様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ６ 月　 ９ 日現在

機関番号：１２６０８
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2024
課題番号：２０Ｋ１１７４３

研究課題名（和文）制御捕獲のモデル化と応用

研究課題名（英文）Modelling of Control Capture and Its Applications

研究代表者
西崎　真也（Nishizaki, Shin-ya）

東京科学大学・情報基盤センター・教授

研究者番号：９０２６３６１５

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）：本研究では、例外処理機構の中でも理論的研究が不足していたコントロールキャプチャ機能（finally、dynamic-windなど）に注目し、λ計算およびエフェクトシステムに基づく新たな計算モデルを提案・構築した。従来の大域脱出や一級継続の枠組みを拡張しつつ、数理論理学、特に線形論理やシーケント計算を用いてその形式的性質と意味論的対応を解明した。さらに、本モデルは関数型・命令型・オブジェクト指向・分散型といった多様な言語パラダイムに応用可能であり、コントロールキャプチャ機構を含むプログラムに対する検証・解析手法の構築にも貢献する成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究は、従来理論的検討が不足していたコントロールキャプチャ機能に注目し、計算モデルを構築し数理論理学的に定式化した点に学術的意義がある。継続、例外処理、動的スコープなどに対し、線形論理やシーケント計算を用いた理論的枠組みは、ラムダ計算や型理論の新たな発展に貢献する。さらに、例外処理機構が果たす役割を形式的に分析することで、安全性や堅牢性が求められるソフトウェアの信頼性向上に寄与する。特に入出力終了処理のような側面を検証可能にする意義は大きく、実用的な開発への応用も期待される。また、複数の言語パラダイムに対応する理論を提供することで、今後の高信頼ソフトウェア開発の基盤技術となる可能性を持つ。

研究成果の概要（英文）：This study focused on control capturing in exception handling, such as finally and dynamic-wind, which have not been studied much in theory. Based on earlier research on non-local exits and first-class continuations, we made a new computational model using lambda calculus and effect systems. We studied this model with formal methods from mathematical logic, especially linear logic and sequent calculus, and explained how control capture works in theory. We also applied our model to various programming styles, like functional, imperative, object-oriented, and distributed languages. As a result, our research gives a base for checking and analyzing programs that use these kinds of exception-handling features.

研究分野：プログラミング言語理論

キーワード：関数型言語　例外処理　継続　制御捕獲

※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。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１（共通）

１．研究開始当初の背景

ソフトウェアにおける信頼性や安全性が重視される現在、例外処理機構の正確な理解と設計が重要な課題となっている。従来、大域脱出（try-catch）や一級継続（call/cc）といった機構は、数理的なモデル化が進められてきたが､finally や dynamic-wind に代表されるコントロールキャプチャ機能については、理論的な分析が十分ではなかった。

申請者はこれまでに、catch&throw や unwind-protect を含む例外処理の形式的意味論や、継続と線形論理の関係について研究してきた。こうした研究成果を土台とし、例外処理機構、特にコントロールキャプチャに関わる部分の構造と性質を理論的に明らかにする必要があると考え、本研究を始めるに至った。。

２．研究の目的

本研究の目的は、これまで理論的に深く検討されてこなかった例外処理におけるコントロールキャプチャ機能（finally、unwind-protect、dynamic-wind など）に対して、計算モデルと数理論理に基づいた基礎理論を構築することである。

具体的には、ラムダ計算とエフェクトシステムに基づいた形式体系を提案し、これを関数型・命令型･オブジェクト指向･分散型などの複数の言語パラダイムに適用可能な形で拡張する。また、構築したモデルに証明論的意味を与えることで、プログラムの正しさを検証するための理論的枠組みを作ることを目指す。さらに、実際のソフトウェア検証やモデル検査への応用を視野に入れ、例外処理中の入出力や終了処理の正当性を形式的に確認可能にする。以上を箇条書きでまとめる：

- コントロールキャプチャ機能を含む例外処理機構に対する計算モデルの構築
- ラムダ計算およびエフェクトシステムに基づく理論体系の提案
- 様々な言語パラダイムへのモデルの適用と拡張
- 数理論理学的・証明論的な意味付けの確立
- 例外処理の正当性を検証可能にする手法の基礎構築
- 実用的なソフトウェア検証・解析手法への応用展開

３．研究の方法

本研究では、理論的取り扱いが不十分であった例外処理のコントロールキャプチャ機能に焦点を当て、それらの形式的性質を明らかにするための計算モデルを構築した。まず、既存の catch&throw や call/cc に関する操作的意味論を整理し、コントロールキャプチャを統合した新しいラムダ計算体系を設計した。この体系では副作用をエフェクトシステムで記述し、制御構造と型システムとの関係を詳細に示すことが可能となった。

次に、この形式体系に対して Continuation-Passing Style（CPS）変換を定義し、意味保存性と型保全性を証明した。また、停止性・進行性・型の一意性など、意味論的安定性に関わる性質についても定理を立て、それぞれ証明を行った。

さらに、関数型にとどまらず、命令型・オブジェクト指向型・分散計算といった複数の言語パラダイムに対応する形式体系へとモデルを拡張した。これにより、多様な実装言語に共通する例外処理の構造を記述可能な理論的基盤を整備した。

構築したモデルに対しては、線形論理やシーケント計算を用いて証明論的解釈を与え、Curry-Howard 対応に基づいた意味付けを行った。これにより、制御構造と論理の対応関係に新たな知見が得られた。

最後に、この理論に基づき、例外処理を含むプログラムに対する形式的検証手法を開発した。特に、OpenJML などの SMT ソルバーを活用し、入出力の終了処理の正しさを静的に検証できる推論基盤の構築を進めた。これにより、高信頼ソフトウェア開発に向けた例外処理の形式的保証が可能となった。

４．研究成果

本研究では、例外処理のうちコントロールキャプチャ機能に焦点を当て、その理論的な位置づけを与える新たな計算モデルを構築した。まず、副作用をもつ単純型付きラムダ計算の枠組みにおいて、catch&throw および unwind-protect を形式化し、それらを CPS（Continuation-Passing Style）変換によって意味づけする方法を確立した。これにより、例外の大域脱出と常に実行される終了処理とを明確に区別し、制御の流れを論理的に追跡できるようになった。

続いて、一級継続（call/cc）と dynamic-wind の組合せを扱う新しいラムダ計算体系を設計し、線形論理に基づいた型システムおよびその推論体系を与えた。この体系では、値と継続の関係を線形否定という観点から捉え、動的な環境の切り替えと復元を論理的に表現可能とした。

加えて、これらのモデルを関数型にとどまらず、命令型、オブジェクト指向、分散計算といった

多様なプログラミングパラダイムに適用できるよう拡張した。これにより、各言語に内在する例外処理の構造を統一的に捉える理論基盤を提供した。
また、数理論理の観点から、構築したモデルに対してシーケント計算や Proof-net を用いた証明論的意味付けを行った。この取り組みによって、Curry-Howard 同型を制御構造にまで拡張し、論理と計算との関係を一層深めることができた。
さらに、得られた理論成果に基づき、コントロールキャプチャを含む例外処理機構を備えたプログラムに対する検証手法を構築した。特に、入出力の終了処理が正しく実行されるかどうかを、モデル検査や SMT ソルバー（例：OpenJML）を用いて形式的に確認する方法を試作した。これらの成果は、信頼性の高いソフトウェアを開発する上で重要な基盤技術となる。
今後は、未公開の成果についても順次公開し、さらなる理論の深化と実用への応用を図る予定である。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計7件（うち査読付論文　2件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 Nishizaki Shin-ya、Takayanagi Yuta	４．巻 11
２．論文標題 Extracting Environments from Function Closures	５．発行年 2022年
３．雑誌名 ICSCA2022	６．最初と最後の頁 61～68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3524304.3524313	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 Kasuga Ryotaro、Nishizaki Shin-ya	４．巻 11
２．論文標題 Formalizing dynamic-wind in the lambda calculus	５．発行年 2022年
３．雑誌名 ICSCA2022	６．最初と最後の頁 90～96
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3524304.3524318	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 Nishizaki Shin-ya	４．巻 12
２．論文標題 Transplanting of Environments between Closures in the lambda calculus	５．発行年 2023年
３．雑誌名 ICSCA2023	６．最初と最後の頁 122～130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3587828.3587847	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 Nishizaki Shin-ya	４．巻 12
２．論文標題 Transplanting of Environments between Closures in the lambda calculus	５．発行年 2023年
３．雑誌名 ICSCA2023	６．最初と最後の頁 122～130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3587828.3587847	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 Kosuke Kaneshita, Shinya Nishizaki	4．巻 23
2．論文標題 Strong Normalizability of the Simply-Typed Lambda Calculus with Environment Extraction from Function Closures	5．発行年 2025年
3．雑誌名 Atlantis Highlights in Computer Sciences	6．最初と最後の頁 20～36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2991/978-94-6463-684-0_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 Yu Daiki, Shinya Nishizaki	4．巻 20
2．論文標題 Time efficiency analysis of parallel programs on Liquid Haskell	5．発行年 2024年
3．雑誌名 Atlantis Highlights in Computer Sciences: Proceedings of the Workshop on Computation: Theory and Practice (WCTP 2023)	6．最初と最後の頁 155～192
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2991/978-94-6463-388-7_11	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 Nishizaki Shin-ya、Kasuga Ryotaro	4．巻 10
2．論文標題 Untyped lambda calculus with functionally referable environments	5．発行年 2021年
3．雑誌名 ICSCA2021	6．最初と最後の頁 100～104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3457784.3457798	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 －

〔学会発表〕　計0件

〔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