

学位論文題名

Study on Evolutionary Adaptive Functional Electronic Circuits

(進化適応型電子回路の開発研究)

学位論文内容の要旨

本論文は、生物の適応能力の一つである進化メカニズムを模倣した工学的手法により、自動制御の中核である電子回路の機能を適応的に獲得させる方法に関する一連の研究成果をまとめたものである。

一般的に、システム自身が状況に応じて自律的にその機能を変える適応型システムそのものは、生命現象の柔軟な適応性に着目したその工学的実現であり、大規模複雑化するシステムに関し、設計時に詳細な仕様まで全て決定するという困難さの解決や、予期せぬ故障時の柔軟なりカバリの実現という目的のために有効な方法として注目を集めてきた。

本論文では、もっとも柔軟性の高い適応メカニズムの一つと考えられる進化的アルゴリズムを、多くの産業用・民生用の機器の制御などに使用されている電子回路に適用して、高速適応型システム、すなわちハードウェア進化システムを構築する手法を開発することをその目的にする。ところで従来、大規模な可変ハードウェアを実現することは困難だったため、適応型の手法はシステムのソフトウェアプログラム部分のみに適用されることがほとんどであった。近年の FPGA に代表されるプログラマブル電子デバイスの登場後は、ハードウェアを適応メカニズムの対象とした研究報告が行なわれるようになってきている。本論文では、適応的ハードウェアメカニズムの実現のために、操作対象物が物理デバイスであることによる潜在的なシステム破壊の危険性の回避、およびデバイスの構成自由度の高さから逆に生じる問題空間の巨大化への対処として、進化アルゴリズムの単純な適用ではなく、系の自由度を適切に制限しつつ適応過程を導く必要性の存在を明らかにしている。

具体的設計対象物として本論文は、特に大規模なハードウェア進化システム構築を目的とした手法について中心的に取り扱っている。ハードウェア記述言語および有限状態オートマトンに基づいた制御構造に着目することで、実際に設計者が大規模な回路を設計するときに用いる機能抽象化・階層型設計法といった最新の設計手法を進化アルゴリズムの対象に組み入れる方法を明らかにしている。さらに設計対象物の持つ定性的な性質として、従来均質かつ平坦な回路モデルを扱う研究例がほとんどで、実践的な設計法を考慮した手法の報告は少ないが、これに対して生物学的な見地をもとに 2 倍体を用いてシステムの多様性を確保し適応過程の円滑化と環境変動時の頑健性機能が得られることを示している。

具体的に種々の実験を通じて提案した手法により実現された電子回路の機能が進化的に獲得されることを示している。さらにすでに解法が知られている問題のみならず、設計者でさえも容易に解決できない問題、あるいは変動する環境に対しても問題を解く回路が自律的に構成できることを明らかにしている。

上記の結果から、本論文で提案する諸手法が、進化適応型電子回路の構築に有効であると結論付けている。

本論文は 8 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本論文が取り扱う課題を提示し、その意義について述べている。まず適応型システムの必要性およびそれにより解決される問題について述べている。次に学習アルゴリズムと進化アルゴリズムの手法の違いを述べている。また、ソフトウェアの進化とハードウェアの進化の違いについても議論している。

第 2 章では、本論文の研究に関連するハードウェア進化システムの研究例が述べられている。ハードウェアの進化に特有の、システムの安全性の確保、および問題空間の巨大さへの対処といった問題を提示したあと、回路のコーディング手法の観点から各研究例を整理している。

第 3 章では、大規模回路の実際的设计方法および第 4 章および第 5 章で使用する大規模回路の設計システムとそこで使われるハードウェア記述言語について概説している。

第 4 章では、提案するハードウェア記述言語を使用したハードウェア進化システムについて説明している。まず、システムの概観を述べ、続いて言語文法を表現するプロダクションルール、それをを用いたハードウェア記述言語プログラム群の初期発生の方法について述べている。さらに染色体の導入の必要性、およびその染色体構造について述べたあと、遺伝的オペレーションについて説明している。本システム特有の遺伝的オペレーションについてはその意味および利点についても述べている。

第 5 章では、第 4 章で提案したシステムについて、いくつかのシミュレーション実験により提案する手法で、実際に電子回路の機能が進化的に獲得できることを示している。実験は簡単な数値計算を行なうもの、および未知の環境で動作する回路を想定したものについて行なっている。結果を考察してこの手法が後者の問題に適していることも指摘している。

第 6 章では、第 4 章で提案したシステムについて進化過程を滑らかに改善するために、システムの 2 倍体化を行なっている。2 倍体を可能にする染色体構造について提案し、それに応じた遺伝的オペレーションの修正および拡張について述べている。シミュレーション実験を通して、この 2 倍体化によりシステムが環境変動に対し頑健になることを明らかにしている。

第 7 章では、高位レベルでの高速な機能切り替えを目的として、プログラマブルな構造を持つ回路構成法を提案している。ある種のカウンタを組み合わせることで、電子回路の高位時系列動作を決定付けるフロー制御回路を、任意に構成できることを示し、その可変な実装方法を示している。さらに信号処理を行なうデータパス部、およびそれを自由度をもって、フロー制御回路に接続するルーティング部を加えて、汎用高位プログラマブル電子回路を構成する方法を提案している。本構成法において、遺伝操作で起こる高位の回路機能変更が簡潔に行なえること、および回路変更により動作可能周波数に変動がないことを指摘し、本方法の有効性を述べている。また、この回路構成を利用して、電子回路の進化に関わるすべての操作を、電子回路自身の中で行なうような新しいシステム設計論を展開している。

第 8 章において、論文全体のまとめと総括を行なっている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇  
副 査 教 授 大 内 東  
副 査 教 授 大 森 隆 司  
副 査 教 授 和 田 充 雄

学 位 論 文 題 名

## Study on Evolutionary Adaptive Functional Electronic Circuits

(進化適応型電子回路の開発研究)

本論文は、生物の適応能力の一つである進化メカニズムを模倣した工学的手法により、自動制御の中核である電子回路の機能を適応的に獲得させる方法に関する一連の研究成果をまとめたものである。本論文では、もっとも柔軟性の高い適応メカニズムの一つと考えられる進化的アルゴリズムを、多くの産業用・民生用の機器の制御などに使用されている電子回路に適用して、高速適応型システム、すなわちハードウェア進化システムを構築する手法を開発することをその目的としている。具体的設計対象物として本論文は、特に大規模なハードウェア進化システム構築を目的とした手法について中心的に取り扱っている。ハードウェア記述言語および有限状態オートマトンに基づいた制御構造に着目することで、実際に設計者が大規模な回路を設計するときに用いる機能抽象化・階層型設計法といった最新の設計手法を進化アルゴリズムの対象に組み入れる方法を明らかにしている。さらに設計対象物の持つ定性的な性質として、従来均質かつ平坦な回路モデルを扱う研究例がほとんどで、実践的な設計法を考慮した手法の報告は少ないが、これに対して生物学的な見地をもとに2倍体を用いてシステムの多様性を確保し適応過程の円滑化と環境変動時の頑健性機能が得られることを示している。具体的に種々の実験を通じて提案した手法により実現された電子回路の機能が進化的に獲得されることを示している。さらにすでに解法が知られている問題のみならず、設計者でさえも容易に解決できない問題、あるいは変動する環境に対しても問題を解く回路が自律的に構成できることを明らかにしている。本論文の概要は以下の通りである。

第1章は序論である。

第2章では、本論文の研究に関連するハードウェア進化システムの研究例を述べ、ハードウェアの進化に特有の、システムの安全性の確保、および問題空間の巨大さへの対処問題を

提示し、回路のコーディング手法の観点から各研究例を整理している。

第3章では、大規模回路の設計システムとそこで使われるハードウェア記述言語を述べている。

第4章では、提案するハードウェア記述言語を使用したハードウェア進化システムについて、システムの概観、言語文法を表現するプロダクションルール、およびハードウェア記述言語プログラム群の初期発生の方法について述べて、染色体の導入の必要性、およびその染色体構造、遺伝的オペレーション、本システム特有の遺伝的オペレーションを詳述している。

第5章では、シミュレーション実験により提案する手法で、実際に電子回路の機能が進化的に獲得できることを示している。実験は簡単な数値計算を行なうもの、および未知の環境で動作する回路を想定した場合についてこれを行い、得られた結果からこの手法が後者の問題に適していることも指摘している。

第6章では、提案したシステムについて進化過程を滑らかに改善するために、システムの2倍体化を行なっている。2倍体を可能にする染色体構造について提案し、それに応じた遺伝的オペレーションの修正および拡張について述べている。シミュレーション実験を通して、この2倍体化によりシステムが環境変動に対し頑健になることを明らかにしている。

第7章では、高位レベルでの高速な機能切り替えを目的として、プログラマブルな構造を持つ回路構成法を提案している。ある種のカウンタを組み合わせることで、電子回路の高位時系列動作を決定付けるフロー制御回路を、任意に構成できることを示し、その可変な実装方法を示している。さらに信号処理を行なうデータパス部、およびそれを自由度をもって、フロー制御回路に接続するルーティング部を加えて、汎用高位プログラマブル電子回路を構成する方法を提案している。また、この回路構成を利用して、電子回路の進化に関わるすべての操作を、電子回路自身の中で行なうような新しいシステム設計論を展開している。

第8章は総括である。

これを要するに、著者は生物の適応能力の一つである進化メカニズムを模倣した工学的手法である進化的アルゴリズムを、電子回路の機能抽象化・階層型設計法に取り入れ、電子回路の機能を適応的に獲得させ得る大規模高速適応型システム設計理論の展開、設計ツール群の開発、および応用実験を通しての展開した理論の正当性、有効性を検証した。これにより進化ハードウェア工学に関する研究分野において多くの新知見を得たものであり、電子工学、情報工学、および複雑系工学分野の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。