

氏名(本籍)	近藤 弘郁		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第 10011 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		
審査学術院	理工情報生命学術院		
学位論文題目	高効率な組込みシステム向けコンピュータアーキテクチャに関する研究		
主査	筑波大学 教授(連携大学院)	理学博士	佐藤 三久 (理化学研究所)
副査	筑波大学 教授	工学博士	朴 泰祐
副査	筑波大学 教授	学術博士	和田 耕一
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	安永 守利
副査	東京大学 教授	博士(工学)	塙 敏博

## 論文の要旨

家電製品、スマートフォン、産業機器から自動車に至る組込みシステムはコンピューティングのエッジ環境としてインテリジェント化が進んでおり、組込みデバイスのコンピュータアーキテクチャは、高い電力効率と面積効率が求められている。本研究では組み込みシステムのデバイスを、比較的成本制約が緩く消費電力を抑える必要がある SoC(System on Chip)と厳しいコスト制約がある MCU(Micro Controller Unit)に分けて、その用途に対して、コスト、電力、性能(演算、リアルタイム性)を最適化するプロセッサアーキテクチャ技術を提案している。SoC に対しては、小型のマルチコアと超並列 SIMD アクセラレータをコンフィギュラブルに設定できるようにすることで、低コスト、低電力でありながら柔軟な処理を可能にするアーキテクチャを提案し、画像認識アプリにおいて従来よりも消費エネルギーを 45%削減した。さらに、複数の SoC チップを結合してシステムを構成する、組込み向けマルチチップ構成の実現のために、PCIe を通信インターフェースとして用いるインターコネクト技術を提案している。一方、MCU に対しては、短い命令コードをよく使われる命令セットに割り当てることによりコードをコンパクトにし、さらに命令フェッチ機構の効率化により、従来(SH2)に比べて 2~5 倍の電力効率の向上を可能にした。組み込みシステムの中でも車載向け MCU には信頼性が重要になるが、信頼性向上のための仮想化をハードウェアによるスイッチングをサポートし効率化するとともに、信頼性向上のための BIST をスリープタイムに行う SR-BIST(Sleep Resume BIST)方式を提案し、PMHF(目標故障率)  $10^{-8}$  以下で車載向けの信頼性の規格 ASIL-D を実現している。これらの技術を用いた SoC ならびに MCU のチップを設計・制作し、その評価により、提案した技術が本研究の目的である SoC および MCU において高い電力効率と面積効率が実現できることを実証した。

## 審査の要旨

### 【批評】

本研究は、高効率な組み込みシステム向けプロセッサについて、制約条件が異なる SoC と MCU において、コスト、電力、性能（演算、リアルタイム性）を最適化するプロセッサアーキテクチャ技術を提案している。比較的成本制約が緩く消費電力を抑える必要がある SoC については、マルチコア技術、専用アクセラレータ、マルチチップ構成のためのインターコネクト技術について提案している。また、厳しいコスト制約がある MCU については、命令セットの工夫によるキャッシュの効率的な利用、キャッシュ機構の工夫、さらに、高信頼性のためのハードウェアによる仮想化支援、スリープモード時に BIST を行う SR-BIST などについて提案し、その有効性について実証している。いずれの技術も、著者が企業において十数年に渡って研究開発したプロセッサのために考案された技術であり、それぞれの提案技術が実際のチップ開発の中で有効性の実証がなされているのは評価できる。学術的な研究テーマとしては多少、まとまりに欠けるところはあるものの、本論文においては組み込みシステムにおいて必要される、高い電力効率と面積効率、さらに高信頼性という一貫した要請に対して、SoC と MCU という条件が異なるプロセッサの設計において、上に挙げた提案技術の位置づけを整理している。また、それぞれの技術については国際的に評価の高い論文誌あるいは国際会議で発表されており、十分な成果発表がなされていることも評価できる。これからの社会においては、組み込みシステムの高性能化、高度化はますます重要になると思われる。論文の最後にこれからの課題について考察されているが、社会的な情勢および基盤となる半導体技術の進展の中で、本研究で研究開発された技術がこれからの組み込みプロセッサにも貢献することに期待したい。

### 【最終試験の結果】

令和 3 年 1 月 29 日、理工情報生命学院において、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。この結果とシステム情報工学研究群情報理工学位プログラムにおける達成度評価による結果に基づき、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。