

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：13302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25730004

研究課題名(和文) 項書換えの合流性解析とその応用

研究課題名(英文) Confluence Analysis for Term Rewriting and Its Applications

研究代表者

廣川 直(Hirokawa, Nao)

北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：50467122

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：項書換えシステムは定理自動証明や仕様記述言語の基盤理論であり、演繹や計算は等式変形による答えの網羅的な探索として実現される。そのため計算結果が必ず一意に定まることを保証する合流性は、効率的な計算の実現に大切な性質である。本研究では合流性の証明手法とその応用に取り組み以下の成果を得た：(1)可換性分解、危険対解析、E単一化に関する技法を開発・発展させ、強力な合流性解析を実現した。(2)それらの知見の応用として、定理自動証明の基盤理論である抽象完備化の正当性についての簡潔な証明、(3)さらに計算を効率的に行うための基本正規化定理を得た。

研究成果の概要(英文)：Term rewriting is a fundamental computational model that underlies automated theorem proving and algebraic specification languages. In applications, deduction or computation is usually performed as an exhaustive search of normal forms. Therefore, for efficient computation, confluence that guarantees uniqueness of normal forms is considered as one of the most important properties in the area of rewriting. The main outcomes of our project are three: (1) We developed effective confluence analysis based on commutative decomposition, critical pair analysis, and E-unification. As applications of confluence analysis, (2) we obtained a simple proof for correctness of abstract completion which is a theoretical foundation of automated theorem proving, and also (3) a basic normalization theorem that enables us to effectively compute a normal form of basic terms.

研究分野：項書換え

キーワード：項書換え 合流性 国際研究者交流 オーストリア

1. 研究開始当初の背景

項書き換えシステムは等式を向き付けた計算モデルであり、定理証明システムや数式処理システム、CafeOBJ や Maude に代表される仕様記述言語の理論基盤として用いられている。これらにおいて演繹や計算は等式変形による答えの網羅的な探索と見なされる。計算結果が必ず一意になることを示す「合流性」は、効率的な計算や等式公理の整合性を保証する重要な性質である。例えば、計算問題としての数式

$$(2 + 3) - (2 + 3)$$

は括弧内の部分式をどちらから計算しても答えが 0 ただ一つに定まる。括弧内の式を計算せずに同一の式の差が 0 になるという事実を用いても、計算結果は同じく 0 である。これは初等教育で習う加減算の計算規則が合流性を持っているためであり、実際、望ましい性質である。仕様記述言語・関数型言語においても、計算規則としての等式を用いてプログラムが記述されるが、計算経路に依存せずに計算結果が一意に決まることは、多くの場合望ましい性質であり、プログラムが合流性を持つかを検証する技術が必要である。このように合流性証明自動化には大きな意義がある。

合流性研究の歴史は、1930 年代のチャーチ・ロッサーによる計算の研究に端を発し、今日に至るまで様々な合流性の証明技法が考案されてきた。現在は、特に自動化に適した合流性解析技法の確立が分野の焦点になっている。合流性自動証明ツール ACP (青戸ら, 2009) の登場を皮切りに、CSI (Felgenhauer ら, 2011), Saigawa (廣川・Klein, 2012) など様々な自動解析ツールが現れ、開発競争が続いている。これらのツールは複数の合流性証明技法を実装しており、その証明能力は長足の進歩を遂げている。しかし数学公理で頻繁に用いる結合律・交換律を始めとし、停止性を持たない項書き換えシステムに対しては、未だ決定的な合流性の解析手法を欠いている。

2. 研究の目的

本研究の目標は次の 2 つである。

- (1) 強力な合流性自動解析の実現。合流性の証明手法を発展させ、強力な合流性自動証明ツールの実現を目指す。特に現在の合流性ツールが上手く扱えないクラス (非停止性・非左線形) の克服を図る。

- (2) 新たな応用の創出。これまで合流性は「計算モデル」の備えるべき性質として議論されてきたが、他の問題領域への新たな利用法を追求する。特に、現在、合流性はツールによる解析可能なものになりつつあり、自動化によって可能になる潜在的応用を模索する。

3. 研究の方法

前節の目的達成のため、インスブルック大学および名古屋大学の研究グループと連携し、以下の事項に取り組んだ。

- (1) 合流性自動解析の研究。次に挙げる合流性の主要 3 定理の拡張・統合を試みた：

- ・ 危険対定理 (Knuth & Bendix, 1970)
- ・ 直交性定理 (Rosen, 1973)
- ・ モジュラリティ (外山, 1987)

研究当初は、非左線形と呼ばれる項書き換えシステムのクラスに有効な手法の確立を目指した。しかし非左線形の挙動に関する研究を通じて、むしろ左線形システムの理解が深まることとなった。後述で述べる通り、結果として左線形の項書き換えシステムに対し非常に有効な合流性解析の枠組みを得ることになった。

- (2) E 単一化の研究。停止性を持たない書き換えシステムに対して、「拡張危険対」(extended critical pair) を用いて合流性を証明する手法が知られている (Jouannaud & Kirchner, 1986)。拡張危険対の計算には、E 単一化と呼ばれる項に関する方程式を解く必要がある。この E 単一化を行う手続きは複雑かつ計算量が高いことが多く、合流解析において回避される傾向があった。本研究では現在の合流性ツールが弱点としている結合律を扱えるように、結合律に関する単一化理論の研究・調査を行った。

- (3) 前項 (1), (2) で考案した手法評価のため、それらの手法に基づく合流性ツールを実装し、実験により評価を行った。

- (4) 合流性解析技法の応用。次の対象を軸に研究を行った：

- ・ 定理自動証明の基盤理論である抽象完備化。
- ・ 計算・組合せ論理の基本定理である (最外最左戦略の) 正規化性定理。
- ・ 形式言語理論、特に文脈自由文法への応用。

4. 研究成果

(1) 合流性解析に関する成果

可換性分解に基づく解析。多くの合流性ツールは、モジュラリティの定理を用いて、合流性問題をサブシステムの合流性問題に帰着させる分割統治法を用いている。しかし左線形システムに対しては、Hindley 定理という合流性をサブシステム間の可換性から帰結できる事実を用いたアプローチがより効果的であると判明した。

結合律(A)・可換律(C)を含む項書換えシステムの合流性解析技法。Jouannaud & Kirchner の合流性定理をA規則とC規則の組合せに対して用いる方法を与えた。いわゆるAC規則の場合は、E単一化のアルゴリズムが良く知られているが、AまたはC規則のみの場合は不明な点が多い。E単一化の研究により、項書換えが左線形の場合にA規則またはC規則単体だけの場合でも扱える枠組みを構築した。

の手法を元に合流性自動証明ツール CoLL を開発し、その有効性を実証した。これらの成果を取りまとめた論文は CADE 2015 に採択された。

前項 の定理の自動化には、AC停止性を自動証明する必要がある。AC停止性の証明手法としてAC-KBOと呼ばれる順序を用いる手法が知られている。名古屋大学・インスブルック大学との共同研究により、既存のAC-KBOの定義に誤りがあることを発見した。またその修正方法を見出した。この成果を国際会議 FLOPS 2014 で発表、また学会誌 TPLP に招待された。

危険対解析。合流性を効果的に特徴づける critical-pair-closing system の概念を考案した。これは左線形システムに対して、危険対定理と直交性定理を一般化するために導入された critical pair system (廣川・Middelorp, 2010) の双対的な概念である。理論上、両者は比較不能であるが、合流性の標準問題集 Cop を用いた実験評価は critical-pair-closing system の優位性を示している。IWC 2014 において本成果を口頭発表した。現在、国際会議への投稿準備を行っている。

(2) 合流性手法の応用に関する成果

抽象完備化の簡易な証明。E単一化および定理自動証明の基盤技術である Knuth-Bendix の完備化 (1970) について共同研究を行い、現在教科書で採用されている標準の証明より簡潔な証明を発見した。定理証明システムや計算機代数システムの理論基盤を刷新するものと期待している。この成果は国際会議 ITP 2014 に採択された。

実行時間計算量の自動解析。項書換えシステムの計算過程を実効置換と呼ばれる概念を元に解析する手法を開発した。合流性・停止性・計算量解析など様々な性質の検証技法への応用が期待される。この成果は RTA-TLCA 2014 で受理された。ここで得られた成果は合流性の応用ではないが、次項の核心技術となっている。

正規化性定理と基本正規化定理。遅延評価型言語の基盤定理である正規化性定理の証明は自明ではないが、可換性を用いると極めて簡潔に証明できることが明らかになった。さらに、単純化した証明を元に、基本正規化性定理と名付けた、最左最外戦略が基本項に対し正規化性を持つか判定する十分条件を与えた。この条件は前項 の実効置換に基づく。本成果を取りまとめた論文は RTA 2015 に採択された。

形式言語への応用。正則言語と文脈自由言語の包含関係が決定可能なクラスを発見した。これは合流性に基づく Book (1993) の成果の拡張版である。その評価は今後の課題である。

(3) 学会組織・運営

第2回合流性に関する国際ワークショップ (IWC 2013) を主催した。また合流性解析ツールの国際競技会 CoCo を 2013, 2014, 2015 年に開催した。東北大学、インスブルック大学との共催である。

条件付き書換え・高階書換えの合流性問題に対応できるように、合流性問題データベース Cops のバックエンドシステムを開発・刷新した。

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1件)

- (1) Akihisa Yamada, Sarah Winkler, Nao Hirokawa, and Aart Middeldorp. AC-KBO Revisited. Theory and Practice of Logic Programming, 16(2):163-188, 2016. 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1017/S1471068415000083>

[学会発表](計6件)

- (1) Kiraku Shintani and Nao Hirokawa. CoLL: A Confluence Tool for Left-Linear Term Rewrite Systems. Proceedings of the 25th International Conference on Automated Deduction, Lecture Notes in Artificial Intelligence 9195, pp. 127-136, 2015. 2015年8月4日、ベルリン(ドイツ) 査読有
- (2) Nao Hirokawa. Commutation and Signature Extensions. Proceedings of the 4th International Workshop on Confluence, pp. 23-27, 2015. 2015年8月2日、ベルリン(ドイツ) 査読無
- (3) Nao Hirokawa, Aart Middeldorp, and Georg Moser. Leftmost Outermost Revisited. Proceedings of the 26th International Conference on Rewriting Techniques and Applications, Leibniz International Proceedings in Informatics 36, pp. 209-222, 2015. 2015年6月30日、ワルシャワ(ポーランド)
- (4) Nao Hirokawa, Aart Middeldorp, and Christian Sternagel. A New and Formalized Proof of Abstract Completion. Proceedings of the 5th International Conference on Interactive Theorem Proving, Lecture Notes in Computer Science 8558, pp. 292-307, 2014. 2014年7月17日、ウィーン(オーストリア) 査読有
- (5) Nao Hirokawa and Georg Moser. Automated Complexity Analysis Based on Context-Sensitive Rewriting. Proceedings of the Joint 25th

International Conference on Rewriting Techniques and Applications and 12th International Conference on Typed Lambda Calculi and Applications, Lecture Notes in Computer Science 8560, pp. 257-271, 2014.

2014年7月14日、ウィーン(オーストリア) 査読有

- (6) Akihisa Yamada, Sarah Winkler, Nao Hirokawa, and Aart Middeldorp. AC-KBO Revisited. Proceedings of the 12th International Symposium on Functional and Logic Programming, Lecture Notes in Computer Science 8475, pp. 319-335, 2014. 2014年6月6日、石川県立美術館(石川県金沢市) 査読有

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]
ホームページ等

- (1) 本研究課題のホームページ
<http://www.jaist.ac.jp/~hirokawa/kaken12.html>
- (2) 合流性ツール CoLL のウェブサイト
<http://www.jaist.ac.jp/project/saiga/wa/>
- (3) 合流性ツールの国際競技会 CoCo のウェブサイト
<http://coco.nue.riec.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
廣川 直 (HIROKAWA NAO)
北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号: 50467122
- (2) 研究分担者
該当者無し。
- (3) 連携研究者
該当者無し。