

主論文審査の要旨

《本文》

人類の諸活動が情報システムに依存する度合いは増す一方であり、その信頼性・安全性の確保は極めて重要な社会的課題である。そのエンジンである LSI も、それ自身が膨大な数の回路素子を含む巨大システムであり、その信頼性・安全性は情報システムの信頼性・安全性のコアとなる。しかし、半導体製造プロセスが微細化するに伴い、エレクトロマイグレーションなどによる永久故障（ハードエラー）や、放射線の影響による一時故障（ソフトウェア）が問題となってきた。そこで、本論文は再構成可能な LSI である FPGA (Field Programmable Gate Array) の柔軟性を生かして信頼性・安全性に優れるディペンダブルシステムを実現する新たな技術を提案し、その評価を行っている。

本論文は全 6 章から構成されている。

第 1 章では、本論文の研究背景と目的が述べられている。

第 2 章ではまず関連用語の定義を行い、FPGA について概要を述べた後、LSI における一般的な信頼性問題と FPGA 特有の問題を説明している。そして、FPGA における高信頼化技術の現状と課題を説明した後、本論文の主旨を以下のように位置づけている。

- ・ 内部状態を持つ回路におけるソフトウェア回復技術
- ・ 高信頼システムを評価可能なフォルトインジェクション評価システムの構築
- ・ 部分再構成を用いたハードエラー・ソフトウェアに対する自己復旧システムの構築

第 3 章では、内部状態を持つ回路におけるソフトウェア回復技術として、ソフトコアプロセッサを対象とし、TMR (Triple Modular Redundancy) 構成を利用した内部状態同期手法を提案している。TMR と部分再構成を利用したシステムを実装してソフトウェアの影響を回復できることを実証し、提案手法がソフトコアプロセッサの同期復旧に有効であることを示した。

第 4 章では、高信頼システムの評価を行うために、再構成によるフォルトインジェクション評価の高速化技術について論じている。本論文では信頼性評価を現実的な時間で行うために、部分再構成技術を用いたフォルトインジェクション時間の短縮と、統計的なアプローチを用いた再構成回数の削減について提案を行っている。評価システムでは、まずフォルトインジェクション 1 回あたりの時間を最小化するためにフレーム単位の部分再構成技術を提案して再構成時間を約 10 分の 1 に短縮し、次にモンテカルロ法の 1 つであるブートストラップ法を適用することでフォルトインジェクション回数を約 40 分の 1 に削減し、提案手法が評価時間短縮に有効であることを実証した。

第 5 章では、自己復旧可能なディペンダブルシステムについて論じている。まず、ハードエラー回避を実現するために、部分再構成データの再配置を可能とする設計手法を明らかにしている。そして、第 3 章のソフトウェアに対する高信頼化技術と組み合わせることにより、ハードエラー・ソフトウェアを自己復旧可能なシステムを構築し、外部装置の助けを借りず FPGA 内部で自動的にソフトウェア・ハードエラーから復旧することを可能と

している。これにより、FPGA はハードエラーに対してもディペンダブル化が可能であり、FPGA の柔軟性を生かして信頼性・安全性に優れるディペンダブルシステムを実現する新たな技術を提示している。

最後に、本論文で得られた研究成果を第 6 章で総括している。

以上のように、本論文の内容は、FPGA を用いたディペンダブルシステムについて新たな技術を提案し、その実用性を示しており、工学的に価値が高いものと判断される。また、これらの研究成果の主要部は、審査付き学術雑誌論文 4 編、審査付き国際会議論文 12 編として公表されている。よって本審査委員会は、本論文が博士（工学）の学位授与に値する論文であると判断した。

【学位審査報告書の 3、論文審査の結果の要旨のみを記入】

審査委員会は、学位論文提出者に対して当該論文の内容ならびに関連分野の事項について試問を行った。その結果、学位論文提出者は、当該の研究分野及び関連分野について十分な知識と理解力を示し、研究遂行能力を有していると判断した。また、外国語に関しては、論文業績の中で 8 編の国際会議での発表が示されており、十分なレベルの能力があると認めた。本論文は専攻の学位審査基準を満たしており、以上の結果に基づいて、審査委員会は最終試験を合格と判定した。

主査	情報電気電子工学専攻	先端情報通信講座	教授	末吉敏則
審査委員	情報電気電子工学専攻	先端情報通信講座	教授	趙 華安
審査委員	情報電気電子工学専攻	機能創成エネルギー講座	教授	中村有水
審査委員	情報電気電子工学専攻	先端情報通信講座	准教授	久我守弘
審査委員	情報電気電子工学専攻	先端情報通信講座	准教授	飯田全広