

## 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24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2011

課題番号：20500008

研究課題名（和文）

高階関数プログラムの停止性判定に関する研究

研究課題名（英文）

On Proving Termination of Higher-Order Functional Programs

研究代表者

草刈 圭一朗 (KUSAKARI Keiichirou)

名古屋大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：90323112

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、関数プログラムの停止性証明法の理論整備と、得られた理論成果に基づく停止性自動証明システムの構築である。特に、関数プログラムで広く利用されている高階関数への対応を重点的に研究する。

本目的に従い、我々は静的依存対法と言う、関数プログラムの静的再帰構造を解析することにより停止性を証明する非常に強力かつ効率的な手法を提案する。これは現在、高階関数を含む関数プログラムの停止性証明法としては実用上最も強力な手法である。本手法は一階の書換え系で提案された依存対法と、型付きλ計算の停止性証明のために導入された強計算性の概念に基づき設計される。また、静的依存対法により効果的かつ効率的に停止性を証明するために必須となる引数切り落とし法や実効規則も高階の書換え系上に拡張する。

さらに、得られた成果に基づき高階定理自動証明系 HOPSYS(Higher-Order Proving SYStem)の停止性ライブラリを作成した。現在は、公開に向けて Web ユーザインターフェースを開発中である。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research is to present a method for proving termination of higher-order functional programs, and to develop a termination prover based on the results. In particular, we investigate higher-order functions that are widely used in existing functional programs.

To such purpose, we present an extremely powerful method for proving termination, namely the static dependency pair method. The method combines the dependency pair method introduced for first-order rewrite systems with the notion of strong computability introduced for typed  $\lambda$ -calculi. This method statically analysis a recursive structure of functional programs, and by solving suitable constraints generated by the analysis, we can prove termination. We also extend the argument filtering method and the notion of usable rules onto higher-order systems.

Moreover we produce a termination library of HOPSYS (Higher-Order Proving SYStem). Currently in order to release HOPSYS, we are preparing a manual and web user interface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：計算理論

#### 1. 研究開始当初の背景

プログラム検証においては効果的かつ効率的な停止性証明法が重要となってくる。一方、高階関数を含む関数プログラムの停止性証明法は、萌芽的な成果はいくつか報告されていたものの、実際の関数プログラムに適用可能な実用的なものは知られていなかった。

#### 2. 研究の目的

高階関数を含む関数プログラムの停止性を証明できる停止性証明法の確立と得られた成果に基づく停止性自動証明システムの構築。特に、得られた成果の実用性が、実際の関数プログラムを対象とできるレベルであることを目的とする。

#### 3. 研究の方法

##### ①静的依存対法の改良拡張：

- a) 我々の提案した静的依存対法は非常に強力であるものの、研究開始時点では萌芽的な成果であった。また、一般には健全では無いため、適用条件の調査が必要となる。このために型付きλ計算の停止性証明に導入された強計算性の概念に関する理論的な考察と、強計算性に基づく再帰構造という非常に抽象的な概念の定式化を行う。
- b) 静的依存対法により効果的・効率的に停止性証明を行うためには、引数切落とし法や実効規則などの手法・概念が必要になってくる。これらは高階関数に対応していないため、高階関数に対応できるように拡張する。

##### ②停止性自動証明システムの構築：

我々のグループでは高階証明系 HOPSYS を開発している。HOPSYS は様々な自動証明を行えるものの、研究開始時点では停止性に関しては貧弱な実装しか組み込まれていない。よって、得られた成果に基づき HOPSYS の停止性ライブラリの充実を行う。

#### 4. 研究成果

##### ①静的依存対法の改良拡張：

- a) 単純型上において必要となる基本成果は一通り完成した。得られた成果は、現在、高階関数を含む関数プログラムの停止性証明法としては実用上最も強力な手法である。一方、現在の関数プログラムに適用するには多相型を取り扱えないという問題が

残った(※研究期間にはぎりぎり間に合わなかったものの多相型を取り扱えるように拡張することには成功しており、現在論文を投稿中である)。

- b) 静的依存対法により効果的・効率的に停止性証明を行うために最重要である、引数切落とし法と実効規則、またこれらを組み合わせた手法に関して、単純型上において、定式化を完成し、それらの健全性の証明を与えた。

##### ②停止性自動証明システムの構築：

得られた成果を高階証明系 HOPSYS の停止性ライブラリとして実装し、プロトタイプを完成させた。一方、公開・配布を行うために必要となるドキュメント類やユーザインターフェースの開発・整備が不十分のため研究期間中での公開は行えなかった。

#### 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 4 件)

- ① SUZUKI Sho, KUSAKARI Keiichirou, Frédéric Blanqui, Argument Filterings and Usable Rules in Higher-Order Rewrite Systems, IPSJ Transactions on Programming, Vol.4, No.2, pp.1-12, Mar 2011. (査読有)
- ② KUSAKARI Keiichirou, ISOGAI Yasuo, SAKAI Masahiko, Frédéric Blanqui, Static Dependency Pair Method based on Strong Computability for Higher-Order Rewrite Systems, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E92-D, No.10, pp.2007-2015, Oct 2009. (査読有)
- ③ KOJIMA Yoshiharu, SAKAI Masahiko, NISHIDA Naoki, KUSAKARI Keiichirou, SAKABE Toshiki, Context-Sensitive Innermost Reachability is Decidable for Linear Right-Shallow Term Rewriting Systems, IPSJ Transactions on Programming, Vol.2, No.3, pp.20-32, Jul 2009. (査読有)

- ④ KUSAKARI Keiichirou, SAKAI Masahiko,  
Static Dependency Pair Method for  
Simply-Typed Term Rewriting and  
Related Techniques,  
IEICE Transactions on Information  
and Systems, Vol.E92-D, No.2,  
pp.235-247, Feb 2009. (査読有)
- [学会発表] (計 12 件)
- ① 大井一展, 草刈圭一朗, 酒井正彦, 坂部俊樹, 西田直樹,  
高階書換え系における引数切り落とし関  
数の下での実効規則について,  
Tech. Rep. of IEICE (SS2011-49),  
Vol. 111, No. 406, pp. 57-62, 高知, Jan  
2012. (査読無)
- ② 尾関朗, 草刈圭一朗, 坂田翼, 西田直樹,  
酒井正彦, 坂部俊樹,  
単純型付き項書換え系における書換え帰  
納法について,  
Tech. Rep. of IEICE (SS2011-48),  
Vol. 111, No. 406, pp. 51-56, 高知, Jan  
2012. (査読無)
- ③ 高桑一也, 西田直樹, 酒井正彦, 坂部俊樹,  
草刈圭一朗,  
制約付き項書換え系における木準同型写  
像を用いた関数等価性検証,  
日本ソフトウェア科学会第 28 回大会講  
演論文集, No. 7B-1, 12 pages, 那覇,  
Sep 2011. (査読無)
- ④ 坂田翼, 西田直樹, 酒井正彦, 草刈圭一朗,  
坂部俊樹,  
多重文脈書換え帰納法における反証と補  
題追加,  
日本ソフトウェア科学会第 28 回大会講  
演論文集, No. 1A-4, 12 pages, 那覇, Sep  
2011. (査読無)
- ⑤ 倉橋克尚, 酒井正彦, 西田直樹, 野村太  
志, 坂部俊樹, 草刈圭一朗,  
制約付き木オートマトンとその閉包性,  
Tech. Rep. of IEICE (SS2010-63),  
Vol. 110, No. 458, pp. 61-66, 那覇, Mar  
2011. (査読無)
- ⑥ 服部達哉, 酒井正彦, 西田直樹, 草刈圭一朗,  
坂部俊樹,  
順方向ナローイングに基づく右線形右シ  
ャロー項書換え系の非停止性証明につい  
て,  
Tech. Rep. of IEICE (SS2010-44),  
Vol. 110, No. 336, pp. 31-36, 渋川, Dec  
2010. (査読無)
- ⑦ 馬場達也, 坂部俊樹, 西田直樹, 草刈圭一朗,  
酒井正彦,  
等式理論を法とする DPLL 遷移系につい  
て,  
Tech. Rep. of IEICE (SS2010-36),  
Vol. 110, No. 227, pp. 49-54, 滝沢村(岩  
手県), Oct 2010. (査読無)
- ⑧ SUZUKI Sho, KUSAKARI Keiichirou,  
Frédéric Blanqui,  
Argument Filterings and Usable Rules  
in Higher-Order Rewrite Systems,  
Tech. Rep. of IEICE (SS2010-24),  
Vol.110, No.169, pp.47-52, 旭川, Aug  
2010. (査読無)
- ⑨ 馬場正貴, 酒井正彦, 濱口毅, 西田直樹,  
坂部俊樹, 草刈圭一朗,  
例外処理を持つ関数型プログラムの停止  
性証明法,  
第 12 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 PPL2010, 論  
文集 p. 81, 琴平, Mar 2010. (査読無)
- ⑩ 御宿義勝, 酒井正彦, 坂部俊樹, 草刈圭一朗,  
西田直樹,  
右線形右シャローな項書換え系における  
文脈依存停止性の決定可能性について,  
Tech. Rep. of IEICE (SS2009-40),  
Vol. 109, No. 343, pp. 31-36, 高松, Dec  
2009. (査読無)
- ⑪ 鈴木翔, 草刈圭一朗, 坂部俊樹, 酒井正彦,  
西田直樹,  
高階書換え系における引数切り落とし法  
と実効規則,  
Tech. Rep. of IEICE (SS2009-39),  
Vol. 109, No. 343, pp. 25-30, 高松, Dec  
2009. (査読無)
- ⑫ KOJIMA Yoshiharu, SAKAI Masahiko,  
NISHIDA Naoki, KUSAKARI Keiichirou,  
SAKABE Toshiki,  
Context-Sensitive Innermost  
Reduction of Linear Right-Shallow

Term Rewriting Systems Effectively  
Preserves Regularity,  
LA-Symposium 2009 (Summer),  
pp.14.1-14.8, 東松島, Jul 2009. (査読無)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

草刈 圭一朗 (KUSAKARI Keiichirou)  
名古屋大学・大学院情報科学研究科・  
准教授  
研究者番号 : 90323112

### (2) 研究分担者

坂部 俊樹 (SAKABE Toshiki)  
名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号 : 60111829

酒井 正彦 (SAKAI Masahiko)  
名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号 : 50215597

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

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :