

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24500014

研究課題名(和文) ゲーム意味論による共有メモリ型並列プログラムの定式化と検証

研究課題名(英文) Formalization and verification of shared-memory parallel programs in game semantics

研究代表者

西村 進 (Nishimura, Susumu)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10283681

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：共有メモリ型並列プログラムのゲーム意味論を、wait-notifyゲームを用いることによって構築した。wait-notifyゲームが構成する圏において、可換強モナドの計算構造が誘導されることを示し、これによって関数型言語に書き換え可能変数を加えたAlgol言語の並列拡張の意味論がゲームのKleisli圏における射として与えられることと、full abstraction定理を示した。公平性を考慮した並列実行に関しても、wait-notifyゲームにおいて非決定的選択も計算資源の一種であるとみなすことによって、WN有界戦略を構成することによって意味論を与えることができた。

研究成果の概要(英文)：A game semantics for share-memory parallel programs was given by developing the wait-notify game. In the category of wait-notify games, it was shown that a computational structure of a commutative strong monad is induced and the strong monad gives rise to a Kleisli category, in which a game semantics for a parallel extension of an Algol-like language with mutable variables is defined by the arrows in the Kleisli category. It was also shown that the game semantics is fully abstract. Furthermore, it was also shown that a game semantics for fair execution of parallel programs can be formulated in a game model with WN-bounded strategies, a variant of wait-notify game where nondeterministic choice is also regarded as a shared computational resource.

研究分野：計算機科学

キーワード：並列プログラミング ゲーム意味論 wait-notifyゲーム

1. 研究開始当初の背景

マルチコア CPU の普及等に伴い、並列プログラミングの重要性はますます高まってきたが、並列プログラミングはその非決定的性質から通常の逐次プログラミングに比べ格段に間違いが起こりやすく、その発見・修正も困難である。加えて、マルチコアの性能を引き出すためには細粒度の高い並列性が必要であり、そのプログラミングはさらに難しい。

並列プログラムの動作は原理的には単純で、2 つ以上の逐次プロセスがひとつの共有メモリに対して排他的に読み書きを行っているだけである。ただし、各プロセスの実行はいつでも中断されたり遅延されたりする可能性があるため、並列プログラミングにおいては、複数の並列プロセスのメモリ・アクセスの混ぜ合わせのすべての可能な順列組み合わせ（インターリーブ）を考慮しなければならない。実際のプログラムにおいては、この組み合わせの数は容易に爆発するため、人手で洩れなくすべての場合を考慮するのは難しく、これが並列プログラムの難しさの本質的な原因となっている。

このような並列プログラミングの難しさを克服するためには、並列実行に関わる計算現象に対するより深い理解とそれを基礎としたプログラミング検証の方法論が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、並列実行の順列組み合わせを系統的に洩れなく数え上げるための手段としてプログラミング言語意味論のひとつであるゲーム意味論の手法を適用することにより、プログラムの正しさを保証・検証するための系統的かつ実際的な手法を確立することを目的としたものである。

ゲーム意味論とは、二者対話型ゲームの理論に基づき、プログラムを Player(対戦者・後手)、実行環境を Opponent(対戦相手・先手)とモデル化し、両者の交互の指し手によりプログラムの実行を定式化したものである。Player が勝利することがプログラムの正しい実行に対応する。しかしながら、ゲーム意味論はもともと逐次プログラムの意味論を与えるために提案されたものであり、並列プロセスがインターリーブ実行されるような場合への拡張は明らかではない。

もともと逐次プログラムのために考案されたゲーム意味論を拡張してインターリーブ実行される並列プログラムのためのゲーム意味論を確立し、これを通して並列プログラムの実行に関わる計算現象に内在する計算構造を見出すことによってその本質を明らかにすることが、本研究の目的である。また、ゲーム意味論を基盤とすることによって、プログラムの正しさ、すなわち与えられた並

列プログラムが意図した通りの動作をするかどうかを判定する方法を与えることができるとも考えた。

3. 研究の方法

本研究では、Player を並列プロセスの集合、Opponent をスケジューラとみなすことによって、並列プログラムにおけるゲームを「いかなるインターリーブ実行によっても、並列プロセスの集合は正しい結果を計算する」という解釈のもとで構成し、適切なゲーム意味論を与える。

このようにして与えられた並列プログラムのためのゲーム意味論に関して、それに内在する計算構造を明らかにする。なお、並列プログラムの実行に関しては並列プロセスのスケジューリングがプログラムの意味に大きく影響することから、スケジューリングの公平性(fairness)がゲーム意味論にどう統合できるかについても考察する。これらの知見を元に、現実的な計算時間で並列プログラムの正しさを機会的に検証する方法を考案する。

4. 研究成果

(1) wait-notify ゲームによる並列プログラムのためのゲーム意味論の構築

ゲーム意味論による定式化に際しては、並列プログラムが非決定的な実行パスのどれを辿っても正しく動くことを保証できるような定式化を行う必要があるが、これを、Harmer と McCusker による非決定的 Algol 言語のためのゲーム意味論を拡張する形で与えた。従来のゲーム意味論では、Opponent と Player が交互にゲームの指し手を打つ奇偶性の制約を満たすことが本質的だが、単純にそれぞれのプロセスのゲームの指し手の列をインターリーブするだけではこの制約が保存されないのでは不適切である。

この問題を解決するため、wait-notify ゲームという並列計算のためのゲームモデルを提案した。このモデルでは奇偶性の制約を壊さずに複数プロセスのゲーム列を自由にインターリーブできることを示した。(渡辺敬介氏との共同研究) wait-notify ゲームでは、実行中のプロセスがスケジューリングによって実行を中断し他のプロセスに実行権を譲るときにはゲーム手 wait を、後のスケジューリングで実行に復帰するときはゲーム手 notify を打つことによって、必ず Opponent と Player が交互にゲームの指し手を打つことを保証している。この成果は、情報処理学会プログラミング研究会論文誌に採録・出版された。

(2) wait-notify ゲーム意味論に内在する計算構造の解明

前項で提案した wait-notify ゲームによって並列プログラムの意味論を基本的には与えることができたが、関数などのより進んだプログラミング機構は扱うことはできなかった。これは、wait-notify ゲームに内在する計算構造が明らかでなかったため、既存のゲーム意味論の構造とうまく統合できるかどうか不明だったためである。

wait-notify ゲームの計算構造を詳しく研究した結果、これがモナドの構造を持つことが明らかになった。すなわち、ゲーム意味論が構成する圏において、wait-notify ゲームが可換強モナドの構造を誘導することを示し、これによって(一定の緩やかな制限のもとで)関数型言語に書き換え可能変数を加えた Algol 言語の並列拡張したものをゲームの Kleisli 圏における射として定式化できることを示すことができた。

また、この定式化に基づき、ゲーム意味論における標準的な証明手法を改良することによってゲーム意味論の重要な定理である full abstraction が成立することを示した。なおこの証明は、共有変数のアクセス競合を回避するためのアトミックなメモリ操作命令が本質的に必要である(このようなメモリ操作がなければ実現できない並列プログラムが存在する)ことを示唆するものであり、大変興味深い。

この成果は、国際学会 Computer Science Logic 2013 (CSL 2013) に採択され、研究発表を行った。

(3) 公平性を考慮したゲーム意味論

前項までの研究成果により、並列プログラムのためのゲーム意味論が構築可能であることは示されたが、これだけでは公平性を考慮した並列実行に対して適切な意味を与えることができない。なぜなら、ゲーム意味論は公平性のように無限長のゲーム列を考慮する必要がある活性(liveness)を記述することを考慮していないからである。また、並列実行による非決定的実行と公平性との組合せは、通常のプログラムでは非有界非決定性(unbounded nondeterminism)を誘導するため、意図しないプログラムの発散を導出してしまうという問題があった。

これらの問題を解決するため、wait-notify ゲームの枠組みを詳細化し、並列プログラムの公平実行のためのゲーム意味論を構築した。この詳細化された wait-notify ゲームでは、非決定的選択も計算資源の一種であるとみなし、これら計算資源へのアクセスを表すゲーム手をゲーム列中に明示的に挿入することにした。これにより、すべての並列実行のゲーム列における可能な非決定的選択枝の数が、先行する非決定性資源へのアクセス回数によって定まる上限で抑えられることを示した。これを WN 有

界ゲーム戦略とよび、このような WN 有界ゲーム戦略によるゲーム意味論が full abstract であることを示した。

この結果について、日本ソフトウェア科学会第 31 回大会において講演発表を行った。

(4) 機械検証における状態爆発抑止

本研究のもう一つの目的である、ゲーム意味論を基盤とした並列プログラムの正当性の機械的手法による検証については、並列性に起因する状態数の爆発を抑える効果的な手法が、現実的な計算時間で検証を行うのに必要となることは予想されていた。当初は、正規表現で言うところの shuffle 表現により状態数爆発を抑えることを予定していたが、残念ながらその効果は非常に限定的であろうという見込みが得られた。

この局面を打開するための技術的手段として組合せ幾何的モデルの援用を検討した。組合せ幾何的モデルは分散コンピューティングの理論で近年研究が活発に行われている手法で、並列プロセス間のコミュニケーションによる組合せ的非決定性を組合せ幾何における単体的複体(点・線・面などの図形の組合せ)の形で抽象化して表現したものである。並列プログラムの仕様を組合せ幾何的モデルで与えたとき、この仕様から導出される単体的複体上で、一定の部分複体の変形を発見することで仕様を満たすプログラムを導出できることが原理的に可能であることを見出した。

問題はそのような複体変形を効率良く発見することができるかどうかだが、並列プロセスの数を制限する等の一定の条件のもとで、現実的な時間で解が導き出せそうである。未完成の内容ではあるが、状態数爆発の問題を解決するための突破口が見出せたと考えている。

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 2 件)

Keisuke Watanabe, Susumu Nishimura,
May&Must-Equivalence of Shared Variable
Parallel Programs in Game Semantics,
Information Processing Society of Japan
Transactions on Programming (PRO), vol.
5(4), 2012, 17-26

URL:

<http://jlc.jst.go.jp/DN/JST.JSTAGE/ipsj/trans/5.167>

Susumu Nishimura, A Fully Abstract
Game Semantics for Parallelism with
Non-Blocking Synchronization on

Shared Variables, Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), vol. 23, 2013, 578-596
DOI:
<http://dx.doi.org/10.4230/LIPIcs.CSL.2013.578>

〔学会発表〕(計 4 件)

Susumu Nishimura, A Fully Abstract Game Semantics for Parallelism with Non-Blocking Synchronization on Shared Variables, 22nd EACSL Annual Conference on Computer Science Logic (CSL 2013), 2013年9月2日, Torino (イタリア)

西村 進, 公平な並列実行のためのゲーム意味論, 日本ソフトウェア科学会第31回大会, 2014年9月9日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

西村 進, 順序複体上の連続変形発見による分散プログラムの導出, 第26回ALGI(代数, 論理, 幾何と情報科学研究集会), 2015年8月31日, 鳥取環境大学(鳥取県鳥取市)

西村 進, 組合せトポロジーによる分散並列プロトコル発見アルゴリズム(ポスター発表), 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, ダイヤモンド瀬戸内マリンホテル(岡山県岡山市)

〔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〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 進 (NISHIMURA, Susumu)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 10283681

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし