

摘要

理解大脑信息加工机理是神经科学和人工智能共同关心的核心问题。生物大脑中有大量不同类型的神经元，这些神经元有着复杂的树突、树突棘、离子通道等结构。生物神经网络精细建模仿真是计算神经科学的重要组成部分，从离子通道、树突等微观尺度构建精细神经网络模型，是构建、操纵、分析、理解精细神经网络的基础工具，对系统神经科学研究和新一代人工智能发展都具有重要意义。然而精细仿真计算量大，极大限制了相关研究。

本文围绕生物神经网络精细建模仿真展开研究，提出了高效率的生物神经元和神经网络仿真方法以及学习方法，构建了高效的 GPU 仿真系统，重现了四种精细模型的生物实验现象，验证了精细建模仿真的生物精确性和系统计算高效性。主要创新点包括：

第一，提出一种基于树结构划分的高效并行仿真方法，将并行化仿真计算的问题建模为树划分问题，求解得到高效的并行过程。海因斯算法（Hines method）的计算过程是精细神经网络仿真的效率瓶颈。基于树结构划分的仿真方法从并行化海因斯算法角度，首先提出了正确性条件，用于判断海因斯算法并行化后的计算结果是否保持不变；并构建了计算代价函数，量化并行计算过程的效率。然后以最小化计算代价为目标、正确性条件为约束，将并行化问题建模为树结构划分问题，提出了启发式搜索算法进行求解，得到并行计算过程，并在 GPU 平台上进行优化。实验结果表明，所提方法相比主流仿真平台所使用的当前最高效 GPU 方法 cuHinesBatch 快4至7.5倍。

第二，提出一种树突层次化调度高效并行仿真方法，将并行化问题建模为更细粒度的组合优化问题，所提出的求解算法对于不同类型的神经元均可得到最优的并行过程。针对树结构划分方法并行粒度较粗所导致的线程闲置问题，树突层次化调度方法重新将并行化海因斯算法的问题建模为组合优化问题，提出基于贪心思想的调度算法进行求解，从理论上证明了求解算法可取得最优解。该方法进一步对计算过程面向 GPU 进行实现优化。实验结果表明，相比 cuHinesBatch 方法，树突层次化调度仿真方法可取得8至16倍加速比，相比于树结构划分方法，可取得1.5至3倍加速比。

第三，设计并实现了高效 GPU 仿真系统，以树突层次化调度方法为核心构建高效仿真引擎，并提出一种精细神经元学习方法以构建系统的学习模块，使系统同时支持高效生物物理仿真和学习仿真。系统首先针对 GPU 硬件并行优势对树突层次化调度方法进行集成，对整体仿真计算过程进行系统优化。然后以所提出的学习方法为基础构建基于 GPU 的学习模块。此外，系统实现了多 GPU 扩展以及对于仿真结果的可视

化功能。实验结果表明，对比当前最高效的 GPU 仿真平台 CoreNEURON，同样硬件下系统最高取得 17 倍加速比；所提出的学习方法可使精细神经网络完成手写数字识别任务，取得 97.04% 的准确率。

第四，使用高效仿真系统构建了四种精细模型，从神经元特性、网络特性、认知现象、学习功能四个方面验证了相关生物功能和实验现象，仿真效率的显著提升使得系统可实现现有其他平台无法完成的复杂任务。所构建模型包括树突棘尺度神经元模型、大规模纹状体网络模型、基于树突脉冲调控的突触可塑性模型以及基于精细网络的感知学习模型。分别验证了树突棘的信号整合特性、树突棘形态对于网络响应的影响、树突远端对于形成概念关联的作用以及生物神经元的感知学习功能。四种不同模型的功能验证表明了精细建模仿真对于神经科学以及类脑智能算法研究的作用。

关键词：大脑仿真，树突计算，神经形态计算，计算神经科学