

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25540001

研究課題名(和文)非単調な再帰的定義の新しい基礎理論

研究課題名(英文)Studies for Non-Monotone Recursion

研究代表者

住井 英二郎(SUMII, Eijiro)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：00333550

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)：「再帰」とは、高校で習う数列の漸化式(例えば $\text{fib}(n+2) = \text{fib}(n+1) + \text{fib}(n)$, $\text{fib}(1)=\text{fib}(2)=1$ と定義されるフィボナッチ数列 fib)のように、定義の中に自分自身が登場するような定義のことである。再帰的定義は循環論法による矛盾が生じないよう、一定の性質(単調性)を満たす必要があり、現代的な計算機プログラミング言語の理論において本質的困難があった。本研究は新しい再帰の理論(特にプログラム等価性)により、従来は扱いが難しかった言語機能を扱えるようになった。

研究成果の概要(英文)：We studied a new theory of recursion (for program equivalence, in particular) for programs and programming languages with advanced features such as graphs and first-class continuations.

研究分野：プログラム理論

キーワード：プログラム理論 再帰 パラメタの高階抽象構文 環境双模倣 プログラム等価性 継続演算子(call/cc)

1. 研究開始当初の背景

$x = G(x)$ のように、定義の中に定義される対象そのものが現れる再帰的定義は、リストや木などの再帰的データ構造や、繰り返し(ループ)の一般化である再帰関数など、高水準な計算機プログラムないし計算モデルに必要な不可欠な本質的概念である。しかし、例えば $P \rightarrow P$ や $D \equiv [D \quad D]$ のように、再帰的定義は解が存在しない・存在が自明でない、あるいは解が一意でない・無限にある場合も多い。この問題に対し、古典的には Knaster-Tarski の不動点定理や Scott-Strachey を始めとする表示的意味論(領域理論)より最近では圏論的意味論、ゲーム意味論、Appel, Ahmed, Dreyer らの step-index 付き論理関係など、多くのアプローチが盛んに研究されている。しかし、これらのアプローチは一般に高度な数学的構造を用いていて対象となるプログラミング言語ないし計算モデルに限られる、あるいは逆に初等的な自然数論に基づいていて理論が煩雑になる、といった問題があった。

住井らは、「二つのプログラムの外部動作が等しい」ことを証明する「プログラム等価性」の理論において、観察者の知識を表す「環境」の概念を Milner の「双模倣」に導入することで、一般的・初等的かつ単純な「環境双模倣」を再帰的に定義した[JACM, TCS (2件), TOPLAS, POPL'04, POPL'05, LICS'07, ESOP'09, CSL'09, FOSSACS'11, LICS'12 他]。住井らの手法はトップ国際会議において多くの直接的追従研究が発表されるなど[Koutavasら POPL'06, Hurら POPL'12 他]、世界的に注目されている。この業績により、住井は MSR 日本情報学研究賞、日本 IBM 科学賞、船井学術賞などを受賞した。

2. 研究の目的

(1) 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか 本研究では、住井らの「環境」の着想を一般化することを目指す。これにより、例えば高階関数や第一級継続(first-class continuation)などの現代的な機能を持つプログラミング言語ないし計算モデルに対して、一般的・初等的かつ単純な意味論、特にプログラム等価性の理論を確立する。

(2) 当該分野における本研究の学術的な特色及び予想される結果と意義 再帰は計算機科学の中核をなす主要な概念の一つであり、その学術的意義は極めて大きい。特に関数やオブジェクトなどの意味論においては、再帰変数 x が負の位置に現れる(母関数 G が非単調になる)ため、その扱いは 1960 年代以来、プログラム理論の中心的研究テーマの一つである。住井らの環境の着想は、プログラム等価性と同様、「再帰」の理論にプレー

クスルーをもたらす可能性が期待される。

3. 研究の方法

次節の「研究成果」と合わせて記述する。

4. 研究成果

(1) 平成 25 年度

平成 25 年度は、次年度以降の理論の構築に先立ち、主な関連研究を調査・検討した。特に、現時点で最も密接な関連研究と思われる、Hur らの研究[POPL'12, '13]について検討した。[POPL'12]は、Ahmed, Dreyer らの step-index 付き論理関係と、住井らの環境双模倣を融合し、再帰型と破壊的代入を持つ多相計算におけるプログラム等価性に適用した研究である。[POPL'13]は、双模倣(環境双模倣を含む)の核心である余帰納的定義について、環境に類似したパラメタを考慮ることにより、余帰納法による証明を拡張した研究である。いずれも環境双模倣の直接的追従研究であるだけでなく、一般化を志向していると思われ、本研究と関連が深い。(ただし、推移律(transitivity)が成り立たない等の問題があり、本研究の目的を直に達するものではない。)

他に、パラメタ化高階抽象構文(parameterized higher-order abstract syntax, PHOAS)、オブジェクト指向プログラミング言語における open recursion、Hasegawa のトレース付きモノイダル圏に基づく再帰的定義の意味論等についても検討した。

当初の研究実施計画には含まれていなかったが、(再帰的データ構造の典型である)リストや木と並んで重要なデータ構造であるグラフの、PHOAS を用いた再帰的定義と双模倣についても、既存研究を参考に新たな知見が得られた。

(2) 平成 26 年度

非単調な再帰的定義(負位置の再帰的出現がある定義)と関連の深いパラメタの高階抽象構文(parameterized higher-order abstract syntax, PHOAS)を利用した、関数的(functional)なグラフ表現である、構造的グラフ(structured graph)[Oliveira and Cook, ICFP 2012]に関する研究を、研究協力者ら(博士前期課程学生およびポストドクター研究員)と共に引き続き行なった。より具体的には、原論文で考慮されていなかった、構造化グラフ表現の正規化のため、書き換え規則を定義し、その合流性・停止性の証明を行なった。書き換え規則の設計および停止性の証明においては、いくつかの自明でない考察が必要となった。この研究は代表者により情報処理国際連合(IFIP)関数型プログラミングワ

ーキンググループ(WG 2.8)において発表された。本発表をはじめとする貢献により、代表者は日本人として初めて同ワーキンググループの正メンバーに選出された。今後は構造化グラフ以外のグラフ表現[Ghani et al., TFP 2006]等の関連研究について調査・考察するとともに、より一般に非単調な再帰的定義の研究を継続する計画である。

なお、平成 27 年 1 月から 3 月までポスドクター研究員を雇用するにあたり、基金化された科研費の「前倒し」制度が極めて有効に機能した(前倒しは補助金でも調整金により可能であるが、より煩雑な手続きが必要のため、基金でなければ事務時間に消費し、研究に大きな支障をきたした可能性が高い)。

(3) 平成 27 年度

本研究の目的は研究代表者らの環境双模倣を発展させた非単調な再帰的定義の理論である。主な成果として研究協力者との共同研究により、代表的な継続演算子の一つである call/cc を持つ値呼び型無し 計算のための新たな等価性証明手法を定式化し、その健全性・完全性を証明した。以下にその詳細の一部を記述する。E は評価文脈である。値の上の二項関係 R が adequate up-to context であるとは、以下の条件を満たすことと定義する。(1) $(x.M) R (x.M')$ ならば、任意の $W = [\sim V/\sim x]C$, $W' = [\sim V'/\sim x]C$, $E = [\sim V/\sim x]E0$, $E' = [\sim V'/\sim x]E0$, $\sim V R \sim V'$ に対し、 $E[[W/x]M] \sim_R E'[[W'/x]M']$ 。ただし \sim_R は以下の条件をすべて満たす最大の対称な関係と定義する。(2) $M \sim_R M'$ かつ $M \sim N$ ならば、 $M' \sim N'$ なる N' が存在し、 $N \sim_R N'$ または $N = [\sim V/\sim x]C$, $N' = [\sim V'/\sim x]C$, $\sim V R \sim V'$ の形。(3) $V \sim_R M'$ ならば $M' \sim V'$ なる V' が存在する。従来環境双模倣との大きな違いは、簡約の途中で call/cc により継続が取り出される可能性があるため、条件(1)において任意の E を考慮する必要がある一方、条件(3)において R に (V, V') を追加する必要がない点にある。任意の E を考慮することは一見すると重い条件のように思われるが、(2)の後半の up-to context により E をキャンセル(吸収)することが可能なため、証明の負担は大きく変わらない(特に call/cc を用いない場合)。この大きな特徴は call/cc が無い 計算等における環境双模倣にも応用可能であり、今後のさらなる理論の発展が期待できる。

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 5 件)

谷内 太一, 住井 英二郎, Call/cc を含む型無しラムダ計算における文脈等価性の一証明手法, 日本ソフトウェア科学会第 32 回

大会(2015 年度)講演論文集, 査読無, 2015 年, pp. 1-7

Ryohei Tokuda, Eijiro Sumii, Specialization of Generic Array Accesses After Inlining, The OCaml Users and Developers Workshop (talk abstracts), 査読有, 2015 年, pp. 1-2

Akinori Abe, Eijiro Sumii, A Simple and Practical Linear Algebra Library Interface with Static Size Checking, EPTCS, 査読有, 198 巻, 2015 年, pp. 1-21, DOI: 10.4204/EPTCS.198.1

Akinori Abe, Eijiro Sumii, A Simple and Practical Linear Algebra Library Interface with Static Size Checking, Proceedings of ACM SIGPLAN ML Family Workshop, 査読有, 2014 年, pp. 1-3

Eijiro Sumii, Yuji Sato, A Multi-Role Translation of Protocol Narration into the Spi-Calculus with Correspondence Assertions, FCS'13: Workshop on Foundations of Computer Security (Informal Proceedings), 査読有, 2013 年, pp. 68-82

[学会発表](計 6 件)

阿部 晃典, 住井 英二郎, 機械学習による関数型ブーリアンプログラムの型推論, 第 18 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(PPL2016), 2016 年 3 月 7 日, 岡山

谷内 太一, 住井 英二郎, Call/cc を含む型無しラムダ計算における文脈等価性の一証明手法, 日本ソフトウェア科学会第 32 回大会, 2015 年 9 月 10 日, 東京

Ryohei Tokuda, Eijiro Sumii, Specialization of Generic Array Accesses After Inlining, The OCaml Users and Developers Workshop, 2015 年 9 月 4 日, バンクーバー(カナダ)

Eijiro Sumii, A Simple and Practical Linear Algebra Library Interface with Static Size Checking, ACM SIGPLAN ML Family Workshop, 2014 年 9 月 4 日, ヨーテボリ(スウェーデン)

Eijiro Sumii, Normalizing Structured Graphs, IFIP Working Group 2.8 32nd Meeting, 2014 年 8 月 11~15 日, エステパーク(アメリカ)

Eijiro Sumii, A Multi-Role Translation of Protocol Narration into the Spi-Calculus with Correspondence Assertions, FCS'13: Workshop on Foundations of Computer Security, 2013 年 6 月 29 日, ニューオーリンズ(アメリカ)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kb.ecei.tohoku.ac.jp/~sumii/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

住井 英二郎 (SUMII, EIJIRO)

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：00333550

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：