

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

研究分野：総合領域

科研費の分科・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. 研究計画の概要

「継続」とは、プログラム実行中で「まだやり残している仕事」のことである。継続は例外処理を一般化した概念で、近年、種々の場面で使われるようになってきており、重要性が増している一方で、基礎理論についてはほとんど研究がされていない。このような背景に基づき、本研究では部分継続の基礎理論の確立とその応用の開拓を目的とすると同時に、型の入った効率的な処理系の作成を目指す。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。

2. 研究の進捗状況

研究計画の概要に述べた (1) から (4) それぞれについて以下に記す。

(1) 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んでおり、これにより継続計算における多相性が確立された。型システムの健全性については、定理証明系 *Coq* を用いて、*locally nameless* 手法を使って証明を完成させた。(2) 継続計算の処理系作成のための基礎技術として、*Danvy* らの提案する *functional derivation* の手法を継続計算に適用し、*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を導出した。その際、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では関数呼び出しにおける変数の退避・復活、および *shift/reset* におけるスタックのコピーがモデル化できるようになった。

(3) 継続計算用型システムの応用として、*printf* の静的な片付けが提案する型システムでできることを示した。特に、*printf* の引数の数が最初の引数に依存する問題が、依存型を使うことなく解決できることを示した。(4) *MinCaml* コンパイラをベースにして *PowerPC* の機械語を出力するような継続計算に対するコンパイラを実装するとともに、その中核部分を詳細に検討し、実装方法を明らかにした。これは、継続計算のスタックコピーを使った最初の機械語の実装である。さらにスタックのコピー量を減らすため、スタックコピーを遅延させる手法を提案、実装し、各種の応用プログラムでベンチマークを行った。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

(理由)

研究計画の概要に述べた (1) から (4) のうち (1) については、既に終了しており、その定理証明系による定式化について発展的な検討を行っている段階である。(2) については、*functional derivation* の手法で継続計算の定義と抽象機械の等価性までが示されており、さらに抽象機械と (4) で作成した実装とみなすことができる仮想機械との間の等価性を最終年度で示す予定である。(3) につ

いては、`printf` という新しい応用についての検討がすむとともに、さらにその発展を検討しているところである。当初の予定であった例外解析については最終年度に取り組む。(4)については、すでに実装がすんでおり、各種の応用プログラムを実行できる状態である。さらにより良い実装の検討などを行うとともに、部分評価などより先進的な最適化についても検討を行っている。

4. 今後の研究の推進方策

研究計画の概要に述べた (1) から (4) それぞれについて以下に記す。

- (1) Isabelle/HOL の Nominal パッケージを使った定式化について、現在のところまだうまくいっていないので、それを検討する。
- (2) Functional derivation の手法で得られた抽象機械と、より実装に近い仮想機械の間の等価性について検討する。
- (3) 例外解析について検討する。
- (4) さらに各種ベンチマークを行うとともに、実装の改良、および部分評価などの最適化について検討する。

5. 代表的な研究成果

(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 7 件)

- ① 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、15 pages (2009) 掲載決定済み、査読あり
- ② 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
- ③ 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
- ④ 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
- ⑤ 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 6 件)

- ① 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

プ、2009年3月10日、岐阜県、高山市

- ② 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
- ③ 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
- ④ 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
- ⑤ 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