

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2023

課題番号：19K24339

研究課題名（和文）信頼性と表現力を兼ね備えたプログラミング言語の実装

研究課題名（英文）Implementing a Reliable and Expressive Programming Language

研究代表者

叢 悠悠（Cong, Youyou）

東京工業大学・情報理工学院・助教

研究者番号：30847629

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：継続（残りの計算を表す概念）を操作するための言語機構を持つ計算体系に対して、型システムおよびプログラム変換を開発した。具体的な例としては、制御演算子の振る舞いを詳細に表現できる型システム、名前付き代数的効果に対する安全かつシンプルな型システム、制御演算子・代数的効果間の型と意味を保存するプログラム変換などが挙げられる。また、開発した型システムとプログラム変換に基づき、依存型と継続機構を持つ言語を Racket の Turnstile パッケージを用いて実装した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

型システムと継続機構はそれぞれプログラムの信頼性とプログラミング言語の表現力の向上に有用である。実際、研究期間中にさまざまなプログラミング言語のコミュニティで強力な型システムやプリミティブの継続機構を導入する動きが見られた。本研究ではこれらの基礎理論を構築したが、その中で得られた成果は安全なソフトウェアの簡潔な実装につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：I developed type systems and program transformations for calculi that have constructs for manipulating continuations. Examples include a type system that can describe the detailed behavior of control operators, a simple type system that ensures safe use of named effect handlers, and program translations that convert between control operators and effect handlers. I also implemented a dependently typed language with effect handlers based on the type systems and program translations I developed and using the Turnstile package of the Racket language.

研究分野：プログラミング言語

キーワード：依存型 代数的効果 制御演算子

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ソフトウェアの信頼性を向上させるために、仕様を形式的に記述し、実装が仕様を満たすことを機械で証明するという手法が有望視されている。この手法でしばしば用いられるのが、定理証明支援系とよばれる、証明を書くためのプログラミング言語である。こうした言語の多くは、プログラムの仕様を記述するためのツールとして依存型を提供する。依存型とは、数字や文字列といった項に言及できる型のことである。これまでに、依存型付き言語を用いてコンパイラの正当性や暗号技術の安全性などを証明する取り組みが行われている。また、依存型を用いてバグのない社会を目指すというプロジェクトも進められている。

依存型付き言語の問題点として、表現力の欠如が挙げられる。特に、例外の発生や状態の書き換えといった副作用を伴うプログラムを記述することが難しい。これは、依存型と副作用が混在すると型システムの健全性(型が付いたプログラムは、その型が表現する仕様通りに動作するという性質)が崩れるという事実から、依存型付き言語において副作用を伴う操作が禁止されていることによる。この制限は、依存型付き言語の安全性を実世界のソフトウェアで享受することの妨げとなる。

依存型付き言語のもう一つの問題点として、実装や理論的性質の証明にかかる労力が挙げられる。型が項に依存する言語では、型の検査が項の評価に依存する。言語の実装において、この依存性は型検査器が評価器に依存することを意味する。また、理論の証明において、この依存性はプログラム変換の型保存性が意味保存性に依存することを意味する。

2. 研究の目的

本研究は、プログラミング言語の信頼性と表現力を少ない労力で両立させることを目的とする。この目的を達成するために、代数的効果とハンドラを持つ依存型付き言語を実装する。代数的効果はさまざまな副作用を統一的に表現できる言語機構であり、高い拡張性と利便性を特長とする。この機構と依存型の軽量の組み合わせを実現するために、本研究では以下に挙げる Racket 言語のインフラを利用して目標の言語を実装する。

- 制御演算子：実行の流れを制御するための言語機構であり、代数的効果と同等の表現力を持つ。
- Turnstile パッケージ：文法規則、評価規則、型規則を直感的な表記で定義するための API を提供する。

3. 研究の方法

本研究では、既存の言語インフラや研究成果を利用することで、言語の実装と理論の証明にかかる労力を軽減する。このアイデアを実現するために、提案言語を図1のように設計する。この言語において、代数的効果を使って記述されたユーザプログラムは、プログラム変換によって制御演算子を使ったものへ書き換えられる。そして、変換結果が Racket のインタプリタで実行され、実行結果が出力される。

上述の流れを実現するために、必要となる型システムやプログラム変換を数学的に形式化し、Racket で実装する。このうち、代数的効果から制御演算子への変換は、Pirog らによる変換をベースとして定義する。また、制御演算子の型システムは、研究代表者が過去に与えた型システムの拡張として定義する。

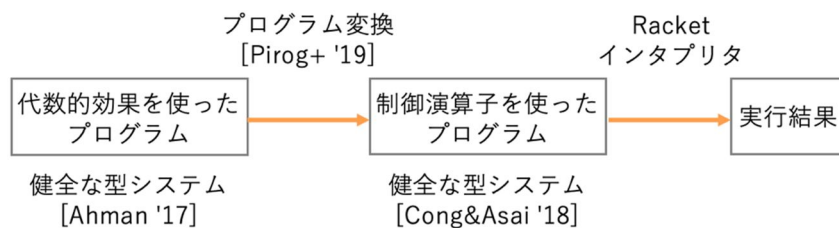


図1：提案言語におけるプログラムの実行の流れ

4. 研究成果

(1) 制御演算子と代数的効果

2019年度は、さまざまな制御演算子と代数的効果・ハンドラの対応関係について研究した。制御演算子には多くの種類が存在するが、いずれも継続(残りの計算)の捕捉を引き起こす演算子と、継続の範囲を定める演算子からなる。このうち、Danvy らの shift/reset は、研究代表者の過去の研究によって依存型システムが与えられているが、代数的効果との構文的なギャップが大きい。一方、Sitaram の fcontrol/run は、依存型システムが与えられていないものの、代数

的效果と類似した構文を持つ。

これをふまえ、代数的効果から制御演算子へのプログラム変換を定義した。アイデアとしては、代数的効果を一度 `fcontrol/run` に書き換え、そこから `shift/reset` に書き換える。これにより、各変換の定義と証明を単純化することができた。

(2) 言語の実装

2020 年度は、代数的効果とハンドラを持つ依存型付き言語の実装に取り組んだ。代数的効果は複雑な機構であるため、実装は二つの中間ステップを挟む形で行った。最初のステップでは、依存型付きラムダ計算に例外機構 `raise/try` を導入した。これは、継続を破棄する代数的効果に対応する。次のステップでは、例外機構を制御演算子 `fcontrol/run` に拡張した。これは、継続を使用して種類のエフェクトを表現できる代数的効果に対応する。図 2 は `Turnstile` を使って記述した型規則の例である。

実装を行う過程で感じた Racket 言語の利点は二つある。一つは、プリミティブの制御演算子を用いて実装する言語の意味論を容易に定義できる点である。もう一つは、`Turnstile` の API を用いて開発言語の型規則を導出規則の形で直感的に定義できる点である。

一方で、`Turnstile` の改善点も見つかった。まず、各種 API の使用方法がドキュメントの中で十分に説明されていない。また、エラーメッセージの理解にマクロシステムの知識が必要となる。このことは `Turnstile` 開発者に報告している。さらに、国際ワークショップ `Scheme 2020` で、所属研究室の学生とともに改善策および応用例の提案を行った。

```
(define-typed-syntax (fctrl e τ_out) >>
  [⊢ e >> e ⇒ τ_in]
  -----
  [⊢ (fcontrol e-) (⇒ : τ_out) (⇒ in τ_in) (⇒ out τ_out)])
```

図 2 : `Turnstile` で記述された `fcontrol` の型規則

(3) 高度な制御演算子・代数的効果の型システム

2021 年度は、高度な意味論を持つ制御演算子や代数的効果の型付けについて研究した。

まず、お茶の水女子大学の研究者らとともに、`control/prompt` 演算子の最も一般的な型システムを開発した。`control/prompt` は幅優先探索などの実装に有用であり、その複雑な振る舞いを正確に見積もることは難しいとされてきたが、研究代表者らは継続渡し形式 (CPS) で記述された意味論から型システムを導出することで、振る舞いの正確な見積もりを可能にした。この成果は国際会議 `FSCD 2021` および国際論文誌 `LMCS` で発表している。

次に、Microsoft Research の研究者らとともに、名前付き代数的効果の安全な型システムを開発した。名前付き代数的効果は複数の状態やファイルを扱うのに必要な機構であり、従来は依存型のようなメカニズムによってその安全性が保証されてきたが、研究代表者らは高階の多相型という標準的な機能を用いて安全性を保証することに成功した。この成果は国際会議 `OOPSLA 2022` で発表している。

(4) 制御演算子・代数的効果のコンパイル

2022-2023 年度は、制御演算子や代数的効果のコンパイルに焦点を当てて研究を行った。

まず、お茶の水女子大学の研究者らとともに、代数的効果の反映 (`reflection`) を与えることを試みた。反映はコンパイルと逆コンパイルの関係であり、コンパイラの正当性証明に用いられる。研究代表者らは、制御演算子に対する反映をもとに代数的効果の反映を導出することを試みたが、反映に求められる定理のうち一つを証明することができなかった。これは、コンパイル関数として採用した CPS 変換がプログラムの情報の一部を捨ててしまうためである。この結果は国際ワークショップ `PEPM 2023` で発表している。

次に、所属研究室の学生とともに、名前付き制御演算子と名前付き代数的効果の相互変換を定義した。過去の研究により、名前を持たない制御演算子と代数的効果の間の型付き変換が与えられているが、研究代表者らはその変換を名前で拡張することに成功した。これにより、たとえばプリミティブの名前付き制御演算子を用いて名前付き代数的効果を軽量かつ安全に実装することが可能になった。この成果は国際シンポジウム `PPDP 2023` で発表している。

また、所属研究室の学生とともに、代数的効果の型安全コンパイラを定理証明支援系 `Agda` で形式化した。ここ数年で、さまざまな代数的効果のコンパイル手法が提案されてきたが、いずれも型保存性や正当性の証明が人手で行われている。研究代表者らは、先行研究によって与えられている例外処理のコンパイラの形式化に倣い、代数的効果を持つソース言語とコンパイル後のターゲット言語を内在的型付き言語として実装し、前者から後者への変換を型付きの関数として実装することで、コンパイラの型保存性を機械的に証明した。この成果は国内ワークショップ `PPL 2023` および国際ワークショップ `PEPM 2024` で発表している。

さらに、所属研究室の学生とともに、依存型付き言語に対する効率的な CPS 変換を定義した。研究代表者は過去に依存型付き言語の型保存 CPS 変換を与えているが、その変換は余分な計算ステップを導入するため、実用的なコンパイラの実装には向いていない。一方で、単純型付き言

語については余分な計算ステップを導入しない CPS 変換が存在するが、この変換を依存型付き言語に適用すると型保存性が失われてしまう。これらの問題を解決するために、研究代表者らは一部の継続を let 文として表現するというアイデアを提案し、この方針によって型保存性と効率性を両立できることを示した。この成果は国内ワークショップ PPL 2024 で発表している。

上記の研究成果に加え、当該分野の国際ワークショップ (PEPM 2022, TyDe 2023) および国際研究集会 (NII Shonan Meeting No.203) を主催することで、分野全体の発展に貢献した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tsuayama Syouki, Cong Youyou, Masuhara Hidehiko	4. 巻 N/A
2. 論文標題 An Intrinsically Typed Compiler for Algebraic Effect Handlers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2024 ACM SIGPLAN International Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation	6. 最初と最後の頁 134-145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3635800.3636968	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 Ikemori Kazuki, Cong Youyou, Masuhara Hidehiko	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Typed Equivalence of Labeled Effect Handlers and Labeled Delimited Control Operators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 25th International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3610612.3610616	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 Xie Ningning, Cong Youyou, Ikemori Kazuki, Leijen Daan	4. 巻 6
2. 論文標題 First-class names for effect handlers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 30 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3563289	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 Cong Youyou, Ishio Chiaki, Honda Kaho, Asai Kenichi	4. 巻 Volume 18, Issue 3
2. 論文標題 A Functional Abstraction of Typed Invocation Contexts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Logical Methods in Computer Science	6. 最初と最後の頁 1 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.46298/lmcs-18(3:34)2022	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 Cong Youyou, Asai Kenichi	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Towards a Reflection for Effect Handlers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2023 ACM SIGPLAN International Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation	6. 最初と最後の頁 55 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3571786.3573015	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 Youyou Cong, Chiaki Ishio, Kaho Honda, Kenichi Asai	4. 巻 LIPICS Vol. 195
2. 論文標題 A Functional Abstraction of Typed Invocation Contexts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 6th International Conference on Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2021)	6. 最初と最後の頁 12:1-12-18
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 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 川添裕功、叢悠悠、増原英彦
2. 発表標題 依存型付き言語におけるA-正規形から継続渡し形式への型保存変換
3. 学会等名 PPL 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Youyou Cong
2. 発表標題 One-Pass CPS Translation of Dependent Types
3. 学会等名 PEPM 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Youyou Cong
2. 発表標題 Towards Dependently-Typed Control Effects
3. 学会等名 TyDe 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Youyou Cong
2. 発表標題 A Functional Abstraction of Typed Invocation Contexts
3. 学会等名 FSCD 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ningning Xie, Youyou Cong, Daan Leijen
2. 発表標題 First-class Named for Effect Handlers
3. 学会等名 HOPE 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Youyou Cong
2. 発表標題 Understanding Algebraic Effect Handlers via Delimited Control Operators
3. 学会等名 TFP 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Youyou Cong
2. 発表標題 On Teaching Type Systems as Macros
3. 学会等名 The Scheme and Functional Programming Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Youyou Cong
2. 発表標題 A Functional Abstraction of Typed Trails
3. 学会等名 The ACM SIGPLAN Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation (PEPM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Youyou Cong
2. 発表標題 A Functional Abstraction of Typed Invocation Contexts
3. 学会等名 6th Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2021) (国際学会)
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
---------------------------	-----------------------	----

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