

学 位 論 文 題 名

Generation of Equivalent Transformation Rules via Logical Equivalence

(論理等価式を経由した等価変換ルールの生成に関する研究)

学位論文内容の要旨

ソフトウェアシステムが大規模化するにつれ、優れた信頼性を持つソフトウェア開発の必要性が高まっている。その際、良いアルゴリズムを探索することは効率的なプログラムを作るためにきわめて重要である。等価変換 (ET) 計算モデルに基づくプログラム生成の枠組みは、アルゴリズム探索を達成するための有望な枠組みである。そこでは、ET ルールの集合によってアルゴリズムを構築し、その集合からプログラム変換によって C 言語や Hw 記述言語などのプログラムを生成する。このとき、効率的なプログラムの生成に繋がる良い ET ルールを発見し、生成することが求められる。本論文では、仕様から ET ルールを生成するための新しい方法を提案し、その基盤となる理論を明らかにした。提案方法は、まず仕様から論理等価式を作成し、その論理等価式から ET ルールを生成する。

本論文は 8 章立てで構成されている。

1 章では、序論として研究の背景、研究目的、研究方法について述べている。主要な研究課題は、仕様から論理等価式をどう作るか、その論理等価式の正しさをどう保証するか、論理等価式から ET ルールをどう作るか、その ET ルールの正しさをどう保証するか、の 4 つである。

2 章では、ET 計算モデルにおける仕様、プログラムおよび計算について説明し、ET ルールとは何かを示している。ET 計算モデルにおいて仕様は、問題の背景知識と、質問の集合のペアであり、これらは確定節の集合によって記述されている。ET ルールは、節集合を宣言的な意味が等しい別の節集合に置き換える手続きを記述する。計算は、問題の背景知識に関して正当な ET ルールを使った質問節集合の変換であり、その変換は適用可能な ET ルールがある限り繰り返される。

3 章では、仕様から論理等価式を作成する方法を提案した。論理等価式はアトム集合同士の等価性を記述する論理式である。重要な論理等価式のクラスとして、アトム集合中の異なる 2 つの変数が等しくなる条件を記述する *Speq* クラス、述語の制約を満たさないアトムの条件を記述する *False* クラスを具体的に示し、それぞれの作成方法を提案した。これら 2 つのクラスは、ET ルールのクラスのひとつである *Speq* ルールや *False* ルールのクラスに対応している。*Speq* ルールは確定節の具体化を促進させ、*False* ルールは述語の制約を満たさないアトムを持つ節を取り除くため、これらを効果的に使うことで、より少ない変換回数で答えを求めることができ、効率的なプログラム生成に繋がる。さらに、ET ルールを用いて論理等価式の正しさを自動的に証明するための枠組みを提案した。簡単な論理等価式の正しさは基本的な ET ルールを使って自動的に証明でき、より複雑な論理等価式は基本的な ET ルールと得られる ET ルールを再帰的に使うことで自動的に証明できることを示した。

4 章では、一般的な論理等価式を定義し、論理等価式から ET ルールを生成する方法を提案した。

一般的な論理等価式は、ある前提条件の基でのアトム集合同士の等価性を記述する式である。前提条件を含む論理等価式を作成するとき、前提条件を作るための述語を発見することが要求される。この前提条件は複雑になるにつれて発見が難しくなり、その生成の難易度が高くなる。ETルールは、論理等価式を構成するアトム集合と前提条件から作られるルールの適用条件を用いて生成される。前提条件を含まない場合、ETルールは、単純に論理等価式を構成するアトム集合だけを用いて生成される。ルールの適用条件は、まず論理等価式の前条件を満たすアトム集合 S を決定し、次に入力されたアトム集合が S の要素のときに `true` を返す関数を作成する、そして最後にアトムを用いてその関数を記述することで作成される。

5章では、提案した生成方法によって正しいETルールが生成できることを証明した。正しいETルールとは、問題の背景知識に関して正しく等価変換を行うルールである。生成されたルールが節集合を別の節集合に等価に置き換えているならば、その生成されたルールはETルールである。本章の証明は、論理等価式が問題の背景知識に関して正しいときに、その論理等価式によって節集合同士の等価な関係が決まることの証明と、生成されたルールによる置き換えがこの等価な関係の一部であることの証明の2ステップからなる。

6章では、提案方法の有効性を示した。有効性の検証のために、ET言語を用いたプログラミング実習で学生が作成したETルールを対象にして生成の可能範囲を調査した。その結果、論理等価式を適切に与えることで、全406ルール中の305ルールのETルールが生成できることを確認した。提案方法は、膨大なETルールの空間の中からあらかじめ選択したクラスに属するETルールだけを探索することができ、帰納的な処理を用いて多様なETルールを作ることができるため、メタ計算を用いた等価変換の有限合成では生成することが困難なETルールを生成できることを確認した。その結果、提案方法によりETルール生成の可能範囲が拡大できることを示した。

7章では、プログラム生成システムに提案方法を組み込むための枠組みを検討した。そのシステムは、逐次的にETルールを生成し、そのETルールを蓄積する繰り返し作業によりアルゴリズムを構築する。ETルール生成の方式として、メタ計算の方法と論理等価式の方法を併用することを提案した。提案方法を組み込むことの有効性を示すために、従来では生成が困難である問題を使った実行例を示し、システムを使うことでこの問題を解決するプログラムを生成できることを確認した。その結果、本論文の成果によってより多くの問題に対するプログラムの生成が可能になることを示した。

8章では、結論として本論文で得られた成果についてまとめ、今後の研究課題を示している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	赤間	清
副査	教授	大宮	学
副査	教授	栗原	正仁
副査	教授	水田	正弘

学位論文題名

Generation of Equivalent Transformation Rules via Logical Equivalence

(論理等価式を経由した等価変換ルールの生成に関する研究)

プログラムは現代社会を構成する主要な基盤の1つであり、プログラムを作る技術は極めて重要である。しかし正しく高速なプログラムを構築するには高い技術が必要であり、大きく複雑なプログラムを作るには、大きな困難が伴う。そこで、問題の記述(仕様)から正しく高速なプログラムを自動的に生成するための研究が行われている。重要なアプローチの1つはプログラム変換の研究であり、仕様に近く正しいが遅いプログラムを順次変換して正しくしかも高速なプログラムを得ようとする。しかしこの方法では、必ずしも十分な高速化を達成できるとは限らない。プログラム空間上の探索は本質的に困難な課題であり、その結果、探索は限定された範囲内にとどまる傾向があるからである。

この欠点を克服する有力な方法は、プログラムを等価変換ルールの集合とみなし、プログラムの空間でよりよいプログラムを探索するのではなく、等価変換ルールの空間で、よりよい等価変換ルールを探索するものである。問題がプログラムの探索から等価変換ルールの探索に明快に分割され、探索のコストが大幅に削減できるからである。等価変換ルールからなるプログラムの部分正当性を厳密に保証できることが、等価変換ルールに分割すべきことの理由の1つである。等価変換ルールの多様性が、この方法の豊かなプログラム生成の可能性を示している。

この背景のもとで本研究は、仕様から等価変換ルールを生成するという課題に着目し、その新しい方法を提案し、その基盤となる理論を明らかにしている。また、提案方法を用いたプログラム生成実験システムを構築し、有用性を確かめている。提案方法の特徴は論理等価式という論理式を用いることであり、仕様から論理等価式を経由して等価変換ルールを生成する方法を研究している。

本論文は8章で構成されている。1章、2章で、研究の背景、研究目的、研究方法、ET計算モデル、プログラム生成について説明したあと、3章では、論理等価式のいろいろなクラスを定義している。一般的な論理等価式は、ある前提条件の基でのアトム集合同士の等価性を記述する式である。また、与えられた仕様から、それに関して正しい論理等価式を生成する方法を提案している。その基本的なやり方は、論理等価式の候補を生成し、その正当性を等価変換ルールを使って背理法で証明することである。低コストで有望な論理等価式を提案するために、SpeqクラスやFalseクラ

スなどの特別な論理等価式のクラスが提案され、そのクラスの論理等価式の候補を生成するアルゴリズムを与えている。

4 章では、論理等価式から ET ルールを生成する方法を提案している。論理等価式が前提条件を含まない場合、ET ルールは、単純に論理等価式を構成する 2 つのアトム集合を矢印で結んで生成される。前提条件を含む論理等価式から ET ルールを作成する場合、ET ルールは、論理等価式を構成する 2 つのアトム集合を矢印で結び、前提条件から作られるルールの適用条件を条件部において作成される。

5 章では、4 章で提案したルール生成方法によって、正しい ET ルールが生成できることを証明している。正しい ET ルールとは、問題を記述する確定節に関して常に正しい等価変換を与えるルールである。本章の証明は、(1) 論理等価式が問題を記述する確定節 (背景知識) に関して正しいときに、その論理等価式によって節集合同士の等価な関係が決まり、(2) 生成されるルールによる置き換えがこの等価関係に含まれることを示すことによってなされている。

6 章では、提案方法の有効性を調査によって示している。またメタ計算を用いた等価変換の有限合成という従来方法と比較して、提案方法の有用性を論じている。7 章では、提案方法をプログラム生成システムに組み込み、提案方法の有効性を確認している。最後に 8 章では、成果をまとめ、今後の課題を示している。

これを要するに、著者は、プログラム自動生成のために、仕様から論理等価式を経由して等価変換ルールを生成するための、技術的ならびに理論的な新知見を得たものであり、ソフトウェア工学と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 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。