

学位論文題名

論理型言語の拡張と等価変換計算モデルに関する
基礎的研究

学位論文内容の要旨

本論文は、プログラムを適切に記述し、正当で高速な計算を行う枠組みを目指して行われた研究であり、論理型言語の拡張に関する研究と、論理型計算モデルから等価変換計算モデルへの発展に関する研究の2つの主要な部分から構成されている。前者では、正当な計算を議論できる枠組みとして論理型計算モデルを出発点とし、論理型言語の表現力を向上させるために豊富なデータ構造を使って計算する方法を提案し、後者では、前者の研究の過程で分かってきた論理型計算モデルの限界を打破するものとして提案された等価変換計算モデルと既存の拡張論理型言語との関係に関する理論について提案している。

論理型言語の拡張の研究では、情報付き変数と呼ばれる新しい機構を導入した知識表現言語 UL/α を提案している。情報付き変数とは変数と情報のペアであり、情報を自由に変えることによって様々なデータ構造を表現することが可能である。 UL/α では情報付き変数を使った計算を行うために情報付き変数同士の単一化をユーザが定義する機構を備えている。本論文では、情報付き変数の応用例を幾つか示し、その有用性について議論しているが、特に、情報付き変数によって実現される関数オブジェクトについて、Miranda など遅延評価機構を備えた関数型言語との比較を行い、関数オブジェクトの単一化の過程が関数型言語の遅延評価の過程と良く一致していることを明らかにした。

また、本論文では、 UL/α のコンパイラおよび仮想マシンの実装方法について述べている。 UL/α は、動作の観点からは、論理型言語 Prolog に情報付き変数を追加したものと考えられるため、コンパイラと仮想マシンは、Prolog のコンパイラおよび仮想マシンを拡張する形で実装されている。Prolog と UL/α の主要な違いは、(1) 情報付き変数同士の単一化をユーザが定義できる、(2) 情報付き変数同士の単一化が複数回成功する(複数の単一化子が存在する)可能性がある、(3) 情報付き変数の情報が何度も書き換えられる、であり、これらの違いをコンパイラにおける前処理の追加と仮想マシン命令の追加によって克服している。 UL/α のコンパイラは UL/α 自身によって、仮想マシンは C 言語によって実装されており、幾つかのベンチマークの結果から一般的な Prolog コンパイラおよび仮想マシンと遜色ない性能であることを確認している。さらに、情報付き変数を適切に利用することで、プログラムの計算量のオーダーを下げるのが可能になり、より高速な計算が達成できることも確認している。これは、適切なデータ構造を利用してプログラムを記述することが、プログラムの高速な実行にとって重要であることの実例である。

さらに、本論文では、 UL/α を基礎付ける宣言的プログラムの理論と UL/α との関係について述べている。宣言的プログラムの理論では、特殊化システムと呼ばれる公理系によって規定される抽

象化アトムを用いて確定節を定義し、確定節の集合としてプログラムが定義される。情報付き変数を使用した UL/α プログラムが宣言的プログラムの理論とどのように対応付けられ、プログラムとしてどのような意味が定義されるのかについて述べている。

等価変換計算モデルへの発展に関する研究では、拡張論理型言語である Constraint Handling Rules(CHR) と等価変換計算モデルとの関係に関する理論を提案している。CHR は、制約論理型言語の制約解消を記述するために開発されたプログラミング言語である。CHR におけるプログラムとは、制約を変換するルール (CHR ルール) の集合であり、CHR ルールにより行われる計算の正当性は、計算状態に対応付けられた論理式の等価性によって保証される。一方、等価変換計算モデルでは、論理式の等価性ではなく宣言的意味の等価性によって、計算の正当性を保証するという違いがある。

本論文では、(1) 全ての CHR ルールを等価変換ルールに対応付ける手法を確立し、(2) 対応付けられた等価変換ルールが等価変換計算モデルの観点から正当であることを証明している。さらに、(3) 等価変換計算モデルでは正当な等価変換ルールが、対応する CHR ルールでは正当でない場合があることを指摘している。(3) は、正当な計算として扱える範囲に関して、等価変換計算モデルの方が Constraint Handling Rules よりも広いことを意味している。これは、CHR ルールによる計算の正当性が論理式の等価性に基づいて保証されていることに起因する。論理式として扱うことの出来ない手続き的な操作を含む CHR ルールが引き起こす計算の正当性を Constraint Handling Rules の理論では保証することが出来ない。一方、等価変換計算モデルでは、変換前後の記述の宣言的意味が同じであれば、等価変換ルールに手続き的な操作が含まれていても問題ない。

以上をまとめると、本論文では、プログラムを適切に記述し、正当で高速な計算を行う枠組みを目指し、まず、論理型計算モデルの枠組みの中でデータ構造の拡張に伴って必要となる計算方法の拡張に関する研究を行い、その効果を確認した。その後、等価変換計算モデルと既存の拡張論理型言語との関係の理論を確立することによって、論理型計算モデルから等価変換計算モデルへの発展が正当な計算を行える範囲をさらに拡大することを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主査	教授	赤間	清
副査	教授	栗原	正仁
副査	教授	和田	充雄
副査	教授	大宮	学
副査	助教授	棟朝	雅晴

学位論文題名

論理型言語の拡張と等価変換計算モデルに関する 基礎的研究

人間の持つ知識を計算機に蓄積し、それを利用する知識情報処理の研究が 80 年代以降継続的に行われてきた。論理型計算モデルはそれらの基礎にある知識表現と計算を科学的に議論する主要な舞台を提供してきた。このような研究の重要性は、インターネットが世界を急速に変貌させ、セマンティック Web の研究が盛んに推進される現在ますます高まっている。本研究は知識表現と計算に関する基礎的な研究であり、表現力と計算力を向上させる方向に論理型計算モデルを拡大し、さらなる発展をもとめて等価変換計算モデルへ移行し表現力と計算力の最大化を目指すいくつかの試みの一翼を担った研究である。

論理型計算モデルの枠組みで表現力と計算力を向上させる研究では、特殊化システムと宣言的プログラムという概念が 90 年代前半に提案されている。これは当時盛んに研究されたさまざまな拡張論理型言語が扱うデータ構造を特殊化システムという抽象概念によって一般化し、さまざまな拡張論理型言語を宣言的プログラムとして統一的に理論化しようというものであった。宣言的プログラムの理論は、統一的な宣言的意味論を確立し、さらに手続き的意味論の理論化を推し進めた。本研究では、この理論的背景のもとに、宣言的プログラムを実働化する言語処理系を構築する技術を開発している。こうして作成された言語 UL/ α が通常のプログラミング言語と異なるところは、あらかじめ定められていないデータ構造に対応している点である。すなわちユーザは、問題領域をどのようなデータ構造で扱えばよいかを考え、最適なデータ構造を選択し、それに対する特殊化システムを用いて問題を宣言的プログラムとしてモデル化する。そのモデルに基づいて計算を行うためには、その特殊化システムに対応した効率的な計算が必要になる。本研究では、その特殊化システム上の単一化アルゴリズムをユーザが自ら記述できる枠組みを採用し、そのための仮想マシンやコンパイラ的设计と実装の技術を提案している。これらは、ユーザによる柔軟な対象表現を可能とする情報付き変数や、複数の単一化子を許容する新しい仮想マシンなどを基礎としている。UL/

α は、データ構造を固定したさまざまな言語を包含した“メタ言語”ともみなすことができる。実際、本研究では、いろいろな言語による多様な計算を、UL/ α で明快に実現できることを示している。それは、継承階層などに関連する論理推論や関数型言語の遅延評価などを含んでいる。このようにしていろいろな言語の多様な計算を比較的容易にそして明快に実現し、1つの統一的な視点から見ることを可能にして、拡張論理型言語の研究の推進に貢献している。

UL/ α の研究は、論理型計算モデルの拡張をもたらすと同時に、その限界を浮かび上がらせる役割を果たした。特殊化システムが提供する広範な可能性を利用し尽くすだけの手続き的能力が論理型計算モデルのルール(論理式)にはないことが判明したのである。それを解決するために、新しい計算の概念が構想され、等価変換計算モデルの概念が90年代中ごろに提案された。ここでの大きな課題の1つは、論理型計算モデルから等価変換計算モデルへ移行することが真に有効であることを数学的に証明することであった。本研究では、論理型計算モデルの最も発展した形の1つであるCHRという言語を取り上げ、この言語のルール集合と等価変換ルール集合を包含関係に基づいて比較して、等価変換計算モデルの優越性を証明している。この包含関係の基礎には、論理型計算モデルの計算の正当性が論理式だけをルールとして扱うことによって得られているのに対して、等価変換モデルにおける計算の正当性はそれよりも一般的な、問題の答えの保存を達成するすべてのルールを利用可能としているという構造的な差異が見られる。これによって、論理型計算モデルから等価変換計算モデルへの移行が、正当性を容易に認定できるプログラムの範囲を拡大し、より効率的なプログラムの生成に貢献することを理論的に明らかにした。

これを要するに、著者は、論理型計算モデルと等価変換計算モデルについて、豊かな知識表現と正当で効率的な計算の実現に関する技術的ならびに理論的な新知見を得たものであり、知識情報処理の発展に貢献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。