

論文の内容の要旨

論文題目 Calculational Approach to Automatic Algorithm Construction
 (運算手法によるアルゴリズムの自動構成に関する研究)

氏 名 森畑 明昌

近年、計算機は非常に身近なものとなった。計算機的能力は格段に向上し、また安価で手に入るようにもなった。そのため、最近では多くの人が自分のための計算機を各々の目的のために用いるようになってきている。しかし、計算機的能力を十分に活かすのはそれほど簡単なことではない。なぜなら、計算機が処理を行う速度はその処理手順に大きく依存するからである。良い手順を用いることができれば、計算機は非常に大きな問題すらもあっという間に処理することができる。しかし、処理手順が悪ければ、計算機は間違った結果を返したり、または処理を終えることができなかつたりする。すなわち、計算機を利用するためには良い手順を用意することが不可欠である。「良い手順」はアルゴリズムと呼ばれ、様々な問題に対して効率の良いアルゴリズムが考案されてきた。しかし、近年の計算機の普及はさらに多くのアルゴリズムが必要となる状況を生んでいる。なぜなら、各人が各々の問題のためのアルゴリズムを必要としているからである。しかし、特に専門家以外にとって、効率の良いアルゴリズムを考案することは非常に難しい。そのため、アルゴリズム構成のための良い方法論が求められている。

プログラム演算は効率の良いプログラムの系統的な構成のための手法のひとつである。プログラム演算では、効率の良いプログラムを以下の二段階で構成する。まず、効率を気にすることなく明らかに正しいプログラムを構成する。次に、得られたプログラムに対し演算規則と呼ばれるプログラム変換規則を繰り返し適用することでその効率を向上する。プログラム演算では、明らかに正しいプログラムから正しさの証明された変換規則を用いて効率の良いプログラムを導出するため、得られたプログラムの正しさはその構成から保証されるという長所がある。また、アルゴリズム類型を表現するプログラムを考えることにより、アルゴリズムの構成も同様に議論できる点も長所である。

本論文ではプログラム演算に基づいたアルゴリズムの自動構成に取り組む。効率の良いアルゴリズムの導出の際には、プログラムに陽には現れていない性質を発見・証明する必要があることが多いが、そのような性質を自動的に確認するのは一般に困難である。そのため、プログラム演算によるアルゴリズムの自動構成は十分には達成されていなかった。本論文では、プログラム変換器に対して適切な情報を与える手段を提供することでこの問題の解決を試みる。具体的にはまず、プログラム変換器に対して適切な情報を与えることのできる演算規則を用意する。さらに、それらの演算規則を有効活用するためのプログラミング言語を設計する。提案した演算規則及びプログラミング言語によって、効率の良いアルゴリズムのための情報はプログラム変換器にも確認できる形で提示され、自動的なアルゴリズム構成が達成される。

本論文では大きく分けて二種類のアルゴリズムタイプの自動構成に取り組む。ひとつは動的計画法アルゴリズムの構成であり、もうひとつは分割統治アルゴリズムの構成である。その両方について、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プログラミング言語を設計し、それらに基づいたアルゴリズムの自動構成器を構成する。

本論文の前半では組合せ最適化問題について議論する。組合せ最適化問題とは、離散的な解候補から最適なものを発見する問題であり、アルゴリズム構成における重要な問題のひとつである。組合せ最適化問題に対するプログラム演算によるアルゴリズム構成に関しては、Bird、de Moor、Curtisらによる「貪欲定理」に関するものが挙げられる。貪欲定理は組合せ最適化問題に対する効率の良いアルゴリズムの導出をプログラム演算の立場から定式化したものである。しかし、この定理はアルゴリズムの自動導出には不向きであった。自動的なアルゴリズム構成の立場からは、Sasanoらによる最大マーク付け問題の統一解法が挙げられる。これは、最大マーク付け問題と呼ばれるある種の組合せ最適化問題に対し、その効率的な解法を問題の仕様記述から自動的に導出するものである。しかし、この手法ではグラフを扱う問題など多くの興味深い問題を扱うことができなかった。

組合せ最適化問題に対する効率の良いアルゴリズムを構成するため、本論文では最適解を定める順序関係に着目する。特に、効率の良いアルゴリズムに必要な「適切な場合分け」を特徴づけることにより、動的計画法アルゴリズムの導出のための演算規則を提案する。この演算規則は最大マーク付け問題に関する既知の結果の一般化にあたる。かつ、この演算規則は広い範囲の問題を対象にしており、例えばグラフを扱う問題に対しても適用できる。提案した演算規則の効果は最短路問題及びその亜種に対する効率の良いアルゴリズムの導出を通して確認する。

さらに、前述の成果に基づき、最適経路問題に対する統一的な枠組みを提案する。最適経路問題とはグラフ中の最適な経路を求める問題である。本論文では最適経路問題のための領域特化言語を提案し、その言語で特定された最適経路を効率よく求める最適経路問合せ器の実現を示す。本論文で提案する領域特化言語は、再帰関数による最適経路の柔軟な記述が可能であるだけでなく、その記述から効率良い最適経路問合せアルゴリズムが自動的に得られるよう設計されている。さらに、提案する最適経路問合せアルゴリズムは既知の効率の良いいくつかのアルゴリズムの一般化になっている。最適経路問合せ器の実装及試験結果についても報告する。

本論文の後半では、分割統治アルゴリズムの導出について議論する。分割統治アルゴリズムは複数の演算器による並列実行に適しているため、近年特にその重要性が増している。

本論文では「第三準同型定理」と呼ばれる関数プログラミングの分野で知られている定理に着目する。第三準同型定理は、特定の形式の二種類の逐次プログラムによってある計算が記述できれば、分割統治アルゴリズムによってもその計算を行うことができる、ということを示している。この定理の特徴的な点は、二種類の逐次プログラムが分割統治アルゴリズム導出に十分な情報を保持していることを指摘している点にある。そのため、二種類の逐次プログラムからであれば、分割統治アルゴリズムの自動構成を比較的容易に達成できることが期待できる。

本論文ではまず、列から値を計算する問題について、第三準同型定理が確かに分割統治アルゴリズムを導出する際に効果的であることを確認する。次に、二分木の上での第三準同型定理を提案する。二分木に対する効率的な並列アルゴリズムの系統的な構成法としては、並列木縮約手法に基づいたものが知られていた。これをふまえ、並列木縮約手法と列上の第三準同型定理の関係を示し、二分木を扱う計算に対する第三準同型定理を提案する。手法の要点は木上の経路に着目することにより列の上での結果を活用する点にある。さらに、これらの結果を一般化し、子の数が高々定数の木に対する一般的な議論を行う。具体

的には、子の数が高々定数の木に対する並列木縮約アルゴリズムおよび第三準同型定理を与え、これらが列の上の既知の結果の一般化となっていることを確認する。

本論文ではさらに第三準同型定理に基づいた自動並列化手法を提案する。まず、自動並列化のための領域特化言語を設計する。この言語は第三準同型定理と定理自動証明手法を活用できるよう設計されている。この言語に基づき二種類の自動並列化手法について議論を行う。ひとつは自動逆化に基づく手法であり、もうひとつは生成検査に基づく手法である。本論文では特に後者の手法についてその実装と実験の結果を報告する。これらの手法は共に非自明なくつかの問題に対して現実的な時間で並列プログラムを生成する。また、これら二種類の手法の長短についても議論を行う。

本論文は運算手法に基づいたアルゴリズムの自動構成について、運算規則の構成から自動化まで、一貫した立場からの議論を行う試みである。今後の課題としては、別のアルゴリズム類型についての議論、他のアルゴリズム自動構成手法との連携、定理自動証明手法のより積極的な利用、などが挙げられる。