

令和 4 年 5 月 6 日現在

機関番号：33917

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11250

研究課題名（和文）効率性と拡張性をもつ可逆アルゴリズム族の系統的な設計と解析

研究課題名（英文）Design and Analysis of Efficient Reversible Algorithms

研究代表者

横山 哲郎（Yokoyama, Tetsuo）

南山大学・理工学部・教授

研究者番号：80456631

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：可逆アルゴリズムの理論を深化させた。基礎的な可逆アルゴリズムの構築と解析、可逆言語理論の発展と処理系の実装が主な研究成果である。可逆言語R-WHILEの可逆チューリング完全性を証明した。間順走査と前順走査から対応する二分木を生成する可逆アルゴリズムを考案して解析をした。可逆アルゴリズムの設計において、データ構造の選択と、何を出力とみなすかが重要であることを示した。本研究方法を異なるアルゴリズムに適用可能であることが期待され、いくつかの萌芽的な結果を得た。例えば、メモ化や文字列照合アルゴリズム、符号化の可逆化に対する結果である。プログラミング言語の可逆性の保証のためにメタ言語を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンピュータによる計算は実行時間の短縮とメモリ使用量の削減で効率的になる。情報損失なき計算システムは将来更なる広範的使用が予想されており、可逆計算の効率的実現は社会的意義がある。本研究ではそのメモリ使用量を多階層に跨り系統的に削減した点に学術的価値がある。すなわち、言語・アルゴリズム・アプリケーションに跨る複合的問題を解決し、並びに具体的な言語や可逆計算法ではなく一定の範囲の可逆言語や可逆計算法にも当てはまる設計法や性質を議論するにたる基礎づけに価値がある。研究成果は、可逆回路の設計、双方向変換、投機的実行の逆計算、及びに量子計算等の隣接分野における応用や異なる視点からの解釈も期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the theory of reversible algorithms. The main results of our research are the construction and analysis of fundamental algorithms, the development and analysis of programming language theory, and the implementation of reversible programming languages. We showed that reversible Turing machines can be constructed by the reversible language R-WHILE. We have constructed and analyzed a reversible algorithm that generates a corresponding binary tree from its inorder and preorder traversals. We showed that in designing reversible algorithms, the choice of data structure and what should be outputs matters. We obtained a few preliminary results by extending this study method: memoization, string matching algorithms, and encoding/decoding. We have proposed a metalanguage by which any language defined in the metalanguage is guaranteed to have reversibility and inverse semantics.

研究分野：可逆計算、可逆プログラミング、コンピュータサイエンス

キーワード：可逆計算機構 可逆アルゴリズム 可逆プログラミング 可逆シミュレーション 単射化 可逆化 プログラム逆変換 プログラム逆解釈

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

半世紀にわたって続いたコンピュータの計算能力の飛躍的な発展を、今後も継続させることを目標にもつ研究の流れのひとつに可逆コンピューティングがある。1秒間にできる足し算などの演算数を表す FLOPS で換算すると、この間は 10 年ごとに約 1000 倍ずつの指数関数的な計算能力の発展があった。これは主に半導体微細加工技術の継続的な向上による。現在、微細化は原子レベルまで進み、微視的な物理の可逆性を有効活用することが重要になった。例えば、任意の量子演算はその逆演算が必ず存在するというユニタリー性をもつことが知られている。論理的非可逆性が必ず熱の放出を起こす Landauer の原理による発熱を回避するには可逆性が必須の系がある[1]。我々は、既存の(非可逆な)計算を代替するのではなく、既存の計算パラダイムから独立し補完するものとして可逆コンピューティングを捉えている。

消費エネルギー最適化を始めとする微視的な可逆性の利点を最大に引き出すためには計算機構の全ての層が可逆である「可逆の塔」を実現すべきだと提唱されている(例えば、[2])。本分野の研究者は多階層に分布しているが、申請者は、可逆 ISA・可逆論理回路、可逆プログラミング言語、可逆アルゴリズムの3つの層を跨がることで複合的問題を解決してきた。一方で、下位の層と独立して可逆アルゴリズムや可逆プログラミング言語の研究を行うことのできる理論的整備を行ってきた。

可逆コンピューティングモデルはセル・オートマトン、電子回路設計、量子計算などの分野において研究が行われてきた。可逆コンピューティング機構の研究は、シュレディンガー波動方程式・分子動力学などを対象とする計算統計力学や物理・化学・生物学を含む多分野で行われてきた。2009 年から可逆コンピューティングに関する国際集会在毎年開催されている。

可逆性の制約がある計算機構では、計算過程で情報を消去できないためにメモリ使用量が大きくなるので、アルゴリズム設計に大きな影響を与える。非可逆アルゴリズムを可逆化する一般解法は、1970 年代から知られており、その改良が近年も行われ続けている。一方、問題固有の情報を使うと遙かに効率が良い例が報告されてきた。しかし、効率化手法を他の問題へ適用できるようにまとめることや、可逆アルゴリズムの汎用的な設計法を得ることは充分に行われてきていなかった。プログラミング言語の可逆性を対象言語から独立してメタレベルで議論することは不十分であった。また、そもそも基礎的な可逆アルゴリズムの理論的な整備が必要であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、アルゴリズムの理論を深化させることが大きな目的のひとつである。アルゴリズム設計の観点からは可逆性は制約のひとつであり、この制約下でどのようなアルゴリズムが効率的かを明らかにする。可逆性制約を緩和して一部のデータの消去を許すアプローチをとっているグループもある。このアプローチは論理回路の一部を可逆にするという仮定の下では妥当である。それに対して、我々のアプローチは厳密に可逆な計算を対象としているのが特徴である。

個々のアルゴリズムに対応する効率的な可逆アルゴリズムを整備していくことも基礎研究として重要である。既に知られた一般解法を特殊化してある範囲のアルゴリズムに適用可能な効率化手法を確立するアプローチは今後も有効であると考えている。

可逆プログラミング言語の理論の発展と処理系の実装も並行して行った。記述方法によって思考は影響を受ける。言語の研究とプログラミングの研究は両輪であり、同時に行うことで研究の加速を狙った。言語の性質を議論するためにメタ言語の理論を整備した。

## 3. 研究の方法

(非可逆)アルゴリズムの研究は相当な蓄積がある。同一の問題に対して複数の解法が存在することも珍しくない。解法によって可逆化の困難さは異なる。文字列検索法やハフマン符号化などを対象にして、効率的な可逆プログラムを構築できる可逆化の方法を探究した。既存の可逆アルゴリズムや本研究で考案した可逆アルゴリズムの一部を使用した可逆アルゴリズムを構築していった。アルゴリズム設計の試行錯誤には、我々が形式化や実装の一部を行ってきた可逆命令型プログラミング言語 Janus, R-WHILE, 可逆関数型プログラミング言語 RFUN, 可逆オブジェクト指向言語 ROOPL を用いた。

個々の基礎的アルゴリズムに対する知見を蓄積することとその一般化は系統的なアルゴリズムの解析と導出を実現するための重要なステップである。間順走査と前順走査から対応する二分木を生成するアルゴリズムは 1970 年代から知られており、プログラム逆変換を用いた解析も

行われていた。我々は、十分に解析が行われていなかった可逆コンピューティングの文脈において解析を行った。探索アルゴリズムは基礎的で重要なアルゴリズムであり理論的整備を行っていく必要性が高い。我々は線形探索アルゴリズムや二分探索アルゴリズムといった基礎的なアルゴリズムに対応する効率的な可逆アルゴリズムを考案して解析した。

プログラミング言語の可逆性を論じるためにメタ言語を提案した。メタ言語で記述した意味論が可逆であることを保証するようにメタ言語の設計を行った。

#### 4. 研究成果

本研究を通して、可逆アルゴリズムの理論を深化させることができた。基礎的アルゴリズムの構築と解析、プログラミング言語理論の発展と処理系の実装が主な研究成果である。

可逆プログラミング言語 R-WHILE の可逆チューリング完全性を証明した。具体的には、どの可逆プログラミング言語のプログラムによる計算でも、可逆な R-WHILE プログラムによって計算できることを示した。

間順走査と前順走査から対応する二分木を生成する2つの可逆アルゴリズムを考案して解析をした。可逆的走査は、木を再構築する逆アルゴリズムを直接定義する。これらのアルゴリズムは、よく知られた効率的な探索法と同じ線形時間と線形空間をもつ。プログラムの記述には、可逆的再帰をもつように While 言語を拡張して用いた。線形探索や二分探索といった探索アルゴリズムについて、元の入出力以外のメモリ使用量、元の入力以外の出力ゴミのサイズ、及び入力の最大走査回数間に非自明なトレードオフがあることを定量評価により明らかにした。可逆アルゴリズムの設計において、データ構造の選択と、何を出力とみなすかが重要であることがこれにより示された。

本研究方法を異なるアルゴリズムに適用可能であることが期待される。例えば、メモ化や文字列照合アルゴリズム、符号化への適用が期待される。素朴な方法と Rabin-Karp 法による可逆文字列照合アルゴリズムについては対応する非可逆アルゴリズムと時間計算量と空間計算量が同一であるものを構築し一部の成果を発表した。また、既存のハフマン符号化のうち単射なステップのみから構成されるものを発表しており、効率的な可逆アルゴリズムの構築が期待される。

プログラミング言語の可逆性を論じるために提案したメタ言語は、それにより記述された意味論の可逆性を保証している点が強力である。可逆意味論の研究は萌芽的であり更なる発展が期待される。

ハミルトン曲面流に対応する流れの向きを考慮した極大語の列挙アルゴリズムを提案した。本アルゴリズムは、任意の長さの極大語をもれなく重複無く列挙することができる。ソフトウェア開発で広く使われている統一モデリング言語に採用されている状態チャートによって極大語の生成方法の簡潔な表現が可能になった。また、多重連結領域における安定非圧縮流の全トポロジーを、プリミティブな局所構造変換を繰り返し適用することで構成できることを示した。

可逆コンピューティング及び隣接分野では発熱に繋がるゴミ出力量を最小化することが重要な課題のひとつであるにもかかわらず、「与えられた関係を計算するゴミ出力が最小で効率的な可逆化ができるか」という基本的な問題は未解決のままである。本研究で得られた知見を生かして解決されることが望まれる。

[1] M. Krakovsky: Taking the heat. Communications of the ACM, 64(6):18-20 (2021).

[2] H. B. Axelsen, R. Glueck, A. De Vos, M. K. Thomsen: MicroPower: towards low-power microprocessors with reversible computing. ERCIM News, Special Theme: Towards Green ICT, 79(1):20-21 (2009).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Glueck Robert、Kaarsgaard Robin、Yokoyama Tetsuo	4. 巻 12233
2. 論文標題 Reversible Programs Have Reversible Semantics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Formal Methods. FM 2019 International Workshops (FM 2019), Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 413 ~ 427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-54997-8_26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Glueck Robert、Yokoyama Tetsuo	4. 巻 147
2. 論文標題 Constructing a binary tree from its traversals by reversible recursion and iteration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Information Processing Letters	6. 最初と最後の頁 32 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ipl.2019.03.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 青木 峻、横山 哲郎	4. 巻 J101-D
2. 論文標題 可逆プログラミング言語R-WHILEの可逆チューリング完全性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 1372 ~ 1375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2018JDL8008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 柴田 心太郎、横山 哲郎	4. 巻 J102-D
2. 論文標題 二分木の辞書順のランク計算の効率的なクリーン可逆シミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 130 ~ 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2018PDP0021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 谷崎 海良、平工 真基、横山 哲郎	4. 巻 22
2. 論文標題 素朴な方法とRabin-Karp法による可逆文字列照合アルゴリズム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 南山大学紀要アカデミア理工学編	6. 最初と最後の頁 124 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Glueck Robert、Kaarsgaard Robin、Yokoyama Tetsuo	4. 巻 -
2. 論文標題 From reversible programming languages to reversible metalanguages	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2022.02.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 田島嘉人、横山哲郎
2. 発表標題 木構造の可逆深さ優先探索アルゴリズム
3. 学会等名 令和2年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Masuda、Tetsuo Yokoyama
2. 発表標題 Analyzing Trade-offs in Reversible Linear and Binary Search Algorithms
3. 学会等名 Proceedings of the Third Workshop on Software Foundations for Data Interoperability (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Robert Glueck、Robin Kaarsgaard、Tetsuo Yokoyama
2. 発表標題 Reversible Programs Have Reversible Semantics
3. 学会等名 Reversibility in Programming, Languages, and Automata (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田島嘉人、横山哲郎
2. 発表標題 可逆ハフマン符号化のゴミ出力量の最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会2022年総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田心太郎、横山哲郎
2. 発表標題 量子桁上げ伝播加算器回路の深さの効率化について
3. 学会等名 令和元年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Robert Glueck and Tetsuo Yokoyama	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer-Verlag	5. 総ページ数 164
3. 書名 Special Feature: Reversible Computing: Foundations and Software	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
デンマーク	コペンハーゲン大学			
英国	エジンバラ大学			