

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：33917

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25730049

研究課題名(和文)関数型の視点からの効率的可逆シミュレーションおよび可逆プログラミング方法論の拡張

研究課題名(英文)Extending efficient reversible simulations and the methods of reversible programming

研究代表者

横山 哲郎 (YOKOYAMA, Tetsuo)

南山大学・理工学部・准教授

研究者番号：80456631

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では可逆プログラミング言語の設計および可逆プログラミング方法論の確立を目的とした。

既存の可逆言語Janusに参照渡し機構があっても可逆性は保たれ表現力が向上した。可逆万能性をもち、厳密な可逆性が保証され、木構造を扱えるような簡潔な可逆言語を提案した。その言語を用いて可逆計算理論での応用が期待される線形時間自己解釈が可能であることを示した。可逆プログラミング言語の設計では、構造化・非構造化可逆流れ図の理論を整備した。可逆プログラミング方法論では、可逆アルゴリズムの効率を測る尺度を提案して、可逆整列法や二分木の可逆ランク計算といった基礎的なアルゴリズムを効率的に実装する方法を報告した。

研究成果の概要(英文)：The objective of the research is to investigate the methods of the design of reversible programming languages and reversible programming.

We have shown that the extended reversible programming language Janus is still reversible, even if a parameter passing method is introduced into the language. We have proposed that a small reversible programming language that enables linear-time reversible self-interpretation, which has potential to be applied in the theory of reversible computation. For the design of reversible programming languages, we have studied the theory of structured/unstructured reversible flowchart languages. It is fundamental for reversible imperative programming languages.

We have proposed the concepts to measure the efficiency of reversible algorithms. We have reported fundamental reversible programming methods such as reversible comparison sorts and reversible ranking and its inverse of binary trees, which are efficient in terms of the proposed measure.

研究分野：計算機科学

キーワード：可逆計算 可逆シミュレーション 可逆自己解釈系 可逆プログラミング言語 Janus 構造化定理 可逆アルゴリズム 可逆万能性

1. 研究開始当初の背景

可逆計算モデルは様々な分野から研究が行われてきた。著名なものには、セル・オートマトン、データベースやビュー更新問題などを含む双方向計算、電子回路設計、量子計算などがある。例えば、量子計算は可逆なユニタリ演算子のみから構成される。可逆系の調査・研究は、計算統計力学、物理、化学、および生物学を含む幅広い分野で行われてきた。

可逆計算系は、計算過程において情報が失われることがない。この制約の下で可逆計算系を設計するには既存の知見をそのまま適用することができない。図1のような可逆計算モデルのすべての階層で効率的な可逆シミュレーションを実現することが重要である。

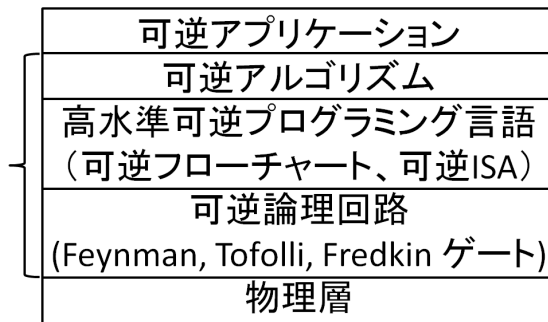


図1. 可逆計算モデルの階層 (可逆の塔)

可逆命令型プログラミング言語の実装には、引数渡し機構を導入しようという試みが行われていたが、その理論的扱いは厳密には行われていなかった。非可逆アルゴリズムを可逆アルゴリズムへと変換する一般解法はさまざまなものが知られていたが、特定の問題領域(例えば、比較ソート、二分木のランク計算)の知識を使ってより効率的な可逆アルゴリズムを構築することは知られていたが、著名なアルゴリズムについても実際には行われていなかった。

我々は、可逆論理回路、可逆ISA・高水準可逆プログラミング言語、可逆アルゴリズムの3層に跨る複合的問題を解決することを試みてきた。高水準プログラミング言語は、理論のみならず実装を進めてきており、可逆アルゴリズムを紙の上だけではなく、計算機上で走らせることでその挙動を確かめることができるようになっていた。

可逆計算に興味をもつ研究者が集まる学会としては、Conference on Reversible Computation が毎年開催されていた[1]。トピックは、物理的な話や回路の設計からアルゴリズムまで多岐にわたる。

世間では「可逆計算によって、エネルギー

の必要量は発熱量ともども何桁も減らすことができる」[2]といった予想もあるが、現在、この分野の研究・技術は萌芽的である。

2. 研究の目的

可逆プログラミングは既存のプログラミング方法論とは直交する概念をもっており、新しい視点からのモジュラリティや特定領域開発支援型のプログラミングをすることが必要である。

効率的な可逆プログラムの開発・可逆アルゴリズムの検証には可逆プログラミング言語の支援が欠かせない。このために、我々は、可逆アルゴリズムをより記述しやすくなるように既存の言語を拡張する。

可逆計算モデルは、非可逆計算モデルとは異なる独自の特徴を持つことが知られている。非可逆計算では良く知られた道具である自己解釈、その線形時間版、万能性を有していながら理論的に扱いやすい大きさの言語などを整備することで、可逆計算モデルに関する研究をプログラミング言語理論からアプローチできるようにする。

以上のように、本研究の主眼は、可逆プログラミング言語の設計を発展させ、可逆計算理論を発展させるための基礎を支え、可逆プログラミング方法論を確立することにある。

3. 研究の方法

(1) 引数渡し機構をもたせた可逆プログラミング言語 Janus が可逆であることを数学的に証明する。また、拡張が行われた Janus においても逆実行や逆変換が元の言語と同様の方法で実現できることを示す。

(2) 可逆万能性や厳密な可逆性を持ち、木構造データが扱いやすい簡潔な可逆プログラミング言語を設計する。この言語を用いて可逆計算理論での応用が期待される線形時間自己解釈が可能であることを、実際にそれを構築することで示す。

(3) 構造化・非構造化可逆流れ図の理論を整備する。この理論は、可逆プログラミング言語の設計の基礎となるものである。

(4) 可逆アルゴリズムの効率を測る尺度を提案する。広い応用が期待される基礎的なアルゴリズムを対象にして、提案した尺度に関して効率的に実装する方法を見つける。

4. 研究成果

(1) 可逆プログラミング言語 Janus の引数渡し機構を拡張して、その拡張言語が可逆であることを数学的に示した。引数渡し機構としては参照渡しを選択した。

参照渡しモデル化には、同一の参照を持つかも知れない複数の変数名が同じ記憶場所を指せるメモリモデルが必要である。これは既存の Janus の形式化で用いられていた状態モデルでは直接には扱うことができていなかった。そこで、我々は、環境・記憶域モデルを導入してモデル化を行った。この結果、プロシージャの実引数には、局所変数や局所配列だけでなく、大域変数や添字付き配列変数の参照、および同一の参照を持つ複数の構文対象も渡せるようになった。

拡張された Janus においても、任意の文やプロシージャ呼び出しの逆実行ができること、任意の文に関して逆文が存在すること、およびそれを求めるプログラム逆変換器が構成できた。

また、可逆性を損なうことなく可逆代入の構文上の制限を一部緩和できることを示した。

(2) 我々は、木構造データ (S 式) をもつ小さな可逆構造化命令型言語を提案した。この言語は、状態を可逆的に更新する命令 1 つ、ごく少数の変数、可逆構造化演算子 1 つ、1 つのアトムと 1 つの構成子をもつデータをもつ。このように小さな言語でありながら、この言語は可逆的に万能性を持ち、線形時間可逆自己解釈ができることが示された。すなわち、この言語は可逆チューリング機械と同等の計算能力を有し、漸近的に実行時間のオーバヘッドなしに自身で記述されるような可逆計算をもシミュレーションすることができることが分かった。

(3) 流れ図は、命令型言語の理論的基礎である。また、任意の流れ図に対して、順次 (sequence)、選択 (selection)、ループ (loop) のみを用いて、等価な意味をもつ構造化流れ図が作れることが知られており、その結果は構造化定理という名で参照されている。構造化定理は構造化プログラミングをサポートする理論のひとつである。

可逆流れ図は、個々のステップが局所的に逆化可能な演算のみからなり、すべての合流点 (join points) においてどちらから合流したかを明示する条件をもつ。可逆流れ図は、可逆命令型言語の理論的基礎となることが期待されている。我々は、構造化定理の可逆版を示した。すなわち、任意の可逆流れ図に対して、順次、可逆選択、可逆ループのみを用いて、等価な意味をもつ構造化可逆流れ図が作れることを示した。可逆構造化定理は可逆構造化プログラミングをサポートする理論のひとつとなることが期待される。

さらに我々は、可逆流れ図の可逆万能性を示した。すなわち、可逆流れ図は、可逆チュ

ーリング機械と同等の計算能力をもつ。

一般に停止性を判定する問題は難しい。しかし、我々は、可逆ループにおいてアクセスされるメモリセルに限りがある場合は、必ず可逆ループは停止することを示した。

構造化・非構造化可逆プログラミング言語を設計して、それら間の翻訳器や逆変換器を作成して、実際に行って見せた。これらのツールは今後の可逆プログラミング言語の研究の基礎となることが期待される。

(4) 我々は可逆シミュレーションの効率を測る尺度として faithful, hygienic といった概念を導入した。可逆シミュレーションは、漸近的な実行時間のオーバヘッドがなく、メモリ使用量が入力データサイズの関数 g で押さえられる場合、faithful という。また、faithful な可逆シミュレーションは、 g が最適となる場合に hygienic という。

われわれは、hygienic という効率性を有する主な比較ソート (バブルソート、挿入ソート、選択ソート、マージソート、クイックソート) や二分木のランク計算とその逆計算の可逆アルゴリズムを作成した。

元々の非可逆計算には不要な出力データをゴミと呼ぶ。我々は必要なデータを効率的に取り出せ、かつメモリ使用量を抑えるようなゴミの表現を考案した。

Identity permutation trick などの既存のプログラミング方法論では使用されないような可逆プログラミングならではのプログラミング技術を発見した。既に知られていた call-uncall などのプログラミングパターンを効果的に応用することもできた。

< 引用文献 >

[1] Conference on Reversible Computation
<http://www.reversible-computation.org/>

[2] レイ・カーツワイル、シンギュラリティは近い、NHK 出版、2005

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

Tetsuo Yokoyama, Holger Bock Axelsen, Robert Glueck
Fundamentals of reversible flowchart languages, Theoretical Computer Science, Vol.611, pp.87-115, Elsevier, 2016
DOI:10.1016/j.tcs.2015.07.046
査読あり

新海 由侑, 田中 秀明, 横山 哲郎

可逆プログラミング言語の引数渡し機構の拡張, Vol.7, No.4, pp.21-36, 情報処理学会論文誌プログラミング(PRO), 2014
<http://id.nii.ac.jp/1001/00102871/>
査読あり

[学会発表](計8件)

青木 峻, 柴田 心太郎, 横山 哲郎
可逆プログラミング言語 R-WHILE による万能可逆チューリング機械の構成, 情報処理学会第79回全国大会, 名古屋大学(愛知県・名古屋市), 2017年3月16日

大久保 雄飛, 横山 哲郎, 金山 知俊
二分木のランク計算のクリーン可逆シミュレーション, 日本ソフトウェア科学会第33回大会, 東北大学(宮城県・仙台市), 2016年9月7日

Yuhi Ohkubo, Tetsuo Yokoyama, Chishun Kanayama
Clean Reversible Simulation of Ranking Binary Trees, 第19回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ, 華やぎの章 慶山(山梨県・笛吹市)

Holger Bock Axelsen, Tetsuo Yokoyama
Programming Techniques for Reversible Comparison Sorts, Programming Languages and Systems (APLAS), Lecture Notes in Computer Science, Vol.9458, 407-426, Springer-Verlag, Pohang (South Korea), 2015年11月30日-12月1日
DOI:10.1007/978-3-319-26529-2_22
査読あり

Tetsuo Yokoyama, Robert Glueck
A Linear-Time Reversible Self-Interpreter, 第17回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ, 道後プリンスホテル(愛媛県・松山市), 2015年3月6日
査読あり

新海 由侑, 田中 秀明, 横山 哲郎
可逆プログラミング言語の引数渡し機構の拡張, 情報処理学会第98回プログラミング研究会, Vol.2013-5-(6), 東京大学(東京都・文京区), 3月18日

山下 健太, 横山 哲郎
リストの可逆分割アルゴリズムを利用したゴミ情報が最適な可逆クイック整列法の生成, 情報処理学会第76回全国大会, 東京電機大学(東京都・足立区), 2014年3月13日

田中 秀明, 新海由侑, 横山 哲郎
引数渡し機構をもつ可逆プログラミング言語の可逆性, 情報処理学会第76回全国大会, 東京電機大学(東京都・足立区), 2014年3月11日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 哲郎 (YOKOYAMA, Tetsuo)
南山大学・理工学部・准教授
研究者番号: 80456631