



TITLE:

Studies on Synthesis Methods for Efficient Optical Logic Circuits(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Matsuo, Ryosuke

CITATION:

Matsuo, Ryosuke. Studies on Synthesis Methods for Efficient Optical Logic Circuits. 京都大学, 2023, 博士(情報学)

ISSUE DATE:

2023-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k24748>

RIGHT:

Methods for Reducing Power and Area of BDD-Based Optical Logic Circuits", doi:10.1587/transfun.E102.A.1751, Copyright(C)2019 IEICE. "A Synthesis Method Based on Multi-Stage Optimization for Power-Efficient Integrated Optical Logic Circuits", doi:10.1587/transfun.2020KEP0018, Copyright(C)2021 IEICE. "BDD-based Synthesis of Optical Logic Circuits Exploiting Wavelength Division Multiplexing", doi:10.1145/3287624.3287703. "A Synthesis Method for Power-Efficient Integrated Optical Logic Circuits Towards Light Speed Processing", doi:10.1109/ISVLSI49217.2020.000-9, © 2020 IEEE. "BDD Variable Ordering for Minimizing Power Consumption of Optical Logic Circuits", doi:10.1109/ISVLSI51109.2021.00028, © 2021 IEEE. "Space and Power Reduction in BDD-based Optical Logic Circuits Exploiting Dual Ports", doi:10.23919/DATE54114.2022.9774637.

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	松尾 亮祐
論文題目	Studies on Synthesis Methods for Efficient Optical Logic Circuits (高性能な光論理回路の合成手法に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>電氣的な制御信号により光の進路を超高速に切り替える光論理素子の研究が進展しており、CMOSなどの既存の電氣的な論理ゲートに比べて桁違いに高速なスイッチング動作が可能になると期待されている。このような光論理素子を多数組み合わせることで所望の論理関数の計算を実現する光論理回路の構成方法がいくつか報告されている。その中でも、二分決定グラフ(BDD: Binary decision diagram)と呼ばれるデータ構造に基づく光論理回路の合成手法は、一定規模までの任意の論理関数に対して光論理回路を自動的に合成することができ、他の手法と比べて省面積かつ低遅延な回路が得られやすいことが知られている。しかしこの手法では、論理関数によっては光導波路の枝分かれが多数発生し、光信号の減衰が生じるため強力な光源が必要となり、消費電力が爆発的に増大するという課題があった。</p> <p>本論文は、高性能な光論理回路の自動合成を実現するため、二分決定グラフに基づく合成手法に関するいくつかの有効な改良手法を提案するとともに、電気信号と光信号を多段に組み合わせた光論理回路の合成手法や、光信号が途中消失することがない素子数最小の光論理回路の合成手法についても論じたものであり、全8章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、技術的な背景と関連技術について概観したのちに、本論文での主たる研究成果の内容を簡潔にまとめ、その章構成について述べたものである。</p> <p>第2章では、本論文の背景的知識として、使用する光論理素子の名称や物理的特性について述べた後、既存技法の1つである二分決定グラフに基づく光論理回路の合成手法について説明している。</p> <p>第3章では、二分決定グラフに基づく光論理回路の面積を削減するために、波長分割多重を用いる改良手法を提案している。さらに消費電力を削減するため、光導波路の枝分かれの数を削減する手法も合わせて提案している。ベンチマーク例題に適用することによりそれらの有効性を評価している。</p> <p>第4章では、二分決定グラフの入力変数順序を変えることで消費電力を削減する手法を提案している。二分決定グラフは入力変数の順序付けによって構造が大きく変化することが知られている。節点数を最小にする変数順序付けは以前より知られていたが、光論理回路においては節点数最小の順序が必ずしも電力最小とはならないことがあるため、厳密に電力最小となる順序付けを探索するアルゴリズムを提案し、ベンチマーク例題に適用することでその電力削減効果を実験的に評価している。</p> <p>第5章では、並行する2つの導波路を制御信号により交換するクロスバー型の光論理素子において、双対な端子を利用して、回路面積を削減する手法を提案している。二分決定グラフにおいて、論理関数の入力変数の真偽を反転させる演算が、光論理素子の双対な端子への接続に対応することを見出し、これによって回路面積を削減させ</p>			

ることに成功している。

第6章では、光-電気変換を用いて光論理回路の消費電力を削減する手法を提案している。提案手法は合成対象の論理関数を入力数の小さな部分関数に分割して光論理回路で実装する。それぞれの光論理回路は光-電気変換を伴って多段に接続される。この手法により途中の光信号の減衰を一定値以下に抑えられるため、光源の強度を抑えることができ、全体的な消費電力を削減することができる。光-電気変換は動作遅延が非常に大きいという欠点を持つが、提案手法は部分回路の並列演算により光-電気変換の遅延オーバーヘッドを打ち消す効果がある。どの程度の規模まで光論理回路を適用することが有効となるかを、実用的規模のベンチマーク例題に適用することで実験的に評価している。

第7章では、光信号が途中で消失するような構造を含まない光論理回路の構成方法を提案している。全ての3入力論理関数に対して、光導波路の枝分かれや開放端子を含まないゲート数最小の光論理回路を網羅的な探索により列挙することに成功している。探索時間削減のために、列挙アルゴリズムは膨大な探索空間を効率的に削減するよう工夫されている。列挙した光論理回路を、既存の二分決定グラフに基づく合成手法で得られる光論理回路と比較して、回路面積や遅延時間について評価している。

第8章は結論であり、本論文における研究成果を総括した上で、今後の課題および今後の研究の方向性について述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、電氣的な制御信号で光の進路を超高速に切り替える光論理素子を組み合わせた光論理回路の設計問題において、高性能な回路の自動合成手法を実現するために、既存の合成手法の課題を分析し、それらの課題を改善するいくつかの技法を提案するとともに、より大規模な論理回路に適用するための実用的な設計法や、厳密に最小な光論理回路を網羅的に列挙する方法を提案し、それらの理論的解析や実験的評価を行った結果をまとめたものである。主要な成果は以下の通りである。

- (1) 二分決定グラフに基づく合成手法に関する種々の改良技法の提案とその評価
既存手法として知られる二分決定グラフの構造に基づいた光論理回路の合成手法に関して、波長分割多重のアイデアによる回路面積削減手法、入力変数順序最適化による消費電力削減手法、および双対な端子を活用することによる回路面積削減手法、の3つの技法を提案し、ベンチマーク例題に適用することで、それらの技法の有効性を実験的に示した。
- (2) 電気と光を多段に組み合わせた光論理回路の合成手法の提案とその評価
光論理素子は光信号の減衰による物理的制約から、一定の入力数を超える論理関数は現実的に扱えない。そこで合成対象の論理関数を小さな部分関数に分割して、各部分回路を光論理回路として構成し、光-電気変換を用いてそれらを多段に接続する合成手法について論じている。光-電気変換は動作遅延が大きいいため、どの程度の規模まで光論理回路を適用することが有効となるかを、実用的規模のベンチマーク例題に適用することで実験的に評価した。
- (3) 光信号が途中消失しない最小の光論理回路の網羅的探索法の提案とその評価
光論理回路において光導波路の枝分かれや開放端子が存在すると、光信号が途中で消失し電力が失われるため、そのような構造を一切含まない光論理回路を構成する方法を考察し、全ての3入力論理関数に対して、光信号が途中消失しない素子数最小の光論理回路を網羅的な探索で求めることに成功した。光信号の途中消失を許す既存手法と本手法で得られた合成結果を比較し、どのような論理関数において本手法が有利になるかを評価した。

以上、本論文は、論理回路の設計自動化の分野において、新しい光論理素子の物理特性に基づいて、回路面積、動作速度、消費電力の観点で高性能な光論理回路を自動合成するための技法を提案し、理論的および実験的にその有効性を評価したものであって、学術上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、令和5年2月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。

要旨公開可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降