

審査の結果の要旨

氏名 松崎 公紀

並列計算は大量のデータを効率良く処理するための重要な計算手法であり、そのための並列プログラムの開発手法が求められている。また、木構造は多くの実用的な計算に現れる重要なデータ構造であるが、その不規則・不均等な構造のために効率の良い並列プログラムを作成することは難しいとされており、このようなデータを対象とした並列プログラミングの方法論の確立が期待されている。これまでも、木構造を扱う効率の良い並列アルゴリズムの提案があるものの、実用的問題に対してそれを適用・実装することは非常に難しく、プログラムの開発も個別的になってしまっているのが現状である。このようなことから、規模の大きい木構造データを扱う並列プログラムを開発するにあたっては、明解なプログラムの仕様から効率の良い並列プログラムを得るための体系的なプログラミング手法、および、得られた並列プログラムを実行するためのライブラリの実現が望まれる。

本論文は、「Parallel Programming with Tree Skeletons (邦訳: 並列木スケルトンによる並列プログラミングの理論と実現に関する研究)」と題し、英文で書かれ、木構造の処理を対象とした並列スケルトン(並列木スケルトン)を用いた並列プログラミングの理論と実現に関して論じたものである。本論文の主な貢献は下記の4点である。

- (a) 構成的アルゴリズム論に基づいた並列木スケルトンの設計。
- (b) 体系的なスケルトン並列プログラミング手法の提案。
- (c) C++とMPIによる並列スケルトンライブラリ「SkeTo」の実現。
- (d) 木に対するスケルトン並列プログラミングの自明でない問題への適用。

本論文は下記に示す11章からなり、理論に関する貢献(a), (b)は第2章から第5章に、実現に関する貢献(c), (d)は第6章から第9章に示されている。

第1章(Introduction)では、本論文の背景、目的、貢献を要約するとともに、論文の構成を示している。

第2章 (Basis of Parallel Tree Computing on Binary Trees) では、まず二分木の上で定義される計算パターンである木上の準同型と tree contraction アルゴリズムを導入した後で、重要な基礎である二分木に対する並列木スケルトンの定義を示している。

第3章 (Tree Associativity and Ternary-Tree Representation) では、二分木上で並列計算およびその条件について、二分木の再帰的な分割を表現した三分木表現とその上で成立すべきある種の結合性 (tree associativity) を定式化している。特に、ここで定義される結合性は、効率良く並列に計算できるように演算が持つべき必要十分な性質であることを主張している。

第4章 (Rose-Tree Skeletons) では、木の内部ノードが任意数の部分木を持つ一般の木構造 (rose tree; 薔薇木) に対する並列木スケルトンを扱っている。薔薇木に対する並列木スケルトンは、二分木に対するものの自然な拡張として定義されており、また、それらの効率良い並列実装は二分木に対する並列木スケルトンの実装を用いて実現できることを示している。

第5章 (Theorems for Deriving Skeletal Parallel Programs) では、明解な仕様から効率の良いスケルトン並列プログラムを得るための系統的な手法を提案している。本手法は、3ステップから構成されている。まず、ユーザは (並列性を意識しない) 初期プログラムを再帰関数として与え、次にこの再帰関数に対して、diffusion 定理を適用して並列木スケルトンの組み合わせを得る。その際に、個々の並列木スケルトンを効率良く動作させるための条件の充足性を、それぞれの計算で使用される演算の代数的な性質から示すことになる。本章では、このような系統的な手法が実用的な並列プログラミングに有効であると主張している。

第6章 (Implementation of Binary-Tree Skeletons) では、分散メモリ環境で並列二分木スケルトンを効率良く実装するためのアルゴリズムを与えている。計算の局所性を高めるためプロセッサに分散された各部分の計算をループとスタックを利用して実現し、データの局所性と負荷分散を両立させるための木を分割する際のパラメータの値について議論している。さらに実験により、これらの工夫による並列木スケルトン実現の効率を確認している。

第7章 (SkeTo: Parallel Skeleton Library) では、並列スケルトンを C++ 言語のライブラリとして提供する SkeTo ライブラリを説明している。ライブラリの概要の他、並列スケルトンを実現する上でのコーディングテクニック、融合変換による最適化機構、

コード生成器などの詳細を示している。また、9種類の例題プログラムに対する実験結果も報告している。

第8章 (Parallelizing Maximum Marking Problems) では、動的計画法によって解くことのできる多くの最適化問題を含む「最大マーク付け問題 (Maximum Marking Problems)」に対し、並列木スケルトンを用いて効率良く並列に計算できることを示している。特に、すでに提案されている手法によって導出される逐次プログラムに対して、第5章で述べている手法を適用して、系統的に並列化できることを示している。

第9章 (Parallelizing XPath Queries) では、XML 文書処理で良く利用される XPath クエリを対象として、その並列化アルゴリズムを示している。ここでは、親子関係、兄弟関係、述語を含む XPath クエリを並列木スケルトンの組合せによって実現できることに着目し、その並列化を論じている。

第10章 (Related Work) では、本論文に関係の深い研究を5つの観点から取り上げ、本論文との関係・類似点・差異などを論じている。

第11章 (Conclusion) では、以上の内容を、木構造に対する並列プログラミングの理論と実現という2つの観点からまとめ、さらに、今後の展望を述べている。

以上を要するに、本論文は並列木スケルトンによる並列プログラミングに関してあらたな方法論を理論的に展開するとともに、実際のシステムを構築しその有効性を示したもので、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。