

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11750

研究課題名(和文) 項書き換えシステムの解の一意性を保証する性質に関する研究

研究課題名(英文) Study of Unique Normal Form Properties of 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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、項書き換えシステムとよばれる論理と計算を融合した計算モデルに関する研究になります。項書き換えシステムにおいては、論理と計算の両方の面から等式変形を捉えるために、非決定的な計算が採用されています。このため、計算の解がどのような場合に一意に得られるかという問題は、さまざまな項書き換えシステムの検証技術等において基本的な問題として立ち表われます。本研究の主な成果の1つは、計算解の一意性を保証する性質の1つである、簡約に関する一意正規形性(UNR性)について、決定不能クラスや検証手法を与えたことです。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、項書き換えシステムとよばれる論理と計算を融合した計算モデルに関する研究になります。項書き換えシステムにおいては、論理と計算の両方の面から等式変形を捉えるために、非決定的な計算が採用されています。このため、計算の解がどのような場合に一意に得られるかという問題は、さまざまな項書き換えシステムの検証技術等において基本的な問題として立ち表われます。本研究の主な成果の1つは、計算解の一意性を保証する性質の1つである、簡約に関する一意正規形性(UNR性)について、決定不能クラスや検証手法を与えたことです。

研究成果の概要(英文)：This project concerns a computational model called term rewriting systems, which combines logic and computation. In term rewriting systems, in order to capture the logical aspect and the computational aspect of equational transformations, non-deterministic computation is employed in this computational model. Because of this fact, the problem of guaranteeing uniqueness of results of computation appears as a fundamental problem in various verification techniques based on term rewriting. One of main outcomes of this research project is about such a property called UNR (uniqueness of normal forms w.r.t. reduction) which guarantees uniqueness of results of computation; we have shown an undecidable class and new verification methods.

研究分野：プログラム理論

キーワード：正規形 項書き換えシステム UNC性 NFP性 UNR性 合流性

## 1. 研究開始当初の背景

合流性(CR 性)以外の解の一意性を保証する性質として、これまで研究されている性質には、正規形性(NFP 性)、可換に関する一意正規形性(UNC 性)、そして、簡約に関する一意正規形性(UNR 性)の3つがある。これらの性質は、CR 性、NFP 性、UNC 性、UNR 性という論理関係がある。したがって、これらの3つの性質は合流性よりも弱い性質となっており、しかも、CR 性、NFP 性、UNC 性、UNR 性の順に階層を成している。合流性の検証技術の発展に近年ますます重要度が高まっている合流性競技会においては、合流性以外のNFP 性、UNC 性、UNR 性についての競技部門も2017年より開催されており、これらの性質の自動検証の重要性の認識はこの分野で共有されていると考えられる。しかしながら、これらの性質については、合流性と比較すると知られている理論的な成果も少なく、理論的な研究の進展は少ない。また、これらの合流性競技会においても、合流性の部門と比較するとこれらの部門の参加ツールは少なく、自動検証技術も未発達であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、NFP 性、UNC 性、UNR 性を始めとする、解の一意性を保証する、合流性より弱いさまざまな性質の検証理論や自動検証技術を開発する。従来、解の一意性を保証する性質としては合流性に焦点をあてて研究されることが多かったため、このような合流性以外の解の一意性を保証する性質に焦点をあてた研究は従来少ない。さらに、これらの性質個々に関する理論について、合流性の多様な十分条件や判定法のようにさまざまなアイデアが得られていると言いはし難い。さらには、これらの性質の自動検証技術に焦点をあてた研究は極めて少ない。本研究の目的は、これらの研究課題を通じて、従来、ほとんど合流性に絞られていた項書き換えシステムの正規形の一意性の解析を合流性以外の性質に広げ、その解析理論と自動検証技術を構築することにより、解の一意性に関する解析の範囲を広げるとともに、その解析能力を高めることである。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず UNC 性の検証理論の研究を更に進め、UNC 性の検証手法の高度化を図る。報告者はこれまでさまざまな合流性検証手法を考案してきた。この研究蓄積を活かすことで、複数の検証理論の構築を図る。また、考案した検証法を計算機上に実装することにより、その検証理論の有効性や効率を評価するとともに、問題点や課題を明らかにする。報告者らの開発した合流性自動検証システム ACP の開発基盤の多くは、UNC 性、NFP 性、UNR 性の検証システムの開発にも利用することができる。更に、さまざまな例について実験することで、効果の高い自動検証技術を開発する。実装したシステムを合流性問題データベースの問題集を用いて実験することで、理論の改良のためさまざまなアイデアが得ることが出来ると考えられる。次に、NFP 性と UNR 性の検証理論の構築を図るとともに、自動検証システムの実装をすすめる。UNC 性の解析に利用できた変換による検証法を NFP 性や UNR 性の検証にどのように適用すればよいか検討するとともに、特に合流性がない場合の NFP 性や UNR 性を保証する十分条件を検討する。

## 4. 研究成果

以下に、3つの主要な結果について報告する。

### 1. 永続性に基づく UNC 性の検証手法

永続性に基づく項書き換えシステムの合流性証明(鈴木ら,2012)を参考に、UNC の検証手法を検討した。合流性と同様に、UNC についても永続性が成り立つことが知られている。鈴木らの手法では、既存の合流性条件を用いて非線形型変数を具体化した型付きシステムの合流性を示すことで、永続性を使って元のシステムの合流性を示す。UNC においても非線形型変数を具体化した型付きシステムの UNC から、元のシステムの UNC が得られる。しかし、合流性の場合と異なり、既存の UNC 条件を適用することは難しい。そのため、既存の UNC 条件を適用するための更なる変換を提案し、提案手法を適用するための条件を与えた。

### 2. フラット右線形 UNR 性の決定不能性

項書き換えシステム(TRS)の解の一意性を保証する性質がいくつか知られている。簡約に関する一意正規形性(UNR)はそのうちの一つである。TRS にフラット、線形などの条件を課すことより、UNR が決定可能となる TRS のクラスを明らかにする試みがされている。一方で、その試みの限界を明らかにするために、どのような TRS のクラスで UNR が決定不能となるかを明らかにする試みもされている。G.Godoy と F.Jacquemard(RTA2009)は、フラット右線形 TRS の UNR の決定不能性の証明を報告した。

が、その証明の補題の一つには致命的な誤りがあり、その証明は不完全である。本研究では、G.Godoy と F.Jacquemard の証明の詳細な解析を行い、誤っている部分を修正し、欠けている部分を補完し、フラット右線形 TRS の UNR の決定不能性の正しい証明を与えた。

### 3. UNR 性の検証技術の開発とツール構築

項書き換えシステムの UNR 性の自動検証技術を開発した。まず、書き換え規則の追加や削除からなる項書き換えシステムの変換がどのような場合に UNR 性を保存するかを明らかにした。また、これらの変換が UNC 性の自動証明を利用した場合には有効でないが、CR 性の自動証明を利用した場合には有効となり得ることを明らかにした。これらの変換が UNC 性を持たない項書き換えシステムの UNR 性の検証には利用できないことから、そのような項書き換えシステムの UNR 性の検証技術を考案した。1 つは、崩壊写像変換 (collapsing mapping transformation) とよばれる変換を用いる手法であり、もう 1 つは、SSR 消去変換とよばれる変換を用いる手法である。これらの変換は UNR 性を保存し、さらに UNC 性をもたないような項書き換えシステムの UNR 性の検証にも利用することが出来る。さらに、考案した技術に基づく、項書き換えシステムの UNR 性検証ツールを構築し、計算機実験によりその有効性を示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

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 -
1. 著者名 Tomoki Shiraishi, Kentaro Kikuchi and Takahito Aoto	4. 巻 12819
2. 論文標題 A proof method for local sufficient completeness of term rewriting systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International International Colloquium on Theoretical Aspects of Computing (ICTAC 2021), LNCS	6. 最初と最後の頁 386-404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-85315-0	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	4. 巻 213
2. 論文標題 Simple derivation systems for proving sufficient completeness of non-terminating term rewriting systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 41st IARCS Annual Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science (FSTTCS 2021), LIPIcs	6. 最初と最後の頁 49:1-49:15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.FSTTCS.2021.49	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 Ryota Haga, Yuki Kagaya, and Takahito Aoto	4. 巻 14279
2. 論文標題 A critical pair criterion for level-commutation of conditional term rewriting systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Symposium on Frontiers of Combining Systems	6. 最初と最後の頁 99-126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-43369-6	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 -

[学会発表] 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 趙順, 青戸等人
2. 発表標題 フラット右線形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の証明について
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第39回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 望月美希, 青戸等人
2. 発表標題 正則項書き換えにおける書き換えステップの決定可能性について
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第39回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryota Haga, Yuki Kagaya, and Takahito Aoto
2. 発表標題 A critical pair criterion for level-commutation of conditional term rewriting systems
3. 学会等名 The 11th International Workshop on Confluence (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 趙順, 青戸等人
2. 発表標題 フラット右線形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25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 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 芳賀亮太, 青戸等人,
2. 発表標題 危険対条件に基づく条件付き項書き換えシステムの階層可換性
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第38回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南山 駿人, 青戸 等人
2. 発表標題 書き換え帰納法による帰納的定理証明と循環余帰納法による余帰納的定理証明の融合
3. 学会等名 第24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 2022)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芳賀 雅樹, 青戸 等人
2. 発表標題 置換に関する不動点制約を用いた名目書き換え
3. 学会等名 第24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 2022)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野 峻, 青戸 等人
2. 発表標題 交差式条件付き項書き換えシステムに対するアンラベリング変換の健全性について
3. 学会等名 第24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 2022)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芳賀 亮太, 青戸 等人
2. 発表標題 危険対条件に基づく条件付き項書き換えシステムの階層可換性
3. 学会等名 第24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 2022)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahito Aoto, Nao Hirokawa, Dohan Kim, Misaki Kojima, Aart Middeldorp, Fabian Mitterwallner, Naoki Nishida, Teppei Saito, Jonas Schoepf, Kiraku Shintani, Rene Thiemann and Akihisa Yamada
2. 発表標題 A new format for rewrite systems
3. 学会等名 Proceedings of the 12th International Workshop on Confluence (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------