

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700011

研究課題名(和文) ストリーム計算のための計算モデル

研究課題名(英文) Mathematical models for stream computation

研究代表者

中澤 巧爾 (Nakazawa, Koji)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：80362581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではストリーム処理を行なうプログラムに対する形式的理論基盤を与えるために、以下の成果を得た。ラムダ・ミュー計算の拡張として、ストリーム構成子などを明示的に含む体系を与えた。この体系は、本研究代表者が既に与えたストリーム・モデルに対して完全なものである。さらにこの体系に対する型システムを与え、ストリーム・モデルのアイデアをこの型付ラムダ・ミュー計算に適用した。さらにこの体系上での簡約体系として、合流性と強正規化性を満たすものを提案した。

研究成果の概要(英文)：We propose an extension of the Lambda-mu calculus with explicit syntax for stream constructors. The extended Lambda-mu calculus is complete with respect to the stream model, which has been introduced by ourselves, and on which programs are interpreted as mathematical functions on streams. We also propose a type system for the extended Lambda-mu calculus, and adapt the idea of the stream models to the typed setting. It is proved that the equational theory of the Lambda-mu calculus can be characterized by a set-theoretic stream model. We also propose a reduction system for the extended Lambda-mu calculus, and prove that it is confluent and strongly normalizing.

研究分野：プログラミング言語理論

キーワード：ラムダ計算 書き換え系 合流性 ストリーム計算

1. 研究開始当初の背景

ストリームの概念はソフトウェア開発において従来から考慮されてきたものであるが、大規模計算機環境やブロードバンドネットワークにおける大容量データ送受信の機会が増え、ストリームデータ処理の必要性はますます高まっている。このため、ストリームを利用した大容量データのリアルタイム処理など、個々の目的に対応する技術に関する研究が盛んに行なわれているが、ストリームを扱うプログラムに対して形式的な理論基盤を与える研究は充分になされていない。

2. 研究の目的

本研究では以上の背景をふまえ、ストリームデータを扱うプログラミング言語の基盤として、形式的かつ抽象的な計算モデルを構築し、その性質を明らかにすることを目的とした。より具体的には、関数型プログラミング言語を抽象化した形式的体系であるラムダ計算の拡張であり、ストリームデータを扱う機構をもつ形式的体系であるラムダ・ミュー計算に注目し、その形式的意味論や型システム、および、ラムダ・ミュー計算を基礎としてプログラミング言語の構築を目指した。

3. 研究の方法

研究の方法としては、次のように行なった。

(1) **(型無し)ラムダ・ミュー計算のモデルの考察.** ラムダ計算に対しては、そのプログラムを数学的な関数として解釈するラムダ・モデルと呼ばれるモデルが古くから研究されているが、本研究代表者はその拡張としてラムダ・ミュー計算に対するモデルを構築している。このモデルでは、ラムダ・ミュー計算がストリームを扱うプログラムを表現するという側面を反映し、プログラムをストリーム上の関数として解釈する。これをストリーム・モデルと呼ぶ。本研究ではストリーム・モデルの構造を調べ、その基本性質を明らかにする。

(2) **ストリーム計算としてのラムダ・ミュー計算に対する型システムの考察.** ストリームを扱うプログラミング言語としてのラムダ・ミュー計算に対する型システムとして Saurin によって導入された型システムが存在するが、その性質については深い考察がない。本研究ではこのアイデアを参考にして、ラムダ・ミュー計算の型システムを構築し、その基本的性質を明らかにする。

(3) **ラムダ・ミュー計算にもとづくプログ**

ラミング言語の設計. Ong らによって与えられた μ PCFv は、ラムダ・ミュー計算を基礎として設計された形式的プログラミング言語であるが、これは制御オペレータをもつプログラムの性質を議論することが目的であった。本研究では、このアイデアをもとに、ラムダ・ミュー計算を基本として、PCF の拡張としてストリームを扱う機構を追加した言語を構築する。

4. 研究成果

本研究では以下のような成果を得た。

(1) ストリーム・モデルに対して完全な計算体系の構築.

ストリーム概念を直接的に導入したストリーム・モデルの構造に対して健全かつ完全な計算体系を、ラムダ・ミュー計算の拡張として構築した。これは、ラムダ・ミュー計算にストリーム構築子と明示的に付加した体系である。雑誌論文[2]および学会発表[2, 3]では、この拡張体系 $\Lambda \mu$ -cons とその上での簡約体系を提案し、その基本的性質として、オリジナルのラムダ・ミュー計算の保守的拡張になっていることや、合流性を満たすことなどを証明した。Saurin による既存の結果では、合流性はストリームを表す変数について閉じたプログラムのみでしか成り立たなかったが、本体系においては、全てのプログラムについて合流性が証明されている。

(2) (拡張)ラムダ・ミュー計算に対する型システムの構築.

オリジナルのラムダ・ミュー計算、および(1)で提案した拡張ラムダ・ミュー計算に対して、そのストリーム計算としての構造を直接的に反映させた型システムを提案した。ストリームの型としては、制限された再帰型を採用している。雑誌論文[2]および、学会発表[2, 3]では、この型システムを提案し、(1)の簡約体系が強正規化性を満たすことを証明した。

(3) 型付きラムダ・ミュー計算に対するストリーム・モデル.

(2)で提案した型付き体系に対してストリーム・モデルのアイデアを適用した。雑誌論文[5]では、この型付きラムダ・ミュー計算の等号理論が、一つの集合論的ストリーム・モデルにおける等価性で完全に特徴付けられること (Friedman の定理のラムダ・ミュー計算版) を証明している。

(4) ストリーム付き組合せ論理の考察.

雑誌論文[1]では、ストリーム・モデルがストリーム組合せ代数と呼ぶ代数構造によって特徴づけられることを示しているが、その際、ラムダ・ミュー計算に等価な組合せ論

理として、ストリーム付き組合せ論理(SCL)を提案している。SCLは従来の組合せ論理(CL)に、ストリーム概念およびストリーム操作のためのコンビネータを追加したものであり、関数抽象の概念を含まない単純な構造を持つもの、ラムダ・ミュー計算と同等の表現力を持つ。さらに、雑誌論文[4]では、SCLの簡約関係(強簡約)を導入し、その合流性を証明している。これによって、SCLがCLの保守的な拡張になっていることを証明した。

(5) ストリーム処理のためのプログラミング言語設計に向けた考察

ストリーム処理言語としてのラムダ・ミュー計算を基礎としたプログラミング言語設計に向けて、必要な機構による拡張を提案した。学会発表[5]では、ラムダ・ミュー計算において関数の再帰的定義を可能にする不動点演算子を追加する方法について提案し、この拡張体系に対する領域論的ストリーム・モデルにおける解釈を与えている。

(6) 形式的計算体系の合流性証明に対する新たな手法の提案

ラムダ・ミュー計算の簡約体系や、選言(または)演算子を含む論理体系の証明正規化を考える際にみられる構造簡約規則は、その合流性の証明が複雑になることがAndoによって示されている。本研究では(1)の合流性を、DehornoyやKomoriらによって提案されている Z 定理によって証明している。これは、Takahashiらによって提案されたcomplete developmentの概念を一般化したものである。さらに、本研究ではより一般の構造簡約規則をもつ計算体系の合流性のために、合成関数に対する Z 定理を提案した。学会発表[7]ではこの手法がラムダ・ミュー計算だけではなく、選言を含む自然演繹や、明示的代入を含むラムダ計算の合流性証明に適用できることを証明した。さらにこの結果により、もともとモジュラーな証明が難しい合流性を、よりモジュラーな形で証明する枠組みを与えた。

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4件)

[1] Koji Nakazawa and Shin-ya Katsumata. Extensional Models of Untyped Lambda-mu Calculus. Electric Proceedings in Theoretical Computer Science 97, pp. 35-47, 2012. (doi:10.4204/EPTCS.97.3)

[2] Koji Nakazawa and Tomoharu Nagai. Reduction System for Extensional

Lambda-mu Calculus. Lecture Notes in Computer Science 8560, pp. 340-363, 2014.

(doi:10.1007/978-3-319-08918-8_24)

[3] José Espírito Santo, Ralph Matthes, Koji Nakazawa, and Luís Pinto. Confluence for classical logic through the distinction between values and computation. Electric Proceedings in Theoretical Computer Science 164, pp. 63-77, 2014.

(doi:10.4204/EPTCS.164.5)

[4] Koji Nakazawa and Hiroto Naya. Strong reduction of combinatory logic with streams. Studia Logica 103:375-387, 2015.

(doi:10.1007/s11225-014-9570-3)

[学会発表] (計7件)

[1] Koji Nakazawa and Shin-ya Katsumata. Extensional Models of Untyped Lambda-mu Calculus. Fourth International Workshop on Classical Logic and Computation (CL&C'12), Warwick, England, July 2012.

[2] 永井智映, 中澤巧爾. 外延的 $\Lambda\mu$ 計算に対する簡約関係. 第16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(PPL2014), 熊本県阿蘇市, 2014年3月.

[3] Koji Nakazawa and Tomoharu Nagai. Reduction System for Extensional Lambda-mu Calculus. 25th International Conference on Rewriting Techniques and Applications joint with the 12th International Conference on Typed Lambda Calculi and Applications (RTA-TLCA 2014), Vienna, Austria, July 2014.

[4] José Espírito Santo, Ralph Matthes, Koji Nakazawa, and Luís Pinto. Confluence for classical logic through the distinction between values and computation. Fifth International Workshop on Classical Logic and Computation (CL&C'14), Vienna, Austria, July 2014.

[5] Koji Nakazawa. Extensional models of typed Lambda-mu calculus. Fifth International Workshop on Classical Logic and Computation (CL&C'14), Vienna, Austria, July 2014.

[6] Koji Nakazawa. Confluence for lambda calculi with permutative conversion.

42nd TRS meeting, Tokyo, February
2015.

[7] 中澤 巧爾, 藤田 憲悦. 置換簡約を含むラムダ計算の合流性. 第 17 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 (PPL2015), 愛媛県松山市, 2015 年 3 月.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中澤 巧爾 (Koji Nakazawa)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号: 80362581