

審査結果の要旨

論文提出者氏名 江本 健斗

近年、計算機で処理する問題が巨大化し、また並列計算機環境の普及に伴い、並列プログラミングが科学技術計算にとって必須のものとなってきている。しかしながら、並列プログラミングでは、これまでの逐次プログラミングには必要なかったデータの配置や計算の分散・同期を考慮しなくてはならず、そのために、並列プログラミングには以下のような課題があるとされる。ひとつは、問題を並列計算機で効率的に処理するためのアルゴリズムの開発であり、もうひとつは、そのアルゴリズムを並列プログラムとして実装する方法である。これらの問題を解決するための枠組みのひとつとして、構造化並列プログラミング（スケルトン並列プログラミング）が提唱されている。この枠組みでは、スケルトンと呼ばれる並列計算の基本パターンを組み合わせることで並列プログラムを構成する。そこでは、並列処理のために考慮すべき並列性をスケルトンによって隠蔽して、アルゴリズムの開発や実装の難しさの解決を図ろうとしている。しかしながら、スケルトンの組合せによるアルゴリズムの記述は比較的容易ではあるが、一方で、そのままのアルゴリズムは非効率であるということが問題となっている。本論文は、この課題の解決に向けた手法を論じたものである。

本論文は、**Homomorphism-based Structured Parallel Programming**（準同形に基づいた構造化並列プログラミングに関する研究）と題し、英文で書かれ7章からなる。本論文では上述のような課題に対して、スケルトンの組合せの融合変換による最適化に注目し、効率のよいアルゴリズムを系統的に作成できるような構造化並列プログラミングの枠組みを提案している。

第1章 **Introduction**では、本論文の背景、目的、貢献、構成を述べている。並列アルゴリズムの開発と、そのアルゴリズムを並列プログラムとして実装する課題を解決する枠組みのひとつとして提唱されている構造化並列プログラミングを紹介し、そこに残されている課題を明示している。また、本章では、最大部分矩形和問題を例に、本論文の提案する準同形に基づいた構造化並列プログラミングの特徴を述べ、本論文で提案する手法を概観している。

第2章 **Algebras and Homomorphisms for Data Structures** では、操作対象のデータ構造を表現する代数系と準同形を導入し、その準同形を計算の基本パターン（スケルトン）とすることにより、単純な計算の組合せによって複雑な計算を記述する方法を述べている。また、それらの代数系に、並列性に内在する自由度を持たせることにより、準同形が並列スケルトンとして利用できることにも言及している。さらに、1次元配列（リスト）、2次元配列（行列）、および木に関する代数系と準同形を導入し、準同形の組合せによりさまざまな計算を記述できることを例示している。

第3章 **Homomorphism-based Design of Parallel Skeletons** では、前章で導入した準同形をもとに、並列計算の基本パターンとなる並列スケルトンを定義している。準同形の性質を受け継ぐスケルトンは、それ自体は単純な計算パターンであるが、それらの組合せによりさまざまな計算を表現できる。こうして、目的とする計算を並列スケルトンで記述すれば、愚直な並列プログラミングを終えたことになる。本章では、1次元配列、2次元配列、および木に関していくつかの並列スケルトンを導入している。また、さまざまな計算のスケルトンによる記述例を通して、スケルトンの組合せの記述力を示している。とくに、2次元配列上の並列スケルトンの設計と、そのスケルトンによるさまざまな並列計算の記述法を新たな貢献として主張している。

第4章 Fusion Optimizations of Parallel Skeletons では、本論文の提案するスケルトンの特徴である融合変換による最適化の基本理論を構築している。この融合変換による最適化により、愚直なアルゴリズムから効率的なアルゴリズムを得ることができると述べている。とくに、拡張された準同形の融合変換を用いることによって効率のよい並列アルゴリズムを系統的に導き出し、2次元配列上の準同形やスケルトンに関する融合最適化の構築と、それを用いた効率的な並列アルゴリズムの導出が本論文の貢献であるとしている。

第5章 Domain-specific Optimization for Skeleton Programs では、特定の問題クラスに特化した融合変換規則の構築と効率的なアルゴリズムを与える最適化定理の構築を示している。とくに、入力に関して興味のある部分構造の集まりを生成して、それらの中から条件を満たすものを選ぶという生成子に基づく(generator-based)解法を対象とし、部分構造の生成の仕方に基づく問題の整理と最適化理論を構築している。具体的には、2次元配列上の各種の最適化定理と、条件による選別付きの1次元配列上の計算に関する最適化理論の構築とを新たな成果として示している。

第6章 Implementation of Skeletons and Optimizations では、前章までに構築した理論を実装し、本論文の提案する構造化並列プログラミングの枠組みでプログラムを効率よく動かすことを実験によって示している。ここでは、2種類のスケルトンの実装と、それらを用いた実験結果をあげている。ひとつはC++上の関数としてスケルトンの実装を提供するライブラリであり、もうひとつは新しいプログラミング言語Fortressの上にスケルトンの枠組みを実装したライブラリである。とくに2次元配列上の各種スケルトンの実装と部分構造の生成の仕方に基づく自動最適化の実装が実用的な成果であるとしている。

第7章 Conclusion では、本論文の内容をまとめるとともに今後の展望を述べている。

本論文の主な貢献は、準同形に基づく融合変換に適した並列スケルトンの設計、スケルトンに関する融合規則による最適化の理論、およびスケルトンと最適化の実装による理論の効果の検証の3点に集約される。とくに、2次元配列を操作対象とするスケルトンの設計とそれらを用いたプログラミング、およびそのようにして開発されたプログラムの最適化は、これまでには解決されていなかった課題への有効な方法を与えたものである。さらに、本論文では、他のデータ構造に関する融合変換に基づく最適化を定理の形で与えて、より幅広い問題の最適化を可能にしている。また、これらの理論的な成果をもとに、愚直なプログラムから効率的なプログラムを得るための自動最適化の仕組みを提案して、これを実装したライブラリを構築して有効性を実証している。

以上を要するに、本論文は構造化並列プログラミングに関して新たな方法論を理論的に展開するとともに、実用的なライブラリの構築によってそ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。