

Adaptive Logic Circuits Based on Netlist Evolution

(ネットリスト進化による適応的論理回路生成に関する研究)

学位論文内容の要旨

本論文は、生物の持つ環境適応能力である進化メカニズムを工学的に応用した手法により、システム構築の基盤である論理回路を適応的に生成する方法論を構築する。

近年、システム自身が状況に応じて自らの機能を変化させる適応システムが注目され、一定の成果を上げている。しかし、それらの殆どは、その適応能力がシステムのうちのソフトウェア部分において実現されており、システム全体としての適応が実現されているとはいえない。一方、本研究では、ソフトウェア、ハードウェアの両者に適応能力を持たせることにより、全体として多様性と並列性を高度に併せ持つ適応システムを構築することを目的としている。このことは、一定の機能に固定されたハードウェアと多様なソフトウェアを用いる従来のノイマン型システムからの脱却を意味し、ますます多様化、複雑化の様相を呈するシステム工学における問題解決の新たなパラダイムとなろう。

本論文では、可塑性を持つハードウェアとして、内部回路の再構成が可能な半導体デバイスである Field Programmable Gate Array (FPGA) を採用した進化ハードウェアシステムについて取り扱っている。そこでは、システムの FPGA 内部構造の理解という視点から議論が進められている。一般的な進化ハードウェア手法を用いて FPGA を適応的に構成する際の問題点は、進化システム側が FPGA の内部構造を理解することができないために、進化過程において系の自由な結合関係が制約されることである。本論文では、その解決指針として、FPGA 設計時に中間生成物として出力されるネットリストを具体的設計対象物とするネットリスト進化を提案している。

ネットリスト進化の最大の特徴は、ネットリストとして表現された論理回路中に出力に結合していない要素、すなわち、冗長な回路要素を多く持っていることである。これらの要素は、回路の動作時には全く役に立っていないものの、進化システムとして見た場合、その存在が集団の多様化に大きく寄与している。本論文では、そのことを進化過程の解析を通じて明らかにしており、さらにその冗長性を活用することで進化効率を向上させることが可能であることを示している。

さらに、本論文では、適応型システムとしての能力を検証するため、提案手法を各種の自律ロボット制御問題に適用している。その結果から、環境、目的、状態の観点から状況に適応した回路が提案手法により構成されることを明らかにしている。また、全ての実験の結果を通じて進化ハードウェアシステムにより適応的に構成される回路と人間により天井下りに設計される回路との相違および適用すべき問題クラスを明らかにしている。さらに、生成された論理回路の回路構造および機能の再現性、再利用性に関する検証を行って

いる。

最後に、上記の結果、議論を総括し、本論文で提案する手法が論理回路を適応的に生成するための方法論として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。以下にその概要を示す。

第1章では、適応システムとしてのハードウェア進化に関して議論を行っている。はじめに、適応システムおよび遺伝的アルゴリズムについて概説し、進化と学習、ハードウェア進化とソフトウェア進化の観点から議論を行い、本研究の方針を示している。

第2章では、本論文に関係するFPGAの概要および進化ハードウェアシステムの研究例が述べられている。進化システムのFPGA内部構造の理解という観点から、通常のFPGAの設計手順に関連付けて研究例を分類することにより、特徴、問題点の比較を行っている。

第3章では、FPGAを単純化したモデルによる計算機実験により、FPGAの内部構造が進化に与える影響を議論している。さらに、以上を踏まえ、必要となる方法論に関する議論を行っている。

第4章では、提案するネットリスト進化を用いた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、論理回路を構成する回路要素の定義、回路要素を結合するネットワークの定義およびネットリスト型染色体へのコーディング手法、進化的方法論の適用方法について述べられている。次に、ネットリスト進化の特徴について述べている。

第5章では、二種類の性質の異なる演算回路の生成実験を通じて提案した手法の性能評価および進化効率向上のための議論が行われている。特にここでは、ネットリストとして表現された回路が持つ冗長性に視点をおいて検証が進められ、その結果を踏まえた提案手法の拡張が行われている。具体的には、冗長な部分回路と有効な部分回路を区別して進化計算を適用することにより、集団の多様性を増し、進化効率を向上させることが可能であることを示している。

第6章では、提案手法を車輪型自律ロボットの制御問題に適用した実験について説明している。ここでは、解法が既知な制御問題について適用し、生成された回路と人間によって作られたアルゴリズムの相違を議論している。また、同目的、異環境にて生成された回路の比較を行い、適応性に関する議論を行っている。さらに、前章での演算回路との比較から、提案手法を含めた進化ハードウェアシステムが、より適応性を求められるタスクに対して適していることも指摘している。

第7章では、提案手法をアメーバロボットの制御問題に適用した実験について説明している。ここで、対象としたのは、3本の脚が点対称構造に配置されたロボットであり、その制御法は、模倣するべく生物が存在しないため未知である。シミュレータを用いた実験により、このロボットを制御する回路を生成し、その回路構造と制御機能に関する解析を行っている。また、生成された回路の機能を抽出し、実ロボットの制御を行うことで、提案手法によって生成される回路機能の再利用性に関する考察が行われている。

第8章において、論文全体のまとめと総括を行っている。

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

Adaptive Logic Circuits Based on Netlist Evolution

(ネットリスト進化による適応的論理回路生成に関する研究)

システム情報工学の分野において、システム自体が環境や要求に応じて動的にその機能を変化させる自律適応システムの研究が盛んである。すなわち、生物の持つ進化や学習といった環境適応機能を工学的に応用することにより、自律的に必要な機能や構成を獲得するシステムを実現しようとするものである。一般的な手法では、その適応能力がシステムのうちのソフトウェア部分に実装されており、システム全体としての適応が実現されているとはいえない。全体として多様性と並列性を高度に併せ持つ適応システムを構築するためには、ソフトウェアだけではなくハードウェアの部分にも適応能力を持たせる必要があり、そのための方法論の確立が望まれている。

本学位請求論文では、可塑性を持つハードウェアとして内部回路の再構成が可能な半導体デバイスである Field Programmable Gate Array (FPGA) を採用した進化ハードウェアシステムに関して理論展開を行っている。そのための基本概念として、回路構造をデバイスの物理的制約を受けずに記述するネットリストという表現法を導入している。さらに、生成された回路の性質を検証し、特に人間より設計された回路との相違の点から、進化ハードウェアシステムの特性を明らかにしている。

論理回路は、機能とその機能を実現する回路構造を持っている。人間による回路設計が設計した機能を回路構造に変換するのに対して、進化ハードウェアの特徴は、回路構造自体を進化の対象とすることにより、機能として表現できない回路構造までも構成できることである。本論では、一般的な進化ハードウェア手法を用いて FPGA を適応的に構成する際の問題点として、平面的な FPGA 上に配置された論理回路の構造はその変更が容易ではないことを指摘している。さらに、その解決指針として、論理回路の機能を回路構造に変換する際に中間生成物として出力されるネットリストを具体的設計対象物とするネットリスト進化を提案している。すなわち、進化過程において論理回路の構造を多次元上に表現することにより、進化操作による回路構造の柔軟な変更を可能としている。

ネットリストとして表現された論理回路は、単純な機能を持つ要素とその自由な結合関

係によって成り立つ系であり、要素間の局所的な相互作用から全体の機能が創発する。そのため、ネットリストとして表現された論理回路中には出力に結合していない要素、すなわち、冗長な回路要素が存在する。本論では、この冗長な要素が進化に与える影響を検証しており、結果として、これらの要素は回路の動作時には全く役に立っていないものの、進化システムとして見た場合、その冗長性が集団の多様化に大きく寄与していることを明らかにしている。さらに、この冗長性を活かすべく提案手法を拡張しており、その有効性を示している。

また、提案手法の適応型システムとしての能力を検証するため、提案手法を各種の自律ロボット制御問題に適用している。同目的、異環境にて生成された回路の比較や制御法が未知な問題への適用を通じて、環境、目的、状態の観点から状況に適応した回路が構成されることを明らかにしている。また、生成された論理回路の回路構造および機能の再現性、再利用性に関する検証を行っている。

以下に本論で得られた主要な成果を示す。

1. 従来の進化ハードウェア手法を検証し、進化的方法論を適用すべき論理回路設計の段階を明らかにしたこと。
2. 回路機能を回路構造に変換する際の中間生成物であるネットリストを具体的生成物としたネットリスト進化を提案し、その評価を行ったこと。
3. 進化システムにおいて、解を表現した染色体が冗長性を持つことにより、集団の多様性が増加することを明らかにしたこと。さらに、この冗長性を活用することにより進化効率が向上することを示したこと。
4. 提案したネットリスト進化の環境適応性を検証すべく、ロボット制御問題に適用し、その有効性を示したこと。
5. 様々な環境、目的、状態で生成された回路の比較を通じて、進化ハードウェアの特性および適用されるべき問題領域を明らかにしたこと。

これを要するに、本論文は、システム構築の基盤となるハードウェアとしての論理回路を適応的に構築する方法論を与えるものであり、従来ソフトウェアを中心に議論されてきた適応システムに対して新知見を得ており、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。