

高階関数・論理型プログラムの計算モデル

(研究課題番号 08458059)

平成 8 ～ 9 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B))(2))
研究成果報告書

平成 10 年 3 月

研究代表者 井田 哲 雄
(筑波大学 電子・情報工學系教授)



はしがき

宣言型プログラミング言語として代表的なものに関数型言語と論理型言語がある。ここ十年ほどの間、これらを自然に融合した関数論理型言語と呼ばれる言語が研究されている。現在すでにいくつかの関数論理型言語が提案されているが、これらはほとんど一階のナローイングに基づいている。一方、関数型言語では、古くから高階の機能を取り入れることで、プログラムの可読性が増し、かつ、強力な表現能力を獲得できることが知られている。したがって、高階性の機能を関数論理型言語に取り入れることでより強力なプログラミング言語を手に入れようという動きが高まりつつある。しかし、この方面の研究はまだ始まったばかりであり、確固とした理論的基礎を築くにはほど遠い状況である。本報告書では、高階関数論理型言語の理論的基礎に関する研究の成果について報告する。なお、ここでいう高階性とは、高階関数を用いて得られる様々なプログラミング手法のことであり、論理学でいわれる高階論理とは異なる。我々は、以下の二つの方法で研究を展開した。

- (1) 一階の関数論理型言語の理論的基礎である一階のナローイングを用いて、高階関数を扱える方法について検討した。ついで、高階関数を扱う一階のナローイングの計算をシミュレートする、高階のナローイング計算系を導出した。この方法では、高階ナローイングが一階のナローイングから導出されるため、一階のナローイングで知られている手法を用いて、高階ナローイングの効率を向上させることが可能になる。このため、我々は一階のナローイング計算系の効率向上のための手法についても研究を行った。
- (2) ラムダ項をベースとする高階関数型言語に、等式に基づく制約を導入することで、関数論理型言語への拡張を行なった。ここでは、関数型のパラダイムである関数は、ベースとなる高階関数型言語の関数として、論理型のパラダイムである関係は、制約として記述される。

我々が得た研究成果を以下に具体的に示す。

- (1) 一階のナローイング計算系である LNC(Lazy Narrowing Calculus) における計算を吟味し、より効率良く実行できる計算系 LNCd(deterministic Lazy Narrowing Calculus) の設計を行った。LNCd は、LNC が本質的にもつ推論規則の選択に関する非決定性を、扱う項書換え系とゴールのクラスを制限することで完全に取り払った。適用すべき推論規則がつねに一意に定まるので、LNC と比べて実行効率の向上をはかることができた。
- (2) 項書換え系やラムダ計算で知られる標準化定理(standardization theorem) の新たな証明法を考案し、左線形な項書換え系および条件付き項書換え系について標準化定理が成り立つことを明らかにした。標準化定理とは、与えられた項の望ましい計算の方法(これを標準的な導出列と呼ぶ)を与えることができるという定理で、関数型言語における遅延評価機構の理論的基礎を与えるものとして重要である。この定理を証明したことで、一階ナローイングの実行効率の向上をはかることができた。
- (3) 関数論理型言語の族を構成する次の3つの言語、すなわち、多ソート一階関数・論理型言語、インタラクティブ一階関数・論理型言語、単純型付き作用型関数・論理型言語の公理的、代数的、操作的、圏論の意味論を与えた。それぞれの意味論は以下の目的のために重要である。
 - 公理的意味論 … 論理的な解釈のため
 - 代数的意味論 … 関数的な解釈のため

- 操作的意味論 ... 実行メカニズムの究明のため
- 圏論の意味論 ... インタラクションの解釈のため

関数・論理型言語の構文的部分を等式論理として定式化し、等式の解釈を与えることによって意味論を構成した。各意味論の間の厳密な対応関係を示し、これらの意味論が正当であることを示した。

- (4) 高階項書換え系に対するナローイングを実現する高階ナローイング計算系 HLNC (Higher-order Lazy Narrowing Calculus) を提案し、その求解完全性を示した。HLNC は一階の項書換え系に対するナローイングを実現していた LNC を高階に拡張したものである。HLNC は定数をもつラムダ計算を包含しており、ラムダ項を含む高階関数・論理型言語の基礎となる計算モデルを与えている。
- (5) 関数と関係を組み合わせることによって、並列プログラムを宣言的に記述できることを示した。逐次的な処理は純粋な関数で表し、並列な振舞いは関係を用いて記述する。このアプローチは関数型プログラミングに関して得られている結果を活かして、関数型の計算モデルを一般化するものである。具体的には、型付ラムダ計算に存在限量された変数を導入する。存在限量された変数に対する等式制約を用いて通信を行なうものとする。得られた計算モデルに対して、線形論理との対応付けによる論理的な意味論と、それから導かれる並列処理の意味論を与えた。

なお、本報告書の研究発表の項で挙げた論文で、上記の研究成果に対応する主なものを以下に示す。

- (3) についての完全な詳細は、浜名誠の博士論文 *Semantics for Interactive Higher-order Functional-logic Programming* を参照のこと。

研究成果	研究発表	研究成果	研究発表
(1)	(1-d)	(4)	(2-h)
(2)	(2-a)	(5)	(1-e)
(3)	(1-c)(2-c)		

研究組織

研究代表者:	井田 哲雄	(筑波大学 電子・情報工学系 教授)
研究分担者:	ミヤルドーブ アート	(筑波大学 電子・情報工学系 助教授)
研究分担者:	チャクラバーティ マニユエル	(筑波大学 電子・情報工学系 講師)
研究分担者:	鈴木大郎	(筑波大学 電子・情報工学系 助手)

研究経費

平成8年度	2,800 千円
平成9年度	1,000 千円

研究発表

(1) 学会誌

- (a) A. Middeldorp, S. Okui and T. Ida. *Lazy Narrowing: Strong Completeness and Eager Variable Elimination*. *Theoretical Computer Science* 167(1), pages 95-130, 1996.

- (b) T. Ida and K. Nakahara. *Leftmost Outside-in Narrowing Calculi*. Journal of Functional Programming 7(2), pages 129–161, 1997.
 - (c) M. Hamana. *Equivalence of the Quotient Term Model and the Least Complete Herbrand Model for a Functional-Logic Language*. Journal of Functional and Logic Programming, 1997(1), 1997.
 - (d) A. Middeldorp and S. Okui. *A Deterministic Lazy Narrowing Calculus*. Journal of Symbolic Computation, to appear, 1998.
 - (e) M.M.T. Chakravarty, Y. Guo, M. Köhler and H.C.R. Lock. *Goffin: Higher-Order Functions Meet Concurrent Constraints*. Science of Computer Programming 30(1-2), pages 157–199, 1998.
 - (f) M. Hamada and T. Ida. *Deterministic and Non-deterministic Lazy Conditional Narrowing and their implementations*. 情報処理学会論文誌 79(3). 1998.
- (2) 国際会議発表、その他
- (a) T. Suzuki. *Standardization Revisited*. Proceedings of fifth International Conference on Algebraic Logic and Programming '96. Lecture Notes in Computer Science 1139, pages 122–134, 1996.
 - (b) A. Middeldorp, H. Ohsaki and H. Zantema. *Transforming Termination by Self-Labeling*. Proceedings of the 13th International Conference on Automated Deduction, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1104, pages 373–387, 1996.
 - (c) M. Hamana. *Algebraic Semantics for Higher-Order Functional-Logic Programming*. Proceedings of the 2nd Fuji International Workshop on Functional and Logic Programming: 1996.
 - (d) Q. Li, Y. Guo, T. Ida and J. Darlington. *Minimised Geomtric Buchberger Algorithm: An Optimal Algebraic Algorithm for Integer Programming*. Proceedings of ISSAC '97. pages 331–338, 1997.
 - (e) Q. Li, Y. Guo, T. Ida. *A Parallel Algebraic Approach Towards Integer Programming*. Proceedings of the ninth International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, pages 59–64, 1997.
 - (f) M. Hamana. *Term Rewriting with Sequences*. First International Theorema Workshop, RISC, 1997.
 - (g) I. Durand and A. Middeldorp. *Decidable Call by Need Computations in Term Rewriting*. Proceedings of 14th International Conference on Automated Deduction, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1249.
 - (h) T. Suzuki, K. Nakagawa and T. Ida. *Higher-Order Lazy Narrowing Calculus: A Computation Model for a Higher-order Functional Logic Language*, Proceedings of Sixth International Conference, ALP '97 – HOA '97, Lecture Notes in Computer Science 1298, pp.99–113, 1997.
 - (i) T. Yamada, J. Avenhaus, C. Loria-Saenz and A. Middeldorp. *Logicality of Conditional Rewrite Systems*. Proceedings of the 22nd International Colloquium on Trees in Algebra

and Programming (CAAP'97), Lecture Notes in Computer Science 1214, pages 141–152, 1997.

- (j) M.M.T. Chakravarty, Y. Guo and M.Köhler. *Distributed Haskell: Goffin on the Internet*. Proceedings of the Third Fuji International Symposium on Functional and Logic Programming, to appear, 1998

筑波大学附属図書館



1 00986 04191 9

本学関係