

自己反映計算のための仮想簡約マシンの 設計とその実装に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、急速な計算機の処理能力の向上にともない、ソフトウェアに対する要求の多様化、システムの複雑化が進んでいる。特に、静的かつ既知な環境ばかりではなく、動的かつ未知な実環境における多様性に対応するシステム開発が望まれている。その要求に柔軟な対応を行うためには、より高度で複雑なプログラムを簡潔に記述できるプログラミング言語の開発および迅速かつ厳密なシステム仕様の確認が必要不可欠かつ有用である。

自己反映計算とは、計算システムが自分自身の構造と計算過程をモデル化した表現を持ち、その表現を操作することにより自己の構造・計算過程を参照および動的変更することである。プログラミング言語の設計やプログラミング方法論においては、自己反映計算は、目的的计算レベル(ベースレベル)とその計算・記述方式を制御あるいはカスタマイズするレベル(メタレベル)を分離するという観点での新しいモジュール化方式を与えるものである。これにより、従来アドホックな方法で導入されてきたメタレベルの機能をシステムティックな方法で導入できる。また、プログラミング言語やオペレーティングシステムといった記述系を自己反映的なシステムとして構成することで、動的に変化するような計算環境に対して、自己の構造や計算過程を適切に操作し、計算環境に動的に適応するようなソフトウェアを自然な形で記述することが可能である。自己反映計算機能を付加したプログラミング言語の研究としては、関数型、論理型、オブジェクト指向型が提案されてきた。また最近では、簡約系をベースとしたものが提案され、その一つに REPS (Reflective Equational Programming System) がある。これは、栗原らによって提案されたもので、項書換え系に自己反映計算機能を付加した言語的枠組みである。簡約系は、非決定性や並列性、記号処理など、多くの要素について抽象レベルでの議論が可能な一つのフレームワークである。これは、代数的仕様記述を用いた仕様においてはプロトタイプ法の試作プログラムとして有効であり、システム構築の際のシステムの機能、仕様の確認を厳密かつ簡単に行える。さらに、より自然な記述を与えプログラムを作りやすくする目的から、書換え規則へ条件部を導入した条件付き項書換え系も提案されている。

本論文では、REPS の考え方を基礎として、簡約系計算モデルの代表的なものの 1 つである条件付き項書換え系へ自己反映計算機能を付加した仮想簡約マシンの設計およびその実装を提唱している。

その成果は、以下のように要約できる。

1. 自己反映計算機能の付加を目的として、条件付き項書換え系を基礎とした仮想簡約マシンの計算状態を提唱して、自己反映仮想簡約マシンを設計している。

条件付き項書換え系における条件評価中の自己反映計算の実現のために、条件評価中

のメタ情報を格納可能とする新たな計算状態を定義している。また、計算状態の推移を形式化した簡約関係により操作的意味を定義して、仮想簡約マシンを設計している。さらに、自己反映計算を実現する2つの操作を定義し、簡約関係を拡張して、自己反映仮想簡約マシンを設計している。

2. 自己反映仮想簡約マシンを実装し、自己反映計算の効率化についての検討を行っている。具体的な簡約戦略として最左最外戦略を選択し、それにしたがって、計算状態、簡約関係、詳細な構文、および自己反映計算のための関数を定義して処理系を構築している。さらに、自己反映計算に伴う極端な非効率化を避ける目的から遅延評価を用いて効率化を行い、評価実験でその性能を示している。また、実装した処理系のプログラム例を示している。

3. 自己反映仮想簡約マシンの今後の課題、および自己反映計算のエージェントシステムにおける展望を示している。

CREPS 処理系の今後の課題と、モジュール化、並列・分散化、動的適応性の追求が望まれるプログラミング言語や各種エージェントシステムにおける自己反映計算の導入の展望について述べている。

本論文は全6章で構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景とその目的について述べている。

第2章では、本論文の準備として、簡約型計算モデルである項書換え系および条件付き項書換え系についての概念および諸定義と、自己反映計算の概念および自己反映計算を導入した項書換え系 REPS について述べている。

第3章では、条件付き項書換え系を基礎とした自己反映仮想簡約マシンを設計し、その詳細について述べている。自己反映計算の実行をトップレベルの計算の他に条件評価中にも行えるように、条件評価中のメタ情報を格納するために4つのフィールドからなるレコードを要素とするスタックを提唱し、計算状態を定義している。次に、計算の状態推移を形式化した簡約関係により操作的意味を定義して、仮想簡約マシンを設計している。最後に、仮想簡約マシンに、自己反映計算機能のための状態推移規則を追加して自己反映仮想簡約マシンを設計している。

第4章では、自己反映仮想簡約マシンの実装 (CREPS 処理系) について述べている。実装にあたり、簡約戦略を決定 (最左最外戦略) して、それに従って、CREPS 処理系の状態、簡約関係を定義している。さらに、具体的な構文および自己反映計算を実現する関数を示している。また、CREPS 処理系の遅延評価導入による自己反映計算の簡単な効率化、および応用として CREPS 処理系のプログラム例を示している。

第5章では、自己反映計算の展望について述べている。項書換え系における応用と、本論文で構築した CREPS 処理系の今後の課題について述べている。さらに、現在ホットなトピックであり、今後も更なる発展が期待されるモバイルコンピューティングシステム、Java 言語、並列・分散システムおよびエージェントシステムにおける自己反映計算の動向および今後の展開について説明している。エージェントシステムは、時間的変化をもつ動的環境において、その変化に柔軟に適応するための枠組みを必要とする。エージェントシステムへの応用例をいくつか述べ、そのような枠組みの一部が、自己反映計算が有する機能により提供されることを示す。

第6章では、本研究の結論について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 内 東
副 査 教 授 宮 本 衛 市
副 査 教 授 嘉 数 侑 昇
副 査 教 授 和 田 充 雄

学 位 論 文 題 名

自己反映計算のための仮想簡約マシンの 設計とその実装に関する研究

近年、急速な計算機の処理能力の向上にともない、ソフトウェアに対する要求の多様化、システムの複雑化が進んでいる。特に、静的かつ既知な環境ばかりではなく、動的かつ未知な実環境における多様性に対応するシステム開発が望まれている。その要求に柔軟な対応を行うためには、より高度で複雑なプログラムを簡潔に記述できるプログラミング言語の開発、および迅速で厳密なシステム仕様の確認が必要不可欠かつ有用である。

自己反映計算とは、計算システムが自分自身の構造と計算過程をモデル化した表現を持ち、その表現を操作することにより自己の構造・計算過程を参照および動的に変更することである。自己反映計算は、プログラミング言語の設計やプログラミング方法論において、目的の計算レベル（ベースレベル）とその計算・記述方式を制御するレベル（メタレベル）を分離するという観点での新しいモジュール化方式を与えるものである。これにより、従来そのシステム毎に特有な方法で導入されてきたメタレベルの機能をシステムティックな方法で導入できる。また、プログラミング言語やオペレーティングシステムといった記述系を自己反映的なシステムとして構成することで、動的に変化するような計算環境に対して、自己の構造や計算過程を適切に操作し、計算環境に動的に適応するようなソフトウェアを自然な形で記述することが可能である。

本論文では、簡約系計算モデルの代表的なものの1つである条件付き項書換え系へ自己反映計算機能を付加した仮想簡約マシンの設計およびその実装を提唱している。

その成果は、以下のように要約できる。

1. 条件付き項書換え系を基礎とした自己反映仮想簡約マシンの設計：

条件付き項書換え系における自己反映計算の実現のために、条件評価中のメタ情報を格納可能とする計算状態を提唱し、その状態推移を形式化した簡約関係により自己反映仮想簡約マシンの操作的意味を定義している。このような形式的な手法によるアプローチおよびその結果得られた設計内容は評価に値する。

2. 自己反映仮想簡約マシンの実装：

具体的に簡約戦略を決定し、それに従い、計算状態や簡約関係による操作的意味を

与え、マシンの具体的な構文、および自己反映計算のための関数を定義してマシンを構築している。さらに、自己反映計算に伴う非効率問題を遅延評価を導入して効率化を図り、簡単な実験でその評価を行っている。意味論の形式化に基づいて正当性を保証しながら行った実装のアプローチは評価できる内容である。

本論文は全6章で構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景とその目的について述べている。

第2章では、本論文の準備として、簡約型計算モデルである項書換え系および条件付き項書換え系についての概念および諸定義と、自己反映計算の概念および自己反映計算を導入した項書換え系 REPS について述べている。

第3章では、条件付き項書換え系を基礎とした自己反映仮想簡約マシンを設計し、その詳細について述べている。自己反映計算の実行をトップレベルの計算の他に条件評価中にも行えるように、条件評価中のメタ情報を格納するための計算状態を定義している。計算の状態推移を形式化した簡約関係により操作的意味を定義して、仮想簡約マシンおよび自己反映仮想簡約マシンを設計している。

第4章では、自己反映仮想簡約マシンの実装 (CREPS 処理系) について述べている。実装にあたり、効率面を考慮した上で簡約戦略を決定 (最左最外戦略) して、それに従って、CREPS 処理系の状態、簡約関係を定義している。さらに、CREPS 処理系の構文および自己反映計算を実現する関数を具体的に定義している。また、CREPS 処理系の遅延評価導入による自己反映計算機能の効率化とその評価実験、および CREPS 処理系のプログラム例を示している。

第5章では、自己反映計算の展望について述べている。本論文で構築した CREPS 処理系の今後の課題と、自己反映計算のエージェントシステムへの有効性について述べている。

第6章では、本研究の結論について述べている。

これを要するに、著者は、条件付き項書換え系へ自己反映計算機能を付加した自己反映仮想簡約マシンの設計およびその実装を行い、自己反映計算の操作的意味を明らかにすることで、自己反映計算に関する研究において新知見を得たものであり、システム情報工学、および複雑系工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。