

研究種目： 基盤研究（C）
 研究期間： 2006 ～ 2009
 課題番号： 18500005
 研究課題名（和文）
 部分継続の基礎理論とその応用
 研究課題名（英文）
 Foundation and Application of Delimited Continuations
 研究代表者
 浅井 健一（ASAI KENICHI）
 お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・准教授
 研究者番号： 10262156

研究成果の概要（和文）：従来の単相の型システムを拡張して多相の型システムを提案し、その健全性など各種の性質を証明した。また、健全性は定理証明系 Coq を用いて定式化した。限定継続命令の定義を与えるインタプリタを系統的に変換することでスタックの複製などを行う低レベルな処理系を導けることを示した。それに基づいて、実際に機械語を出力するコンパイラを作成した。また、限定継続命令の応用として printf の型付けが限定継続を用いると極めて自然に書けることを示した。

研究成果の概要（英文）：The conventional monomorphic type system for delimited continuations is extended to cope with polymorphism. The various properties of the type system are proved, such as type soundness. The type soundness is formalized using the Coq proof assistant. The low-level implementation of delimited continuations that copies a part of stack is shown to be systematically derivable from their definitional interpreter. Based on the technique, a compiler that produces machine code is constructed. As an application of delimited continuations, it is shown that the printf function can be typed naturally if implemented with delimited continuation constructs.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,200,000	690,000	3,890,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：細目：情報学・情報学基礎

キーワード：プログラム理論、部分継続、情報基礎

1. 研究開始当初の背景

「継続」とは、プログラム実行中で「まだやり残している仕事」あるいは答えを計算するために「これからまだしなければならない計

算」のことである。継続の中でも、範囲を限定できる限定継続は注目を集め、例外処理やバックトラック、部分評価における let-insertion など重要性が高まっている。

しかし、これまでのところその基礎理論はほとんど研究されていないに等しい状況であった。そのため、部分継続を使った応用プログラムについての性質を議論するのはほぼ不可能であり、効率的な処理系の作成も困難であった。そのため、部分継続を使った応用プログラムの作成も難しかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、部分継続の基礎理論を確立して、その応用を開拓すること、および型の入った効率的な処理系の実装である。具体的には、基礎理論として (1) 型システムの基本的な性質の確立、および (2) 継続計算の処理系作成のための基礎技術の確立を目指す。また、継続計算用型システムの応用として (3) 例外解析の定式化を行う。さらに (4) これらの知見をあわせ処理系の実装を行う。以下、研究の方法、研究成果のところでは、これら4点について別々に記述する。

3. 研究の方法

(1) 型システムの基本的な性質として健全性をとりあげる。多相性としては `let` 多相を導入し、その健全性を証明する。証明に当たっては、定理証明系を用いることで、間違いを防ぐとともに、定理証明系についての知見も得る。

(2) 継続計算の低レベルな処理系を、継続計算の定義を与えるインタプリタから系統的に導く方法を模索する。特に Danvy らが提唱する CPS 変換と非関数化を使う方法を検討する。

(3) 例外処理を限定継続命令を用いて書き表すことで、どのような例外が起こりうるかを推論できるような型システムの構築を目指す。`effect` を使ったシステムとの関係についても考察する。

(4) 上記で得られた知見をもとに、型のついた継続計算の処理系を実装する。その際、継続はシステムのスタックを使った直接実装方式とする。処理系を実装できたら、各種の応用プログラムを使って評価を行う。

4. 研究成果

(1) `let` 多相性が入った部分継続の型システムを定義し、それに対して各種の性質を証明した。具体的には、型システムの健全性、最も一般的な型と型推論アルゴリズムの存在、強正規化性などを証明した。作成した型システムには、不動点演算子や条件文なども含まれており、ほぼ、普通のプログラミング言語と考えることができる。これにより継続計算においても他のプログラミング言語と同様

の多相性が確立された。

ここでの結果は、継続計算の型システムを実用的なものとした最初の仕事であり、そのインパクトは極めて大きい。この結果により、始めて継続を普通のプログラミング言語に導入することが可能となったのであり、それをもとに処理系の作成 (下記 (4) を参照) や応用プログラムの作成 (下記 (3) を参照) などへの道を開いた。また、本研究以外のところでも、Kiselyov が Haskell で限定継続命令を実装する際に用いられしたり、Rompf が選択的 CPS 変換を使って限定継続命令を Scala に導入する際に用いられしたりしている。

証明した性質のうち、型システムの健全性については定理証明系 Coq を用いて定式化した。このような証明を定式化するには、名前の付け替えをどのように扱うかが問題となるが、これについては `locally nameless` 手法を使うことで定式化できることを示した。一方、Isabelle/HOL の Nominal パッケージも名前の付け替え問題を扱うシステムとして知られている。しかし、Isabelle/HOL の Nominal パッケージを使ったのでは、型システムの健全性を証明するためには、まだ解決しなくてはいけない問題が残っていることが判明した。これについては、今後の研究課題である。

(2) Danvy らの提唱する `functional derivation` の手法を継続計算に適用し、継続渡し形式 (CPS) に基づいた継続計算のセマンティクスと等価な抽象機械、仮想機械を導出した。変換に際しては、従来からよく使われている CPS 変換、非関数化に加えて、スタックを導入する変換、および環境を退避するようにする変換を新しく導入し、その正当性を証明した。これらふたつの新しい変換により、導出された抽象機械、仮想機械では関数呼び出しにおける変数の退避・復活、および継続を操作する際のスタックのコピーをモデル化できるようになった。

これまで `functional derivation` の手法は比較的、高レベルのプログラムに対して使われることがほとんどであったが、ここでの研究はそれが低レベルの実装にも使うことができることを示している。この研究は、今年3月に行われた「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」にて論文賞を受賞した。また、この研究は、低レベルなスタックが、実は継続の動的な部分をデータ構造として切り出したものであることを示しており、Danvy 自身からも面白い結果として評価を受けている。

(3) 限定継続を使用しても例外解析は行うことは可能だが、当初の見込みとは異なり、

限定継続を用いても effect システムなどと同様の困難さが伴い、得られるものがなさそうなことがわかった。そこで、限定継続の応用として新たに printf 命令を取り上げ、printf が限定継続命令を使うと型部分も含めて極めて自然に表現できることを示した。これは、限定継続命令に多相型が入った型システムが確立して始めて可能となったことである。さらに printf の実装が、その仕様から系統的に導きだせることも示した。

下記 (4) で限定継続命令の入った処理系が作られたことにより、printf 以外にも各種の応用プログラムの作成が可能となってきている。その中でも、探索問題は限定継続命令を使うと非決定的なプログラムを書いているのと同様のプログラムを書くことができることが知られている。現在、これの研究を本腰を入れて始めようとしているところである。

(4) 本研究の成果により、限定継続命令の基礎理論が確立され、それによって限定継続命令をサポートする処理系の作成が可能となった。本研究では、ふたつの処理系の実装を行った。第一に、東北大学の住井准教授による MinCaml コンパイラを拡張して限定継続命令を導入した。MinCaml コンパイラは教育用のコンパイラで、その構成は単純であるにも関わらず一定のレベルの機械語を出力することができる。このコンパイラに限定継続命令を導入し、限定継続命令を機械語にコンパイルできるようにするとともに、各種の例を動かした。

実装に際しては、必ず「限定継続に対応するスタック部分の下には、古い reset ポインタと戻り番地が格納されている」という性質が成り立つようにした。この性質を見いだしたことが実装における大きなポイントとなっている。また、この性質が必要なことは、上記 (3) で低レベルな実装を定義から導いた際にも確認されている。

さらに、継続操作時のスタックのコピー量を減らすため、必要になるまでコピーを行わない実装も行った。しかし、コピーの必要があるかどうかは、当初の見込みとは異なり、かなり複雑な解析を行わなければならないことが判明した。現在の実装は、コピーの必要性の判断が正しければ正しく動くが、コピーの必要性の判断の部分はまだ完全ではない。この部分の対応は今後の課題である。

第二に、ここでの経験をもとに、より汎用的な言語である Caml Light の拡張を行い、限定継続命令をサポートした。概念的には、MinCaml コンパイラのときの経験をもとに、それを Caml Light で行ったことになるが、Caml Light のような汎用言語に手を加えるのは容易ではなく、それを実際に行い、限定

継続命令を使える汎用言語を作り上げた意義は大きい。これにより各種の応用プログラムを簡単に作れる環境が整ったことになる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① 木谷有沙, 浅井健一「限定継続を含む仮想機械導出のためのプログラム変換」、コンピュータソフトウェア、16 pages (2010) 掲載決定済み、査読あり
- ② 上田やよい, 浅井健一「型付き対称λ計算と古典論理」、第12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論文集、pp. 34-48 (2010)、査読あり
- ③ 対馬かなえ, 浅井健一「限定継続のためのTDPEに向けて」、第12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論文集、pp. 64-76 (2010)、査読あり
- ④ 増子萌, 浅井健一「shift/reset によるCaml Light の拡張に向けて」、第12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論文集、pp. 115-129 (2010)、査読あり
- ⑤ 櫻井加奈子, 浅井健一「汎用的に証明木のGUIを作成する『Miki β』の開発」、第12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論文集、pp. 191-205 (2010)、査読あり
- ⑥ 木谷有沙, 浅井健一「プログラム変換によるインタプリタからのコンパイラの導出」、第12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論文集、pp. 206-220 (2010)、論文賞を受賞、査読あり
- ⑦ M. Masuko, K. Asai "Direct Implementation of Shift and Reset in the MinCaml Compiler", Proceedings of the 2009 ACM SIGPLAN Workshop on ML, pp. 49-60 (2009)、査読あり
- ⑧ K. Asai "On Typing Delimited Continuations: Three New Solutions to the Printf Problem", Higher-Order and Symbolic Computation, Vol. 22, No. 3, pp. 275-291, Springer (2009)、査読あり
- ⑨ 阪上紗里, 浅井健一「対称λ計算の基礎理論」、コンピュータソフトウェア、Vol. 26, No. 2, pp. 3-17 (2009)、査読あり
- ⑩ 木谷有沙, 浅井健一「限定継続を含む仮想機械導出のためのプログラム変換」、第11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、pp. 149-162 (2009)、査読あり
- ⑪ 増子萌, 浅井健一「MinCaml コンパイラにおける shift/reset の実装」、第11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、pp. 163-177 (2009)、
査読あり

- ⑫ K. Asai, Y. Kameyama “Polymorphic Delimited Continuations” 5th Asian Symposium on Programming Languages and Systems (LNCS 4807), pp. 239-254 (2007)、査読あり
- ⑬ K. Asai “Logical Relations for Call-by-value Delimited Continuations”, A Chapter of Trends in Functional Programming, Vol. 6, pp. 63-78 (2007)、査読あり

[学会発表] (計 9 件)

- ① 石川ちひろ、浅井健一「簡約過程の一般的可視化システムの実装」第12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、2010年3月4日、香川県、琴平温泉
- ② 岩井亜里紗、浅井健一「MetaOCaml を使った部分評価器の実装」第12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、2010年3月4日、香川県、琴平温泉
- ③ 新井祐美、浅井健一「論理関係によるスタック導入の正当性の証明」第12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、2010年3月3日、香川県、琴平温泉
- ④ N. Hirota, K. Asai "Type Soundness of Lambda-Calculus with Shift/Reset and Let-Polymorphism", 4th Informal ACM SIGPLAN Workshop on Mechanizing Metatheory, 2009年9月4日、イギリス、エジンバラ
- ⑤ 櫻井加奈子、浅井健一「証明木作成のための GUI 構築」、第11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、2009年3月10日、岐阜県、高山市

- ⑥ 上田やよい、浅井健一「型付き対称λ計算における論理積型と論理和型の導入」、第11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、2009年3月10日、岐阜県、高山市
- ⑦ 対馬かなえ、浅井健一「再帰と限定継続を扱う polyvariant な部分評価に向けて」、第11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、2009年3月10日、岐阜県、高山市
- ⑧ 廣田知子、浅井健一「Locally Nameless 手法を使った継続計算に対する型システムの健全性の証明」、第10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、2008年3月6日、宮城県、仙台市
- ⑨ 木谷有沙、浅井健一「継続計算のための仮想機械の導出」、第10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、2008年3月5日、宮城県、仙台市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅井 健一 (ASAI KENICHI)

お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・准教授

研究者番号：10262156

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

亀山 幸義 (KAMEYAMA YUKIYOSHI)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授

研究者番号：10195000