審 査 の 結 果 の 要 旨

氏　　名　岩崎　慎太郎

本論文は、「Exploring Lightweight User-level Threading Frameworks for Massive Fine-Grained Parallelism（細粒度並列プログラムを効率的に実行する軽量なスレッド処理系）」と題し、英文８章から構成される。

第１章は「Introduction（序論）」と題し、ハードウェアのコア並列性が増大し、マルチスレッディングがますます重要となる中で、動的で不均衡な細粒度並列プログラムを高効率に実行するための軽量なスレッド処理系が求められていることを説明し、本論文で提案する軽量ユーザーレベルスレッドを用いた細粒度並列処理系であるArgobotsとBOLTの研究の動機となっていることについて述べている。

第２章は「Background（背景知識）」と題され、本研究の前提である、ユーザーレベルスレッドを含む各種スレッド実装についてまとめている。さらに、アプリケーションプログラマが高効率と高生産を両立しながら容易に並列スレッドプログラミングを行うための抽象度の高い並列プログラミング言語の重要性について議論し、数ある並列プログラミング拡張の中で最も用いられているものの一つであるOpenMPについて、特に詳細に取り上げている。

第３章は「Argobots and Lightweight User-Level Threading Techniques（Argobotsおよび軽量ユーザーレベルスレッドの実装手法）」と題され、軽量ユーザーレベルスレッド処理系であるArgobotsを提案している。多様化するアプリケーションワークロードおよび計算機環境に対応するために、スケジューリングやスレッドプールの実装についてのインターフェイスを提供するなどの、高性能と高い拡張性を重視したArgobotsの設計について議論している。

さらなる高性能化のために、細粒度並列プログラムの実行において最も性能に影響を与える基礎的なマルチスレッド操作であるForkとJoinの性能を詳細に解析し、実行に際して関数呼び出しでは実現不能なコントロールフローが必要となるようなイベント（deviation）の有無が、ユーザーレベルスレッドの性能に大きく影響することを発見している。この知見を元に１１のユーザーレベルスレッド手法を実装し、その性能の違いについて、スケジューリング手法、deviationの頻度、および作成されるスレッドの数の尺度からマイクロベンチマークのデータを元に詳細な議論を行っている。

第４章は「BOLT: OpenMP over Argobots（BOLT：ArgobotsをベースとしたOpenMP処理系）」と題され、高い生産性から多くのアプリケーションで利用されているOpenMPとい

う並列プログラミング拡張について、前章で提案したArgobotsをベースとしたOpenMP処理系としてBOLTを提案し、その設計および実装について詳細な議論を行っている。OpenMP言語拡張および処理系は、OSによって提供される細粒度並列に不向きなスレッド実装を暗黙的な前提として設計されており、単にスレッド実装をArgobotsに入れ替えるだけでは高性能化が困難であることを述べている。そこで、ユーザーレベルスレッドに適したスレッド - コア割り当て、軽量なリソース管理手法、および細粒度・粗粒度に適応的に対応するスレッド間同期手法を提案し、これらを用いることで、既存のOpenMP処理系と比較し高い性能を発揮できることを述べている。

第５章は「Application Benchmarks（アプリケーションを用いた性能評価）」と題され、提案するArgobotsおよびBOLTについて、前２章で用いたマイクロベンチマークに加え、５つのアプリケーションで性能評価を行うことで、提案する処理系が実世界のアプリケーションの性能向上につながることを示している。

第６章は「Practicality of Argobots and BOLT（ArgobotsおよびBOLTの実用性について）」と題され、ソフトウェア機能の安定性やOpenMPの言語仕様の順守などの観点から、提案手法の実用性を議論している。

第７章は「Related Work（関連研究）」と題し、過去に提案された様々なユーザーレベルスレッド手法、および軽量スレッドライブラリを用いたOpenMP処理系を含む並列処理系の研究を紹介している。

第８章「Conclusions and Future Work（結論および今後の展望）」では、本論文の結論を述べるとともに、ArgobotsおよびBOLTの研究の今後の展望について議論している。

以上これを要するに、本論文は、細粒度マルチスレッドプログラミングの重要性が増す中で、ArgobotsおよびBOLTという二つの軽量なスレッド処理系を提案・開発し、その設計について詳しく議論を行い、得られた知見を元に最適化手法を提案・実装した上で、詳細な性能評価を行っており、電子情報学の発展に寄与するところが少なくない。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。