

## 審査結果の要旨

論文提出者氏名 森畑 明昌

これまでもさまざまな問題に対するアルゴリズムが考案されてきているが、近年はさらに多くのアルゴリズムが求められている。しかし、一般利用者が効率のよいアルゴリズムを考案して実現することはきわめて難しく、個々の問題のためのアルゴリズムを簡便に得るための方法論が求められている。このような課題に対して系統的にアルゴリズムを導出する手法であるプログラム演算の枠組みでアルゴリズムを構成することが考えられる。

本論文は “Calculational Approach to Automatic Algorithm Construction (演算手法によるアルゴリズムの自動構成に関する研究)” と題し、英文で書かれ全8章から成る。本論文では、動的計画法アルゴリズムと分割統治アルゴリズムとの2種類のアルゴリズム類型を対象に、具体的な問題解決のためのアルゴリズムを自動的に構成する手法を論じている。いずれに対しても、アルゴリズム導出のための演算規則を用意し、演算規則を活用するための領域向けの記述言語を設計し、それらに基づいてアルゴリズムを自動的に構成するシステムを実現している。

第1章 Introduction では、本研究の背景とプログラム演算(Program Calculation)の概要を述べ、アルゴリズムの自動的な構築と記述言語の関係を説明している。また、本論文の貢献と論文の構成を示した後で関連研究に触れている。

第2章 Basis of Program Calculation では基本的な記法と概念を説明している。多くはBirdとde Moorによる著書Algebra of Programmingに従うものとしている。

第3章 Calculational Laws for Combinatorial Optimization Problems では、組合せ最適化問題におけるアルゴリズムの導出について従来の研究成果を紹介し、アルゴリズムの自動構成の観点からそれらの特徴を述べている。種々の離散構造の上で効率のよいアルゴリズムを導出するには、Bird、de Moor、Curtisらによる「貪欲定理」があるが、この定理は一般的ではあるものの自動構成には適していないとしている。また、ある種の組合せ最適化問題に対して問題の仕様記述から効率的な解法を導出する Sasanoらによる最大マーク付け問題はアルゴリズムの自動導出には適しているが、グラフなど多くの興味深い問題を扱うことができないと述べている。このような考察から、これら両者の長所を兼ね備えたプログラム演算規則の構築が必要であると結論づけてい

る。

第4章 Compositional Approach to Monotonicity では、組合せ最適化問題に対する効率のよいアルゴリズムを構成するための枝刈りの順序関係に着目して論じている。具体的には、問題の特徴づける解候補の生成と許容解が満たすべき制約条件と最適化を行うための順序関係のそれぞれについて、アルゴリズム中の枝刈りを演算規則の形で定式化して「適切な場合分け」を特徴づけ、動的計画法アルゴリズムの導出のための演算規則を示している。これは最大マーク付け問題に関する既知の結果の一般化になっており、グラフを扱う問題に対しても適用できるもので、貪欲定理よりもはるかに自動化が容易であると主張している。ここで提案した演算規則の効果は最短路問題等に対する効率のよいアルゴリズムの導出を通して確認している。

第5章 A General Framework for Optimal Path Querying では、グラフ中の最適経路を求める問題に対する統一的な枠組みを提案している。ここでは、この領域向けに効率的アルゴリズムの自動構成に適した最適基準記述用言語を設計し、その言語による記述から最適解を求める最適経路問合せ器の実現法を与えている。この最適経路問合せアルゴリズムが効率のよい既知のもの一般化になっていることも示している。また、実現した最適経路問合せ器を用いた実験により、その実行時間が個別に人手で開発された既知のものに比べても数倍程度しか遅くないことを確認して、人手を介することなく自動的に実用的なプログラムを構成できることを実証している。

第6章 Calculational Laws for Parallel Programming では分割統治アルゴリズムの導出を扱っている。ここでは、同一の問題を解く特定の形の2種類の逐次的アルゴリズムの記述が存在するならば、その問題に対する分割統治アルゴリズムが存在するという、列に対する「第3準同型定理」に着目し、それを拡張して二分木の上の第3準同型定理を提案し、同時に分割統治アルゴリズムの導出法を与えている。この考え方の要点は、二分木上の経路に着目して列に対する定理を活用する点にある。さらに、部分木の個数が定数であるような木に対する第3準同型定理を与え、これが列に対する既知の結果の一般化となっていることを述べている。

第7章 Automatic Parallelization via the Third Homomorphism Theorem では、第6章で扱った第3準同型定理に基づいた分割統治アルゴリズムによる逐次プログラムの自動並列化手法を扱っている。ここでは、第3準同型定理と限定記号除去による自動証明を活用できるように設計した自動並列化のための領域向け言語を提案している。ここでは、自動並列化に際して、可能性のあるプログラム候補を生成してそこから適切なものを選択するという生成-検査に基づく手法を詳述し、それを実現して実験結果を報告して有効性を主張している。

第8章 Conclusion では本論文の成果を取りまとめている。各章で論じているように、本論文では、動的計画法によるアルゴリズムと分割統治アルゴリズムに関して、特定の領域向けに設計された言語による問題の記述から自動的にアルゴリズムを構成するための数理的な基盤構築を行ったと述べている。これらの成果をもとに、別のアルゴリズム類型をも対象とするとともに、他のアルゴリズム自動構成手法との連携や定理自動証明手法の積極的な利用などがあることをあげて、今後の研究への展望を与えている。

以上を要するに、本論文はアルゴリズムの自動構成に関して新たな方法論を理論的に展開するとともに、システムを実現してその手法の有効性を実証したもので、数理情報学、計算機科学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。