

学 位 論 文 題 名

Design and Implementation of an Abstract Machine
and a Program Synthesis System Based
on the Equivalent Transformation Computation Model

(等価変換計算モデルに基づく抽象機械と
プログラム生成システムの設計と実装)

学位論文内容の要旨

本研究の目的は、問題を記述した形式仕様から正当で効率的なプログラムを自動生成することである。宣言的プログラミングの分野で同様の研究が行なわれているが、現実の問題に対して、正当性と計算効率を両立するのが困難な状況がしばしば起こっている。これらの問題を克服するために、本研究では、等価変換計算モデルという新しい計算モデルを採用する。この計算モデルは、仕様に対して、正当なプログラムの集合を求め、プログラムを独立した部品の集合として構築する。等価変換計算モデルでは、仕様とプログラムは明確に区別される。仕様は、完全に宣言的な記述であり、プログラムは等価変換ルールの集合である。よって、本研究におけるプログラム生成とは、仕様で定義された問題を解くための等価変換ルールの集合を生成することである。

本論文では、始めに、否定や集合表現を含む問題を厳密に記述し、正しく解くための理論を与えた。次に、それらの問題を計算機上で共通な枠組みで解くための機構である、ワールド機構を定義した。さらに、仕様から効率的な等価変換ルールを生成するための方法論を議論した。そして、等価変換ルールでワールド機構を処理するシステムのための抽象機械 ETAM を定義した。

始めに、広範囲の問題を厳密に記述するための参照制約と呼ばれる問題の表現方法を提案した。従来、等価変換による問題解決において仕様は確定節集合で記述されていたが、参照制約を導入することによって、否定や節集合を含む問題を記述できるようになる。また、否定の表現によって、仕様の記述に一階述語論理の表現を用いることが出来る。次に、否定や集合表現を含む問題に対して、正当な計算を行なうために必要な操作の集合を定義し、それらの操作が等価変換であることを証明した。論理プログラムの否定の計算方法である SLDNF-Resolution では解決困難な、変数を含む否定表現が表れる問題を参照制約の理論で解けることを示した。

さらに、参照制約を含む問題を共通の枠組みで解くための計算機構であるワールド機構を定義した。ワールド機構は、節集合とルール集合の集合の組であるワールドを単位とする。ワールド、節集合、そして、ルール集合は、それぞれがノードとなってグラフを作る。本論文では、等価変換の計算対象を従来の節集合から、ワールドのグラフへと一般化した。ワールドは節集合を高々 1 つ持つが、ルール集合を複数持つことが可能である。また、複数のワールドが 1 つのルール集

合を共有可能であるが、節集合は共有できない。ワールドは互いに参照したり、影響を与えたりしながら、全体の計算を行なう。ワールド間の相互作用の正当性を、参照制約の理論によって保証した。ルール集合の変更の正当性は、等価変換ルールの追加と削除が全体の変更に影響を与えないという性質から保証される。また、ワールド間で共有可能な変数を導入した。この共有変数によって、各ワールドの計算結果が伝播され、より高度な計算が可能になる。共有変数による副作用が起こることを防ぐために、未定定数の概念を導入し、変数が作られたワールドでは、その変数は通常の変数として扱い、他のワールドでは未定定数として扱うことによって、変数に対する操作に正当性を与えた。

また、仕様から効率的な等価変換ルールを生成するための方法論を与えた。このルール生成法は等価変換のメタ計算に理論的基礎を置く。メタ計算では、節を抽象化したメタ節を等価変換する。最初に与えるメタ節は、直感的には生成したいルールのパターンを表している。ルール生成では、メタ計算で得られる変換列中の異なる 2 つの節集合から新しい等価変換ルールを作る。一般にメタ計算は非決定的なので、変換列は始めに与えられたメタ節を根とする木構造になり、多数のルールの候補が得られる。ここで、全てのルールの候補が正当であることが、メタ計算の大きな特徴である。全ての候補が正当なので、そこから効率的なルールを探索する。本論文では、ルールの形から効率的なものを選択するための戦略を提案した。また、仕様からプログラムの生成、実行までを自動化する方法を提案した。この方法では、実計算部とメタ計算部がそれぞれ異なるワールドで互いに相互作用を及ぼしながら実行される。実計算部では、具体的な問題を解きながら必要なルールを発見して、メタ計算部にそのルールの生成を要求する。メタ計算部は要求を満たす効率化されたルールを生成して、実計算部に追加する。このことを実計算が終了するまで繰り返す。結果として得られる等価変換ルールの集合は、実計算部で計算した問題を含む、より一般的な問題に対応する効率化されたプログラムとなる。このプログラム生成方法の特徴は、複雑なプログラム生成の問題を部品を一つ一つ生成して集積するという問題に分解可能なことである。このことによって、他の研究分野のプログラム合成やプログラム変換と比較して、プログラム生成のための計算コストを大きく削減できる。

そして、等価変換計算モデルに基づき、ワールド機構を処理するための独自の抽象機械 ETAM を定義した。ETAM はプログラムのワールド機構の計算の効率的な実行だけではなく、プログラム生成を目的として設計されていることが大きな特徴である。等価変換モデルでのルール生成では、システムを実際に実行しながら必要なルールを発見し、生成してシステムに追加する。このため、ETAM は動的なプログラムの修正に対応できる設計を行なった。ETAM の定義は、仮想メモリへのオブジェクトのマッピング方法、各オブジェクトの操作方法の定義、動的なプログラムの仮想メモリへの格納法、そして、抽象機械命令の定義などからなる。また、ETAM を基にした処理系として ETI を作成した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	赤間	清
副査	教授	嘉数	侑昇
副査	教授	大内	東
副査	教授	和田	充雄
副査	教授	大森	隆司

学位論文題名

Design and Implementation of an Abstract Machine and a Program Synthesis System Based on the Equivalent Transformation Computation Model

(等価変換計算モデルに基づく抽象機械と
プログラム生成システムの設計と実装)

問題が与えられたとき、それを正確にしかも高速に解くプログラムをどのように作成するか、そして、そのプログラムが指定する計算をいかに高速に実現するかは、問題を計算機で解く上で、最も基本的で重要な技術の1つであろう。特に正当性の系統的な保証の問題を解決するために、現実の計算機に直結した手続き型の計算モデルではなく、書き換えや論理などに基づく新しい計算モデルと、それに基づく新しいプログラムの概念が提案されてきた。またそのプログラムの高速な実行を実現するために適した仮想的な計算機(抽象機械)が設計され、現実の計算機の上に実装されてきた。

しかしこれまでの研究は、適用できる問題クラスの広さや、計算の柔軟性や効率性において充分とはいえない。本論文の考えでは、その基本的な原因は、これまでに採用されてきた宣言型計算モデルそのものにある。すなわち、宣言型計算モデルの基本原理は、問題の宣言的記述をそのままプログラムと見なすものであるから、必然的にプログラムをある狭い範囲に限定してしまい、結果として十分な柔軟性と高速性が達成できない場合が少なくない。

本論文の目的は、従来の研究の持つ上記の限界の克服を目指して、新しい計算モデルである等価変換計算モデルを基礎として、プログラム生成とプログラム実行の理論と技術の体系を構築することである。等価変換モデルでは、問題記述は純粹に宣言的な記述であり、手続きであるプログラムと明確に区別される。プログラムは問題を書き換える規則の集合である。規則が常に問題の答えを変えないとき、その規則は等価変換規則と呼ばれる。等価変換規則だけからなるプログラムは誤った答えを出すことはない。したがって、本論文でのプログラムの生成は、等価変換規則の生成に帰着されている。

本論文は6章から構成されており、その概要はつぎのとおりである。

第1章では、等価変換計算モデルに基づいて、問題記述、ルール生成システム、等価変換ルール、等価変換プログラミング言語ETI、抽象機械ETAM、等価変換による計算実行などからなる研究の全体像を説明している。

第2章では、等価変換による計算を正当化するための基礎理論を展開している。問題を表現するために使われる記述は、一般に、宣言的記述と呼ばれている。宣言的記述として一種の確定節集合が使われるが、確定節のボディには、アトム以外に、参照制約と呼ばれる表現を許している。これは、否定表現や、集合表現、さらには一階述語論理のすべての表現を利用可能にするためのものである。参照制約はアトムと異なり、引数に項だけでなく宣言的記述をとることができる。したがって宣言的記述は再帰構造をしており、宣言的記述中に別の宣言的記述を含みうる。個々の宣言的記述が表現する集合が定義され、その集合を保存して宣言的記述を変換するルールが導入されている。

第3章では、問題記述（宣言的記述）から等価変換ルールを自動的に生成するための基礎的な枠組みであるメタ計算が示され、それに基づいて、プログラムの自動生成システムが設計されている。メタ計算によって正当なルールを低コストで多数作り出すことができる。その中からあらかじめ定めた評価尺度を用いてルールを選び出し、それを集めることによってプログラムを作る。ルールの独立性により、得られたプログラムの正当性が保証される。

第4章では、等価変換による計算のための抽象機械である ETAM の設計が示されている。参照制約を含む問題を解くための計算機構であるワールド機構を提案し、確定節、ルール、ワールド、共有変数、ルールの優先度、などが相互作用して作り出す複雑な非決定的計算を正確に効率的に実現するシステムについて議論している。

第5章では、等価変換プログラミング言語 ETI の設計について述べている。プログラミング言語のレベルで、ルールやデータ構造やワールド機構の使い方が示され、実行例が与えられている。ETI は高い手続き表現力を持ち、非決定性と決定性のプログラムを記述できる。

第6章では、論文全体をまとめている。

本研究は、プログラム生成システムと等価変換抽象機械の設計と実装を核として、理論からシステム設計、システム構築に至る広範囲な課題を研究し、新しい計算パラダイム（等価変換パラダイム）の基礎の確立に貢献している。本研究の特徴は、一般的な計算原理と厳密な正当性の保証を背景とした、一般性と必然性の高いシステム設計である。

これを要するに本論文は、等価変換計算モデルという新しい計算モデルのもとで、問題の表現力を拡大し、プログラム生成システムとプログラミング言語、抽象機械の適切な設計原理を探索し、それに基づいてシステムを構築したものであり、プログラムの生成や実行に関する有益な知見を得ており、計算機工学及びソフトウェア工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。よって筆者は、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。