

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00092

研究課題名(和文) 高階代数系指向プログラミングの原理 安全・柔軟なソフトウェアへ向けて

研究課題名(英文) Principles of Higher-Order Universal Algebraic Datatypes

研究代表者

浜名 誠 (Hamana, Makoto)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：90334135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：情報システムが重要な社会基盤の一つとなるにつれ、ソフトウェアの安全性保証が大きな課題となっている。本研究は信頼性のあるソフトウェアの基盤として、新しい高階代数系指向プログラミングの原理を提案し、その基礎理論の確立を目的とした。このために高階書換え系の理論を多角的に研究し、Haskellベースの解析ツール SOL, Second-Order Laboratoryを開発した。これにより様々な計算体系の決定可能性を証明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高階代数系を基礎とするプログラミング言語のための有用な研究成果をあげた。特にSOLシステムを用いることにより、プログラミング言語論と関係する様々な体系が二階書換えの理論で取り扱えることがわかった。高次元書換え理論とも関連するため、今後も重要な発展に繋がると期待できる

研究成果の概要(英文)：As information systems have become one of the important infrastructures, the assurance of dependable software has become an important social and research problem. The aim of this study is to propose a new principle of higher-order algebra-oriented programming as a basis of dependable software. For this purpose, I studied the theory of higher-order rewriting systems from various aspects and developed a Haskell-based analysis tool, SOL, Second-Order Laboratory. Using it, I have proved the decidability of various computational systems.

研究分野：ソフトウェア科学

キーワード：関数プログラミング 書換え系 代数仕様 プログラム理論 合流性 ラムダ計算 停止性

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

情報システムが重要な社会基盤の一つとなるにつれ、ソフトウェアの安全性保証が大きな課題となっている。本研究は高階代数系の概念を用いた新しいソフトウェア原理の創出をめざして研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究は信頼性のあるソフトウェアの基盤として、新しい高階代数系指向プログラミングの原理と基礎理論の確立を目的とした。申請者はこれまで、代数系のアイデアを関数型プログラミングへ拡張する基礎研究を行ってきた。従来の代数系は一階の型に限られていたため、高階関数型言語への適用が困難だった。これに対し申請者は2013年に代数系を関数型言語におけるプログラム推論に直接使うことのできる、多相と高階にまで拡張した高階代数理論を確立し、その問題を解決した(業績 LICS'13)。この準備に基づいて研究に取りかかった。

3. 研究の方法

本研究は高階代数系の高階書換え系による計算的解釈および圏論的意味論を用い、高階代数系指向プログラミングの原理を確立し、安全性と柔軟性を併せ持つソフトウェア構築の基礎を提供する。

特に二階書換えの理論を精密化させ、二階書換えのための合流性と停止性の自動チェックを行うシステムの実装を行なう。多数のプログラム言語のための計算体型や関数型プログラムの決定可能性が自動チェックできるよう、特に Function-as-constructor パターンへ拡張する。

さらに書換え系の多相化と、二階の停止性証明機構をさらに強力する。多相書換え、値予備体系のための合流性の自動証明へと拡張を行なう。

4. 研究成果

- (1) Function-as-Constructor Higher-Unification を初めて関数的に実装した。これには Pruning と Discharging という操作を実装する必要があるが、Haskell を用いて効果的に実装できることを示した。成果は国際ワークショップ UNIF'17 で発表した。
- (2) 新しい国際論文誌 ACM on Programming Languages で発表した論文では、近年その重要性が高まる関数型プログラミング言語を高機能化する8つの異なる計算体系の決定性可能性(decidability)の証明を一度に解決した。これは Function-as-Constructor Higher-Unification を用いた危険対チェックと General Schema 方式による強停止性の判定を2階書換えに対して精密に定式化し、さらにそのための SOL システムのソフトウェアを開発し、公開した。同内容を国際会議 ICFP 2018 で発表した。
- (3) グラフデータベースのための質問言語 UnCAL の圏論的意味論を初めて与えた。これは Bloom と Esik によるイテレーション圏を用いることで、グラフ間の双模倣を完全に等式によって公理化することに成功した。この意味論からグラフ上の構造再帰がイテレーション関手として自然にモデル化できることも示した。本結果は、プログラム理論の国際論文誌 Mathematical Structures in Computer Science において発表した。
- (4) 二階書換えの停止性、合流性自動判定のための SOL システムのソフトウェアの改良を進め Confluence Competitoin 2018 に出場し、好成績を得た。また Confluence Competitoin 2018 の開催方法とその内容についての報告論文を国際会議 FSCD 2018 で発表した。
- (5) さらに多相書換え規則の新しいフレームワークとその合流性の理論を提案した。様々なプログラミングの基礎計算系を定式化することができ、さらにそれら基礎体系の性質を調べることに適した体系となった。多相書換えのための型推論アルゴリズムを新しく設計し、SOL システムに実装した。また多相書換えの弱合流性検証のための危険対チェック基準を明らかにした。そしてそれらの正当性を証明した。この論文は国際会議 FLOPS 2018 で発表し、Best Paper Award を受賞した。

- (6) またこれまで困難と思われていた二階書換えの停止性のモジュラ性の証明に取組み、minimal non-terminating terms、predictive labelling の方法と General Schema 法を組み合わせる証明の見通しがたった。この証明の準備的報告を日本ソフトウェア科学会第 35 回大会にて発表し、優秀発表賞および高橋奨励賞を受賞した。
- (7) プログラミング言語概念の等式理論の決定可能性を二階代数理論の枠組みで証明する一般的な方法論を提案したものである。Haskell ベースの解析ツール SOL, Second-Order Laboratory について詳しく述べた。プログラミング言語理論における様々な例を網羅するために、二階計算の構文的・意味的な結果を非自明な方法で組み合わせて拡張した。論文は Journal of Functional Programming 誌で発表した。
- (8) さらにプログラミング言語の基本的な計算を分析するのに適する、値と非値の区別に対応できる多相書き換えルールの新しいフレームワークを提示した。型推論アルゴリズムと合流性をチェックするための新しい基準を開発し、合流チェックツール PolySOL に実装した。論文をプログラミング言語科学ジャーナル Science of Computer Programming 誌で発表した。

これらにより高階代数系を基礎とするプログラミング言語のための有用な決定手続きの幅広い研究成果を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 M. Hamana, T. Abe, K. Kikuchi	4. 巻 187
2. 論文標題 Polymorphic computation systems: Theory and practice of confluence with call-by-value	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of Computer Programming	6. 最初と最後の頁 102322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scico.2019.102322	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 M. Hamana	4. 巻 29
2. 論文標題 How to prove decidability of equational theories with second-order computation analyser SOL	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Functional Programming	6. 最初と最後の頁 e20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S0956796819000157	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 M. Hamana	4. 巻 10818
2. 論文標題 Polymorphic Rewrite Rules: Confluence, Type Inference, and Instance Validation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 99-115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-90686-7	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 T. Aoto, M. Hamana, N. Hirokawa, A. Middeldorp, J. Nagele, N. Nishida, K. 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 (LIPIcs)	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 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 該当する

1. 著者名 M. Hamana, K. Matsuda and K. Asada	4. 巻 28
2. 論文標題 The Algebra of Recursive Graph Transformation Language UnCAL: Complete Axiomatisation and Iteration Categorical Semantics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mathematical Structures in Computer Science	6. 最初と最後の頁 287-337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S096012951600027X	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 M. Hamana	4. 巻 Volume 1 Issue ICFP
2. 論文標題 How to prove your calculus is decidable: practical applications of second-order algebraic theories and computation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 Article No. 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3110266	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 M. Hamana	4. 巻 32
2. 論文標題 A Functional Implementation of Function-as-Constructor Higher-Order Unification	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of International Workshop on Unification	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3110266	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7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 M. Hamana
2. 発表標題 Polymorphic Rewrite Rules: Confluence, Type Inference, and Instance Validation
3. 学会等名 International Symposium on Functional and Logic Programming 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浜名誠
2. 発表標題 関数プログラム・計算系の分割停止性検証: 外山-Klop-Barendregt の定理の高階化
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会 第35回 高橋奨励賞
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Hamana
2. 発表標題 The Algebra of Recursive Graph Transformation Language UnCAL: Complete Axiomatisation and Iteration Categorical Semantics
3. 学会等名 Shonan Meeting - Diagrammatic Methods for Linear and Nonlinear Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Hamana
2. 発表標題 How to Prove Your Calculus is Decidable: Practical Applications of Second-order Algebraic Theories and Computation
3. 学会等名 International Conference on Functional Programming (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Hamana
2. 発表標題 A Functional Implementation of Function-as-Constructor Higher-Order Unification
3. 学会等名 International Workshop on Unification (UNIF'17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makoto Hamana, Tatsuya Abe, Yuito Murase, and Kazuhiko Sakaguchi.
2. 発表標題 SOL: Second-Order Laboratory
3. 学会等名 International Confluence Competition 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Hamana
2. 発表標題 SOL: A Tool for Proving Decidability of Equational Theories
3. 学会等名 Shonan meeting on REVERSE EXECUTION IN TESTING - IMPROVING SECURITY AND RELIABILITY (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Makoto Hamana home page http://www.cs.gunma-u.ac.jp/hamana/
--

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