

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：11301
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2019～2022
課題番号：19K11892
研究課題名(和文) 一方向プログラミングと双方向プログラミングの融合

研究課題名(英文) Combining Unidirectional and Bidirectional Programming

研究代表者

松田 一孝 (Matsuda, Kazutaka)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：10583627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：双方向変換は異なる種類の複数データ間の同期を可能にし、プログラミング言語やソフトウェア工学等の様々な分野で注目を集めている。

本プロジェクトでは主に、双方向変換の記述のためのプログラミング言語に関する二つの成果を得た。一つ目は高階関数型部分可逆プログラミング言語のSparclの設計・実装である。この言語では可逆性を保証したまま一方の処理と可逆な処理を組み合わせることが可能であり、結果、辞書式圧縮等をより自然な形で記述することを可能とする。もう一つは双方向変換合成システムSymbitの設計・実装である。このシステムは、通常の一方向プログラムと逆方向の入出力例から双方向プログラムを効果的に合成する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

双方向変換は、データベースにおけるビュー更新、GUI/Webアプリケーション作成、アンドウ/リドゥ機能の実装や、相互変換処理の作成等、ソフトウェア開発における様々な応用を持つ。そのためプログラミング言語分野のみならず様々な分野で注目を集めているのは前述の通りである。本プロジェクトの成果は双方向プログラミング言語に関する基盤技術に関わるものであり、変換の記述をより容易にする。このことは、ひいては上記のような双方向変換を利用するソフトウェアの生産性の向上につながる。

研究成果の概要(英文)：Bidirectional transformation, which enables synchronization among multiple data in different formats, attracts interest in various research areas, including programming languages and software engineering.

The main outcomes of this project are two folds. First, we designed and implemented a higher-order partially-invertible programming language Sparcl. In the language, users can mix irreversible and reversible computations while keeping the reversibility guarantee, which leads to more natural programs for many programs, such as dictionary-based compressions. Second, we realized a bidirectional-transformation synthesis system called Symbit, which effectively synthesizes a bidirectional program from a unidirectional program and input-output examples for its backward behavior.

研究分野：プログラミング言語

キーワード：プログラミング言語 関数プログラミング 領域特化言語 双方向変換 プログラム合成 可逆計算

1. 研究開始当初の背景

双方向変換は異なる種類の複数データ間の同期を可能とし、プログラミング言語、ソフトウェア工学、データベースなど様々な分野で注目を集めている。言語に基づく双方向変換の実装技術、すなわち**双方向プログラミング言語**は双方向変換における重要な基盤技術の一つである。世界初の双方向プログラミング言語 *lens* を提案した論文はプログラミング言語理論分野の最高峰会議 POPL 2005 で発表され、その 10 年後に「*the paper sparked a great deal of follow-on work in the area of BX ("bidirectional transformations")*」という理由で Most Influential Paper に選ばれている。また、現在においても双方向変換は、*lens* を提案し Pennsylvania 大のグループの他にも、Edinburgh 大、Oxford 大、日本の国立情報学研究所などで盛んに研究されている。

より具体的には、双方向変換は、データ(ソースと呼ばれる)を別のデータ(ビューと呼ばれる)へと変換する順方向の変換(単射とは限らない)と、変換後のデータに対する変更を元データへと反映させる逆方向の変換の組である。双方向変換は、それを組み合わせることで複数のデータ間の同期を可能とし、データベースにおけるビュー更新、GUI/Web アプリケーション作成、アンドゥ/リドゥ機能の実装、整形出力器と構文解析器の作成、プログラム進化の補助など様々な応用を持つ。順方向変換と逆方向変換は「双方向」に動作するという性質を満す必要があるが、順方向変換と逆方向変換を別個に実装したのでは、煩雑だけでなく、得られる変換の組が「双方向」性を満たさないという不具合を含みやすい。そこで、一つのプログラムを記述するだけで**双方向性を満たすような順方向変換と逆方向変換の組**が得られるような双方向プログラミング言語が研究されてきた。

2. 研究の目的

これまで、様々な双方向プログラミング言語が提案されてきたものの、多くは双方向性の保証に重きを置いており、プログラムの記述性は軽視されてきた。一つの例外が研究代表者らによる高階双方向プログラミング言語 HOBiT (ESOP 2018 にて発表)である。この言語では双方向変換は通常の間数として表現される。そのため、高階間数を含む、通常の間数定義(抽象)を用いた通常の「一方向のプログラミング」により、双方向プログラムを作成することが可能となっている。このことは言語の記述性を向上させ、双方向変換をより自然な形でプログラム可能にした。本研究プロジェクトは、この方向性をさらに発展させ、実際の変換例を現実的な労力で記述可能にするような言語の実現を目的とする。

3. 研究の方法

本プロジェクトでは以下の方法で研究を進めた。

(1) **可逆プログラミング言語への HOBiT のアイデアの応用** 可逆プログラミング言語は双方向プログラミング言語の一部であり、一つのプログラムを記述するだけで間数 f とその逆間数 f^{-1} が得られるようなプログラミング言語である。これまでも様々な可逆プログラミング言語が提案されてきたが、それらは主に可逆な処理を基本単位としている。一方で、現実の可逆な変換は可逆な処理のみから構成されるわけではない。たとえば、辞書式圧縮では辞書は圧縮時も展開時も同様に変化し、変化が逆になりはしない。「一方向プログラミングと双方向のプログラミングの融合」の観点からこのギャップの解消に取り組むことで、双方向プログラミングにおいても有用となる言語機能やプログラミングイデオムの発見につながることを期待された。

(2) **HOBiT プログラムの合成手法** これまで、研究代表者らの成果を含む様々な双方向プログラミング言語が提案されてきた。しかしながら、双方向プログラミングでは、プログラムの双方向の挙動を記述するという本質的な複雑さがある。入出力例や述語などの形で与えられる仕様からそれを満たすプログラム合成する、**プログラム合成**はこの問題の解決策の一つである。HOBiT プログラムを合成することができれば、双方向プログラミングにかかる労力を下げることにつながる。

4. 研究成果

本プロジェクトの成果は主に 2 つある。

(1) **高階間数型部分可逆プログラミング言語** 部分可逆性とは入力の一部を固定することで可逆となるという性質である。たとえば、加算や減算は一方の入力を固定することで可逆となるため、部分可逆である。より現実的な例では、Huffman 符号化は、Huffman 木を固定した上で符号と復号が可逆になるため、部分可逆である。HOBiT のアイデアは部分可逆性と相性がよく、部分可逆

な変換を可逆な変換と同様に通常の間数として表現することを可能にする。しかし、それだけでは現実の可逆な変換を自然に表現できるのは十分ではない。技術的な挑戦は可逆でない処理と可逆な処理の相互作用にある。たとえば、典型的な辞書式圧縮では辞書を入力に応じて変更しなければならない等、可逆でない処理が可逆な処理に依存にする。

本研究の貢献は、部分可逆な変換を基本要素とするようなプログラミング言語 Sparcl を提案したことである。本言語の特徴の一つは HOBiT のアイデアを応用し、可逆な変換と部分可逆な変換を統一的なインターフェースで扱えることである。また、提案言語は可逆に扱われるデータを一時的にそうでないデータに変更するような pin 演算子を持つ。この pin 演算子は可逆でない処理と可逆な処理のある種の相互作用を実現する。これらの特徴により、提案言語においては前述の Huffman 圧縮や辞書式圧縮など様々な可逆プログラムがより自然な形で記述可能である。

この成果の一部はこの分野のトップレベル会議の一つである ICFP 2020 にて発表されている。また、言語実装に用いた技術の一部については ICFP と同等に競争的な会議である ESOP 2020 にて発表された。

(2) **双方向プログラム合成システム** 前述の通り、双方向プログラミングでは、プログラムの双方向の挙動を記述するという本質的な複雑さがあり、**プログラム合成**はこの問題の解決策の一つである。これまでいくつかの双方向プログラムの合成手法が提案されている。それらは入出力例および変換の型から lens を合成するものである。一方で、双方向変換を記述する際、順方向の変換は既に存在するかプログラムの頭の中にあることも多いが、既存の手法はこの情報を活用していない。そこで、研究代表者らは、通常の一方向のプログラムと逆方向の入出力例から双方向プログラムを合成するシステム Synbit を設計・実装した。本研究の貢献は、合成に使用する双方向プログラミング言語 HOBiT の、双方向変換を通常の一方向のプログラムに近い形で記述できるという特性を活用した点にある。提案システムは与えられた一方向のプログラムと同じ構造の双方向プログラムに限定して、与えられた入出力例を満たすようなプログラムを探索するため効果的に双方向プログラムを合成することができる。また、合成したプログラムが入出力例を満たすかどうかの検査に双方向プログラムの特性を活用することでより効率的な探索を実現している。

また、どのようなプログラムに対して合成が成功するかの考察を通して、HOBiT プログラミングに関する知見を得ることができた。

この成果の一部はこの分野のトップレベル会議の一つである OOPSLA 2021 にて発表された。また、第一著者であった当時の修士学生の修士論文にもなっている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yamaguchi Masaomi, Matsuda Kazutaka, David Cristina, Wang Meng	4. 巻 5
2. 論文標題 Synbit: synthesizing bidirectional programs using unidirectional sketches	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 1~31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3485482	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 Matsuda Kazutaka, Wang Meng	4. 巻 4
2. 論文標題 Sparcl: a language for partially-invertible computation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 1~31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3409000	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 Kazutaka Matsuda	4. 巻 なし
2. 論文標題 Modular Inference of Linear Types for Multiplicity-Annotated Arrows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Programming Languages and Systems - 29th European Symposium on Programming	6. 最初と最後の頁 456-483
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-44914-8_17	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yamaguchi Masaomi, Matsuda Kazutaka, David Cristina, Wang Meng
2. 発表標題 Synbit: synthesizing bidirectional programs using unidirectional sketches
3. 学会等名 第24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（PPL 2022）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazutaka Matsuda
2. 発表標題 High-Level Language for Bidirectional Transformations: Experiences and Future Directions
3. 学会等名 SFDI2020: Fourth Workshop on Software Foundations for Data Interoperability (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazutaka Matsuda
2. 発表標題 Modular Inference of Linear Types for Multiplicity-Annotated Arrows
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第37回大会, トップカンファレンス特別講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazutaka Matsuda and Meng Wang
2. 発表標題 Sparcl: A Language for Partially-Invertible Computation
3. 学会等名 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
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>本研究に関連の深い国際共同研究プロジェクトおよびその成果をまとめたウェブページ https://bx-lang.github.io/EXHIBIT/OOPSLA_21論文のfull version https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.13783 双方向プログラム合成システムSynbitの実装 https://github.com/masaomi-yamaguchi/synbit Synbitのデモページ http://www2.sf.ecei.tohoku.ac.jp/~kztk/SynbitDemo/ 研究代表者のWebページ http://www2.sf.ecei.tohoku.ac.jp/~kztk/ 可逆プログラミング言語Sparclの実装 https://github.com/kztk-m/sparcl 可逆プログラミング言語Sparclに関するいくつかの性質のAgdaによる形式化 https://github.com/kztk-m/sparcl-agda ESOP 2020論文のフルバージョン https://arxiv.org/abs/1911.00268</p>

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
研究協力者	WANG Meng (WANG Meng)		

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			
英国	University of Bristol			