 6 章で構成され、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章では、FPGA 開発における問題点を議論するために、高位合成言語による問題解決の可能性を述べている。審査対象論文は題目の通り、FPGA を対象とした高位合成言語による設計方法について論述したものである。そこで、研究背景を含めてこの目的の重要性を紹介し、解決すべき課題と次章以降の構成を紹介している。

第 2 章では、FPGA の基本構成についてまず述べている。続いて、基本構成の採用する細粒度アーキテクチャと親和性の高い Register Transfer Level (RTL) の設計フローと高位記述言語による設計フローについて説明している。そして、これらの設計の違いと高位記述言語に関する関連研究を紹介し、現在の技術課題について整理している。

第 3 章では、FPGA 上のステンシル計算について、時空間の並列性及び繰り返し計算を考慮した高位合成記述による性能向上手法について紹介している。関連研究を引用しつつ、性能向上を実現するための課題と解決方法について取り上げている。

第 4 章では、本論文の中心となるステンシル計算について、演算回路の空間的配置およびメモリアクセスについて議論し、想定した実装を実現するための高位記述方法について議論を行っている。また、2 つの異なるベンチマークを用い、その性能について多角的に検証している。

第 5 章では、近年登場した High Bandwidth Memory について、その利用による性能改善の可能性について議論している。また、ステンシル計算を対象とした FPGA 実装における変数を整理し Roof-Line モデルを提案し議論している。

第 6 章では、各章で得られた結論を総括している。

## 審査の要旨

## 【批評】

審査対象論文は、FPGA の利用が有用と考えられるステンシル計算に着目し、大規模化する FPGA とその開発効率の低下に対する高位合成記述の利用と、それによる演算性能の向上手法について提案および検証を行ったものである。まず、FPGA の細粒度アーキテクチャに適した伝統的設計手法 (RTL 記述) について議論し、そこから発展させる形で高位合成記述による設計フローを示した。これに基づき、現在の高位合成記述における問題点および改善可能性について提案し、時空間並列性を考慮した FPGA 回路設計指針について提案を行っている。

格子ガスオートマトン法および格子ガスボルツマン法における実証実験により提案の有効性について示し、また、高帯域メモリ (High Bandwidth Memory) の実証実験を通し、ステンシル計算に対する FPGA 実装に関わる変数を整理し、ループラインモデルという形で性能予測についても示した。

様々な実験結果に基づいて並列化手法の整理および性能予測モデルの検討に結びつけており、興味深い知見をえた点は高く評価できる。しかし、現段階では主に 2 次元の限定的な条件に限った議論であり、高位合成記述という観点から体系的にまとめているとは言い難い。今後もひき続いて議論を深め、3 次元ステンシル計算への拡張や構文解析などを伴った回路自動生成へとつなげていくことが望ましい。しかしながら、FPGA 実装における高位合成記述について一定の整理を行い、今後の議論に向けて、十分な貢献を果たしていると考えられる。よって本審査委員会は、本論文が博士(工学)の学位請求論文として合格と判断する。

## 【最終試験の結果】

令和 3 年 2 月 3 日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

## 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。