

9-2-2020

GPU-Accelerated Simulation for Class of Multi-Agent Based Models

Zhao Yuan

1. Guangdong College of Industry & Commerce, Guangzhou 510510, China;;2. College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;;3. Guangdong Province Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China;;4. Key Laboratory of the Ministry of Land and Resources for Construction Land Transformation, Guangzhou 510642, China;

Jiachang Cheng

2. College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;;

Wang Lu

2. College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;;3. Guangdong Province Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China;;4. Key Laboratory of the Ministry of Land and Resources for Construction Land Transformation, Guangzhou 510642, China;

Yueming Hu

2. College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;;3. Guangdong Province Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China;;4. Key Laboratory of the Ministry of Land and Resources for Construction Land Transformation, Guangzhou 510642, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

GPU-Accelerated Simulation for Class of Multi-Agent Based Models

Abstract

Abstract: A parallel agent-based model of Von Thünen Model was proposed driven by graphics processing units (GPUs). The Von Thünen Model often involved the simulation of large numbers of geographically located individual decision-makers and a massive number of individual-level interactions. This simulation required substantial computational power. GPU-enabled computing resources provided a massively parallel processing platform based on a fine-grained shared memory paradigm. This massively parallel processing platform held considerable promise for meeting the computing requirement of agent-based models of spatial problems. *A dynamic relationship table rebuilding method was proposed to enable the use of GPUs for parallel agent-based modeling of the spatial Von Thünen Model. The key algorithm played an important role in best exploiting high-performance resources in GPUs for large-scale spatial simulation.* Experiments conducted to examine computing performance show that GPUs provide a computationally efficient alternative to traditional parallel computing architectures and substantially accelerate agent-based models in large-scale spatial space.

Keywords

spatial index grid, multi-agent system, parallel computation, GPU

Recommended Citation

Zhao Yuan, Cheng Jiachang, Wang Lu, Hu Yueming. GPU-Accelerated Simulation for Class of Multi-Agent Based Models[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 396-403.

基于 GPU 的一类地理多智能体系统并行仿真研究

赵元^{1,2,3,4}, 程家昌², 王璐^{2,3,4}, 胡月明^{2,3,4}

(1. 广东工贸职业技术学院, 广州市 510510; 2. 华南农业大学信息学院, 广州市 510642;

3. 国土资源部建设用地再开发重点实验室, 广州市 510642; 4. 广东省土地利用与整治重点实验室, 广州市 510642)

摘要: 针对当前地理多智能体建模存在着计算成本高、配置复杂、运算加速性能不高的问题, 以杜能模型为例, 提出基于 GPU 并行技术的一类地理多智能体仿真与优化方法。通过构建空间索引网格的方法, 动态维持智能体与空间索引网格的关联关系, 提高地理多智能体系统的仿真运行效率。研究表明: 采用 GPU 并行技术, 能够使多智能体系统的运行性能得到明显提升, 对开展大规模数据下的空间系统多智能体仿真建模具有重要意义。

关键词: 空间索引网格; 多智能体系统; 并行计算; GPU

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 02-0396-08

GPU-Accelerated Simulation for Class of Multi-Agent Based Models

Zhao Yuan^{1,2,3,4}, Cheng Jiachang², Wang Lu^{2,3,4}, Hu Yueming^{2,3,4}

(1. Guangdong College of Industry & Commerce, Guangzhou 510510, China;

2. College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

3. Guangdong Province Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China;

4. Key Laboratory of the Ministry of Land and Resources for Construction Land Transformation, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A parallel agent-based model of Von Thünen Model was proposed driven by graphics processing units (GPUs). The Von Thünen Model often involved the simulation of large numbers of geographically located individual decision-makers and a massive number of individual-level interactions. This simulation required substantial computational power. GPU-enabled computing resources provided a massively parallel processing platform based on a fine-grained shared memory paradigm. This massively parallel processing platform held considerable promise for meeting the computing requirement of agent-based models of spatial problems. A *dynamic relationship table rebuilding method* was proposed to enable the use of GPUs for parallel agent-based modeling of the spatial Von Thünen Model. The key algorithm played an important role in best exploiting high-performance resources in GPUs for large-scale spatial simulation. Experiments conducted to examine computing performance show that GPUs provide a computationally efficient alternative to traditional parallel computing architectures and substantially accelerate agent-based models in large-scale spatial space.

Keywords: spatial index grid; multi-agent system; parallel computation; GPU

引言

多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)是仿



作者简介: 赵元(1977-), 男, 江苏徐州, 博士, 研究方向为地理信息建模、地理仿真; 胡月明(通信作者 1964-), 男, 湖南益阳, 博士, 教授, 研究方向为地理信息系统、土地信息化。

收稿日期: 2014-01-24 修回日期: 2014-04-13

基金项目: 国家自然科学基金委-广东联合基金(U1301253)

布式人工智能的一个重要分支, 它的应用研究开始于 20 世纪 90 年代中期, 因其具有自主性、分布性、协调性、自组织能力、学习能力和推理能力, 能够自底向上的视角来刻画整个系统行为, 被认为是研究复杂系统的一个有效途径^[1]。国内外大批学者采用 MAS 开展复杂系统复杂行为过程模拟和仿真工作, 如应用到智能机器人、交通控制、城市扩张、

市场系统、军事作战系统等众多领域。

近年来,多智能体系统建模与地理空间过程逐渐结合展开应用,实现对地理空间上发生的自然、社会与经济过程的自底向上的建模。常见的地理多智能体系统模拟对象有城市多智能体仿真、土地利用模拟、地理区位问题、地价分布、公共场所防灾及流行病的空间传染行为模型等。如:Otter^[2]等通过多智能体系统模拟了区位模型,强调了多智能体系统对于从微观方面深刻了解土地利用的重要性;陶海燕^[3-4]等采取复制与扩散算法对杜能模型进行多智能体系统模拟,模拟的结果与杜能、藤田昌久等人的研究成果一致;张鸿辉^[5]等利用多智能体系统及其决策行为规则,构建基于多智能体系统的区域土地利用优化配置 RLUOA(Regional Land Use Optimization Allocation)模型;全泉等^[6]利用多智能体模型,在 GIS 手段的支持下构建城市扩展动态模型,并通过模型实现对城市土地利用状态进行分析。李玮等提出动态小世界网络仿真模型,研究 HIV 在地理社会网络上传播特性^[7]。崔喜红等建立基于多智能体的考虑个体特征和行为的公共场所人员疏散模型,研究公共场所人员疏散行为^[8-9]。这些模拟同一般的多智能体系统建模相比,具有明显的地理空间特征,能够直观的还原人们在现实中的获得的认知与感受。

但从上述这些文献研究案例来看,案例中设置的智能体个体数量较少,仿真规模偏小,与现实地理空间问题的要求差别较大。在实践中,应用 ABMS 方法研究大型复杂系统时,一方面可能定义的智能体数量众多,另一方面单个智能体可能本身就具有较强的行为逻辑,需要进行大量计算,这都会使得运行一次仿真耗费大量时间^[10]。大规模复杂智能体仿真应用,要以合理的仿真运行速度为首要的现实基础,仿真运行速度已成为其重要的制约因素。

要解决这个问题,采取并行计算模式可以说是必由之路。从 2000 年左右开始,出现了并行智能体仿真的相关研究^[11-16],早期主要以工作站集群等

并行技术进行研究。如:Clarke 利用消息传递模型在多核处理器及工作站集群上实现 SLEUTH 模型^[17];Tang 等提出层次并行多智能体建模(HPABM)方法,对 Stupid 模型进行子模型划分,使研究区域及参与的智能体数量规模大大增加,计算性能提升取得了较好效果^[18];Li X 等采用网格技术构建基于网格的地理模拟系统,运行大规模的地理模拟取得较好的应用^[19]。但这些解决方案普遍存在方案部署复杂、加速性能不高等问题,如 Gobron 等花费几百小时时间在高性能工作站上进行 CA 优化求解^[20]。寻求计算成本低、部署简单、加速性能好计算模式来缓解计算瓶颈十分必要。

从 2006 年开始,以 Nvidia 公司推出的基于 GPU 通用并行计算架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA),为实现桌面化高性能计算提供了一个有效的途径。相比 CPU 而言,基于 GPU 的并行运算可获得显著加速比,该技术在地震模拟、医学成像、分子动力学、金融预测等领域内的一些计算密集型应用上获得了巨大成功。引发了研究者对多智能体系统的并行化仿真新一轮研究兴趣,陆续出现了在 GPU 上进行离散事件仿真和基于智能体的仿真研究,并在最近几年成为多智能体并行仿真研究的一个热点。

虽然 GPU 具有强大的并行运算能力,但其硬件架构的单指令多数据流(Single Instruction Multiple Data, SIMD)性质,使得并不是所有类型的多智能体仿真应用都适合在其上运行。Perumalla 认为相比离散事件模拟模型,多智能体系统较为适合在 GPU 上运行,多数基于智能体的仿真采用的是基于时间片的调度方式,在每个时刻点扫描全体的智能体模型,执行相应的计算,比较适合映射到 GPU 的流式并行计算架构下,能够有效利用 GPU 的硬件计算资源^[21-22]。Roshan M. D'Souza 基于多智能体建模技术对肺结核形成过程进行了模拟,将模型数据组织成流,智能体的状态更新采用核函数,解决了基于原子比较及交换的智能体冲突处理等关键技术^[23-24]。David Strippgen 等利用 CUDA

技术实现基于多智能体的大规模交通仿真模拟,通过队列仿真,将数据结构转换为适合 GPU 运算的数据流与核函数,从而实现并行加速^[25]。

与一般多智能体系统有所不同的是,地理多智能体系统智能体的建模涉及到与环境、其他智能体之间的交互作用。Tang 等为了加快地理多智能体系统的运行效率,采用智能体分组、空间域分解、负载均衡及代理的策略,有效的提升多智能体系统的运行效率^[26]。本研究针对地理多智能体系统中智能体位置访问冲突问题,基于 GPU 并行技术,探讨在并行条件下构建多智能体模型实现机制,并以杜能模型为案例,提出一种构建空间索引网格的方法,动态维持智能体与空间索引网格的关联关系,使多智能体系统的运行性能得到明显提升,实现智能体系统的并行加速,对开展大规模数据下的地理仿真建模具有重要意义。

1 一类地理多智能体模型

为了实现本文目标,我们选择具有典型地理多智能体特征的著名模型-杜能模型(The Von Thünen Model)作为案例实行并行化仿真。

1.1 实验模型

杜能模型是以德国经济学家杜能的著作《孤立国同农业和国民经济的关系》为起点,经过后人的努力完善与发展形成的经典的模型,在城市经济学、农业经济学与经济地理学中具有重要地位。其数学表达形式为:在区域中有 n 种生产活动,记为 i 。每生产单位产品 i 使用 a_i 单位土地, a_i 为常数,与区位无关。假定产品在城市中价格为 p_i , 该产品的单位运费成本 t_i , 即产品市场与运输市场完全竞争,导致价格相同。经过数学推导,杜能模型可以表达为以下的数学模型:

距离城市中心 r 处的产品 i 的产量 $q_i(r)$ 为:

$$q_i(r) = 1 / a_i \quad (1)$$

生产者在区位 r 的单位土地上给出的最高价格(竞价租金)为:

$$\psi_i(r) \equiv (p_i - t_i r) / a_i \quad (2)$$

生产者在区位 r 的单位土地上从事生产活动 i 获得收益:

$$\begin{aligned} \pi_i(r) &= (p_i - t_i r) q_i(r) - \\ R(r) &\equiv \psi_i(r) - R(r) \end{aligned} \quad (3)$$

1.2 模型设置

用一个 $M \times N$ 的二维离散网格表示智能体所在地理空间,平面上的土地具有在均质性,空间上进行交易的市场位于地理空间的中心,其位置为 (i_0, j_0) , 空间中的每一个区位 (i, j) 与中心城市的距离可表示为 $\sqrt{(i - i_0)^2 + (j - j_0)^2}$ 。

假设智能体是理性的,是以自身利益最大化前提下选择区位以及所从事的生产活动。其决定在空间中的位置因素主要为土地地租和收益。由于土地市场是完全竞争,就是说地租将弥补区位差异,同时智能体总是希望获得更大的收益,确保自己在竞价中保持优势。但智能体仅感知有限的信息,在每个生产周期后,通过市场知道自己所在地块的收益,如果智能体对自身收益不满意,可以选择离开这个区位。

在整个模拟过程中,智能体可能采取的行为如下:(1)如果智能体第一次进入空间,将随机占有一块空地(地租=0),随机选择生产某种产品;(2)在每个生产周期后,如果该地块收益<0,智能体将离开该地块,该地块将变成空地;(3)如果一个地块有多人竞价,收益最高者将竞价成功。在整个空间上,地租随着周边地块的地租做动态调整。

仿真模型的参数设置为:假定每种农业产品类型的价格统一,假定运输费用仅和距离相关,地租的高低由竞价决定。在该模型中,每个智能体的位置为 (XPos, YPos), 智能体的生产类型为 productType, 产品的定价为 productPrice, 运输产品的运输单价为 transPric, 单位运输成本 t , 单位土地产品数量 productNumber, 智能体至市场的距离 d , 所在地区的地租为 R 。模型采用的具体参数如表 1 所示。

表 1 模型采用的参数与图例

	A	B	C	D	E	F	G
C	■	■	■	■	■	■	■
P	0.0	30	10.0	25.0	42.0	43.0	15.0
T	0.0	0.8	0.5	0.75	1.5	1.6	2.0
N	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

注: C 为颜色, P 为产品价格, T 交通成本, N 单位土地产品数量

2 地理多智能体系统并行化仿真方法

根据 GPU 具有的单指令多数据流特征, 通常采取“分而治之”的策略实现仿真的并行化。但智能体在空间上具有自由移动性, 进行模型仿真会出现智能体之间位置冲突情形, 很难实现静态实现对智能体进行标识划分。如图 1 中, 智能体在空间移动且出现位置冲突, 很难用静态表示的方法实现任务分解。

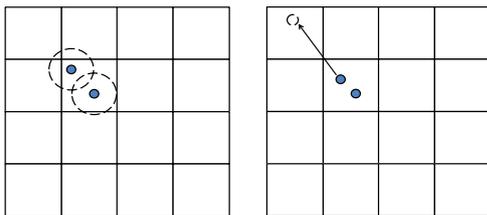


图 1 地理多智能体在空间上出现的位置索引冲突

要使智能体的编号能够建立唯一值, 防止出现重复标记, 需要采用动态方法处理。本文提出构建空间索引网格的方法, 动态维持智能体与地理空间的实时关系。

假设一定数量的智能体在地理空间中活动, 记智能体为 *Object*, 智能体所在地理空间记为 *Grid*。模型中的智能体标识为:

$$\text{Object: } \{ID_o, \text{Attribute}\} \quad (4)$$

其中: ID_o 为智能体的索引值。

地理空间是智能体行为发生的场所。为适合并行处理, 将地理空间范围离散化为二维格(Lattice)空间, 并为格空间建立索引, 形成索引网格。模型中的索引网格单元的标识为 *Grid*:

$$\text{Grid: } \{ID_s, \text{Attribute}\} \quad (5)$$

其中: ID_s 为网格单元的索引值。

在索引网格中, 每个单元可以进驻若干智能体个体, 在稳定状态下可以限制只有一个智能体才能存在。智能体与网格单元之间可以建立关联表:

$$ID_l \leftarrow (ID_o, ID_s) \quad (6)$$

其中: 智能体的索引号 ID_o , 空间索引网格的索引为 ID_s , 关联表的索引 ID_l 。

如图 2 所示, 左边的场景图中表明了网格单元中进驻了多个智能体, 其中一些单元存在多个智能体。按照单元格索引进行排序的情况, 则形成图 1 中右下的关联关系表; 按照智能体索引进行排序的情况, 则形成图 2 中右上的关联关系表。

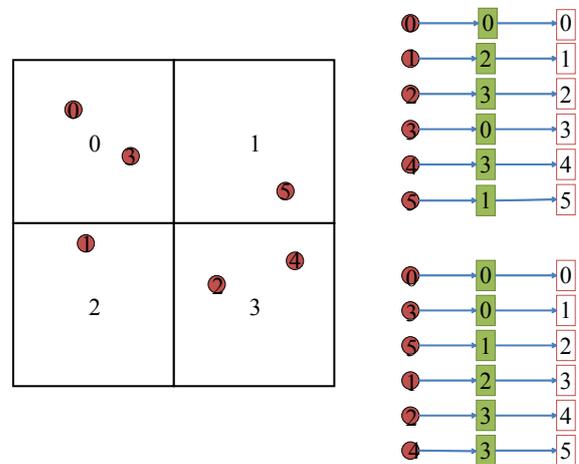


图 2 智能体索引, 网格索引建立关联关系示意图

该关联关系只能反映快照存在时的临时状况, 随着模型的运行, 智能体的位置处于不断变动中, 网格单元与智能体的关系也处于不断变化之中, 在每次完成一个场景的迭代过程之后, 则要更新智能体与网格单元之间的联系。根据并行系统的特征, 可以采用两种方式进行重建关联表实现模型并行化。

将智能体与线程建立映射关系, 在并行操作的情况下, 允许智能体线程同时无冲突的情况完成相同变量的修改, 但会导致并行执行效率降低。可以通过两组数据来记载关联记录: *gridCounters* 记载每个单元中智能体的个数。初始值为 0; *gridCells* 记载每个单元中的智能体, 每个网格具单元智能体数量是有限的。如图 3 所示, 每个单元格记载着智能体的数量与编号。在智能体向同一单元格进行请

求的情况下，每个智能体对应一个线程，通过原子操作自动增加其所在单元格中智能体计数器变量，同时把索引值记载在网格数组中。

0	1	2	3	4 ^①
5	6	2 ^② 7 ^④	8	9
10	11	12	13	14
15	1 ^① 16 ^⑤ 7 ^⑦	17	18 ^③	19
20	21	22 ^⑥	23	24

图 3 采用智能体映射线程进行的重建关系示意图

这种并行方式很难取得性能上的稳定提高，在大幅度出现的智能体位置冲突情况下，智能体线程对于全局内存的访问是随机(取决于智能体的位置)，将导致线程不能对内存进行合并访问。多个智能体在向相同位置写入数据时，由于冲突原因，导致性能大幅度降低。

0	1	2	3	4 ^①
5	6	2 ^② 7 ^④	8	9
10	11	12	13	14
15	1 ^① 16 ^⑤ 7 ^⑦	17	18 ^③	19
20	21	22 ^⑥	23	24

图 4 智能体位置导致索引表中 ID 乱序问题

此时，要避免访问冲突带来的问题，必须考虑智能体位置更新带来的关联表中的 ID 序号关系紊乱问题。可以在每次迭代时，通过重建智能体与网格的对应关系来解决 ID 乱序形成的访问冲突问题。具体步骤如下：

第 1 步，获取智能体在新位置的网格索引。根据每个智能体的新位置，计算出网格的索引。形成智能体与网格单元的新的关联表。根据图 4，可以计算的新的网格索引关联表。比如，序号为 0 的智能体，旧的网格索引为 4，计算新的索引为 3。

第 2 步骤，采用基于 GPU 的快速基排序算法^[27]，按照网格单元序号返回新的智能体索引排序表。在这个时候，智能体出现新旧两个标识。如表 2 所示。

表 2 网格单元与智能体的动态关联表

GID	IDn	IDo	GID	IDn	IDo
0	FFFFFFFF	FFFFFFFF	13	FFFFFFFF	FFFFFFFF
1	FFFFFFFF	FFFFFFFF	14	FFFFFFFF	FFFFFFFF
2	FFFFFFFF	FFFFFFFF	15	FFFFFFFF	FFFFFFFF
3	0	FFFFFFFF	16	FFFFFFFF	1, 5, 7
4	FFFFFFFF	0	17	6, 7	FFFFFFFF
5	FFFFFFFF	FFFFFFFF	18	FFFFFFFF	3
6	2	FFFFFFFF	19	FFFFFFFF	FFFFFFFF
7	FFFFFFFF	2, 4	20	FFFFFFFF	FFFFFFFF
8	4	FFFFFFFF	21	FFFFFFFF	FFFFFFFF
9	FFFFFFFF	FFFFFFFF	22	FFFFFFFF	6
10	FFFFFFFF	FFFFFFFF	23	FFFFFFFF	FFFFFFFF
11	1, 5	FFFFFFFF	24	FFFFFFFF	FFFFFFFF
12	FFFFFFFF	FFFFFFFF			

注: GID 网格索引 IDo 为智能体旧索引 IDn 为智能体新索引 (FFFFFFFF 表示空值)

第 3 步骤，更新智能体。由于智能体存在两个标识符，在进入新的迭代计算之前，智能体将根据旧标识符对应属性，转移到新的标识符号上。

整个关联表的重建，反映了在整个空间单元上，按照索引序号智能体的索引形成整体的序列。模型的算法基于网格单元进行组织，所以在每个线程运行时，就要知道自己所在的网格单中的智能体情况。通过采用序列移位的方式，查询序列中的智能体在单元中的分布，确定每个单元格中的智能体起始与终结序号。

在索引值列表中，可以通过比较每个智能体的单元索引与之前的单元索引值，如果单元索引出现不同，说明智能体处在新的单元位置。因此，可以根据这个方法发现智能体在相同单元的开始标记与结束标记。从图 5 中可以看出，对单元索引进行

移位, 形成右边序列, 之后同左边的序列比较, 如果出现相同的数值, 则为左边序列中重复子序列的终结值。因此, 可以确定出索引空间序号为 0 的单元, 智能体序号为 0 和 3; 索引空间序号为 1 的单元, 智能体序号为 5; 索引空间序号为 2 的单元, 智能体序号为 1; 索引空间序号为 3 的单元, 智能体序号为 2 和 4。

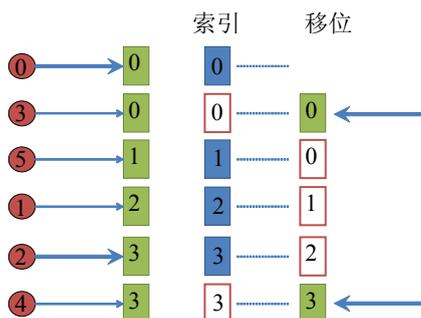


图 5 单元格中智能体的起始与终结序号确定

3 仿真结果与分析

整个实验场景大小设置为 512×512 范围的空间(总计包括 262 144 个单元), 智能体总数目设置为 200 000 个。

软硬件实验环境为单台 PC 环境, 内存配置容量为 4GB, CPU 为 Intel i3, 主频为 3.3 GHz。图形处理器为支持 CUDA 的 NVIDIA GTS 250 显卡。显卡拥有 16 个光栅单元, 128 个 CUDA 处理器核心, 搭配 256M 显存。操作系统环境为 Windows XP SP3, CUDA 的版本为 3.2。算法采用 C++ 与 CUDA SDK 编写。

模拟结果显示, 从初始状态开始, 场景由无序向有序的方向不断演化, 从城市中心向外围, 环的分布按照单位土地生产产品的单位距离花费从高到低的顺序(表 1), 呈现出青色、黄色、紫色、红色、蓝色的典型杜能圈层结构(图 6)。

通过比较串行算法与并行算法在类似的硬件环境下的运算时间, 可以看出并行算法在现有条件下对串行算法的性能有较大提升。表 3 为不同规模地理栅格单元及不同多智能体数目情况下串行算法与并行算法耗时比较。

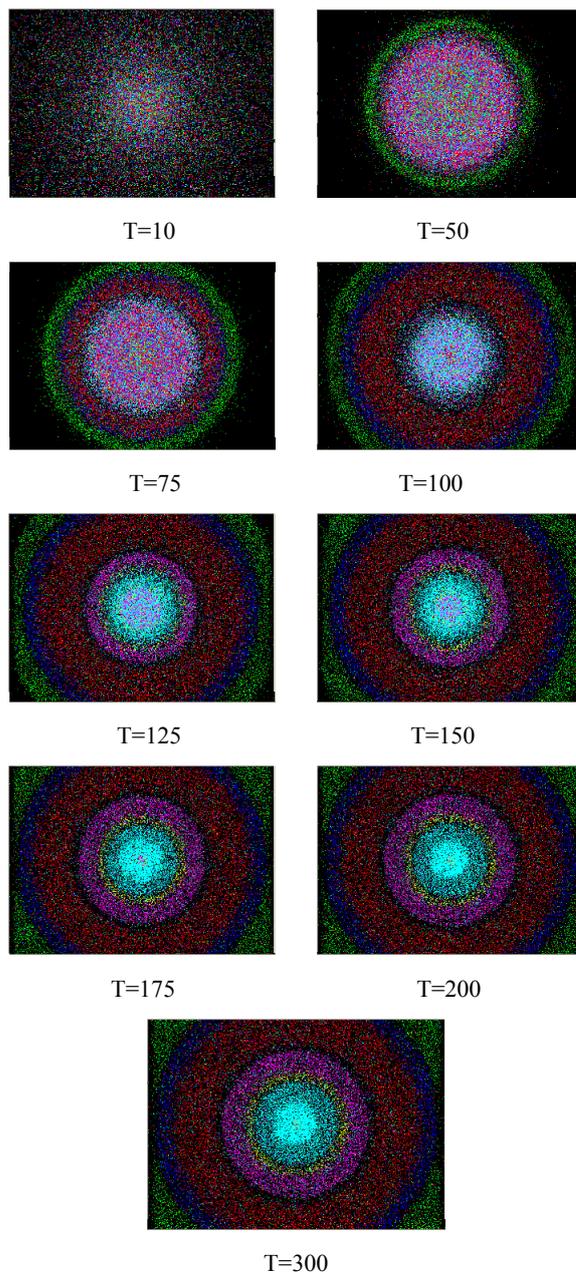


图 6 杜能圈层演化场景图

表 3 串行与并行算法耗时比较(迭代 100 次)(单位:秒)

栅格空间规模	串行算法			并行算法		
	多智能体数目规模			多智能体数目规模		
	5000	50000	200000	5000	50000	200000
128^2	14			1.5		
256^2	55	562		6.3	64.1	
512^2	221	2320	9396	271	278	1124

可以看出, 基于 GPU 并行仿真是高性能的。因为算法改善了访问冲突下的内存访问一致性, 同时也减少并行的分散性。

从图 7 可以发现, 在实验环境选定的 GPU 硬件条件下, 并行算法对串行的加速比, 可以达到 8 倍左右, 有效的提升了多智能体系统的运行性能。

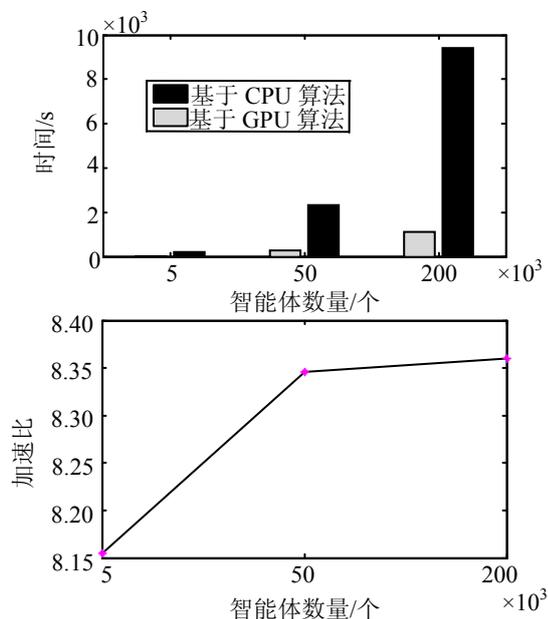


图 7 基于 GPU 与基于 CPU 的运行时间比较与加速比

4 结论

通过在 GPU 计算环境下进行多智能体系统并行建模, 可以解决规模较大的地理空间问题。串行计算受到处理器能力及内存限制, 很难发挥出高性能处理。需要采用合适的高性能计算方法来实现算法的加速。

本研究所述的并行多智能系统建模旨在通过 GPU 并行技术, 增强多智能体系统建模的计算性能。通过对串行多智能体系统模型的改造, 对地理空间实施空间索引网格划分, 建立智能体与空间索引网格的动态关联关系, 从而实现 GPU 对空间索引网格中的智能体进行并行计算。

研究表明, 基于 GPU 的并行加速, 建立空间索引格网, 对智能体与索引网格的对应关系进行实时动态调整, 能够改善并行条件的合并访问, 避免访问冲突, 适合于实时性要求高的较大规模地理多智能体系统的建设。未来可以考虑扩充到真实空间地理多智能体系统建模中, 增强地理模拟的实用

性。值得注意的是, 对于有复杂的智能体决策行为, 有着较强的交互能力的多智能体系统, 存在着严格的时间序列关系, 则不适合采用并行方法加速。

参考文献:

- [1] Macal C M, North M J. Agent-Based Modeling and Simulation [C]// Winter Simulation Conference, 2009. USA: WSC, 2009.
- [2] Otter H S, Van Der Veen A, De Vriend H J. ABLOOM: Location Behaviour, Spatial Patterns, and Agent-Based Modelling [J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation (S1460-7425), 2001, 4(4). (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/4/2.html>)
- [3] 陶海燕, 黎夏, 陈晓翔, 等. 基于多智能体的地理空间分异现象模拟——以城市居住空间演变为例 [J]. 地理学报, 2007, 62(6): 579-588.
- [4] 陶海燕, 潘茂林, 黎夏, 等. 城市居住空间分异仿真模型框架研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(21): 5086-5089.
- [5] 张鸿辉, 曾永年, 谭荣, 等. 多智能体区域土地利用优化配置模型及其应用 [J]. 地理学报, 2011, 66(7): 972-984.
- [6] 全泉, 田光进, 沙默泉. 基于多智能体与元胞自动机的上海城市扩展动态模拟 [J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2875-2887.
- [7] 李玮, 毕贵红, 张寿明. 基于Agent动态小世界网络的HIV同性传播仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(1): 216-222.
- [8] 崔喜红, 李强, 李学东, 等. 公共场所疏散引导人静态布局优化算法及其应用 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(22): 6285-6289.
- [9] 崔喜红, 李强, 陈晋, 等. 基于多智能体技术的公共场所人员疏散模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(4): 1006-1010.
- [10] 余文广, 王维平, 李群. 并行Agent仿真研究综述 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(2): 245-251.
- [11] Lees M, Logan B, Minson R, et al. Distributed Simulation of MAS [M]. Berlin, Germany: Springer, 2005: 25-36.
- [12] Uhrmacher A M, Gugler K. Distributed, parallel simulation of multiple, deliberative agents [C]. USA: IEEE, 2000.
- [13] 鄢超波, 赖华贵, 赵千川. 多智能体并行仿真框架 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(S1): 191-195.
- [14] Tang W, Bennett D A. Parallel Agent-Based Modeling of Spatial Opinion Diffusion Accelerated using Graphics Processing Units [J]. Ecological Modelling

- (S0304-3800), 2011, 222(19): 3605-3615.
- [15] Shook E, Wang S, Tang W. A Communication-Aware Framework for Parallel Spatially Explicit Agent-Based Models [J]. *International Journal of Geographical Information Science* (S1365-8816), 2013, 11(27): 2160-2181.
- [16] Tang W. Parallel Construction of Large Circular Cartograms using Graphics Processing Units [J]. *International Journal of Geographical Information Science* (S1365-8816), 2013, 11(27): 2182-2206.
- [17] Clarke K C. Geocomputation's Future at the Extremes: High Performance Computing and Nanoclients [J]. *Parallel Computing* (S0167-8191), 2003, 29(10): 1281-1295.
- [18] Tang W, Wang S. HPABM: A Hierarchical Parallel Simulation Framework for Spatially-explicit Agent-based Models [J]. *Transactions in GIS* (S1467-9671), 2009, 13(3): 315-333.
- [19] Li X, Zhang X, Yeh A, *et al.* Parallel Cellular Automata for Large-Scale Urban Simulation using Load-Balancing Techniques [J]. *International Journal of Geographical Information Science* (S1365-8816), 2010, 24(6): 803-820.
- [20] Gobron S, Devillard F, Heit B. Retina Simulation using Cellular Automata and GPU Programming [J]. *Machine Vision and Applications* (S0932-8092), 2007, 18(6): 331-342.
- [21] Perumalla K S. Discrete-Event Execution Alternatives on General Purpose Graphical Processing Units (GPGPUs) [C]. USA: IEEE Computer Society, 2006.
- [22] Perumalla K S, Aaby B G. Data Parallel Execution Challenges and Runtime Performance of Agent Simulations on Gpus [C]. USA: Society for Computer Simulation International, 2008.
- [23] D'Souza R M, Lysenko M, Marino S, *et al.* Data-Parallel Algorithms for Agent-Based Model Simulation of Tuberculosis on Graphics Processing Units [C]. USA: Society for Computer Simulation International, 2009.
- [24] Alberts S, Keenan M K, D Souza R M, *et al.* Data-Parallel Techniques for Simulating a Mega-Scale Agent-Based Model of Systemic Inflammatory Response Syndrome on Graphics Processing Units [J]. *Simulation* (S0037-5497), 2012, 88(8): 895-907.
- [25] Strippgen D, Nagel K. Using Common Graphics Hardware for Multi-Agent Traffic Simulation with CUDA [C]. Belgium: ICST, 2009.
- [26] Shook E, Wang S, Tang W. A Communication-Aware Framework for Parallel Spatially Explicit Agent-Based Models [J]. *International Journal of Geographical Information Science* (S1365-8816), 2013, 11(27): 2160-2181.
- [27] Satish N, Harris M, Garland M. Designing Efficient Sorting Algorithms for Manycore GPUs [C]. USA: IEEE Computer Society, 2009.

《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊（光盘版）电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心，以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源，首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》（CAJ-IJCR 年报），第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标，并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序，发布了“中国最具国际影响力学术期刊”（排序 TOP5%）和“中国国际影响力优秀学术期刊”（排序 TOP5-10%），在国内外学术界产生了较大反响。之后，2013 年版年报，将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前，2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成，《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续三年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊，走向世界，进入国际一流，指日可待！