

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 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21700011

研究課題名（和文） 単射性を持つ関数型プログラムの逆関数プログラム生成に関する研究

研究課題名（英文） Study of Program Inversion for Functional Programs Defining Injective Functions

研究代表者

西田 直樹 (NISHIDA NAOKI)

名古屋大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：00397449

研究成果の概要（和文）：本研究では逆関数プログラムを自動生成する逆化変換の実用化をめざし、関数適用に関して関数定義が決定的である、すなわち、いわゆるプログラムを形成する逆関数の関数定義を生成する逆化変換の開発を行った。さまざまな関数型プログラムへの応用を容易にするため、関数型プログラムの計算モデルの一つである項書換え系を扱った。まず、末尾再帰関数に特化した逆化変換を提案し、先行研究で提案した基本的な逆化変換に組込んだ。さらに、関数適用に関して決定性を持たない項書換え系の書換え規則の右辺をナローイング計算で解析し、可能な計算を保存したまま関数定義を具体化することで関数定義を決定化する手法を提案した。ナローイング計算を利用した決定化手法を逆化変換の後処理として利用することで、既存の逆化変換を改良することに成功した。提案した逆化変換を実装し、ウェブブラウザを介して項書換え系の逆化変換を行うサービスの提供を開始した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aimed at applying program inversion methods that automatically generate inverse computation programs, into practical functional programs, and we developed a program inversion method that inverts a given program to a function-definition set which is deterministic with respect to function application, namely a program. To apply the method into several functional languages, as target programs, we dealt with term rewriting systems of which the class is known as a computation model of functional programs. First, we proposed a new inversion transformation that specializes in tail recursive functions, and then incorporated it into the program inversion method developed at our previous work. Next, we proposed a method for determinizing rewrite rules that are indeterministic with respect to application of rules. More precisely, with preserving desired computation, the method instantiates each of the rules by analyzing the right-hand side by means of narrowing computation. By using the method as a postprocess of the inversion method, we succeeded in improving the existing inversion method. Finally, we implemented the inversion method and provided a service of inversion via web browsers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：書換え理論

科研費の分科・細目：情報学，情報学基礎

キーワード：プログラム逆化，プログラム変換，項書換え系，関数型言語

1. 研究開始当初の背景

プログラム P に v_1, \dots, v_n を入力して結果 v を得たとき， v から v_1, \dots, v_n を求めるプログラム P を P の逆計算プログラムと呼ぶ．逆化変換は P から P を求めるプログラム変換である．また， v と一部の入力 v_{k+1}, \dots, v_n から残りの入力 v_1, \dots, v_k を求めるプログラムを P の部分逆計算プログラムと呼び，逆化変換はしばしば部分逆計算プログラムを生成できるように拡張されている．加算と乗算の部分逆計算がそれぞれ減算と除算であるように，部分逆計算は実用性のあるプログラムである．また，共有鍵を用いた暗号化／復号化関数も互いの部分逆計算プログラムであり，バグがないようにコーディングすることが要求される．逆化変換はその正当性を示されることで，バグのないプログラムを自動生成できることが保証される．よって，逆計算プログラムの生成では高い信頼性を持つプログラム生成が可能なツールである．

これまでにいくつかの逆化変換が関数型プログラムを対象に提案されている．近年では特に単射関数を対象とした逆化変換の研究が盛んである．その理由は，単射関数の逆計算も単射性を持つことからその場合の応用例があること，その一方で，単射関数を扱う場合でもその逆計算を関数で定義するように変換することは容易ではない．これは各関数定義を逆化しただけでは関数適用に関して決定的な定義になるとは限らないためである．この問題は単射関数を対象とした逆化でも起こる．Glück らは LR 解析を用いることでこの問題に取り組んだ．しかし，LR 解析に成功するプログラムのクラスは限られており，すべての単射関数に対して決定的な逆計算プログラムを生成できるわけではない．例えば，プログラム定義の照合パターンが複雑になると手法を適用できない場合が多い．

本研究ではこれまでに，関数型プログラムの計算モデルである項書換え系を対象とした逆計算プログラム生成コンパイラを提案した．提案したコンパイラはまず，逆計算を定義する条件付き項書換え系を生成し，次にそれを紐解き変換 (unraveling) と呼ばれる変換を利用することで項書換え系に変換する．紐解き変換の従来の目的は条件付き項書換え系の性質を解析することで，本来起こらない計算を生じさせることが原因で，その結果の項書換え系を条件付き項書換え系の代替として用いることはなかった．しかし，本

研究ではその起こらない計算が生じないための条件を明らかにし，紐解き変換の新たな利用例を与えた．

さらに，動作に制限を与えた完備化手続きを後処理として適用することで，完備性を持つ逆計算項書換え系を生成する枠組みを提案した．完備性とは計算の停止性と計算結果の一意性を保証する性質であり，完備化手続きは等式集合をそれと等価な完備性を持つ項書換え系に変換する．

このアプローチは最終結果である完備性を持つ項書換え系を変換して関数型プログラムに戻すには適していない．さらに，本研究のコンパイラは末尾再帰関数などのようにアキュムレータ関数を補助関数として用いて定義される単射関数に対しては停止性を持たない逆計算プログラムを生成してしまうという問題が残されていた．

2. 研究の目的

本研究では，項書換え系を対象とした既存の逆化変換を，単射性を持つ関数型プログラムに対して関数適用が決定的となる関数定義を生成するように改良することをめざす．関数適用が決定的である関数定義とはいわゆる関数型プログラムであり，本研究の目的は計算モデルである項書換え系を対象とした逆化変換を実際の関数型プログラムに適用できるようにすることである．そして，この変換を実装し，Web ブラウザを介してプログラム逆化のサービスを提供するツールを実現する．

3. 研究の方法

研究の目的を達成するために以下のように研究を行った．

(1) 単射関数でない関数を逆化して得られた関数定義は一般には定義部にのみ現れる変数を持つためそのような関数定義による計算にはナローイング計算が適していることを先行研究で示した．さらに，そのような計算の停止性を証明する方法も先行研究で提案した．その提案手法を G. Vidal 教授 (バレンシア工科大，スペイン) が 2008 年に提案した手法を組み合わせ，ナローイング計算の停止性証明の手法の提案に G. Vidal 教授と取り組んだ．変換方法の開発においては生成

したプログラムに対して停止性を解析することは、逆化変換の開発で重要な役割を果たすことが期待される。

(2) 動作に制限を与えた完備化手続きを後処理として適用する逆化の枠組みをベンチマークに適用した結果からその枠組みの有効性を評価した。さらに、その結果を考察し、関数定義を決定化するアプローチについて考察を行い、決定化の方法として関数定義を具体化することが有効な方法の一つであるという結論に至った。

(3) 逆化対象を単射関数に制限するためには関数が単射性を持つことを判定する方法が必要であるが、関数が単射性を持つことの十分条件は十分に明らかにされていない。そこで、逆化変換を利用した十分条件を明らかにした。

(4) 末尾再帰関数に対して既存の逆化変換では停止性を持たない関数定義が生成される問題に対し、末尾再帰関数に特化した逆化の原理を発見し、既存の逆化変換に組込んだ。末尾再帰関数を対象とした逆化の研究は、本研究の既存の逆化変換で生成された関数定義が決定的である際の入力の構文条件について研究を行った G. Vidal 教授と在外研究中に共同で研究を行った。

(5) 逆化変換で得られる関数定義は条件付き項書換え系で表現されている。性質の解析において項書換え系よりも複雑な条件付き項書換え系を解析するアプローチとして項書換え系へと変換する紐解き変換 (unraveling) がある。紐解き変換で得られた項書換え系は元の条件付き項書換え系の計算を近似したシステムであるため、一般にはその書換えは健全ではない。条件付き項書換え系の性質をより厳密に解析するため、紐解き変換が健全である条件付き項書換え系のクラスを先行研究で明らかにしてきた。逆化変換で得られた関数定義の性質を解析するために、紐解き変換の健全性について、条件付き項書換え系の他の変換との比較の観点から、紐解き変換の健全性を解析した。

(6) 逆化変換で得られる関数定義は、末尾再帰関数に特化した変換を導入しても一般には決定的ではない。そこで、関数適用が決定的でない項書換え系を対象に、その関数定義を決定的にするための変換の開発に取り組んだ。

4. 研究成果

本研究では「研究の方法」で述べた方針で研究を遂行し、以下の成果を得た。

(1) ナローイング計算が停止する場合の十分条件を明らかに、依存対法と呼ばれる項書換えの停止性証明の手法を応用した証明法を提案した (雑誌論文②)。

(2) 動作に制限を与えた完備化手続きを後処理として適用する枠組みをまとめ、さらにベンチマークに適用した結果からその枠組みの有効性を評価し、ベンチマークのプログラムについて決定的な関数定義を生成できることを確認した (雑誌論文②)。

(3) 完備化手続きを後処理とした逆化の応用として、その枠組みでの逆化後の関数定義の決定化 (すなわち、後処理の完備化手続き) の成功が元の関数の単射性の十分条件であることを示した (学会発表⑥)。既存の十分条件では単射性を証明できなかった例のいくつかは単射性を持つこと、本十分条件により証明できることを確認した。

(4) 末尾再帰を実現している補助関数の関数定義の両辺を入れ換える変換が末尾再帰関数に特化した逆化変換の原理であることを示し、既存の逆化変換に組込んだ (学会発表⑤)。本変換はベンチマークの末尾再帰関数に対して直接、停止性を持つ決定的な関数定義を生成することが可能であった。

(5) 紐解き変換の健全性について先行研究の証明を整理し、紐解き変換で得られた項書換え系の各書換え規則の左辺が線形 (各変数は一度しか現れない性質)、もしくは右辺が線形で変数は必ず左辺にも現れることが十分条件であることを示した (学会発表④)。さらに、他研究の成果と比較し、条件付き項書換え系の変換の比較を容易にする抽象的な概念を与えた (雑誌論文①)。

(6) 論理プログラムを決定化する MSV 変換に基づき、項書換え系の書換え規則を決定化する手法を提案した (学会発表③)。これは書換え規則の右辺をナローイング計算で解析し、期待される計算結果に到達できることを保存しながらなるべく書換え規則を具体的にする変換である。各書換え規則を一つの具体的な書換え規則に変換するだけでは決定化に成功しない場合があるため、複数の書換え規則へ変換するように拡張した (学会発表②)。また、その拡張の際に、条件付き項書換え系を対象とするように拡張した。本変換により逆化のベンチマークの例すべてに対し、逆関数の決定的な関数定義を生成する

ことに成功した。しかし、拡張した MSV 変換を利用しても決定化できない例は存在する。そこで、Glück らの逆化変換を適用できるクラスを広くすることで改良を行った（学会発表①）。

以上の成果のうち、逆化変換を構成する変換を実装し、本研究のウェブサイトを開設した。ウェブサイトではブラウザ上で変換を実行できるサービス、Java の jar 形式のダウンロード版ツール、さらに発表論文にけいさいされているベンチマークの例題を提供している。本研究が開設したウェブサイトは、今後、他の研究グループと共同で逆化変換の共通ベンチマークを整備するための基盤となると期待される。

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 3 件）

- ① Naoki Nishida, Masahiko Sakai, and Toshiki Sakabe, Soundness of Unravelings for Conditional Term Rewriting Systems via Ultra-Properties Related to Linearity, *Logical Methods in Computer Science*, Vol. 8, No. 3, pp. 1-49, 2012, 査読有.
- ② Naoki Nishida and German Vidal, Termination of Narrowing via Termination of Rewriting, *Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing*, Vol. 21, No. 3, pp. 177-225, 2010, 査読有.
- ③ Naoki Nishida and Masahiko Sakai, Completion after Program Inversion of Injective Functions, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Vol. 237, pp. 39-56, 2009, 査読有.

〔学会発表〕（計 7 件）

- ① Naoki Nishida and German Vidal, Computing More Specific Versions of Conditional Rewriting Systems, *the 22nd International Symposium on Logic-Based Program Synthesis and Transformation*, 2012 年 9 月 20 日, ルーベン (ベルギー).
- ② Minami Niwa, Naoki Nishida, and Masahiko Sakai, Extending Matching Operation in Grammar Program for Program Inversion, *the 22nd*

International Symposium on Logic-Based Program Synthesis and Transformation, 2012 年 9 月 20 日, ルーベン (ベルギー).

- ③ Naoki Nishida and German Vidal, More Specific Term Rewriting Systems, *the 21st International Workshop on Functional and (Constraint) Logic Programming*, 2012 年 5 月 29 日, 名古屋.
- ④ Naoki Nishida, Masahiko Sakai, and Toshiki Sakabe, Soundness of Unravelings for Deterministic Conditional Term Rewriting Systems via Ultra-Properties Related to Linearity, *the 22nd International Conference on Rewriting Techniques and Applications*, 2011 年 6 月 1 日, ノビサド (セルビア).
- ⑤ Naoki Nishida and German Vidal, Program Inversion for Tail Recursive Functions, *the 22nd International Conference on Rewriting Techniques and Applications*, 2011 年 5 月 31 日, ノビサド (セルビア).
- ⑥ Naoki Nishida and Masahiko Sakai, Proving Injectivity of Functions via Program Inversion in Term Rewriting, *the 10th International Symposium on Functional and Logic Programming*, 2010 年 4 月 21 日, 仙台.

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tris.cm.is.nagoya-u.ac.jp/rep/ius/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西田 直樹 (NISHIDA NAOKI)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：00397449

(2) 研究分担者 なし

()

研究者番号：

(3) 連携研究者 なし

()

研究者番号：