

8-7-2020

Parallel Radiosity Based Light Distribution Simulation within Virtual Plant Canopy

Can Hou

National Engineering Research Centre of Geospatial Information Technology, Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou, 350002, China;

Liyu Tang

National Engineering Research Centre of Geospatial Information Technology, Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou, 350002, China;

Chongcheng Chen

National Engineering Research Centre of Geospatial Information Technology, Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou, 350002, China;

Yifei Yang

National Engineering Research Centre of Geospatial Information Technology, Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou, 350002, 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.

Parallel Radiosity Based Light Distribution Simulation within Virtual Plant Canopy

Abstract

Abstract: Owing to the computing-cost calculation of the form factor and the radiation energy in the traditional radiosity, a new method of parallel radiosity Based on CUDA (Compute Unified Device Architecture) was proposed to improve the performance of the implementation. Specifically, the implementation processes were as follows. The detailed 3D plant canopy model was loaded in the virtual scene. The solar altitude angle, solar azimuth and the radiation intensity were estimated according to the given time and the geographic location, and the light panel was generated afterwards, which was defined as radiation source on the basis of uniform triangular subdivision. To realize the parallel computation of light distribution within the virtual plant canopy, the 3D-discrete View Factor method was used to calculate the view factor and the corresponding radiation energy based on CUDA. The experimental results show that the presented algorithm can achieve a speed-up ratio about 20 with a considerable accuracy, compared to the traditional method running in the CPU.

Keywords

Radiosity, virtual plant, light distribution, form factor, CUDA

Recommended Citation

Hou Can, Tang Liyu, Chen Chongcheng, Yang Yifei. Parallel Radiosity Based Light Distribution Simulation within Virtual Plant Canopy[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2337-2343.

基于并行辐射度的虚拟植物冠层内光分布模拟

侯璨, 唐丽玉, 陈崇成, 杨怡斐

(福州大学地理空间信息技术国家地方联合工程研究中心, 福州大学, 福建省空间信息工程研究中心, 福州 350002)

摘要: 针对辐射度模型中形状因子计算量大, 辐射能量计算效率低等问题, 提出了基于 *CUDA*(Compute Unified Device Architecture) 的并行辐射度方法。该方法实现过程为: 在虚拟三维场景中, 加载植物精细模型; 根据给定时刻及地理位置估算太阳高度角、太阳方位角和辐射强度, 生成光源面板, 并进行均匀三角剖分形成辐射源; 进而在 *CUDA* 架构下, 利用三维离散视角因子方法并行地计算形状因子, 估算离散的光源和植物模型之间传递的辐射能量值。实验结果表明: 在保证计算精度的同时, 该算法比运行在 CPU 端的传统方法有 20 倍左右的加速比。

关键词: 辐射度; 虚拟植物; 光分布; 形状因子; *CUDA*

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 10-2337-08

Parallel Radiosity Based Light Distribution Simulation within Virtual Plant Canopy

Hou Can, Tang Liyu, Chen Chongcheng, Yang Yifei

(National Engineering Research Centre of Geospatial Information Technology, Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou, 350002, China)

Abstract: Owing to the computing-cost calculation of the form factor and the radiation energy in the traditional radiosity, a new method of parallel radiosity Based on *CUDA* (Compute Unified Device Architecture) was proposed to improve the performance of the implementation. Specifically, the implementation processes were as follows. The detailed 3D plant canopy model was loaded in the virtual scene. The solar altitude angle, solar azimuth and the radiation intensity were estimated according to the given time and the geographic location, and the light panel was generated afterwards, which was defined as radiation source on the basis of uniform triangular subdivision. To realize the parallel computation of light distribution within the virtual plant canopy, the 3D-discrete View Factor method was used to calculate the view factor and the corresponding radiation energy based on *CUDA*. The experimental results show that the presented algorithm can achieve a speed-up ratio about 20 with a considerable accuracy, compared to the traditional method running in the CPU.

Keywords: Radiosity; virtual plant; light distribution; form factor; *CUDA*

引言

光是植物光合作用主要的能量来源, 植物的光

截获效率与植物的蒸腾作用、光合作用密切相关^[1]。通过对植物冠层内光辐射分布的研究, 可以揭示冠层内各部位光分布的规律, 进而定量解释光对光合作用的贡献, 可为植物株型设计、种植优化配置及其生长预测提供新的依据, 为定量遥感反演提供参考^[2]。

近年来, 计算机三维建模与虚拟现实技术在虚



收稿日期: 2015-06-27 修回日期: 2015-07-25;
基金项目: 国家 863 计划课题(2012AA102002); 国家自然科学基金项目(41471334);
作者简介: 侯璨(1990-), 女, 湖南郴州人, 硕士, 研究方向为地理信息工程; 唐丽玉(1972-), 女, 福建莆田人, 博士, 副研究员, 研究方向为地学可视化与虚拟地理环境、虚拟植物。

拟植物技术中不断发展,为虚拟植物冠层内光分布模拟和研究提供了基础。辐射度(Radiosity)模型是虚拟植物冠层内的光辐射模拟采用的主要方法之一。温维亮等开发了基于辐射照度的作物冠层光分布计算系统,计算冠层内每个面元的光分布状态^[3]。辐射度模型以面元为计算单元,在开展虚拟植物的辐射模拟与计算前,需要将场景划分成大量的面元,并且精度要求越高,则面元个数越多,计算量相应也越大。尤其是辐射度模型中形状因子的计算,其时间复杂度为 $O((m+n)^2)$ (m 为场景中树模型的面元个数, n 为场景中光源的面元个数)。对于复杂的虚拟三维场景,如何有效减少整个场景的复杂度,提高辐射度模型的计算速度和效率是亟待解决的问题。国内外学者对此进行了积极有效的研究,提出了一些辐射度优化方法,主要包括基于层次结构的场景组织方式^[4]和基于 GPU(Graphic Processing Unit)的硬件加速方法。随着计算机硬件的发展,尤其是计算统一设备架构(CUDA)平台的推出,使得 GPU 具有更好的并行可编程性^[5],基于 CUDA 的辐射度加速方法逐渐成为研究热点。

针对虚拟植物冠层内光三维分布模拟和计算过程中,遮挡判断、形状因子和辐射能量计算复杂、运算效率低等问题,本文在 CUDA 架构下,并行解决光源与场景树面元的遮挡判断,进而计算形状因子,并求解场景中各个面元的辐射能量,在保证计算精度的同时,提高了计算效率。

1 辐射度模型

辐射度模型是基于热辐射工程中的能量传递和能量守恒理论,即一封闭环境中的能量经多次反射以后,最终达到一种平衡状态^[6]。辐射度是一种整体求解技术,可以用于模拟植物冠层内光的多次漫反射,且具有模拟精度高等优点,因而被广泛用于虚拟植物冠层的光辐射模拟中。

本文利用参数化建模软件 ParaTree^[7-8]来构建虚拟植物模型,生成的植物几何模型最小面元采用三角面元来表达,并且假设所建场景为理想环境,即所有三角面元均为 Lambert 漫反射面。光源的定

义借鉴文献[9]中最小光线投射平面求解方法,根据给定时刻及地理位置,估算太阳的高度角、方位角和辐射强度,以此生成光线投放面板,并将其均匀剖分成三角面元,从而形成光源。

在辐射度模型中,假设虚拟三维场景中的树模型共由 N 个三角面元组成,对于单个三角面元 i 的辐射度,即离开该面元的总的辐射通量密度(记作 B_i)等于该面元自身发射的辐射能量密度(记作 E_i)与该面元反射其他面元入射的辐射能量密度(记作 $B_j F_{ij}$)之和。对于面元 i 的辐射度模型,其数学表达式^[6]如下:

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N B_j F_{ij} \quad (\text{其中 } i=1,2,\dots,N)$$

式中: ρ_i 为第 i 个面元的反射系数; F_{ij} 为形状因子(form factor),也可称为视角因子(view factor),它表示离开面元 i 而到达面元 j 的能量占离开面元 i 的能量的百分比。

其中任意两个面元 i 和面元 j , 设其面积分别为 A_i 和 A_j , 两面元之间的形状因子为:

$$F_{ij} = F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \text{HID}(dA_i, dA_j) \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi \|r_{ij}\|^2} dA_j dA_i \quad (1)$$

式中 $\text{HID}(dA_i, dA_j)$ 为遮挡函数,当面元 i 和面元 j 之间存在遮挡时,其值为 0; 否则为 1; r_{ij} 为两面元之间的距离; θ_i 和 θ_j 分别为面元 i 和面元 j 的法向量与两面元连线之间的夹角。图 1 为形状因子的几何说明示意图,由图 1 可知,两个面元之间的形状因子 F_{ij} 只与它们之间的空间位置有关。

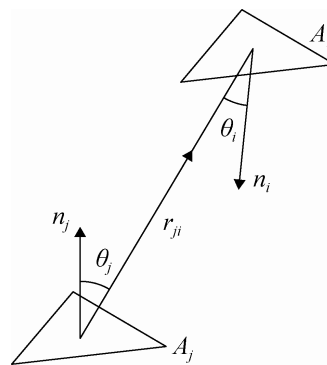


图 1 形状因子的几何说明示意图

两个面元间形状因子 F_{ij} 的求解是求解辐射度模型的关键, 实践表明, 形状因子的计算占辐射度计算量的 90% 以上^[10], 提高形状因子的计算效率和精度是辐射度模型的关键。经典的求解形状因子的算法有 Nusselt 算法^[11]、半立方体算法^[12]、三维离散视角因子方法^[13](3D-discrete view factor, 3D-DVF)等, 其中 3D-DVF 算法适用性广、并行性强。本文根据 3D-DVF 算法的思想, 将场景剖分成大量的三角面元, 根据各面元之间的空间位置关系计算形状因子。

在虚拟植物冠层的太阳直射光辐射模拟中, 光源面板被剖分为若干个大小相等、同质的三角面元, 是整个场景的光源即能量源; 三维树模型由大量三角面元组成, 是接受能量的面元。在此基本结构上形成了光源与树模型之间的能量传递关系。场景中各三角面元也均有各自的几何属性, 包括三角面元中心点坐标、三角面元面积、反射率、辐射强度等。

在以上场景中, 假设光源面板被剖分成 N 个三角面元, 在不遮挡的情况下, 对于每个树模型面元 i , 都接受来自光源面元 j 的能量辐射。面元 i 接受来自光源面元 j 的能量可表示为:

$$\Phi_i = B_j F_{ji} S_j$$

式中: Φ_i 为面元 i 接收来自光源辐射的辐射能量; S_j 为光源面元 j 的面积。

场景中, 光源面片的反射率 ρ_i 为 0, 因此面元 i 接受到所有光源面元的总辐射能量为:

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^N E_j F_{ji} S_j \quad (2)$$

以上是 DVF 算法计算植物模型各面元接受来自光源面板辐射强度的基本思想。本文基于 DVF 算法的辐射度模型模拟虚拟植物冠层光辐射, 其具体流程如下:

Step1. 在 ParaTree 中加载树模型, 构建并剖分太阳直射光源面板;

Step2. 给场景中每个面元赋予几何属性, 设定光源面元能量初始值;

Step3. 利用 3D-DVF 算法计算形状因子以及估算各树面元的辐射能量值;

Step4. 虚拟植物冠层直射光分布分析, 绘制三维场景。

假设 m 为场景中树模型的面元个数, n 为场景中光源面元的个数, DVF 算法计算形状因子以及各树面元获取的辐射能量值的伪代码如下:

```
for(i=0; i<m; i++)
```

```
    for(j=0; j<n; j++)
```

```
        判断光源面元与树面元之间是否存在遮挡
```

```
            利用公式(1)求解形状因子
```

```
            利用公式(2)求解各树面元增加的辐射能量值
```

```
                将树面元增加的辐射能量值累加
```

```
        end
```

```
    end
```

根据上述流程, 当场景中树模型的面元个数 m 很大时, 形状因子和辐射能量计算量随之增大, 且计算的双重循环中, 各个光源面元与单个树模型各面元的辐射计算具有高度的独立性, 因此基于 DVF 算法的辐射度模型适合并行计算。

2 CUDA 架构下辐射度模型的实现

CUDA 是 NVIDIA 公司于 2007 年发布的一种开发环境和软件体系, 它不需要借助图形学 API, 可以使用类 C 语言进行通用计算。它将 CPU 作为主机(Host), 负责逻辑性强的事务管理和串行计算, GPU 作为一个数据并行计算设备(Device), 专注于执行密集型大规模的处理任务。CUDA 在光线跟踪算法^[14]和辐射度算法^[15]中也得到了应用, 已成为提高算法效率的重要手段之一。

2.1 模型实现的流程

虚拟植物冠层光分布模拟首先在虚拟三维场景中加载树模型, 之后根据给定时刻及模拟地区地理位置构建并剖分光源面板, 确定光源面元的参数, 如光强度、几何信息等, 进而将场景各面元的属性数据传输至 GPU 端, 在 CUDA 架构下实现三

维树模型面元与光源面元之间的辐射能量计算。虚拟植物冠层光辐射模拟的流程如图 2 所示。

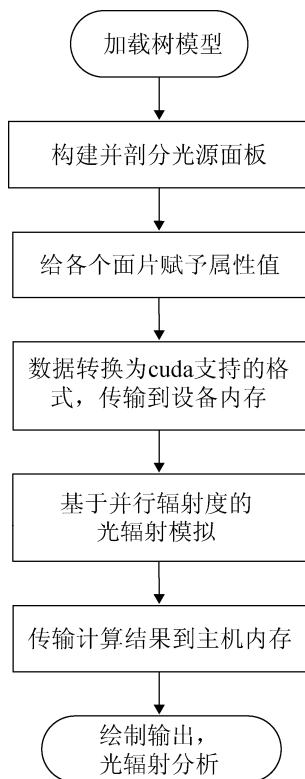


图 2 光辐射模拟流程图

2.2 并行计算方案

在 CUDA 架构中，一个内核函数存在两个层次的并行，即线程格网中的线程块并行和线程块中的线程并行。采用分而治之的思想，将整个问题分解为若干小规模子问题，各子问题模块分别用一个线程块实现，线程块之间为粗粒度并行；线程块内可以采用细粒度的线程并行。这种编程模型可以充分利用硬件资源，实现多线程高效并行计算。虚拟三维场景中，植物冠层的光辐射模拟并行方案如图 3。

2.3 形状因子计算的并行实现

形状因子 F_{ij} 表达的是离开面元 i 而到达面元 j 的能量通量分量，它只与两个面元之间的空间位置有关。因此虚拟场景中每对面元之间的形状因子计算是相互独立的，适合并行处理。

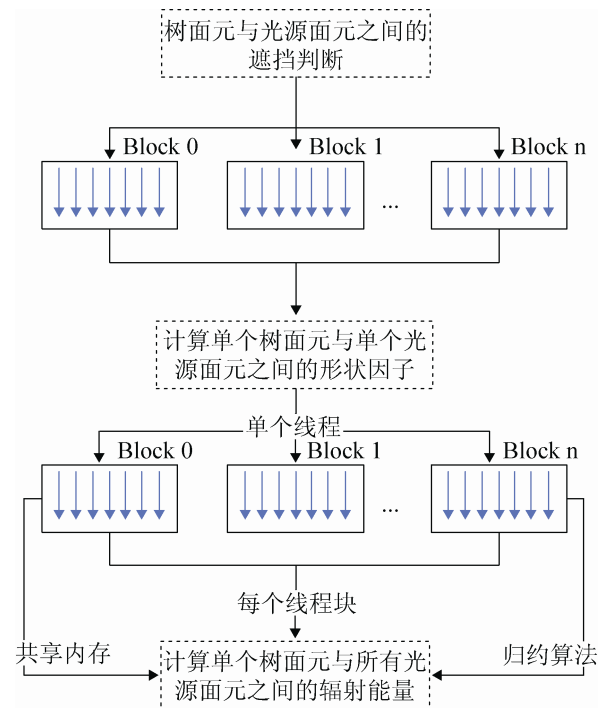


图 3 并行方案

在计算各个树面元与光源面元之间的形状因子时，每个线程计算一个树面元与一个光源面元之间的形状因子。将同一个树面元与所有光源面元之间的形状因子计算放在同一个块中，利用不同的块计算不同的树面元与光源面元的形状因子。虚拟场景中计算每对面元的形状因子线程结构采用一维的线程格网和一维的线程块，假设场景中树面元的个数为 $n_{TreeSize}$ ，光源面元个数为 $n_{LightSize}$ ，则 $BlockDim.x = n_{LightSize}$ ， $GridDim.x = n_{TreeSize}$ 。以此在线程和线程块两个层次并行计算形状因子。

2.3.1 基于射线求交的遮挡判断

遮挡函数的求解是形状因子计算的关键内容之一。在虚拟的三维场景中，若三维树模型的某个面元 i 在以面元 j 为光源的某光线方向上，被其他的树面元遮挡，则其遮挡函数 $HID(dA_i, dA_j)$ 为 0，根据公式(2)其形状因子为 0，即光源面元与树面元之间的无能量传递。光源与树面元之间的遮挡情况采用射线求交的算法进行判断。本文通过遍历光源和所有树面元，通过它们之间的两层循环，分别引出一条直线，将光源与树面元之间的遮挡判断转换

为光源面元中心点为起点, 树面元中心点与起点连线为方向的射线与树面元之间的求交测试。所有与该条射线有交的树面元, 除距离光源面元距离最近的树面元外, 其它均视为被遮挡。光辐射模拟如图 4 所示。

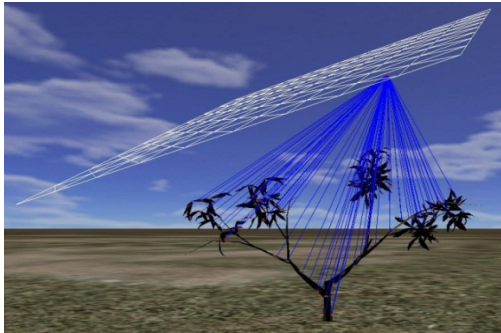


图 4 光辐射模拟示意图

本文采用 Tomas Moller 和 Ben Trumbore 提出的一种高效的射线-三角形求交算法^[16], 进行射线与树面元之间的求交测试。该算法通过传入光线原点、方向及待求交的三角形顶点为参数, 进行三维空间中射线与三角形的求交计算。该算法不需要获取三角形所在的平面方程, 减少了计算时间、节省了存储空间。求交计算都是单纯的向量运算数值计算, 非常适合 GPU 指令集。因此该算法具有占用内存低、计算速度快、适用于 CUDA 计算等优点。

2.3.2 遮挡判断的并行实现

光源面元与三维树模型之间的遮挡判断最终归纳为射线与三角形的求交测试。射线的原点为光源面元的中心点, 射线的方向为光源面元与树面元的连线方向, 三角形即为树模型的三角面元。假设场景中树面元的个数为 $nTreeSize$, 光源面元个数为 $nLightSize$, 则射线的个数为 $(nTreeSize \times nLightSize)$ 条, 数据量大且每次都是执行相同的任务, 而每条射线与树模型的求交是相互独立的, 因此可以处理为并行结构。

在 CUDA 架构下, 用一个线程处理单条射线与树模型所有树面元之间的求交测试, 测试结果作为一个布尔变量来; 个块中线程获取光源面元的中

心点坐标, 将线程组织在不同的块获取不同树面元的中心点坐标, 通过两个中心点坐标的连线确定射线的方向。光源与树模型的遮挡判断线程结构采用一维的线程格网和一维的线程块, 则 $BlockDim.x = nLightSize$, $GridDim.x = nTreeSize$ 。总的线程的个数即为射线的个数 $(nTreeSize \times nLightSize)$, 以此实现线程和线程块两个层次间的并行。

2.4 辐射能量求解的并行实现

单个树面元接受所有光源面元的辐射能量是独立的, 同时各个树面元之间的辐射能量计算也是独立的, 可以处理成两个层次的并行。

在计算树面元与光源面元之间的辐射能量时, 每个线程计算单个树面元与单个光源面元之间的辐射能量。将计算同一个树面元的线程放在同一个线程块中, 而不同树面元与所有光源面元之间的辐射能量计算放在不同的线程块中。虚拟三维场景中辐射能量求解的线程结构采用一维的线程格网和一维的线程块, 则 $BlockDim.x = nLightSize$, $GridDim.x = nTreeSize$ 。如此在每个线程块中计算单个树面元与所有光源面元之间的辐射能量, 以此实现线程间的并行。在线程格网中计算各个树面元与所有光源面元之间的辐射能量, 以此实现线程块间的并行。

每个树面元的在场景中获取的总能量是所有光源面元对其辐射累加的结果, 又因为每一个树面元从光源获取的辐射能量计算是在同一个线程块中, 根据 CUDA 的通信模型, 每个线程块中可以使用共享内存进行快速通信。因此每个线程的计算完成后, 需要在线程块中对线程计算的结果进行累加求和, 以得到每个树面元获取的总能量。求和采用归约算法, 并行归约(Reduction)是一种可以实现并行求和、求乘、求最大(小)值等各种操作的方法, 它能够利用共享内存, 加快求解速度。每个块的归约操作前, 将每个线程计算得到的单个树面元接受单个光源面元的能量保存在共享内存中, 在避免存储体冲突的情况下, 使用归约算法进行块内的快速求和, 归约后的结果保存在全局内存中, 可以避免

数据在主机端和设备端传输而占用时间。

为更好地利用 GPU 的运算能力, 本研究在并行实现中使用了相关优化处理技术, 如归约求和过程中的数据对齐、形状因子计算过程中算术指令优化等, 并且充分利用 CUDA 存储结构中能够实现快速通信的共享内存, 有效地提高了程序运行效率。

3 实例结果与分析

本研究实验的硬件环境为 CPU 型号 Interl(R) Core (TM) i5-3470 CPU @ 3.20GHz, GPU 型号 NVIDIA GeForce GT640(CUDA Kepler 架构, 计算能力为 3.0); 软件环境为 VS2010 编译环境,

CUDA6.0 并行计算开发工具, 实验平台为交互式单树建模软件 ParaTree。

研究团队已积累采用光线跟踪模型实现虚拟植物冠层内光分布模拟。分别采用光线跟踪模型和本文并行辐射度模型, 模拟 2013 年 6 月 21 日(夏至)福州(具体地理位置是东经 119°20', 北纬 26°7', 高程 33 米, 假设当时天气晴朗无云)单株晚红枇杷冠层内的光分布。分别选取从 6:00 至 18:00 间隔 90 分钟各个时刻晚红枇杷单位面积截获的光辐射瞬时能量进行对比, 结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 各个时刻采用不同的方法计算植物冠层内的单位面积光辐射瞬时能量值和其变化趋势一致。

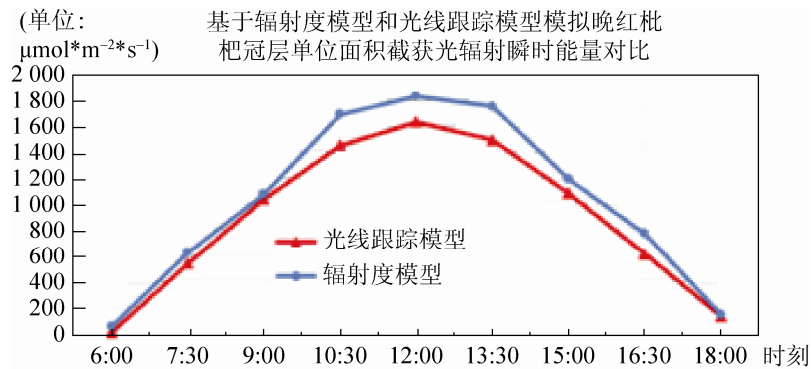


图 5 并行辐射度与传统辐射度模型计算辐射能量对比

以晚红枇杷为例, 模拟在上述地理位置, 2013-6-21, 10:30 的光分布效果图如图 6 示。由图 6 可以看出, 枇杷冠层顶部较之于枝干及冠层内部截获的光辐射能量较多。这是因为植物冠层叶片较多, 它们之间的遮挡也较多, 光辐射难以到达冠层内部及枝干, 因而无效光区较多。

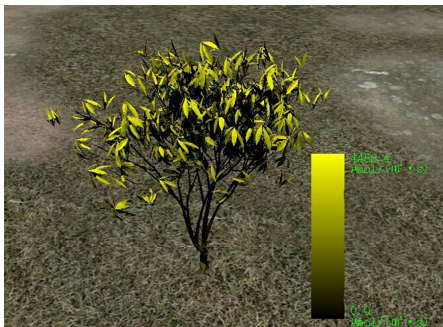


图 6 虚拟枇杷光分布效果图

表 1 为运行在 CPU 上和在 CUDA 架构下利用射线求交进行遮挡判断的计算时间(单位: s)比较。分别对三个不同数据级面元个数的树模型进行模拟, 从表 1 可以看出, CUDA 架构下遮挡判断的计算时间比运行在传统 CPU 上的计算时间减少了 20 倍左右。这是因为在 CUDA 架构下射线求交计算时, 采用了多线程的方式对射线进行了并行处理, 利用 GPU 的并行计算能力使计算速度得到了提升。

表 1 不同树模型的遮挡判断计算时间/s

模型	面元个数	计算时间/S		加速比
		T1(CPU)	T2(GPU)	
模型 1	952	4.717	0.266	17.733
模型 2	2631	36.317	1.576	23.044
模型 3	14039	889.965	44.557	19.974

表 1 中数据表明, 随着树模型面元数量的增加, 遮挡判断计算的加速比并没有很明显的增加, 甚至有所下降。最主要的原因是, 本研究中每个线程的计算都要遍历整个树模型, 与树模型的所有面元进行射线求交, 计算量随着树模型面元个数的增大而增大。后期将通过对树模型进行层次剖分或者用八叉树、K-d Tree 等数据结构进行组织, 减少射线与树模型的求交次数来对遮挡判断进行进一步的优化加速。此外 GPU 的条件控制能力非常弱, 在遮挡判断过程中, 使用了较多的条件控制语句, 分支嵌套过多, 极大地影响了 GPU 的执行效率。

表 2 为运行在 CPU 上和 CUDA 架构下基于 DVF 算法的辐射度模型进行辐射能量计算的时间(单位: s)比较。分别对不同面元个数的树模型进行模拟, 由表 2 可知, 模型 1 中 CUDA 架构下辐射能量的计算速度比运行在传统 CPU 上的计算速度低, 这是因为模型较小且运行时间很短, 在 CUDA 架构下, GPU 进行数据计算前需要把数据从主机端拷贝至设备端, 计算完后又需要把计算结果从设备端拷贝主机端, GPU 数据计算的时间未能隐藏数据拷贝的时间。除模型 1 外, CUDA 架构下辐射能量的计算效率比运行在传统 CPU 上的计算时间有所提高, 并且模型的面元个数越大, 加速比越高。这是因为 CUDA 架构下并行辐射度模型, 为每个线程分配的任务都是单纯的数值计算, 也没有过多的分支语句, 这种情况下, 随着模型的规格增大, GPU 的并行计算能力能得到充分的发挥。

表 2 不同树模型的辐射能量计算时间/s

模型	面元个数	计算时间/S		加速比
		T1(CPU)	T2(GPU)	T1/T2
模型 1	2631	0.045	0.071	0.634
模型 2	14039	0.102	0.084	1.214
模型 3	34986	0.191	0.135	1.415
模型 4	46221	0.251	0.149	1.685

4 结论

光是植物光合作用的重要能量来源, 本研究利用 3D-DVF 算法普适性好、适合并行实现等特点,

在 CUDA 架构下基于辐射度模型, 实现了虚拟植物冠层内任一位置的光辐射三维分布模拟。实验结果表明, 与传统 CPU 串行结构相比, CUDA 架构下的并行计算在保持与前者计算精度一致的同时, 能够有效地提高计算效率。本研究中, 光源与树模型间的遮挡判断, 采用单个线程遍历整个树模型的方法, 效率仍有提升空间, 在后续研究中, 可采用层次结构的树模型来减少射线求交的次数, 进而实现遮挡判断计算效率的进一步优化。本文计算虚拟植物冠层内的光分布, 尚只考虑了光源对植物冠层的能量辐射, 后续将展开计算冠层间的辐射能量传递。

致谢:

感谢福州大学林定博士对 GPU 技术的指导。

参考文献:

- [1] Da Silva D, Han L, Costes E. Light Interception Efficiency of Apple Trees: A Multiscale Computational Study Based on MAppleT [J]. *Ecological Modelling* (S0304-3800), 2014, 290: 45-53.
- [2] Huang H, Qin W, Liu Q. RAPID: A Radiosity Applicable to Porous Individual Objects for Directional Reflectance over Complex Vegetated Scenes [J]. *Remote Sensing of Environment* (S0034-4257), 2013, 132: 221-237.
- [3] 温维亮, 孟军, 郭新宇, 等. 基于辐射照度的作物冠层光分布计算系统设计 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(z1): 190-193.
- [4] Bindick S, Stiebler M, Krafczyk M. Fast Kd-tree-based Hierarchical Radiosity for Radiative Heat Transport Problems [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* (S0029-5981), 2011, 86(9): 1082-1100.
- [5] 赵权, 黄运保, 孙宇航. CUDA 架构下的靶丸辐射能流并行计算 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(7): 937-945.
- [6] Goral C M, Torrance K E, Greenberg D P, et al. Modeling the Interaction of Light between Diffuse Surfaces [J]. *SIGGRAPH Comput Graph*, 1984, 18(3): 213-222.

(下转第 2351 页)