

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 5 月 25 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21700017

研究課題名（和文）高階項書換えシステムの合流性自動検証に関する研究

研究課題名（英文）Proving confluence of higher-order term rewriting systems automatically

研究代表者

岩見 宗弘 (IWAMI MUNEHIRO)

島根大学・総合理工学部・講師

研究者番号：70314614

研究成果の概要（和文）：高階項書換えシステムの合流性自動検証のために、様々な書換えシステムの研究を行った。研究成果として、組合せ子の項書換えシステムの多くが強頭部正規化可能性を持たないことを示した。さらに、無限項書換えシステムの強頭部正規化可能性および生成性に対する反証手続きを提案し、反証手続きの正しさを示すとともに、手続きの実装を行った。

研究成果の概要（英文）：We studied several rewriting systems for proving confluence of higher-order term rewriting systems automatically. In this project, we showed many term rewriting systems of combinators do not have strong head normalization. Furthermore, we presented procedures for disproving two properties of infinitary term rewriting systems - the strong head normalization and the productivity. The correctness of our procedures is proved. And we implemented our procedures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
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：項書換えシステム，高階項書換えシステム，無限項書換えシステム，合流性，強頭部正規化可能性，強収束性，生成性，一般生成性

1. 研究開始当初の背景

ソフトウェアに対する多様な要求に対し

て、高機能な関数型プログラミング言語が提案され、それらのプログラミング言語の基礎

理論を与えるものとして高階項書換えシステムが近年活発に研究されている。

合流性と停止性は書換えシステムの重要な性質である。合流性は、計算結果の一意性を保証する概念である。停止性は、計算が必ず終了することを保証する概念である。一階の項書換えシステムにおいては、合流性と停止性に関して多くの理論的な研究が行われてきた。

一階の項書換えシステムに対しては多くの停止性自動検証法が提案され、実装されている。それらのソフトウェアの高速化に関する研究も活発に行われている。また、高階項書換えシステムに対する停止性自動検証法とその実装に関する研究も盛んである。

一方、一階の項書換えシステムに対して合流性自動検証法の研究は非常に少ない。さらに、その手法が高階項書換えシステムの合流性自動検証へ単純に拡張することはできないことが知られている。したがって、高階項書換えシステムの合流性自動検証に関する研究はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高階項書換えシステムの合流性に関する理論体系を確立し、その理論体系に基づいた合流性自動検証システムの設計を目指すものである。

具体的には、高階項書換えシステムの合流性自動検証のために、組合せ子の項書換えシステムの理論的な解析を行う。これらの項書換えシステムは有限項上では合流性を持つ代表的なものとして知られている。

さらに、項書換えシステムを拡張した無限項書換えシステムの理論的な解析を行う。

無限項書換えシステムは、遅延リストやストリームといった仮想的に無限長としてみなされるデータを扱う関数型プログラミング言語の計算モデルとして知られている。通常の項書換えシステムとの違いは、通常の項書換えシステムが有限の大きさの項しか対象としないのとは対照的に、無限項書換えシステムでは大きさが無限であるような項（無限項）も対象とする点である。

3. 研究の方法

項書換えシステムの停止性は非常に有用な性質である。一方、通常の項書換えシステムとは対照的に、無限項書換えシステムでは停止性を考える意味があまりない。無限項を対象に含める場合には停止性を持たないことが通常のためである。このため、停止性に代わる基本的な性質として無限項書換えシステムにおける強頭部正規化可能性（強収束性）が考えられている。

しかしながら、非強頭部正規化可能性については、縮退規則（右辺が変数となっている書換え規則）を持つ無限項書換えシステムが強頭部正規化可能性を持たないことが知られているが、それ以外の十分条件や証明法は従来あまり知られていない。

また、ストリームを生成するプログラムを記述したときに、ストリームの先頭要素をいくつ消費しても、その次の要素が必ず求まるという性質は非常に望ましい性質である。このような性質や、より一般的に、与えられた仕様による（無限の）データの定義可能性は、

生成性と呼ばれる。無限項書換えシステムの部分クラスであるストリーム項書換えシステムが与えられ、ストリーム型項の生成性の概念が提案され、ある十分条件のもとでの生成性判定手続きが報告されている。

本研究では以下の3段階の方法により、強頭部正規化可能性と一般生成性における自動反証について研究を進める。

(1) 組合せ子の項書換えシステムの強頭部正規化可能性の解析

(2) (1)の解析に基づく無限項書換えシステムにおける強頭部正規化可能性および一般生成性の反証手続きの提案

(3) (2)の手続きの解析と実装および実験・評価

4. 研究成果

本研究による主な研究成果は以下のとおりである。

(1) 組合せ子の項書換えシステムの非強頭部正規化可能性：

これらの項書換えシステムは有限項上では合流性を持つ代表的なものとして知られている。

- ① これらのシステムの多くは非縮退性を持つにもかかわらず、無限項上では強頭部正規化可能性を持たないことを、実際に反例を構成することにより示した。
- ② さらに、いくつかのシステムは無限項上で強頭部正規化可能性を持つことを行列解釈により示した。

(2) 無限項書換えシステムにおける強頭部正規化可能性の自動反証手続きの提案：

この手続きの基本的なアイデアは、有限表現を持つ無限項である正則項（部分項の集合が有限集合である項）の反例を構成する点にある。この正則項の反例構成の鍵となっているのは、正則項の単一化手続きである。従来知られていた正則項の単一化手続きは、単一化可能性の決定可能性を示すことを目的に提案されたものであるため手続きの効率は考慮されておらず、実装に用いるには適していない。そこで、反証手続きに先立ち、正則項の効率的な実現法を明らかにした。

- ① 研究成果(1)の反例の構成過程を解析し、強頭部正規化可能性に対する反証手続きを提案した。
- ② ①で提案した手続きの正当性（正しさ）を証明した。すなわち、手続きに成功する場合には必ず強頭部正規化可能性を持たないことを示した。
- ③ ①で提案した手続きを関数型プログラミング言語で実装した。実験の結果、特に、研究成果(1)のすべての項書換えシステムに対して提案手法が有効であることを確認した。また、強頭部正規化可能性が従来検証されていなかった組合せ子についても、強頭部正規化可能性の自動反証に成功した。さらに、研究成果(1)以外の一般の項書換えシステムに対しても提案手法が有効であることを確認した。

(3) ストリーム項書換えシステムにおける一般生成性の自動反証手続きの提案：

ストリーム項書換えシステムは無限項書換えシステムの部分クラスである。次の手続

きの基本的なアイデアも、研究成果（２）と同様に、有限表現を持つ無限項である正則項の反例を構成する点にある。この正則項の反例構成の鍵となっているのも、研究成果（２）と同様に、正則項の単一化手続きである。

- ① 生成性の概念を拡張した一般生成性の概念を与えた。生成性はある特定の項に対してストリームの生成を考えるが、それでは、外部からストリームを入力としてとる場合や入力となるストリームが定まっていない場合などに対応できない。このような場合には、どのような入力についても生成的となることを保証する一般生成性の方がより自然な概念ではないかと考えられる。
- ② 研究成果（２）の反証手続きを改良することにより、一般生成性に対する反証手続きを提案した。
- ③ ②で提案した手続きの正当性（正しさ）を証明した。すなわち、手続きに成功する場合には必ず一般生成性を持たないことを示した。
- ④ ②で提案した手続きを関数型プログラミング言語で実装した。従来の生成性判定法は、ストリーム項書換えシステム一般には適用できない。実験の結果、従来手法では取り扱えない例について効率的に反証が成功する場合があることを確認した。

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 5 件）

- ① 岩見宗弘，青戸等人，無限項書き換えシステムにおける強頭部正規化可能性および一般生成性の自動反証，コンピュータソフトウェア，2012，査読有，Vol. 29, No. 1, pp. 211-239

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jssst/29/1/29_1_1_211/_pdf

- ② 岩見宗弘，青戸等人，無限項書き換えシステムにおける性質に関する考察，京都大学数理解析研究所講究録，2011，査読無，No. 1769, pp. 153-157
- ③ 岩見宗弘，左線形かつ K-開発閉包な項書換えシステムの合流性に関する考察，京都大学数理解析研究所講究録，2010，査読無，No. 1712, pp. 156-161
- ④ 岩見宗弘，青戸等人，無限項書換えシステムにおける強頭部正規化可能性の反証手続き，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論文集，2010，査読有，pp. 261-273
- ⑤ 岩見宗弘，組合せ子の強収束性，第 8 回情報科学技術フォーラム講演論文集，2009，査読無，pp. 251-258

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.cis.shimane-u.ac.jp/~munehiro/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩見 宗弘 (IWAMI MUNEHIRO)
島根大学・総合理工学部・講師
研究者番号：70314614

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：