

審査の結果の要旨

氏名 宮本 大輔

本論文は、全脳スケールで集積されつつある詳細な実験的知見を元に神経回路シミュレーションを行う際に非常に大きな問題となる莫大な計算量について、現代そして次世代のスーパーコンピュータにおける複数の計算階層に対応した並列化手法を実装し、かつその計算特性について明らかにすることで、多様な細胞形態を有する 10,000 神経細胞規模のマルチコンパートメント Hodgkin-Huxley 型モデルのリアルタイムスケールでのシミュレーションを可能にしたものである。これは同時に、カイコガやショウジョウバエなどの神経細胞情報のデータベースを元にしたモデル構築から大規模並列シミュレーションまでを明示化された手法として構築したものである。本論文は、背景及び論文構成について述べた第 1 章～第 4 章、高速化・高並列化手法及びそれらを行うためのソフトウェアや計算環境について述べた第 5 章～第 10 章、高速化・高並列化結果について述べた第 11 章～第 13 章、本研究成果を元に全脳スケールの神経回路シミュレーションを行うための展望及び次世代スーパーコンピュータ環境への要求について考察した第 14 章から成り、全 14 章より構成される。

第 1 章、第 2 章は、「背景」、「大規模神経回路シミュレーション高速化の先行研究」であり、現在の国家規模で進められている全脳スケールの脳機能解明プロジェクトや、それらの成果の一部である大規模神経回路シミュレーションの現状と課題について述べている。

第 3 章、第 4 章は、「本研究の目的・構成」、「本研究におけるソフトウェア構成」であり、前述された課題について、本論文でどの様に取り組み、解決を行うかに関して概要を述べている。

第 5 章、第 6 章は、「神経細胞・シナプスモデル」、「計算環境」であり、本研究を行う上で基礎となる神経細胞やシナプスの数値計算モデルや、利用したス

ーパソコンコンピュータの性能諸元などの情報について整理し、記述されている。

第7章は、「開発を行ったソフトウェア」であり、本研究において、神経細胞データベースから大規模並列環境を構築し、シミュレーションを行うまでに必要となり、開発を行った各種ソフトウェア・フレームワークについて、一覧的に記述し、それぞれの基礎的な利用方法について記述している。

第8章は、「利用した既存のデータベース・ソフトウェア等」であり、本研究で利用した既存の神経細胞データベースや各種専用フォーマット、神経細胞形態抽出などのソフトウェア、並列化に関わる環境、ベンチマークソフトウェア、可視化ソフトウェア等について、記述している。

第9章は、「データベース情報を元にした神経回路モデルの構築」であり、第7章、第8章で述べられた各種ソフトウェア・フレームワークを用いて、大規模並列シミュレーションの対象となる、「カイコガ均一神経細胞モデル」、「カイコガ LAL-VPC 領域 86 細胞神経回路モデル」、「ショウジョウバエ大規模モデル」を構築する手法について述べている。

第10章は、「神経細胞・回路シミュレーションの高速化・高並列化手法」であり、汎用的に利用されている神経回路シミュレータである NEURON をベースに、マルチコンパートメント Hodgkin-Huxley 型モデルの計算特性解析の手法及び、高速化・高並列化の手法について述べている。本章では、計算特性解析として演算数・メモリアクセス量、高速化・高並列化手法として、キャッシュヒット率向上による SIMD 演算の活用・演算カーネルに対する OpenCL/PezyCL の適用・OpenMP によるスレッド並列化・細胞形態の分割による高速化・細胞形態の縮約による計算量の低減とロードバランシング改善の手法について述べている。これらは、現代及び次世代のスーパーコンピュータにおける様々な並列階層を反映したものである。

第11章は、「マルチコンパートメント Hodgkin-Huxley 型モデルの計算特性と高速化」であり、第10章で述べた手法を元に、マルチコンパートメント Hodgkin-Huxley 型モデルを高速化した際の結果について述べている。これにより京コンピュータにおいて、高速化前の約6倍の演算性能が達成されている。

第12章は、「均一な神経細胞による大規模シミュレーション」であり、第9章で述べた手法により構築された大規模神経回路モデルについて、第10章で

述べた細胞分割・細胞形態縮約といった手法を適用することで、均一な神経細胞形態からなる 10,000 神経細胞のモデルについて、リアルタイムでのシミュレーションを達成した結果について述べている。

第 13 章は、「不均一な神経細胞による大規模シミュレーション」であり、ショウジョウバエ神経細胞形態データベースを元に構築した、多様な神経細胞形態を持つ神経回路モデルについて、ロードバランシングへの影響と、細胞形態縮約手法を用いた改善について述べている。またさらに、細胞分割及びスレッド並列化により最終的に約 12,000 神経細胞より構成されるメスショウジョウバエモデルについて、リアルタイムの約 5 倍程度の時間でのシミュレーションを達成した結果についても述べ、本研究における最終的な成果として示している。

第 14 章は、「考察」であり、本論文における高速化・高並列化のまとめ、そしてそれを元にした全脳スケール神経回路シミュレーションへの展望、さらにはそれを実現可能にするための、将来のスーパーコンピュータ環境へのアプリケーション側からの要求について考察し、述べている。

本論文では、現代及び次世代のスーパーコンピュータにおける多様な並列階層に対応した高速化・高並列化手法を、マルチコンパートメント Hodgkin-Huxley 型モデルに関して新規に提案・実装を行っており、独自性が高いだけでなく技術的にも高度なものとなっている。また、データベースを元にモデル構築・シミュレーション・可視化を行う一連のソフトウェアについては、今回対象となっているカイコガ・ショウジョウバエに限らず、マウスやヒトなど、より高次の生物に対しても適用可能なものであり、将来的なヒト全脳シミュレーションに向けた基盤となることも期待されるものである。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。