

氏名	石井 大海
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博甲第 8930 号
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	Bidirectional Interplay between Mathematics and Computer Science: Safety and Extensibility in Computer Algebra and Haskell (数学と計算機科学の相互作用: 計算代数と Haskell における安全性と拡張性)

主査	筑波大学准教授	博士（理学）	照井 章
副査	筑波大学准教授	博士（数学）	塩谷 真弘
副査	筑波大学教授	理学博士	坪井 明人
副査	筑波大学准教授	理学博士	坂井 公

論 文 の 要 旨

本論文では、情報科学におけるプログラム言語の理論と、数学における圏論と計算機代数という、情報科学と数学の両分野にまたがる研究テーマに取り組んでおり、主に以下のテーマを扱っている。

1. 関数型プログラミング言語における副作用をもつ計算の効率化の改善: 圏論の手法を用いた、関数型プログラミング言語における新たな設計手法の提案。
2. 関数型プログラミング言語による数式処理システムの実装: 関数型プログラミング言語の特徴的な機能を活用し、安全性、正確性、拡張性を高めた数式処理システムの実装。

各テーマの内容および著者による研究成果は以下の通りである。

1) の研究テーマでは、純粋関数型言語における「副作用」を伴う機能の合成を取り上げている。一般の手続き型プログラム言語が、入力されたデータを操作する命令の列を主体にしてプログラムを組むのに対し、関数型プログラミング言語では、入力されたデータに対し、関数の適用を組み合わせることによってプログラムを組む特徴を持つが、特に「純粋関数型言語」では、プログラムの合成可能性や一貫性を向上させるため、関数を適用する対象以外の計算の状態を変化させない特徴を持つ(この特徴を「純粋性」という)。一方で、純粋関数型プログラミングの機能だけでは、計算機のプログラムに必要な入出力など、いわゆる「副作用を伴う」機能を達成できないので、数学の圏論の「モナド」を導入することで、副作用を伴う処理を記述する。

これまでは、複数の種類の副作用を合成する手法として、モナドの合成に「モナド変換子」が用いられて

いたが、合成した処理の扱いの手間や計算効率の面で課題があった。そこで、著者の参考論文の共著者による先行研究では、“Extensible Effects”と呼ばれるアイデアが提案された。先行研究では、副作用の合成を圏論における函手 (functor) の直和で表し、それが生成する自由モナドを考えることで、副作用を伴う処理を重ねた場合の処理の効率化を行っている。

本論文で提案された手法の中心的なアイデアは、先行研究における Extensible Effects のアイデアをさらに推し進める“More Extensible Effects”と呼ばれるものである。本論文の提案手法では、自由函手を用いることで函手の制約を外し、処理を行う関数を合成する際に、最初からすべての関数の合成を行わずに関数の列を保持したままにし、必要な処理が発生した段階で必要な関数の合成を行うことで、さらなる効率化を図っている。

2) の研究テーマでは、関数型プログラミング言語 Haskell を基盤に、計算機代数向けの領域特化型言語を実装している。この実装は以下の特徴を持つ。

1. 弱い「依存型」を採用し、自然数や、文字列のリストに依存する依存型を用いている。これにより、変数の個数が異なる多項式環を区別することで、たとえば1つのシステムの中で複数個の性質が異なる多項式環を扱う際、計算やプログラミングにおける安全性を担保している。また、多項式の変数に一意的なラベル(文字)を割り当てることで、たとえば異なる多項式環どうしでの式の割り当てや変換を効率化している。
2. Property-based Testing というテスト手法により、アルゴリズムの実装の正当性を検証する機構を導入している。これは、無作為な入力、あるいは増大順の入力を与え、システム内で組むプログラムが、指定した形式仕様を満たすかを検証する手法である。

本論文では、計算機代数のアルゴリズムの実装例として、多項式環のイデアルのグレブナー基底を計算する代表的なアルゴリズム(ヒルベルト級数を用いた項順序変換によるアルゴリズム、F4 アルゴリズム、F5 アルゴリズム)の実装例とベンチマーク結果を示し、上記の特徴により、安全性、正確性、拡張性を高めた数式処理システムの実装例を示している。

審 査 の 要 旨

[批評]

純粋関数型言語では、プログラムの合成可能性や一貫性が向上する利点がある一方、現実のソフトウェアの開発においては、副作用を伴う処理も必要不可欠である。その際、副作用を伴う処理が重なることもしばしばあり、副作用を伴う処理の合成の効率化は、純粋関数型言語の実用性を高める上で重要な課題の一つである。本論文の提案手法は、圏論の手法を用いた従来の手法を発展させることで、副作用を伴う処理の合成を効率化している。また、本論文の提案手法は、具体的な対象としてプログラミング言語 Haskell を対象としたが、同様の方法論を持つ他のプログラミング言語にも適用可能であることから、同種の純粋関数型言語に広く適用して効果を挙げることが期待される。

計算機代数のアルゴリズムの実装においては、伝統的に、アルゴリズムの効率化、およびそれらの効率的な実装が重要視されている。その一方で、実装されるアルゴリズムの正当性の検証や、実装によるエラ

一が起こりにくい数式処理システムの方法論についても、近年、注目が集まっているが、アルゴリズムの効率化に比べれば、それらは現状においてはやや地味な研究分野という見方もできよう。しかし、近年、ソフトウェア工学などの分野では、医療や航空宇宙産業など、ミッションクリティカルな用途に用いるソフトウェアに対し、実装の正当性を理論的に検証することで、ソフトウェアの安全性を保証する方法論が広まりつつあり、本論文における提案手法は、計算機代数の分野でそうした流れを推進する手法の一つとして注目される。

計算機代数における同様の手法は先行研究にも存在するが、本論文による実装は、既存の研究と比べて、アルゴリズムの効率の向上にも積極的に取り組んでいる点も注目に値する。実際、多変数多項式環におけるグレブナー基底の計算アルゴリズムに関しては、近年、大きな注目を集めている F5 アルゴリズムも実装しており、いくつかの例題では、グレブナー基底計算において優れた性能を持つ数式処理システムの一つである Singular に迫る効率を達成しており、効率的な実装の面でも注目すべき結果を出している。本論文の提案手法は、今後、数式処理システムのアルゴリズムの効率を保ちつつ、安全性、正確性、拡張性を高めるための実装の一手法として、発展が期待される。

以上、本論文による研究内容および成果は、関数型プログラミング言語を用いたソフトウェアの開発において、圏論の手法に基づく開発手法の改善、及び、関数型プログラミング言語を用いた数式処理システムの実装方法の改善という、数学と計算機科学の相互作用という点で優れているものと認められる。

〔最終試験結果〕

平成 31 年 2 月 13 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。