

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540030

研究課題名(和文)安全な多言語並列計算基盤のための型付中間言語

研究課題名(英文) Towards Typed Intermediate Languages for Safe Parallel Computing Bases among Multiple High-Level Languages

研究代表者

八杉 昌宏 (YASUGI, Masahiro)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：30273759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、様々な高水準言語の連携による安全で高性能な並列計算を可能とする汎用性を持つ型付中間言語の設計に挑んだ。既存の依存型、fractional permissionによる型検査技法をベースとし、逐次一貫性メモリモデルのためのデータレース回避の型検査技法、部分配列のpermissionを取り出せる空間的fractionの導入、複数の高水準言語からメタ呼出しを通して型付中間言語レベルで準備した共有データ構造を操作させる安全な方式、をそれぞれ検討できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we tried to design universal typed intermediate languages for supporting safe and fast parallel computing among various high-level languages. On the basis of the existing techniques of type checking with dependent types and fractional permissions, we examined (1) type checking for ensuring data race freedom and realizing the sequential consistency memory model, (2) spatial fractions for extracting permissions on sub-arrays, (3) a safe scheme that makes multiple high-level languages access the typed intermediate languages' shared data structures via meta-calls.

研究分野：計算機科学

キーワード：型付中間言語、低水準言語、プログラミング言語処理系、型検査、並列計算、データレース、高水準言語、多次元配列

## 1. 研究開始当初の背景

近年の情報通信ネットワークの発展は、各地のソフトウェアの開発者と利用者とを結びつけ、コード(プログラム)の活発な配信も可能となっている。その際、バグや攻撃による被害をいかに防止して、安全性を確保するかという点が極めて重要であると考えられている。

Java 仮想機械語(JVML)や CIL に代表される既存の型付中間言語は、実行前型検査と自動メモリ管理(GC)によりそのプログラムを安全に実行できるが、型システムが特定のオブジェクト指向言語(Java や C#)にほぼ対応している点を含め汎用性は高くない。また、汎用性が高いはずの低水準言語であっても、Morrisett らの TAL (Typed Assembly Language)をさがけとする既存研究の多くは、広く様々な高水準言語からの翻訳の共通のターゲットとして、高水準言語間の連携(例えば、Java 言語と Lisp 言語間の連携)を追求するには十分とはいえなかった。

さらに、共有メモリによる高性能な多言語並列計算という形の、様々な高水準言語で書かれたプログラムを共通中間言語に翻訳して作成されたコンポーネント間の生き生きとした連携ができれば、近年進む計算システムのマルチコア化を極めて有効に活用できる。しかし、多言語並列計算の安全性確保(データレース回避の検証等)は、そもそもメモリモデルを多言語でどう定めるかという点を始めとして、極めて挑戦的である。

## 2. 研究の目的

汎用性の高い型付中間言語、すなわち広く様々な高水準言語からの翻訳の共通のターゲットとしての低水準の型付中間言語を、安全で高性能な言語処理系(計算基盤)が作成できる形で定義することは、高水準言語間の連携などの点で言語処理系技術に貢献しようとする研究者の挑戦的な夢である。さらにマルチコア化を活用した共有メモリによる高性能な多言語並列計算の安全性確保(データレース回避の検証等)は極めて挑戦的である。本研究では近年の型理論の成果(依存型等)を踏まえて、その設計に挑戦した。

本研究は、従来困難と考えられていた、汎用性の高い型付中間言語、すなわち広く様々な言語からの翻訳の共通のターゲットとしての利用に優れた低水準の型付中間言語(以降、この言語を“MIL”と呼ぶ)を、安全で高性能な言語処理系(計算基盤)が作成でき、さらには安全性確保(検証)を前提に共有メモリによる高性能な多言語並列計算ができる形で設計することを目的とした。

期待される効果としては、これまで計算基盤個別に行われてきた研究に統一的な共通基盤を提供し、コンパイラ、型システム、クラウド計算などの研究者による新たな研究の展開を促すとともに、社会的には、世界各地のソフトウェアの開発者から利用者へ

の活発な最新プログラム配布を安全・安心面でサポートすることであった。

また、多言語並列計算の安全性確保に本質的困難さを発見すれば、その危険性に警鐘を鳴らしての安全性重視の流れ(例えば、メッセージ交換型並列計算)を促進するものとした。

## 3. 研究の方法

本研究の第一の特色は、高水準言語を固定せず、実計算機の特徴を捉えた仮想機械の RISC 命令を設計する形で高速性と汎用性(将来の高水準言語のサポートを含む)を最大限追求しつつ、近年の型理論の成果(依存型など)を踏まえて、計算基盤としての安全性を確立する方法を研究するというアプローチにある。

さらに斬新な特色は、近年進む計算システムのマルチコア化を活用できるよう、安全性確保を前提に、共有メモリによる高性能な多言語並列計算という形の、様々な高水準言語で書かれたプログラムを共通中間言語に翻訳して作成されたコンポーネント間の生き生きとした連携を目指すというアプローチにある。

このような従来にないアプローチをとる本研究課題は、さまざまな困難が予想される挑戦的な課題である。例えば、近年、仕様が定まり注目されている C++11 のメモリモデルでは、データ競合のあるプログラムの振る舞いは未定義とされた。また、メモリモデル研究の現状は「各言語で」であり、多言語並列計算を扱おうとする本研究はメモリモデルの面からだけでも極めて挑戦的である。

本研究では、型付中間言語 MIL を開発を、型付中間言語 MIL の言語仕様の設計を中心として進めた。言語仕様の設計においては、MIL の役割と型システムを強く意識した上でシンタックス、セマンティクスの設計を行う。そして、MIL の汎用性ならびに MIL レベルにおけるメモリモデルと安全性確保(データレース回避の検証)のサポートを中心として研究を進め、次に、MIL へと翻訳する各高水準言語におけるメモリモデルのサポート、その後、多言語並列計算のためのメモリモデルのサポートを中心として研究を進めた。

## 4. 研究成果

本研究は、様々な高水準言語の連携による安全で高性能な並列計算を可能とする汎用性を持つ型付中間言語の設計に挑んだ。既存の依存型、fractional permission による型検査技法をベースとし、逐次一貫性メモリモデルのためのデータレース回避の型検査技法、部分配列の permission を取り出せる空間的 fraction の導入、複数の高水準言語からメタ呼出しを通して型付中間言語レベルで準備した共有データ構造を操作させる安全な方式、をそれぞれ検討するなど、以下の成果(も

しくは重要な今後の課題)を得た。

(1) MILの汎用性ならびにMILレベルにおけるメモリモデルと安全性確保(データレース回避の検証)のサポートを中心に検討を行った。MILレベルにおけるメモリモデルは、既存のアプローチと同様、データレースがない(data-race-freeな)プログラムについては逐次一貫性(sequential consistency)が得られるという点を基礎とした。データレース回避(data race freedom)の検証には、できるだけ既存の手法を用いることにした。つまり、データレース回避が検証できないプログラムは型検査をパスしないという点で安全性を確保するものである。

そのような中で、現状の技術でデータレース回避(data race freedom)を検証するには、プログラム論理、fractionalな所有権、分離論理などに基づいていくことで一定の範囲がカバーできるとの方向性を得た。また、以下の(2)で提案する空間的 fraction についてはMILレベルでも利用が可能である。

(2) MILへと翻訳する各高水準言語におけるメモリモデルの研究を行った。これは例を用いて検討することとした。具体的にはspawnとsyncコンストラクトにより、スレッド生成と完了待ちが行えるCilkのような高水準並列言語において、再帰的並列LU分解を行うプログラムを例として用いて、データレース回避のための型検査が可能かを検討した。

その結果、fractional permissionに関する既存研究を拡張することで、高水準言語レベルでは、高水準並列言語で記述された再帰的並列LU分解という行列計算の例題におけるデータレース回避の検査が可能との確信を得た。拡張としては、配列(行列)の部分配列(行列)に関するpermissionを取り出すための空間的 fraction を導入している。

一方、MILレベルでデータレース回避が必須であることから、各高水準言語からMILへと翻訳する各コンパイラ(翻訳系)は、データレースのないコードを生成する必要がある。よって、以下の複数の場合・アプローチについて検討を進めた：高水準言語もまたデータレース回避を必須としている言語である場合、それを維持する方式。翻訳系でデータレース回避の検証を行っている場合、その結果を残す方式。高水準言語でデータレース回避が必須でない場合は、MILレベルでのデータレース回避をしたうえで、高水準言語におけるメモリモデルに則して最適化を施す方式。

このうち、またはが、spawnとsyncコンストラクトにより、スレッド生成と完了待ちが行える高水準並列言語でも該当するが、経過報告的な発表を行い、spawn, syncなどをワークスティールなどの形で「実装」する型付中間言語でもデータレース回避を検査するためには、fractional permissionをデータ構造等にパックして正確に授受可能とする仕組みが必要といった議論を行った。

(3) 多言語並列計算のためのメモリモデルの研究を行った。そもそもメモリモデルを多言語でどう定めるかという点を始めとして、極めて挑戦的である。よって、次の点に着目してこの課題に挑戦した：「中途半端」な状態の扱い、複数の高水準言語からの中間言語としたときの扱い、言語間相互に「プロトコル」を定める方法の検討。

多くの課題があるため一般的な方式に最初からは取り組むことはせず、確実に安全な、複数の高水準言語による並列処理方式を確立後、その発展を考えることとした。考えたのは、まず、型付中間言語レベルで、fractional permissionを扱える共有データ構造を準備し、複数の高水準言語(ただし、逐次言語)の逐次インタプリタを並列に実行し、メモリが分離していると型検査可能なインタプリタにメタ呼出しを通してのみ共有データ構造を操作させる方式である。メタ呼出しでは引数や結果にビット列等の無難なデータを用いることとする。この方式では、各逐次インタプリタは他のスレッドと直接干渉しないため、上記の(2)で述べたようなMILレベルでのデータレース回避が不要なく、通常実行時の性能低下を招く高頻度の相互排他を用いる必要がないため、インタプリタではあるが高速に動作可能となる。その上で、高水準言語のプログラムに関して高水準言語インタプリタを特化(部分評価)するという意味のコンパイル(翻訳)を行えば、コンパイル方式の実行も可能となる。さらに、この方式は単一言語の複数インタプリタ並列実行にも単なる特殊ケースとして適用可能であり、(2)の課題の解決方法の一つとしても有力といえる。また、(2)で述べたspawnとsyncコンストラクトによりスレッド生成と完了待ちが行える高水準並列言語といったもので逐次言語の部分置き換えることも(2)の または が十分機能すれば可能である。

一方、確実に安全な、複数の高水準言語による並列処理方式を出発点とする方式は、(3)の注意点、のいずれも、MILレベルのメタ呼出しのみ扱うことで避けているだけであり、当初の目標であった、複数言語に由来するコンポーネント間の活き活きとした連携については、システムソフトウェアレベルのメモリ保護の境界跨ぎは必要としないものの、「疎結合」にしか達成できなかった。別のアプローチとして、他言語モジュール呼出し時にその言語で可能な形のpermissionを抽出するためのview変換fractionといった方法も考えられるため、今後の課題としたい。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計3件)

八杉 昌宏、複数言語による正しい並列プログラミングのための計算基盤の検討、

日本ソフトウェア科学会第 33 回大会  
(ポスター発表)、2016 年 9 月 8 日、東北  
大学 片平キャンパス(宮城県・仙台市)  
八杉 昌宏、安全な並列計算向け型検査方  
式の例題を用いた検討、日本ソフトウェ  
ア科学会第 32 回大会 (ポスター発表)、  
2015 年 9 月 10 日、早稲田大学 西早稲田  
キャンパス(東京都・新宿区)  
八杉 昌宏、メモリモデルを考慮した汎用  
型付中間言語設計に向けて、高信頼な理  
論と実装のための定理証明および定理証  
明器 (TPP 2014)、2014 年 12 月 4 日、  
九州大学・西新プラザ大会議室(福岡県・  
福岡市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

八杉 昌宏 (YASUGI, Masahiro)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教  
授

研究者番号：30273759