

# 植物冠层光辐射分布的快速深度缓存算法

肖 强, 劳彩莲, 王春霞

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 针对植物冠层内光分布计算过程中存在的计算复杂度大、耗时长等问题, 提出一种快速深度缓存算法。采用动态选取光照投影平面和确定光照分布密度等方法, 设计一套快速计算植物冠层光分布的模拟系统。应用该系统模拟水稻孕穗期冠层内的光分布情况, 结果表明, 该方法在保持原有算法精度的同时, 能缩短计算时间。

**关键词:** 植物冠层; 辐射; 空间分布; 模型; 深度缓存

## Fast Z-buffer Algorithm of Solar Radiation Distribution in Plant Canopy

XIAO Qiang, LAO Cai-lian, WANG Chun-xia

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

**【Abstract】** The distribution of solar radiation is an important factor to the growth of plant. In order to reduce the complexity and time-consuming in modeling the distribution of radiation in canopy, this paper aims to improve this model by changing the projection plane and making certain of the density of solar radiation. It uses a software based on advance to model the a boot stage paddy rice to evaluate the improvement, and results show that the advance model can provide the accuracy and reduce the complexity.

**【Key words】** plant canopy; radiation; space distribution; model; Z-buffer

### 1 概述

太阳光辐射在植物冠层中的分布特性影响着植物的生理形态、生长过程, 模拟冠层中的光分布是研究植物生长发育的重要内容<sup>[1]</sup>。随着计算机技术的成熟和发展, 图形学算法和虚拟现实技术被广泛应用, 冠层内光分布计算方法也变得多样化。常见的有辐射度方法<sup>[2]</sup>、光线跟踪方法<sup>[3]</sup>、深度缓存投影算法等<sup>[4]</sup>。相对于前2种方法, 深度缓存投影方法的特点是忽略光的反射、投射作用, 只考虑光的直射。由于光合有效辐射主要表现在直射部分, 而且集中于可见光波段, 所以该方法对光合有效辐射分布模拟有着很高的精度, 同时原理简单, 便于计算机实现。但由于处理数据量巨大, 致使计算耗时较长。本文介绍了一种用于计算植物冠层光分布的快速深度缓存排序方法。它在保留原有精度的条件下进一步的降低时间复杂度, 提高算法的实用性。

### 2 改进算法原理及模型实现

#### 2.1 基于深度缓存排序算法的植物冠层光分布方法

深度缓存(Z-buffer)算法是计算机图形学中最为常用的真实感显示算法之一, 主要原理是以近物取代远物。在观测区域外设立投影平面, 将区域内物体向投影平面进行投影, 对于投影后位置重叠的不同物体, 判定距离投影平面近的为可见, 其他的为不可见。当只考虑光的直射影响时, 冠层内的光分布差异情况主要是由于植株结构相互遮挡产生的, 所以可以应用深度缓存算法进行计算。

图1为植物冠层的侧视示意图。在计算植物冠层光分布时, 首先确定一块矩形的植物冠层区域为实际观测区域, 图中实线区域就是抽象成长方体的实测区域。但因为该区域周围的冠层结构由于遮挡会对区域内光分布造成影响, 所以假

设实测区域周围存在着与实测区域冠层结构完全相同的植物冠层, 即图中的虚线区域, 称其为复制域<sup>[5]</sup>。为了方便投影, 该方法还利用实测的冠层植株三维空间坐标对叶片表面进行划分, 将其分割成很小的空间三角形面元, 接下来逆向考虑太阳光线射入冠层内与小面元的相交的过程来进行投影。

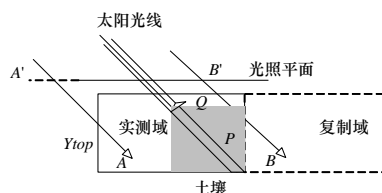


图1 植物冠层的侧视示意图

具体投影过程如下:

(1) 光照平面的建立: 在冠层正上方建立固定尺寸的光照平面, 认为入射到冠层内的光线全部来自光照平面, 根据入射光线将光照平面进行二维网格化, 认为每一个小网格上有一条光线入射。

(2) 面元的投影: 根据入射到实测区域内的光线方向将叶片面元逆向的投影到预先建立的光照平面上, 对于那些投影后不在投影平面的小面元, 如图1中的面元A, 可以通过计算复制域中与A位置相同的面元B的投影情况来替代, 结果

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目“虚拟作物中的结构-功能-环境互作建模与可视化表达”(2006AA10Z229)

**作者简介:** 肖 强(1984—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 植物冠层光分布模拟; 劳彩莲, 副教授; 王春霞, 硕士

**收稿日期:** 2010-02-02 **E-mail:** justinshaw84@126.com

相当于将面元  $A$  平移入光照平面。

(3)面元与光线相交情况的判断: 计算投影后落在同一小网格的一系列面元的深度缓存值(Z-buffer 深度排序法), 找到与光照平面距离最短的小面元。判定该小面元截获光线, 进而统计出太阳光在冠层中的三维分布情况。

## 2.2 算法改进

本文称原有模型中位于冠层顶部的尺寸固定的光照平面为原平面。对于同样的光线,如果入射方向不同对于冠层的光照影响差别是很大的。这主要由于入射角度的变化引起了原平面上光线分布密度的变化,进而改变了二维网格尺寸。但是我们可以认为在光线入射方向的横截面上的光线分布密度是相同的,于是原平面上的光线分布密度就存在如下关系:

$$\rho_{\text{原平面}} = \rho_{\text{光线横截面}} \times \cos \theta \quad (1)$$

其中,  $\theta$  为现有光照平面与光线横截面之间的夹角。

由式(1)可以看出,  $\theta$  越大, 落在原平面的光线密度越小, 对于同样光线, 入射角度越大, 只需计算少量光线数, 放大网格的尺寸就能达到模拟效果。而现有光照模型中由于光照平面固定选取所以投放到平面上的光线数一般也是固定的, 在计算某些角度入射光线时网格过密导致了相交计算的计算量过大, 而深度缓存投影算法时间上的消耗主要集中在光线与三角形面元的相交计算上, 造成了时间浪费。

改进算法的目的是固定选取光线入射密度,通过减小光照平面尺寸来减少光线数,从而降低时间复杂度。

选取与光线入射方向垂直的平面为新光线投影平面, 尺寸为原平面沿光线方向的投影大小, 并以该方向为  $Y$  轴重新建立投影坐标系。根据图形学原理: 叶片面元在新坐标系中的坐标相当于原坐标绕  $X$  轴、 $Z$  轴旋转一定角度产生的。具体步骤如图 2 所示。其中, 立方体代表植物冠层区域上方平面为光照平面, 阴影部分为需要移动的区域。

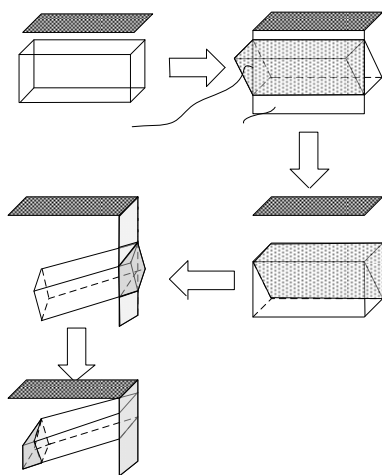


图 2 坐标旋转示意图

首先将代表冠层区域的立方体绕  $Z$  轴旋转使得入射光线进入  $Y-Z$  平面。由于旋转,一部分面元垂直投影后会在  $X$  方向移出光照平面,根据复制域原理将这部分面元进行平移,即用复制域中相同面元进行代替。接下来同理再绕  $X$  轴旋转将入射光线移入  $Y$  轴,在  $Z$  方向上偏移出光照平面的面元再次进行平移,即建立了投影坐标系。

在之后的投影过程中, 由于光线在新坐标系下沿  $Y$  轴垂直入射, 因此可以直接进行光线与三角形面元的相交判断, 利用固定的光线分布密度进行网格化, 再利用  $Z$ -buffer 算法

对落入同一网格的面元进行深度排序。最后通过统计各面元光线数得到整个冠层光分布情况。

### 2.3 模型实现

本文采用 C++ 语言在 Windows 平台下进行模型实现, 开发环境为 VS2005。程序的算法流程如图 3 所示。面元坐标旋转模块, 以及是否落入光照平面判断模块为最算法改进主要部分。

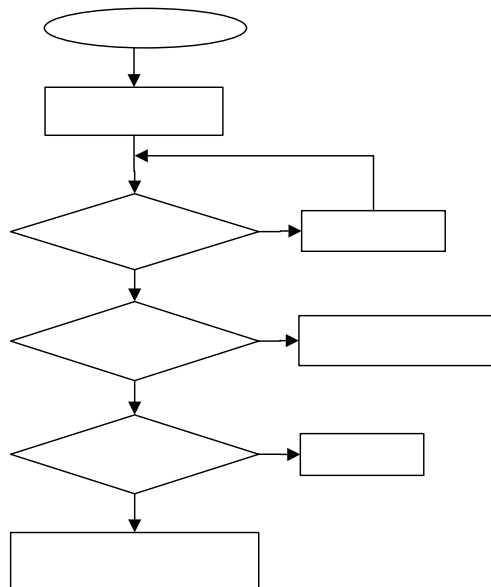


图 3 算法流程

### 3 基于改进算法的仿真分析

这部分将利用上述系统仿真孕穗期水稻冠层光分布情况,该时期观测域中水稻冠层由约  $10^6$  个三角形面元组成,仿真设定光照高度角为  $62.01^\circ$ ,方位角为  $-81.37^\circ$ 。光分布计算的三维效果如图 4 所示。



图 4 水稻冠层孕穗期光分布效果

下面通过对比基于深度缓存方法的光分布算法和快速算法的仿真结果数据来评估一下快速算法的可信性和实用性。

运用 2 种算法同时计算上述光照方向下一次太阳光直射产生的光分布情况,并统计出不同高度水平面上的光斑量,得到光斑垂直分布规律,进行对比以此检验快速算法的计算准确性和实效性。

当快速算法的光线分布密度选取为  $21 \times 21$  条/ $\text{cm}^2$ , 原算法的光线投放数选取为  $1\,500 \times 1\,500$  条时, 他们的光斑垂直分布规律如图 5 所示。其中, 相关性系数  $R^2 = 0.999\,6$ 。而该进模型光线分布密度设置为  $23 \times 23$  条/ $\text{cm}^2$  时其相关性系数为高达  $R^2 = 0.999\,9$ 。对比结果可知快速算法基本上保持了原有基于深度缓存排序方法的精度。

在计算耗时方面,经统计在选取光线分布密度为  $21 \times 21$  条/ $\text{cm}^2$  时,较原算法节约 200 s,约占总耗时的 1/3。

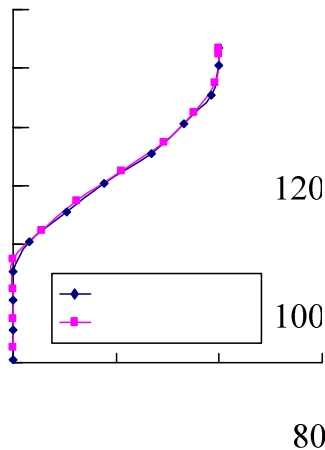


图5 光斑垂直分布对比

通过分析时间复杂度不难发现:快速算法中选取尺寸为 69 cm×69 cm 的方形区域为光照平面,而改进算法中由原光照平面投影产生的新平面尺寸变为 68 cm×61 cm,选取光分布密度为 21×21 条/cm<sup>2</sup> 时,快速算法在保证相同网格化精度的条件下,减少了约 100×200 条光线的投放。应用包围体方法,根据经验,每条光线需与网格内三角形面元平均判断相交 10 次,以此计算快速算法仅在一次单方向光照入射条件下就减少相交计算约 10<sup>5</sup> 次。

当模拟真实野外光照条件时,还要考虑太阳直射光和天空漫反射光在内的多方向光线同时入射光分布叠加的效果相当于需要计算多次直射光分布。笔者利用 turtle 模型<sup>[6]</sup>模拟天空不同方向上的漫反射光对植物冠层的光照分布影响。通过计算在 46 个不同方向上得光辐射分布来模拟天空漫反射分布。由于漫反射入射角度不同,导致在利用快速算法计算时,当选取相同光照密度条件下,投射到该方向上的光线数产生了差异。我们按光照高度角将 46 个漫反射方向进行归类,并估算出该高度角上的投放光线条数,如表 1 所示。其中,方向数为 turtle 模型中的天空漫反射方向数。由表 1 再根据上

述复杂度分析方法估算,用快速算法进行一次全天空光分布计算大概可以节约计算约 10<sup>6</sup> 次,约 2 000 s。当模拟植物动态模型时则效果更好。

表 1 turtle 模型反射光统计

漫反射高度角/(°)	漫反射方向数	投放光线条数
90	1	1 500×1 500
70	5	1 000×1 000
30	25	500×500
10	15	300×300

#### 4 结束语

本文通过动态建立光照平面减小光线投放数的方法改进了植物冠层光分布计算时的深度缓存算法,仿真实验结果显示,改进算法降低了复杂度,提高了运算速度,具有很好的实用价值。为进一步提高计算速度,快速算法可以进行并行化处理,移植到大型计算平台上运行,另外由于 GPU 计算技术的不断完善,该算法也可以进行 CUDA 语言重构并移植到显卡中进行运算,利用硬件技术的发展成果实现运算加速。

#### 参考文献

- [1] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Efectance Modeling: The SAIL Model[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16(2): 125-141.
- [2] Goral C M, Torrance K E, Greenberg D P. Modelling the Interaction of Light with Surfaces[J]. Computer Graphics, 1984, 18(3): 212-222.
- [3] Chelle M, Andrieu B. Radiative Models for Architectural Modeling[J]. Agronomie, 1999, 19(3/4): 225-240.
- [4] Chelle M, Andrieu B. The Nested Radiosity Model for the Distribution of Light Within Plant Canopies[J]. Ecological Modelling, 1998, 111(1): 75-91.
- [5] 王锡平,郭江泰. 植物冠层内太阳直接辐射三维空间分布的模拟[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 7-12.
- [6] Dulk J A D. The Interpretation of Remote Sensing: A Feasibility Study[M]. [S. l.]: Den Dulk, 1989.

编辑 金胡考

(上接第 287 页)

表 1 模拟混合调制信号识别结果

SNR/dB	CW	FM(PM)	AM	LSB	USB	2ASK	2FSK	QPSK	16QAM
/ (%)	/ (%)	/ (%)	/ (%)	/ (%)	/ (%)	/ (%)	/ (%)	/ (%)	/ (%)
0	81	81	95	92	92	93	88	74	85
2	87	82	94	95	94	92	89	79	89
4	95	88	94	96	95	94	87	81	88
6	98	91	97	98	97	96	92	87	92
8	99	91	98	95	95	94	90	82	93
10	99	90	99	97	98	93	92	85	94
12	100	93	99	98	97	99	93	81	97
14	99	92	98	99	96	95	91	85	96
16	99	93	99	98	98	96	91	84	95
18	100	90	100	99	98	95	92	83	95
20	100	92	100	99	98	96	91	87	97

从表 1 可以看出,在 SNR 不小于 6 dB 时,采用文中调制识别算法的平均正确识别率在 94% 以上。

#### 5 结束语

本文提出一种基于决策理论的模拟数字混合调制信号识别算法,给出基于判决树的调制方式识别流程图,对整体的识别判决算法进了 Matlab 仿真实验。文中识别算法是根据仿真结果来选取判决门限,在具体的工程实现中如何选取判决门限以及如何区分 FM 和 PM 信号有待进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 张 玉,杨晓静. 数字调相信号识别研究与实现[J]. 计算机工程, 2008, 34(21): 89-90.
- [2] Dobre O A, Abdi A, Bar-Ness Y, et al. Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends[J]. IET Communications, 2007, 1(2) : 137-156.
- [3] Nandi A K, Azzouz E E. Automatic Analogue Modulation Recognition[J]. Signal Processing, 1995, 46(3): 211-222.
- [4] Azzouz E E, Nandi A K. Procedure for Automatic Recognition of Analogue and Digital Modulations[C]//Proc. of IEEE Communications Conference. [S. l.]: IEEE Press, 1996.
- [5] Nandi A K, Azzouz E E. Algorithms for Automatic Modulation Recognition of Communication Signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(4): 431-436.
- [6] Hu Xiaobo, Ronald G. Expanding the Range of Convergence of the CORDIC Algorithm[J]. IEEE Transactions on Computers, 1991, 40(1): 13-20.

编辑 陈 文

