

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 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500002

研究課題名（和文） 書き換えシステムの合流性自動判定法の研究

研究課題名（英文） Research on automated confluence proving for term rewriting systems

研究代表者

外山 芳人（TOYAMA YOSHIHITO）

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：00251968

研究成果の概要（和文）：

項書き換えシステムの理論は定理自動証明や計算モデルでひろく利用されている。近年、項書き換えシステムの停止性自動証明システムが数多く開発されているにもかかわらず、合流性自動証明システムについてはほとんど研究されていない。本研究では、さまざまな手法に基づいて項書き換えシステムの合流性自動証明システム ACP を開発することである。研究成果としては、リダクション保存完備化による合流性自動証明、片側減少ダイアグラムによる可換性自動証明、多項式サイズ正規形を保証する経路順序、永続性をもちいた合流性自動証明などがある。合流性に関する国際ワークショップ(IWC 2012)における合流性自動判定システムの第 1 回コンペティションにおいて、本研究で開発された ACP は、参加 3 システム中第 1 位の成績で優勝することができた。

研究成果の概要（英文）：

The theory of term rewriting systems is widely used in the fields of automated theorem provings and computation models. Although many automated termination provers of term rewriting systems have been proposed recently, little work is reported on automated confluence provers. This research aims to develop an automated confluence prover ACP for term rewriting systems based on several methods. Concrete results include a reduction-preserving completion method for proving confluence, one side decreasing diagram method for proving commutativity, a path ordering for guaranteeing polynomial size normal forms, a confluence proof method based on persistency. In the first confluence competition for term rewriting systems (IWC 2012), ACP developed by our group has won first place among the three participants.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：書き換えシステム、合流性、自動検証、停止性、モジュラ性

1. 研究開始当初の背景

項書き換えシステムは、関数型プログラムの計算モデルや効率的な定理自動証明手法として広く利用されている。これらの応用で重要な役割をはたす理論的基礎は、項書き換えシステムの停止性と合流性である。そのため、30年以上におよぶ項書き換えシステムの研究の歴史を通して、停止性と合流性は常に中心的な研究テーマとして注目され続け、書き換え理論の発展とともに、さまざまな判定手法が提案されてきた。

項書き換えシステムの停止性の研究は、再帰経路順序(Dershowitz 1980)による停止条件の研究以来、さまざまな判定法が提案されてきた。さらに、自動化に適した強力な停止性判定法である依存対法(Arts-Giesl 1997)が発見されたことで、最近 10 年間の停止性の研究の中心は、強力な停止性自動判定システムの開発競争へと移り、自動化に適した新しい判定法や理論、判定手続きの効率的な実装技術、システム評価のためのベンチマーク、プログラム自動検証や定理自動証明への応用などの面で飛躍的な発展をとげている。

一方、項書き換えシステムの合流性の研究は、危険対解析に基づく合流条件の研究(Knuth-Bendix 1977, Huet 1980)を出発点として、多くの理論的成果が蓄積されてきた。また、非常に制限された項書き換えシステムのクラスでは、合流性が多項式時間で決定可能であることも近年明らかになってきている。しかし、これらの理論的成果に基づいた合流性自動判定システムの開発は、プログラム自動検証や定理自動証明への応用が期待

されているにもかかわらず、これまでほとんど試みられていなかった。

申請者らは、先行研究において、世界最初の合流性自動判定システム ACP を試作し、多くの例題の合流・非合流性の自動判定に成功した。さらに、この先行研究によって、項書き換えシステムのモジュラ分解を利用した分割統治法をもちいると、基本的な合流条件の組み合わせのみでも、強力な自動判定が実現可能であることを明らかにした。これらの成果は、国際会議 RTA2009 (2009) で発表され、合流性研究の新しい流れとして注目されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自動化に適した新しい項書き換えシステムの合流性判定法を提案し、その理論的基礎を確立することである。さらに、その成果に基づいた強力な合流性自動判定システムを開発し、その有効性を実験を通して明らかにする。本研究の具体的な課題は以下のとおりである。

(1) 代表的な合流性判定法である危険対解析法と減少ダイアグラム解析法を統合し、両者の特徴をあわせもつ自動化に適した合流性判定法の理論を構築する。

(2) これまで知られていた永続性分解や層依存分解よりも強力な項書き換えシステムのモジュラ分解法を提案し、それに基づいた新しい分割統治法を提案する。

(3) 停止性自動判定法と有機的に組み合わせ

せることにより、最内停止性や相対停止性などの停止情報を効果的に利用した合流性自動判定法を開発する。

(4) 先行研究で試作した ACP の技術的蓄積の上に、以上の成果を取り入れることで、より強力な合流性自動判定システムを構築し、その有効性を実験を通して明らかにする。

本研究によって、強力な合流性自動判定システムが実現すれば、プログラム自動検証や定理自動証明などの応用分野において、合流性自動判定に基づく新しい自動検証・証明技術の創出が期待できる。さらに、本研究が契機となって合流性自動判定システムの国際的な開発競争が始まれば、これらの応用分野への波及効果だけではなく、合流性の基礎理論に関しても飛躍的な発展が予想される。

3. 研究の方法

本研究の目的は、自動化に適した新しい項書き換えシステムの合流性判定法を提案し、その理論的基礎を確立するとともに、強力な合流性自動判定システムを開発することである。このため、研究は以下の4フェーズを部分的に並行して進め、理論と実験の両面から自動判定法の有効性を検討する。

(1) 自動化に適した合流性判定法の提案と理論的基礎付け

(2) 強力な分割統治法実現のためのモジュラ分解理論の拡張

(3) 合流性判定法の理論に基づく実験システムの設計と実装

(4) 実験システム上での実験と評価

なお、本研究を着実に進めるためには、先行研究で試作した合流性自動判定システム ACP の理論的成果と基盤技術を有効に活用して行くことが不可欠である。このため、全体の研究期間を3年間とし、平成22年度は先行研究で開発した成果を新しい枠組みの中に整理統合する形で基礎理論と実験システムの開発を進め、先行研究との連続性を確保する。平成23年度・24年度では、これらの研究成果を発展させ、新しい合流性自動判定システムの実現を目指す。

4. 研究成果

(1) 項書き換えシステムの合流性自動判定システムの実装と改良を進めた。与えられた項書き換えシステムのリダクション関係を保存してままシステムの変形を繰り返すことで合流性を自動証明する拡張完備化手法を提案し、それを合流性自動判定システムに組み込むことで、従来手法では困難であった AC 規則を含む項書き換えシステムの合流性自動判定が可能となることを明らかにした。また、多くの文献から抽出した例題をもちいて合流性自動判定の実験を行い、本判定システムの有効性を示した。

(2) 基底項書き換えシステムの合流性の多項式時間判定アルゴリズムでは、カーリー変換とフラット変換という前処理が従来もちいられていた。これらの前処理が不要となる効率的な判定アルゴリズムを提案し、アルゴリズムの正当性の証明を与えるとともに、実験を通してその有効性を検証した。

(3) 項書き換えシステムの多項式サイズ正規形を保証する新しい経路順序として擬置換経路順序を提案し、従来知られていた軽

多重集合経路順序の真の拡張になっていることを示した。

(4) 項書き換えシステムの合流性が永続性をみたすことを利用して、非線型な項書き換えシステムを線形なシステムに変換して合流性を証明する手法を開発した。さらに、本手法を実装して、分割統治法が適用困難な例題に対して合流性自動判定の実験を行い、本手法の有効性を明らかにした。

(5) 項書き換えシステムの可換性は、分割統治法に基づく合流性自動証明で重要な役割をはたしている。そこで、可換性を保証する新しい判定手法として、片側減少ダイアグラム法を開発した。さらに、提案手法にもとづく可換性自動判定システムを実装し、本手法の有効性を示した。

(6) 項書き換えシステムに基づく定理自動証明システムを高階システムに拡張する場合、束縛変数の取り扱いは大きな問題となる。そこで、束縛変数の簡明なモデルとして近年活発に研究されている名目システムを調査し、名目書き換えシステムに基づく高階定理自動証明システムの実装と実験を行った。

(7) 合流性の自動判定に重要な役割をはたす到達可能性の判定法について検討した。具体的には、ボトムアップ項書き換えシステムのクラス(BU)を最内書き換えに変更した最内ボトムアップ項書き換えシステムのクラス(IBU)を提案し、IBUに含まれる項書き換えシステムの最内書き換え到達可能性が判定可能であることを明らかにした。

(8) 等式が帰納的定理であるか否かは一般

的には決定不能であるが、いくつかの部分クラスに対する決定手続きが知られている。本研究では、合流性に基づく帰納的定理自動証明法である書き換え帰納法における決定可能性を調べ、外山(2002)の決定手続きと Falke ら(2006)の決定手続きを組み合わせることで、両者が保証している決定可能な帰納的定理のクラスを拡張することに成功した。

(9) 合流性に関する国際ワークショップ(IWC 2012)における合流性自動判定システムの第1回コンペティションにおいて、本研究で開発された ACP は、参加3システム中第1位の成績で優勝することができた。

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. 的場正樹, 青戸等人, 外山芳人, 片側減少ダイアグラム法による項書き換えシステムの可換性証明法, コンピュータソフトウェア, 査読有, Vol. 30, No. 1, pp. 187-202, 2013, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jssst/30/1/30_1_187/_article/-char/ja/

2. Takahito Aoto, Yoshihito Toyama, A reduction-preserving completion for proving confluence of non-terminating term rewriting systems, Logical Methods in Computer Science, 査読有, Vol. 8, No. 1:31, pp. 1-29, 2012, <http://www.lmcs-online.org/ojs/viewarticle.php?id=1099&layout=abstract>

3. 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, 査読有, Vol. 29, No. 1, pp. 211-239, 2012, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jssst/29/1/29_1_1_211/_article/-char/ja/

4. 磯部耕己, 青戸等人, 外山芳人, 多項式サイズ正規形を保証する項書き換えシステムの経路順序, コンピュータソフトウェア, 査読有, Vol. 29, No. 1, pp. 176-190,

2012,
http://www.jstage.jst.go.jp/article/jssst/29/1/29_1_176/_article/-char/ja/

5. Yuki Chiba, Takahito Aoto , Yoshihito Toyama,

Program transformation templates for tupling based on term rewriting, IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol.E93-D, No.5, pp.963-973, 2010,
http://search.ieice.org/bin/pdf.php?lang=E&year=2010&fname=e93-d_5_963&abst=

[学会発表] (計 6 件)

1. Takahito Aoto , Munehiro Iwami, Termination of rule-based calculi for uniform semi-unification, the 7th International Conference on Language and Automata Theory and Applications (LATA 2013), Bilbao, Spain, April 2-5, 2013

2. Takahito Aoto , Jeroen Ketema, Rational term rewriting revisited: decidability and confluence, the 6th International Conference on Graph Transformation (ICGT 2012), Bremen, Germany , September 24-29, 2012

3. Yuki Chiba , Takahito Aoto, Transformations by templates for simply-typed term rewriting, the 6th International Workshop on Higher-Order Rewriting (HOR 2012), Nagoya, Japan, May 28, 2012-June 2, 2012

4. Takahito Aoto, Toshiyuki Yamada , Yuki Chiba, Natural inductive theorems for higher-order rewriting, the 22nd International Conference on Rewriting Techniques and Applications (RTA 2011), Novi Sad, Serbia, May 30, 2011-June 1, 2011

5. Takahito Aoto , Yoshihito Toyama, Reduction-preserving completion for proving confluence of non-terminating term rewriting systems, the 22nd International Conference on Rewriting Techniques and Applications (RTA 2011), Novi Sad, Serbia, May 30, 2011-June 1, 2011

6. Takahito Aoto, Automated confluence proof by decreasing

diagrams based on rule-labelling, the 21st International Conference on Rewriting Techniques and Applications (RTA 2010), Edinburgh, UK, July9-21, 2010.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等
<http://www.nue.riec.tohoku.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

外山 芳人 (TOYAMA YOSHIHITO)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号 : 00251968

(2) 研究分担者

青戸 等人 (AOTO TAKAHITO)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号 : 00293390