

正当なプログラムの十分条件を基礎とした プログラミング教育の方法とその支援システムに関する研究

学位論文内容の要旨

プログラミング教育では、アルゴリズム構築の方法を習得させることが重要であるが、アルゴリズム構築に関する科学的基盤は確立されていない。そのため、現在行われているプログラミング教育の多くは、完成されたアルゴリズムに対するプログラムを特定の言語で記述させて、学習者がプログラミングを体得することを期待するにとどまっており、アルゴリズム構築の教育は十分な成功を収めてはいない。

この論文では、プログラムの正当性に関する新しい科学的知見を基礎として、カリキュラム（何を教えるべきか）と e-learning システム（どのような学習環境を提供すべきか）の両面から、アルゴリズムの構築を教育する新しいプログラミング教育の方法を構想し、教育実践と検証を行った結果を報告している。

本研究では、プログラミングを「仕様に関して正当で高速なプログラムを作ること」と捉え、「仕様に関して正当なプログラムの十分条件」に関する定理を基盤とする新しいプログラミング教育の方法論を提案した。この定理によれば、プログラムの作成は、その構成要素である等価変換ルールの作成に帰着できるので、等価変換ルールの作成を繰り返し演習することを核とした教育方法論を展開した。これにより、個別のプログラミング言語に依存しない普遍的な構造（正当なアルゴリズムの持つ深層構造）の教育を目標とした。そして、この目標を効果的に達成するために、適切な教材の構造を設計し、そのもとで多くの教材を作成したり、学習進度の格差、時間・場所などの制約の解消といった学習環境の面からの教育効果も上げるために、e-learning システムの設計・実装を行ったりするなど、新しいプログラミング教育の方法論を総合的に検討した。

その内容は、次のようなことが達成された。

1. 科学的知見を基礎としたプログラミング教育を展開した。これは従来のプログラミング教育に見られるような手続きを基礎としたアプローチとは異なるものであり、「正当なプログラムの十分条件」を前提として提案されたものである。
2. 「アルゴリズムの発見・構築」を目標とし、それを等価変換ルールの作成・蓄積の繰り返しによって学習する方法を、ET 言語の導入により確立した。これは、「プログラム記述」を目標とする従来の方法とは異なるものであり、プログラミングの本質に迫り、

それを系統的かつ統一的な方法で習得できる。

3. プログラムの作成過程を適切に分解し、学習コンテンツの構造化とその多様性を実現した。これは、正当なプログラムを1つ1つのルールに分解でき、1つのルールもまた、いくつかの知識に分解できる。これらの分解物のすべてには、正当なプログラムの十分条件が関与しているため、様々なアプローチで学習しても本質を学ぶことになる。
4. 教師・学習者のニーズに応じた自由学習環境を提供し、自学のサポートや迅速かつ適切な評価を実現した。これは、コンポーネントベースでシステムを設計・実装し、システム構成に対する自由度の高さと、サブシステムの選択による構成の容易さを与えたためである。
5. システムの拡張や保守などを、正当なプログラムの変換によって、健全に行うための可能性を示した。これは、コンポーネント記述言語およびプログラム変換言語としても有用である ET 言語でシステムを実装し、Web ページ間の整合性の検証や、複雑なコードの生成などを可能にしている。

また、大学生を対象としたプログラミング演習を行い、本教育方法と e-learning システムの有効性について、実践場面からの評価を試みた。その結果、7割の学習者は、本教育方法により、正当なプログラムの作成方法を習得したことがわかった。そして、8割の学習者は、「学習支援」という点で本システムを評価しており、教育方法に応じた e-learning システムの有効性を確認できた。

このように、提案した科学的知見に基づいたプログラミング教育の方法により、正当なプログラムの作成といった普遍的な概念の教示や、適切な分解による効果的かつ多面的な学習コンテンツの提供および指導方法の展開を実現することができた。また、正当なプログラムの十分条件に基づき構築された ET 言語の実用可能性の1つを、教育を通じて見出し、ET 言語がプログラミング教育（アルゴリズム構築言語）や e-learning システム（コンポーネント記述言語、プログラム変換言語）などの分野に活用できることを示した。

本論文は全6章から構成される。

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。

2章では、正当なプログラムの十分条件の基礎と、ET プログラムの作成方法についてまとめた。ET プログラムの作成方法として3つの方法を例証し、科学的知見に基づいたプログラム作成の有効性について述べている。

3章では、正当なプログラムの十分条件および ET プログラム作成方法を前提とした、プログラミング教育の方法を提案した。ここでは、本教育方法の位置づけや適切な分解を行うための観点、分解によって得られた断片（学習コンテンツ）の教示方法および支援システムについて論じている。

4章では、自学環境と教育方法がもたらす自由学習環境を定義し、それを実現する e-learning システムの構築方法について論じている。そして、プログラミング教育のための支援システムを例示した。

5章では、大学生を対象としたプログラミング演習を行い、プログラム作成試験によるプログラムの評価および演習後に実施したアンケートの結果から、本教育方法およびe-learningシステムの有効性について、実践場面からの検討を試みている。

6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、今後の研究の方向性と課題を示している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	赤間	清
副査	教授	大内	東
副査	教授	大森	隆司
副査	教授	和田	充雄
副査	教授	水田	正弘

学位論文題名

正当なプログラムの十分条件を基礎とした

プログラミング教育の方法とその支援システムに関する研究

プログラミングの学習、特にアルゴリズムの構築の学習は、情報科学や工学の基礎の1つとしてたいへん重要であると認識されている。しかし、現在行われているプログラミング教育の多くは、完成されたアルゴリズムに対応するプログラム例を見せたり、真似して記述させたりしているうちに、学習者がプログラミング（アルゴリズムの構築方法）を自分で体得することを期待するレベルにとどまっている。現在のプログラミング教育は、アルゴリズム構築という観点から見ると、十分な成果を挙げているとは言いがたい。

プログラミング教育では、何をどのように教えればいいのか。現在のプログラミング教育の問題点は、アルゴリズムを作り出すための科学的な知見に基づいていないことにあるだろう。アルゴリズムを作り出すための普遍的で体系的な方法に基づいたプログラミング教育があるとしたら、それはいかに設計すべきだろうか。また、それを効果的に支援する学習教材や学習環境はどのようなものが必要だろうか。本論文で究明しようとした問題はこのようなものである。

プログラミングとは、仕様に照らして正しく、しかも高速なプログラムを作り出すことであると捉えることができる。したがって、「プログラムが仕様に関して正当であるための十分条件」が、プログラミングを科学的に捉えるための基礎となる。それは、「アルゴリズムを作り出すための普遍的で体系的な方法」の基礎として欠くべからざるものである。このような考察から、本論文では、プログラムの正当性の十分条件を一般的に提示している理論（等価変換に基づく計算理論）を採用し、それに基づくプログラム構築方法論を展開し、プログラミング教育の新しい方法論を提案している。

本論文は6章から構成されており、その概要は次のとおりである。

第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。すなわち、プログラムの正当性に関する新しい科学的知見を基礎として、カリキュラム（何を教えるべきか）とeラーニングシステム（どのような学習環境を提供すべきか）の両面か

ら、アルゴリズムの構築を習得させる新しいプログラミング教育の方法を構想し、教育実践と検証を行なうというものである。

第2章では、教育方法論を展開する前提となる、プログラミングの科学的知見について述べている。すなわち、等価変換ルールの集合としてのプログラムが仕様に関して正当であるための（非常に一般的な）十分条件に基づいて、等価変換ルールが持つ独立性を有効に生かしたプログラム（アルゴリズム）作成方法について検討している。

第3章では、正当なプログラムの十分条件に基づくプログラム作成方法を基礎として、新しいプログラミング教育の方法を提案している。その最も基本的な構造は、プログラムの作成という難しい課題を、プログラムの構成要素であるルールの作成に分解することである。これは学習者の負担を軽減するのに有効である。本論文では、教材に関しても、適切な分解を行い、再構成や更新、改善が行いやすく、学習者が学びやすい構造を設計し、実際に利用可能な多量の教材を作成している。

第4章では、本論文で提案する新しいプログラミング教育を効果的に支援するeラーニングシステムの構築方法について論じている。基本となる考えは、学習者が、自分のペースで、多彩な学習ができる環境（自由学習環境）である。このシステムは、プログラミング教育だけでなく、いろいろな他の学習科目にも使える汎用性を持つように工夫と改良がなされている。また、教師の工夫を取り込める柔軟性が目指されている。さらに、システムの保守、拡張における安全性を確保することについても工夫がなされている。

第5章では、提案したプログラミング教育の方法を、実際に大学生に対して適用し、その有効性を検討している。この教育では、第4章で述べたeラーニングシステムが利用され、その上で多数の教材（4択問題とプログラミング課題）が配信され、自動採点、結果表示がなされた。それらの教育実践は、学生のアンケート調査や課題の成績などを基礎として分析評価されている。

第6章では、本論文で得られた成果をまとめ、今後の研究の方向性と課題を示している。

これを要するに、著者は、プログラムの正当性に関する科学的知見を基礎として、何を教えるべきか（カリキュラム）とどのような学習環境を提供すべきか（eラーニングシステム）の両面から、アルゴリズムの構築を中心とする新しいプログラミング教育の方法を提案し、学習環境や教材を開発し、教育実践と検証を行っており、プログラミング教育に関する有益な知見を得ており、情報工学及び教育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。