

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 若林一敏

本論文は「システム LSI の上流設計自動化に関する研究」と題し、7 章から成っている。システム LSI は、プロセッサ、専用ハードウェア、各種インタフェース等からなるシステム全体を一つのチップ上に搭載した大規模集積回路であり、電子機器の小型化、低コスト化に大きな役割を果たしているが、製造技術の進歩に伴うその高集積化のペースに設計生産性の向上が追いつかず、この製造と設計のギャップが常に問題となってきた。このため 1980 年代前半から物理レベルに近い下流設計の工程から順に自動化が進められ、これまでに配置配線とそれに続く論理合成の自動化はすでに実用化されているが、システム LSI のさらなる高集積化に伴う設計の複雑化、大規模化を克服するには論理合成の主発点である RTL(レジスタ転送レベル)記述からさらに上流の動作記述へ設計レベルの抽象度をあげることが必要である。こうした認識から本論文は、C 言語によるハードウェア動作記述から RTL 記述を合成(以下では「動作合成」と呼ぶ)する動作合成アルゴリズムの考案、それを基にした動作合成ツールの開発、その動作合成ツールを核とした C 言語ベース設計環境の実用化に至るまでのシステム LSI 上流設計工程の自動化に関する研究の成果をまとめたものである。

第 1 章では、システム LSI の製造と設計のギャップを埋める手段として、動作記述から RTL 記述を合成する自動化ツールと、それを中核にしたシステム LSI 向けの C 言語ベース設計環境の実現が重要であると述べている。また、設計言語として C 言語を選択した意義が、ソフトウェア設計者、ハードウェアアルゴリズム設計者、LSI 設計者の 3 者が共通言語を使える点にあることを指摘し、本論文の背景と目的を述べている。

第 2 章では、すべての回路モジュールを C 言語で記述、合成し、C ソース記述のみで設計・検証を行う“All-in-C”という概念に基づいて設計された C 言語ベース設計環境の全体構成と設計フローについて述べている。この設計環境は動作合成ツールを中核として、他に形式検証、ハードウェアソフトウェア協調検証、フロアプラン、解析ツール等から成り、さらに既存 RTL 部品の取り扱い、バスインターフェース合成、テストベンチ生成などのツール群が統合されていると述べている。

第 3 章では、動作合成ツール Cyber の全体構成を示し、その入出力制約、言語パーザとトラン

スレータ、制御データフローグラフ表現、アロケーション、スケジューリング、バインディング、制御回路生成などの要素技術の特徴、および相互の関係を述べている。

第4章では、Untimed な動作記述からの CFI (Control Flow Intensive) 回路向け動作合成手法として、自動スケジューリング手法、バインディング手法、制御論理生成手法の各工程について詳述している。これらの動作合成手法は演算の実行条件や種々の排他性条件を表現する「条件ベクタ」と呼ぶ新しい概念に基づいており、条件分岐等の制御構造が複雑に存在する動作記述から十分な並列性を抽出できる世界的に独創的な手法であると述べている。また、本合成手法は従来の VLIW 等のプロセッサ向けコンパイラの広域スケジューリング手法に比べても十分に高性能な並列化を効率的に引き出せることが合成実験の結果によって示されたと述べている。

第5章では、制御系回路向けの動作合成手法である Timed な動作記述からの動作合成手法と、C 言語にハードウェア向け拡張を施した動作設計言語 BDL を提案している。提案した BDL 言語は複雑なタイミング制約を持つ制御系回路でも元の動作記述の構造をほぼ保ったまま詳細なタイミング記述の入力が可能であり、この記述に提案した Timed な動作記述からの合成手法を適用すると、状態遷移図による制御回路設計に比べて良い結果が得られ、さらにタイミング収束が RTL 設計に比べ容易になることが設計実験により定性的並びに定量的に確認されたと述べている。

第6章では、まず、動作合成の実用化のために必要な各種合成手法を整理し、合成された回路のアーキテクチャに関する特徴を述べた後、動作合成ツール Cyber を使用して実回路を設計した合成実験結果を分析し、合成された回路の品質向上、設計期間・設計工数の削減、回路面積と消費電力の削減、動作記述の再利用性の高さ（設計生産性向上）、バグ削減と RTL デバッグからの解放（信頼性向上）などに高い効果があることが実例で検証されたと述べている。さらに、C ベース設計環境の今後の方向性について、ハードウェア設計プロセスのソフトウェア化、RTL 設計から C ベース設計への転換の必要性、新しい計算機構出現の可能性、LSI 設計者の教育の必要性に関する考察を述べている。

第7章では以上の成果を要約し、今後の課題を展望している。

以上を要するに、本論文は、システム LSI 設計の研究分野で長年の夢であった「ソフトウェアプログラム（C 言語記述）からの LSI 自動合成」をテーマとし、それを実現した独創的な動作合成アルゴリズムと、それを基に世界で初めて実用化に成功した統合設計システム（動作合成ツールと検証ツール群）の開発手法を述べたものであり、その成果は工学的に貢献するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。