

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11158

研究課題名(和文) 条件付き項書き換えシステムにおける帰納的定理と基底合流性に関する研究

研究課題名(英文) Inductive theorems and ground confluence for conditional term rewriting systems

研究代表者

青戸 等人 (Aoto, Takahito)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00293390

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：項書き換えシステムは、形式手法に基づくソフトウェア構成・検証技術の基礎を与える重要な計算モデルである。帰納的定理は、項書き換えシステムをプログラムとして見做したときに成立する性質に対応し、基底合流性は、項書き換えシステムの解析において重要な解の一意性を保証する性質である。条件付き項書き換えシステムは、ホーン節論理の書き換えシステムによるモデル化であり、関数型プログラムのモデルとして、応用上重要な拡張である。本研究では、指向式条件付き項書き換えシステムにおけるホーン節帰納的定理証明のための書き換え帰納法、指向式条件付き項書き換えシステムの基底合流性検証法、階層可換性の十分条件などを与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

項書き換えシステムは、論理的な推論体系と計算手続きを表わす計算体系と2面性を持つ計算モデルであり、合流性や帰納的な妥当性はその両方の側面を繋ぐ重要な性質と考えることができる。本研究は、安全なソフトウェアを構築するための基礎理論に関するものであり、長期的には情報システムの脆弱性の克服への貢献となるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Term rewriting is a model of computation based on equational logic. The notion of inductive theorems of term rewriting systems expresses validity of equations from the programming perspective, and conditional term rewriting systems are a rewriting framework that suits to model functional programs, based on horn-clause logic. In this project, we give a rewriting induction framework to prove horn-clause inductive theorems over conditional term rewriting systems. We also give a method to prove ground confluence of oriented conditional term rewriting systems, as well as a critical pairs criterion for level-commutativity of oriented conditional term rewriting systems, etc.

研究分野：項書き換え

キーワード：帰納的定理 基底合流性 条件付き項書き換えシステム ホーン節論理 合流性 項書き換えシステム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

項書き換えシステムは、形式手法に基づくソフトウェア構成・検証技術の基礎を与える重要な計算モデルである。帰納的定理は、項書き換えシステムをプログラムとして見做したときに成立する性質に対応し、基底合流性は、項書き換えシステムの解析において重要な解の一意性を保証する性質である。条件付き項書き換えシステムは、ホーン節論理の書き換えシステムによるモデル化であり、関数型プログラムのモデルとして、応用上重要な拡張である。

条件付き項書き換えシステムにおける帰納的定理証明については、A.Bouhouha, M.Rusinowitch らによる一連の研究があり、その成果に基づく定理証明システム SPIKE が、S.Stratulat によって開発されている。しかしながら、彼らの証明体系は非常に複雑であるため、その正しさに関する理論的な検証も困難である。実際、申請者も成功していないし、検証に成功している他グループの研究者も申請者が知る限りでは存在しない。また、実装についても、彼らのグループ以外では成功した報告がない。このように、現在知られている技術は、その技術基盤からして非常に脆弱である。

条件付き項書き換えシステムの合流性については、インスブリュック大学(奥)および名古屋大学において研究されており、合流性検証システムも開発されている。しかし、基底合流性については試みられていない。また、条件付き項書き換えシステムの基底合流性に関する研究報告は、Ganzinger らによる報告、Bouhouha による報告があるが、前者では、帰納法を用いない交差判定のみの単純な場合のみを対象としており、また、後者では、危険対解析を交差可能帰納的定理の証明法へ投げており、その交差可能帰納的定理の証明法は、帰納的定理証明の複雑でアドホックな拡張に基づいている。このため、基底合流性の解析手法も、非常に単純な手法が非常に複雑で当事者以外にはとても実装ができるようなものしか知られていない。

2. 研究の目的

本研究は、条件付き項書き換えシステムにおける帰納的定理および基底合流性の自動証明・検証理論の基盤構築および証明・検証ツールの実現を目標としている。本研究では、申請者らが構築してきた見通しのよい書き換え帰納法の理論に基づいて、条件付き項書き換えシステムにおける帰納的定理の自動証明法および基底合流性の検証法を構築する。

3. 研究の方法

我々のアイデアの鍵となるのは、方向式条件付き項書き換えシステムの始代数意味を規定する上で前提となる論理性を保証する条件は、方向式条件付き項書き換えシステムから項書き換えシステムへの変換であるアンラベリング法の正当性を保証する条件とほぼ変わらないという事実である。この観察に基づき、我々は、まずアンラベリング法を用いて、方向式条件付き項書き換えシステムを項書き換えシステムへ変換し、項書き換えシステムにおいてホーン節帰納的定理の証明を行うアプローチを採用する。これにより、項書き換えシステムにおけるホーン節帰納的定理を証明するための技術に注力することが出来るばかりでなく、SPIKE システムのアプローチよりはるかに堅牢な証明技術が構築可能になると考えられる。実際、アンラベリング変換は、左線形制約が強いため合流性の解析においては極めて不十分と考えられているが、申請者らの考案した帰納的等価変換の理論を経由することで、制約を実質的に回避できる可能性が十分ある。さらに、(条件なし)項書き換えシステムにおいて開発した書き換え帰納法を応用した基底合流性検証法を条件付き項書き換えシステムへ拡張することで、従来ほとんど解析が困難であった条件付き項書き換えシステムの基底合流性解析について見通しよい手法を構築する。

4. 研究成果

主な研究成果は以下の通りである。

(I) 3型指向式条件付き項書き換えシステムにおけるホーン節帰納的定理の自動証明法の提案

提案手法では、3型指向式条件付き項書き換えシステムをアンラベリング変換を用いて項書き換えシステムに変換するとともに、帰納的定理を項書き換えシステムで証明したときに、どのような条件のもとで、その証明手続きの正しさが成立するのか明らかにした。そして、ホーン節帰納的定理を項書き換えシステムを用いて証明する書き換え帰納法を考案した。考案した書き換え帰納法は等式帰納的定理の書き換え帰納法の拡張となっている。また、これらの手法を実験システムとして実装を行い、その有効性を計算機実験によって調査した。さらに、提案手法ではうまく証明できないような例について調べ、追加補題を生成する推論規則を考案した。

(II) 条件付き項書き換えシステムの基底合流性証明法と十分完全性証明手法の構築

アンラベリングして得られた項書き換えシステムの基底合流性が、変換前の基底合流性を保証する条件について検討を行った。十分条件の1つとして、左線形かつ決定的かつ条件部の右辺が変数となっていることという条件を明らかにした。左線形および条件部の右辺についての条件は与えられたシグニチャ上の項への帰着可能性を示すために必要となることから、十分完

全性によっても十分条件が得られることがわかった。そこで、十分完全性の検証を合わせて行う必要性に至った。そこで、3 型指向式条件付き項書き換えシステムにおける十分完全性検証法の検討を行うとともに、そこで用いる項書き換えシステムにおける十分完全性検証法について新しい手法を提案した。提案手法をホーン節帰納的定理の自動証明法と組み合わせることで、より強力な基底合流性証明法も実現できる。

(III) 階層合流性を保証する危険対条件の提案

基底合流性を合流性から推論するアプローチについても改良が出来ないか検討を行うために、条件付き書き換えシステムの危険対解析について調査を進め、3 型指向式条件付き項書き換えシステムの階層合流性を保証する危険対条件を理論的に与えた。さらに、階層合流性から階層可換性への一般化に取り組むことで、階層可換性を保証する危険対条件を与えることに成功した。

(IV) 指向式以外の条件付き項書き換えシステムへの展開とその他

指向式以外の条件付き書き換えシステムである可換式条件付き書き換えシステムや交差式条件付き書き換えシステムについても検討を行い、合流性の証明手法や合流性証明に利用するためのアンラベリング変換の健全性について、その十分条件を与えた。最後に、これら以外にも、正則項書き換えシステムの合流性の基礎的な研究やフラット項書き換えシステムにおける合流性の関連性質の基礎理論についての成果など、関連する諸課題に取り組み、幅広い成果を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 木村 優太, 青戸 等人	4. 巻 37
2. 論文標題 対話的定理証明器 Isabelle/HOL上での書き換え帰納法の形式化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンピュータソフトウェア	6. 最初と最後の頁 104-119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11309/jssst.37.2_104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masaomi Yamaguchi and Takahito Aoto	4. 巻 167
2. 論文標題 A fast decision procedure for uniqueness of normal forms w.r.t. conversion of shallow term rewriting systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 5th International Conference on Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2020), Leibniz International Proceedings in Informatics,	6. 最初と最後の頁 11:1-11:23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.FSCD.2020.11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Mamoru Ishizuka, Takahito Aoto and Munehiro Iwami	4. 巻 12638
2. 論文標題 Commutative rational term rewriting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th International Conference on Language and Automata Theory and Applications (LATA 2021), Lecture Notes in Computer Science,	6. 最初と最後の頁 200-212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-68195-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 栗田 泰智, 青戸 等人	4. 巻 36
2. 論文標題 条件付き項書き換えシステムにおけるホーン節帰納的定理の自動証明	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンピュータ ソフトウェア	6. 最初と最後の頁 61-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11309/jssst.36.2_61	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahito Aoto and Yoshihito Toyama	4. 巻 11715
2. 論文標題 Automated proofs of unique normal forms w.r.t. conversion for term rewriting systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 12th International Symposium on Frontiers of Combining Systems (FroCoS 2019), LNCS	6. 最初と最後の頁 330-347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-29007-8_19	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kentaro Kikuchi, Takahito Aoto and Isao Sasano	4. 巻 13
2. 論文標題 Inductive theorem proving in non-terminating rewriting systems and its application to program transformation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming (PPDP 2019), ACM Press	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3354166.3354178	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 白石智輝, 青戸等人, 菊池健太郎	4. 巻 C1-12
2. 論文標題 項書き換えシステムにおける局所十分完全性の証明法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第22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(PPL 2020)論文集	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 加賀谷有輝, 青戸等人	4. 巻 C1-14
2. 論文標題 条件付き項書き換えシステムの階層合流性証明法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第22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(PPL 2020)論文集	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石塚守, 青戸等人, 岩見宗弘	4. 巻 C1-17
2. 論文標題 交換律による正則項書き換えにおける有限オートマトンの構成法とその応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第22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(PPL 2020)論文集	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 栗田泰智, 青戸等人	4. 巻 36
2. 論文標題 条件付き項書き換えシステムにおけるホーン節帰納的定理の自動証明	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンピュータソフトウェア	6. 最初と最後の頁 61-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 加藤裕人, 青戸等人	4. 巻 21
2. 論文標題 書き換え帰納法を利用した帰納的定理証明の補題生成法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第21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	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山口諒, 青戸等人	4. 巻 21
2. 論文標題 決定手続きを用いた項書き換えシステムの帰納的定理自動証明	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第21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	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahito Aoto, Makoto Hamana, Nao Hirokawa, Aart Middeldorp, Julian Nagele, Naoki Nishida, Kiraku Shintani and Harald Zankl	4. 巻 108
2. 論文標題 Confluence Competition 2018	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Leibniz International Proceedings in Informatics	6. 最初と最後の頁 32:1-32:5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.FSCD.2018.32	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kikuchi Kentaro, Aoto Takahito	4. 巻 12561
2. 論文標題 Confluence and Commutation for Nominal Rewriting Systems with Atom-Variables	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 30th International Symposium on Logic-Based Program Synthesis and Transformation	6. 最初と最後の頁 56 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-68446-4_3	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宮前 海里, 青戸 等人,	4. 巻 14
2. 論文標題 圏論に基づく正則項上の単一化の形式化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌プログラミング (PRO)	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐藤 悠稀, 青戸 等人	4. 巻 14
2. 論文標題 フラット項書き換えシステムにおける正規形の一意性に関する性質の決定不能性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌プログラミング (PRO)	6. 最初と最後の頁 15-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮前海里, 青戸等人
2. 発表標題 圏論にもとづく正則項上の単一化の形式化
3. 学会等名 第131回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笹川葵生, 青戸等人
2. 発表標題 外部変数のある可換式条件付き項書き換えシステムの合流性条件
3. 学会等名 第131回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤悠稀, 青戸等人
2. 発表標題 フラット項書き換えシステムにおける正規形の一意性に関する性質の決定不能性
3. 学会等名 第131回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahito Aoto
2. 発表標題 Proving sufficient completeness w.r.t. reduction of CTRSs automatically
3. 学会等名 第52回 TRS ミーティング
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahito Aoto
2. 発表標題 Level-confluence of left-linear overlapping CTRSs
3. 学会等名 第51回 TRS ミーティング
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石塚守, 青戸等人
2. 発表標題 Jaffarのアルゴリズムに基づく正則項の単一化
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第35回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口諒, 青戸等人
2. 発表標題 決定手続きを用いた項書き換えシステムの帰納的定理自動証明
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第35回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taichi Kurita
2. 発表標題 Automated proofs of horn-clause inductive theorems for CTRS
3. 学会等名 第49回 TRS ミーティング
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiromu Niiyama
2. 発表標題 Automatic verification of unique normalizability of term rewriting system
3. 学会等名 第49回 TRS ミーティング
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroto Kato
2. 発表標題 Lemma generation methods for inductive theorem proving
3. 学会等名 第49回 TRS ミーティング
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuta Kimura
2. 発表標題 Formalizing rewriting induction in Isabelle/HOL
3. 学会等名 第49回 TRS ミーティング
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahito Aoto
2. 発表標題 Proving local sufficient completeness
3. 学会等名 第49回 TRS ミーティング
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohei Nishino
2. 発表標題 Weighted path relation for S-expression rewriting system
3. 学会等名 第50回 TRS ミーティング
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahito Aoto
2. 発表標題 Ordered rewriting for confluence proofs
3. 学会等名 第50回 TRS ミーティング
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加賀谷有輝, 青戸等人
2. 発表標題 条件付き項書き換えシステムの階層合流性証明法
3. 学会等名 第124回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白石智輝, 青戸等人
2. 発表標題 項書き換えシステムにおける局所十分完全性の証明法の提案
3. 学会等名 第124回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東和田直輝, 青戸等人
2. 発表標題 条件付き項書き換えシステムの十分完全性の自動証明
3. 学会等名 第124回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mamoru Ishizuka
2. 発表標題 Commutative rewrite steps in rational term rewriting
3. 学会等名 第51回 TRS ミーティング
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮前海里, 青戸等人
2. 発表標題 等式論理の余帰納的定理における圏論の応用
3. 学会等名 第22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(PPL 2020), ポスター・デモ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤悠稀, 青戸等人
2. 発表標題 フラット項書き換えシステムの簡約に関する一意正規形性の決定不能性
3. 学会等名 第22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(PPL 2020), ポスター・デモ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Sato,
2. 発表標題 The uniqueness of normal forms with respect to reductions for flat term rewriting systems
3. 学会等名 第52回 TRS ミーティング
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohei Nishino
2. 発表標題 Weighted-context-free-grammar to produce parse tree with rests and polyrhythm for auto transcription
3. 学会等名 第52回 TRS ミーティング
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahito Aoto
2. 発表標題 Proving uniqueness of normal forms w.r.t. reduction
3. 学会等名 第53回 TRS ミーティング
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahito Aoto
2. 発表標題 Confluence of join CTRSs via unraveling
3. 学会等名 第54回 TRS ミーティング
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	外山 芳人 (Toyama Yoshihito)		東北大学電気通信研究所教授 (申請時), H30年3月退職

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------