

## 審査の結果の要旨

氏 名 思 敏

近年、マルチコアプロセッサが広く普及しており、次世代高性能プロセッサの開発はコア数の増加およびSIMD 命令幅の増加と並列化により浮動小数点演算性能を向上する傾向にある。本論文はインテル社Xeon Phi や、IBM 社Blue Gene/Q などの汎用メニーコアを計算ノードに有する分散メモリ型並列コンピュータ上の並列プログラミング環境における通信機構高速化技術に関する研究成果をまとめている。メニーコアアーキテクチャのアプリケーション性能は大量の低動作周波数プロセッサコアを用いて並列化されることにより達成される。通信機構は単一スレッドで実装されており、メニーコアアーキテクチャの低動作周波数プロセッサを使った通信処理では高い通信性能を実現できない課題がある。また、コア数増加に対してメモリ容量はさほど増加していないために各計算ノードがローカルに計算する時間は短くなり、高い性能スケーラビリティを提供するためには通信遅延を短くする必要がある。これらの課題について本論文は以下3点の貢献をしている。

第1の貢献は、MPI通信ライブラリ内での並列化手法である。現在多くのアプリケーションでは、計算ノード内ではOpenMPを使用したスレッド並列化、計算ノード間ではMPI通信ライブラリを使用したプロセス並列化が主流である。MPI通信処理には一つのコアしか利用されず他のコアはアイドル状態となり計算資源が無駄になる。この問題に対してアイドル状態になったユーザアプリケーションが作成したスレッドを再利用して、ユーザ定義データ型通信、共有メモリ通信、ネットワークI/O 処理などのMPI 内部通信処理の並列化手法を提案した。本手法により、計算部分だけでなく通信を含めてアプリケーション全体がメニーコア資源を利用でき、全体性能が向上することを示した。

第2の貢献はMPI通信ライブラリにおける非同期通信処理手法である。MPI通信ライブラリはアプリケーションと通信処理の間で非同期に処理できるようにノンブロッキング通信のためのAPI (Application Programming Interface) が用意されている。しかし、実際にMPI通信処理とアプリケーション実行が非同期に実行されるかは実装依存である。既存の実装では、MPI関数を呼び出さない限りMPI通信処理が進まない、あるいは、アプリケーションプロセスおよびスレッドとは別に通信処理を司るユーザスレッドあるいはカーネルスレッドを起動させる手法をとっている。後者の場合、アプリケーションと通信スレッドのコア割り当てが最適にならず、また、通信処理のために割り込みが必要となり非効率となる。本論文では、メニーコアの特徴を活用してMPI 非同期通信処理専用プロセス(ゴーストプロセス)を実装し、最適な非同期通信処理手法を提案している。本手法では、ユーザが任意に計算プロセスに使うコア数と非同期通信を担当するゴーストプロセスに使うコア数を指定する。プロセス間のメモリ領域を共有することにより計

算プロセスの片方向通信データをゴーストプロセスに転送し、ゴーストプロセスが実際の片方向通信を非同期で処理する。従来のアプローチに比べて、本手法はスレッドスケジューリングやシステム割込みのオーバーヘッドを軽減するとともに、プロセスのコア配置に対して優れた柔軟性も達成する。さらに、MPI通信ライブラリのPMPI リダイレクト機能を利用した実装方式を採用することにより、あらゆるMPI 実装にも容易にサポートできる利点がある。この非同期手法を利用して、汎用量子化学計算パッケージNWChemの性能を大幅に向上させ、特に量子化学における「gold standard」と称される水分子+CCSD(T) 法に対して28.4 %の性能向上が達成されることを確認した。

第3の貢献は、上記手法の発展系研究として非同期通信をゴーストプロセスによって処理するかどうかを動的に決める手法を提案し評価しているところである。大規模並列計算アプリケーションは複数の「計算および通信」区間から構成され、計算量と通信量の比率は動的に変わる。静的な非同期通信の手法では、全ての片方向通信がゴーストプロセスで処理されてしまい、通信処理量と計算処理量の比率に従ってゴーストプロセスに委譲するかどうかを動的に変更できない。本論文の第三の貢献として、NWChem を実例としてアプリケーション各「計算および通信」区間の計算・通信性能特徴の変更を解析し、動的に非同期通信処理を自動適応できる機能を提案している。本提案をNWChemに適用した結果、アセン分子+CCSD(T)法に対して21.8 %の性能向上が達成されることを確認した。

このように本論文では、将来の分散メモリ型並列コンピュータの計算ノードアーキテクチャとして有望なメニーコアアーキテクチャ上で課題とされている通信処理に着目し、通信処理内部の並列化手法、アプリケーションと通信処理の非同期処理手法について問題点を考察し新しい手法を提案・実装・評価している。これら本研究の成果は、メニーコアアーキテクチャの計算資源を有効活用しスケーリングに必要な通信処理の低遅延化に多大な貢献を行っており、メニーコアアーキテクチャを基にしたスーパーコンピュータの発展に顕著な貢献をしたといえる。

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。