

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 8 日現在

機関番号：33917

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22700042

研究課題名（和文） 可逆計算系と可逆プログラミング言語の設計と実現に関する研究

研究課題名（英文） Design and Implementation of Reversible Computing Systems and Reversible Programming Languages

研究代表者

横山 哲郎（YOKOYAMA TETSUO）

南山大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：80456631

研究成果の概要（和文）：

本研究では、可逆計算系における基礎的な概念・理論の整備を行って、高水準可逆プログラミング言語に有用な概念を抽出し、それを扱う方法論の確立を目指した。われわれの提案した単射関数のクリーンな可逆シミュレーションは、Bennett によって示されたものに対して、約二分の一の計算ステップ数で実現することができる。提案した可逆シミュレーションは、われわれの形式化した高水準可逆プログラミング言語において実際に実現できることが示された。

研究成果の概要（英文）：

We conducted a research for developing the fundamental theory on reversible computing systems, finding the principles on high-level programming languages, and developing the methodology for manipulating such languages. We proposed an optimization of Bennett's reversible simulation that requires half of the computational steps for a class of injective programs such as some lossless encoders and decoders. The proposed reversible simulation was demonstrated on a high-level programming language that we formalized.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：プログラミング言語、プログラミング方法論、可逆計算、可逆シミュレーション、可逆プログラミング言語

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。著名なものでは、セルオートマトン、デジタル電子回路、量子計算などが挙げられる。また、関連する分野としては、プログラム逆解釈／逆変換、データベースや双方向計算におけるビュー更新問題、電子回路の低電力設計、可逆デバッグ、ロスレス圧縮／伸長、さらに物理学・化学・生物学における可逆シミュレーションが挙げられる。近年、可逆回路や量子回路が実際に作成されたことや、背景にある計算モデルによって暗号化やより効率的なアルゴリズムを導くことができる可能性が示唆されたために本分野への関心が高まってきた。また、これに伴い、こうした分野に横断的にアプローチするために、理論的基盤の整備に注目が集まってきた。

しかし、通常の計算モデルでは 500 近い計算複雑度が知られているにもかかわらず、可逆計算モデルにおける計算可能性や計算複雑性の理論は未だに未整理で手つかずのものがある。可逆性を含む計算モデルは、通常の計算モデルの成果をそのまま適用することができないので、通常の計算モデルと同様に可逆計算モデルでもこうした理論の整理が必要である。さらに、計算機アーキテクチャ、プログラミング言語、プログラミング方法論、コンパイルの原理などの研究は、当時、数少ない例外を除いて主な学術雑誌／会議には発表されていなかった。

物理的な可逆性の特長を最大限に生かす有力な方法として、物理層からアルゴリズムまでのすべての層を可逆にする構想が提案されている。われわれは、プログラミング言語、プログラミング方法論、アルゴリズムなどについての可逆性を探究することでこの構想に貢献したい。

当時、いくつかの高水準可逆プログラミング言語が発表されていたが、それぞれのプログラミング言語の特長を生かしたプログラミング方法論が確立しておらず、上述したような分野に対する効果的なアプローチには至っていなかった。

2. 研究の目的

われわれは、可逆計算系における基礎的な概念・理論の整備を行って、高水準可逆プログラミング言語に有用な概念を抽出し、それを扱う方法論の確立を目指した。可逆シミュレーションは、通常アルゴリズムを可逆化する技法である。可逆アルゴリズムの研究よりも遙かに蓄積のある通常アルゴリズムを効率的にシミュレーションする方法が確立できたらインパクトが大きい。

本研究では、時間計算量が効率的なクリーン可逆シミュレーションの考案を行った。可逆シミュレーションの対象とする関数は、あるクラスに属する単射関数とした。この制限

の下で、任意の計算モデルで使用することができる新しい時間計算量が効率的なクリーン可逆シミュレーションを構築して、実際に高水準可逆プログラミング言語において実現することを目指した。

3. 研究の方法

よく知られた Bennett のクリーン可逆シミュレーションを効率化する方法を採用した。Bennett のクリーン可逆シミュレーションでは、与えられた関数およびその逆関数の順方向および逆方向の計算をする必要がある。しかし、それらのヒストリーが同じである場合は、ヒストリーの生成と消去をそれぞれの関数の可逆シミュレーションで実現できることを見いだした。具体的には、与えられた関数のヒストリーを生成する可逆シミュレーションの後に、逆関数のヒストリーを生成する可逆シミュレーションの逆実行を行うことで可逆シミュレーションを構築する。

実際にプログラミング言語で提案シミュレーションが実現できることを示した。使用するプログラミング言語は、われわれの形式化した高水準可逆プログラミング言語 Janus を選択した。

提案する可逆シミュレーションは、単射関数とその逆関数が存在するときに適用可能である。したがって、アプリケーションとしては、ロスレスな圧縮・伸長アルゴリズムに適用してその有効性を確認することとした。

4. 研究成果

計算のヒストリーを共有する単射関数とその逆関数を入力として、われわれの提案した単射関数のクリーンな可逆シミュレーシ

ョンは、Bennett によって示されたものに対して、約二分の一の計算ステップ数で実現することができた。これは、あるクラスに属する単射関数に対して効率的な可逆シミュレーションを実現する方法を示したと言える。提案した可逆シミュレーションは、われわれの形式化した高水準可逆プログラミング言語 Janus において実際に実現できることが示された。

今後の課題のひとつは、非単射関数の可逆シミュレーションによって生成されるゴミ情報の定式化とその指標による最適化である。

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 1 件)

- ① 横山哲郎, Holger Bock Axelsen, Robert Glück, Optimizing Reversible Simulation of Injective Functions, Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing, 査読有, Vol. 18, No. 1 (2011), pp. 5-24

[学会発表] (計 3 件)

- ① 横山哲郎, A High-Level Reversible Programming Language, Dagstuhl Seminar on Design of Reversible and Quantum Circuits, 2011年12月12日, Dagstuhl, ドイツ
- ② 横山哲郎, Holger Bock Axelsen, Tetsuo Yokoyama, Reversible programming languages, The First International Conference on Networking and Computing,

2010年11月17日, 広島大学 (広島県)

- ③ 横山哲郎, Holger Bock Axelsen, Tetsuo Yokoyama, Optimization of Input-Erasing Clean Reversible Simulation for Injective Functions, Workshop on Reversible Computation, 2010年7月2日, ブレーメン, ドイツ

[図書] (計1件)

- ① Robert Glück, 横山哲郎, pringer-Verlag, Workshop on Reversible Computation, 2012年, 総ページ数 X, 241 p.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 哲郎 (YOKOYAMA TETSUO)

南山大学・情報理工学部ソフトウェア工学科・准教授

研究者番号 : 80456631