

基于辐射照度的作物冠层光分布计算系统设计^{*}

温维亮¹ 孟军^{1,2} 郭新宇¹ 王雪¹ 肖伯祥¹ 陆声链¹

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 2. 洛阳师范学院生命科学系, 洛阳 471022)

【摘要】 以玉米为例,使用C++语言和OpenGL图形函数库,在Windows平台下,开发基于辐射度-图形学结合模型(RGM)的作物冠层光分布计算系统。以相对成熟的RGM方法提取模型参数,并针对作物冠层特点对方法做适当改进。在冠层三维模型基础上,通过用户交互指定参数,可计算出冠层内每个面元的光分布状态。该系统所需模型参数少,且参数均具有较为明确的植物学和农学意义,便于与传统作物模型相结合,操作界面友好、使用方便。

关键词: 作物冠层 辐射度 光分布 模拟

中图分类号: TP391.41; S161.1 **文献标识码:** A

Calculation System of Light Distribution within Crop Canopy Based on Radiosity Method

Wen Weiliang¹ Meng Jun^{1,2} Guo Xinyu¹ Wang Xue¹ Xiao Boxiang¹ Lu Shenglian¹

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. Life Science Department, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China)

Abstract

In order to provide an effective tool for light distribution calculation within crop canopy on Windows platform, a light distribution calculation system derived from RGM model was developed using C++ language and OpenGL library. A maize canopy geometrical model was taking as the experimental example. Parameters were selected on the basis of feasible RGM model. The related methods were improved according to the characteristics of crop canopy. On the basis of 3-D maize canopy model, the light distribution situation of each organ facet could be calculated in real time by using parameters input via human-computer interaction. The system had user-friendly interface and was easy to operate. It only needed few input parameters and most parameters were meaningful in botany and agriculture.

Key words Crop canopy, Radiosity, Light distribution, Simulation

引言

作物冠层光分布的模拟是光合作用定量化模拟的关键。为满足器官尺度光分布模拟研究的需要,Chelle等^[1]和Sinoquet等^[2]曾在虚拟植物模型的基础上建立了基于辐射度和光线跟踪原理的植物冠层

光分布模型,在保证高精度的同时却也面临着计算量大、参数难以获取等问题。鉴于太阳直接辐射是冠层内辐射的主要部分,王锡平等^[3]采用投影深度排序法(projection Z-buffer method,简称PZB)建立了冠层内太阳直射光三维分布的模拟模型,模拟结果与田间实测数据吻合较好。马韞韬等^[4]进一

收稿日期: 2009-07-10 修回日期: 2009-07-22

^{*} 国家自然科学基金资助项目(30700493)和国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA10Z224)

作者简介: 温维亮,助理工程师,主要从事作物三维形态交互式设计研究,E-mail: wenwl@nercita.org.cn

通讯作者: 郭新宇,副研究员,主要从事作物数字化设计研究,E-mail: guoxy@nercita.org.cn

步提出了虚拟照相机法以加速直射光分布模拟,为逐日逐时段模拟提供了一种解决方案。但是,间接散射辐射对光分布的影响尚未有效评估,而对于冠层中下部光合器官而言,间接散射辐射可能在光响应曲线快速上升阶段发挥重要作用。因此,有必要对间接散射分布进行模拟。

辐射度-图形学结合模型(RGM)^[5]是计算机模拟模型的一个重要分支。谢东辉等^[6]于2006年利用扩展的L系统对生长期的玉米进行建模,基于真实结构场景的RGM模型计算了玉米冠层分波段的光分布,模拟结果与实测结果具有较好的一致性。Zhang等^[7]于2007年基于Monte Carlo方法对玉米冠层内部光分布进行了模拟,取得了较好的结果。

RGM在计算作物冠层光分布方面已经相对成熟,但该模型在Windows平台下实现操作复杂,尚难以作为独立的工具软件为农业科研提供有效支撑。本文利用玉米冠层三维模型,基于RGM原理,用C++语言和OpenGL图形函数库在Windows平台下开发作物冠层光分布计算系统。

1 系统设计与实现

1.1 系统概述

系统主要分为以下几个部分:①构造作物三维场景文件。②根据时间信息以及作物冠层所在地理位置信息计算太阳直接辐射照度和天空散射辐射照度。③根据作物冠层三维场景,计算各面元上的太阳直接辐射照度和天空散射辐射照度,并计算各面元之间的形状因子。④用Gauss-Seidel迭代法对辐射照度方程求解,并将结果进行文本输出和可视化。系统计算流程如图1所示。

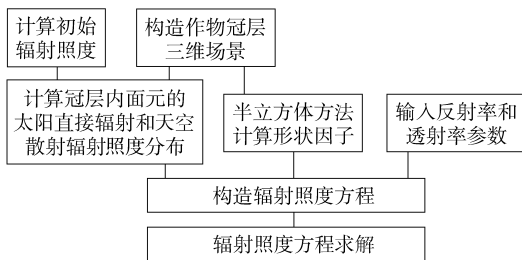


图1 系统计算流程图

Fig. 1 System calculation flow chart

1.2 冠层三维场景设计

植物冠层三维场景往往是按植株进行分类的,也就是每个作物植株作为一组。考虑到计算速度和数据存储量,系统根据面元属性对场景内面元进行分类。以玉米冠层为例,场景中的茎、叶片、土地面元具有不同的反射率和透射率,因此将所有叶片面元分为一类,存入文本文件中,对所有茎秆面元、地

面面元进行相同的归类。用户可通过三维扫描仪或三维建模软件等多种方式构造作物冠层三维场景。系统可以识别obj、3ds等常用三维数据文件格式,无需修改,便于使用。图2给出一个2株×2株玉米冠层三维场景。

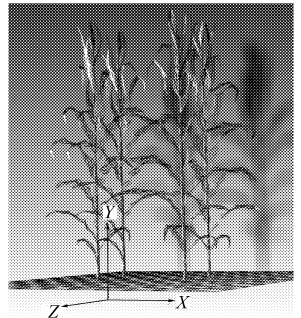


图2 玉米冠层三维场景

Fig. 2 Maize canopy scene

1.3 初始辐射照度计算

初始辐射照度主要是指场景面元中未经辐射照度计算时,即面元只考虑太阳直接辐射和天空散射辐射时的辐射照度。初始辐射照度的计算主要分为以下4个步骤:①指定冠层接收的太阳直接辐射照度和天空散射辐射照度。②计算每个面元的太阳直接辐射照度。③计算每个面元上的天空散射辐射照度。④将每个面元的太阳直接辐射照度与天空散射辐射照度相加就是该面元的初始辐射照度。

系统为冠层初始辐射照度的计算提供了简明的数据接口。用户只需要指定时间信息、地理位置信息以及天空云量就可以计算出冠层的初始太阳直接辐射照度、天空散射辐射照度以及太阳高度角和太阳方位角。

在计算冠层内部每个面元的太阳直接辐射照度时,认为入射冠层内部的光线平行,光线方向由太阳高度角以及太阳方位角决定。设冠层顶部有一基面平行于地面,入射光线均匀穿透基面。通过跟踪穿透基面的光线,判断其与面元的相交情况,以解决冠层内部面元的太阳直接辐射照度分布问题^[8]。

除太阳直接辐射照度外,还需要计算冠层内部面元的天空散射辐射照度分布。系统采用Turtle模型^[9],其原理为作物冠层内某一面元的散射辐射照度(散射辐射透过率)决定于该面元不受其他植株器官遮挡而能看到天空的立体角比例(天空可见率)和散射辐射在天穹不同方向上的分布模式。利用天空立体角网格划分方法,计算受遮挡的天空立体角比例,从而计算每个面元上散射辐射受遮挡的量。

计算出每个面元的太阳直接辐射照度和天空散射辐射照度后,将二值相加,作为面元的初始辐射照度值。

1.4 基于辐射照度的光分布计算

系统利用RGM模型的能量平衡原理解决冠层内部多重反射及散射分布的计算问题。RGM模型定义冠层内部每个面元的辐射照度由面元自身的发射辐射照度、接收到的反射辐射照度和接收到的透射辐射照度组成,模型描述为

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N B_j F_{ij} + \tau_i \sum_{k=1}^N B_k F_{ik}$$

式中 B_i ——面元 i 的辐射照度

E_i ——面元 i 自身的发射辐射照度

F_{ij} ——面元 i 与面元 j 之间的形状因子

ρ_i ——面元 i 的反射率

τ_i ——面元 i 的透射率

N ——场景中的总面元数量

为了得到冠层内能量达到平衡时每个面元的辐射照度,需要对上式线性方程组进行求解。方程中,面元 i 自身的发射辐射照度为该面元的太阳直接辐射照度与天空散射辐射照度之和,形状因子的计算采用半立方体方法^[10]。辐射照度方程中的反射率和透射率是通过用户输入确定的。本研究中,设地面与茎秆的透射率为零,不需要用户输入,所有叶片面元具有相同的透射率、反射率,所有地面面元的反射率相同,所有茎秆面元的反射率相同。上述参数可由田间实验测得,并与作物栽培方式、遗传特性相关,可以与比叶重、含水率、光合速率等参数建立联系。指定了方程中的所有系数后,系统通过解方程得到每个面元最终的辐射照度 B_i ,解方程采用 Gauss-Seidel 迭代法进行求解,该方法需要用户指定一个阈值来限定解方程误差。计算结果通过文本形式进行输出,并可以进行可视化。

1.5 系统实现

系统设计过程中使用了面向对象的程序设计方法,用 C++ 语言、MFC 库进行系统界面的开发,计算结果的可视化采用 OpenGL 图形开发引擎。实现过程中面元的数据结构为:

```
class Element3
{
    float area; // 面元面积
    Vector3 normal; // 法向量
    Vertex3 * pvertex[4]; // 顶点坐标数组
    Point3 center; // 面元中心坐标
    float angle; // 面元与光线夹角
    int lighted; // 面元是否被照亮
    float power-direct; // 太阳直接辐射照度
    float power-diffuse; // 散射辐射照度
    float radiosity; // 面元辐射照度
};
```

该系统界面友好、使用方便。使用时,用户只需按规定格式指定作物冠层的三维模型,输入相关参数即可。更为重要的是,该方法假设叶片具有朗伯体^[11]性质,在模拟过程中,仅需要叶片和茎秆的反射率、透射率以及土壤反射率等参数,这些参数易于

获取,且具有较强的植物学和农学意义,便于与传统作物模型衔接。图 3 给出了系统操作流程。

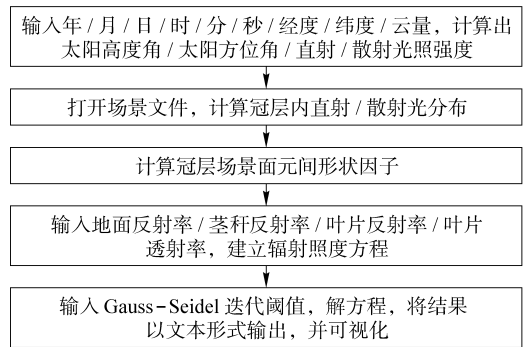


图 3 系统操作流程图

Fig. 3 System operation flow chart

2 模拟结果及其可视化

对指定的辐射时间、地理位置以及指定时间位置下的作物冠层三维模型,系统给出对应的太阳直接辐射照度、天空散射辐射照度、太阳高度角以及太阳方位角,在用户指定了相应的反射率、透射率参数以及解方程阈值后,系统将计算结果以文本形式输出。

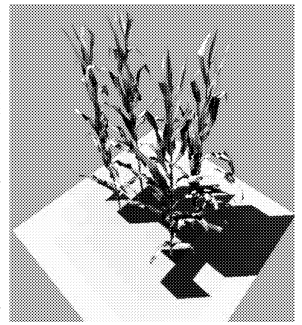


图 4 计算结果的可视化

Fig. 4 Result visualization

图 4 给出了 2008 年 8 月 10 日上午 10 时由系统计算出的稀疏玉米模型的可视化结果,其中,解方程阈值为 0.000 1,根据经验值,玉米叶片及茎秆面元的反射率设置为 0.12,地面的反射率设置为 0.15,玉米叶片的透射率设置为 0.06。由于系统中地面的最终辐射照度不是人们所关心的问题,因此,为了减少计算量,将地面面元的尺度设置相对大一些。

可视化输出结果显示,冠层内部光分布层次清晰,过渡自然,与不考虑间接散射辐射的可视化结果相比,更具真实感^[3]。

RGM 模型中的辐射照度算法虽然耗时,但该算法能客观地反映出冠层内部面元间的多重反射及散射关系,表 1 给出了冠层内部利用辐射照度方法前面元间的光照强度对比。从数据中可以看出,茎秆面元辐射照度计算前后的差异最大,叶片面元其次,而土地面元在计算前后基本无差异。这是因为茎秆位于冠层内部,其面元与叶片面元间的多重反射及散射关系较多,而地面面元只与靠近地面的冠层内一些面元有反射和散射关系,因此在辐射照度计算前后几乎无差异。Hervé Rey 等^[12]研究表

明,茎秆吸收的辐射占总辐射的比例小于5%,但在进行精确光分布模拟时,其作用不能忽略。综合上述结果可以看出,茎秆、叶片的间接散射辐射在模拟研究中的作用不可低估。

表1 辐射照度计算前、后的数据对比

Tab.1 Data before and after radiosity calculation

所属组	面元 ID	W/m ²	
		计算前	计算后
叶片	950	107.254 814	101.861 702
叶片	951	106.378 204	103.122 627
茎秆	1 071	119.169 388	104.683 120
茎秆	1 072	97.802 826	83.742 648
地面	181	274.096 191	274.096 184
地面	182	273.403 381	273.403 389

3 结束语

系统以作物冠层几何模型为基础,模拟了作物

冠层内部辐射照度分布并进行了可视化。通过运用RGM模型,结合叶片透射率、反射率、茎秆反射率等与作物生理状况、品种特性密切相关的农学参数,系统可以模拟冠层内部作物叶片、茎秆以及地面间的相互反射、透射,使之达到一个能量平衡的状态。在光分布计算精细程度上,实现了各器官上更精细面元的光分布计算,为面元尺度光合作用可视化计算创造了条件。参数数量少、农学意义明确、操作简便便是本系统的最大特色,随着三维扫描技术、二维反推三维或更有效的冠层模型技术的成熟,本系统有望为精细农业的研究者提供越来越多的帮助。

计算精度与执行效率间的平衡是软件开发面临的重要问题,系统在计算冠层的天空散射辐射分布以及计算形状因子时的算法复杂度都是 $O(N^2)$,在模拟大规模作物冠层光分布时比较困难。在今后的研究中,将进一步引入面元简化、Monte Carlo方法^[7]以及sail模型等,以提高运算效率,为基于过程的短时间步长作物结构-功能模型研究创造条件。

参 考 文 献

- 1 Chelle M, Andrieu B. The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies[J]. Ecological Modelling, 1998,111(1):75~91.
- 2 Sinoquet H, Thanisawanyangkura S, Mabrouk H, et al. Characterization of the light environment in canopies using 3D digitizing and image processing[J]. Annals of Botany, 1998,82(2):203~212.
- 3 王锡平,郭焱,李保国,等.玉米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.
Wang Xiping, Guo Yan, Li Baoguo, et al. Modelling the three dimensional distribution of direct solar radiation in maize canopy[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(1):7~12. (in Chinese)
- 4 马蕴韬,文美平,李保国,等.基于器官尺度虚拟玉米冠层直射光分布的快速计算模型[J].农业工程学报,2007,23(10):151~155.
Ma Yuntao, Wen Meiping, Li Baoguo, et al. Efficient model for computing the distribution of direct solar radiation in maize canopy at organ level[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(10):151~155. (in Chinese)
- 5 Qin Wenhan, Gerstl Sig A W. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime[J]. Remote Sensing of Environment, 2000,74(1):145~165.
- 6 谢东辉,孙睿,朱启疆,等.利用辐射度模型模拟玉米冠层辐射分布[J].作物学报,2006,32(3):317~323.
Xie Donghui, Sun Rui, Zhu Qijiang, et al. Reflectance distribution of corn canopies simulated with radiosity-graphics combined model[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006,32(3):317~323. (in Chinese)
- 7 Zhang Yuan, Lao Cailian, Li Baoguo, et al. Monte carlo simulation of solar radiation in maize canopies and its visualization [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2007,50(5):553~558.
- 8 Shirley P, Morley KR. Realistic ray tracing[M]. 2nd ed. Natick, MA: AK Peters, Ltd., 2003:1~8,29~30,131~143,169~175.
- 9 Grant R H, Peters D B, Larsen E M, et al. Simulation of canopy photosynthesis in maize and soybean[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1989,48(1~2):75~79.
- 10 Ian Ashdown. Radiosity: a programmer's perspective[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- 11 Chelle M. Could plant leaves be treated as lambertian surfaces in dense crop canopies to estimate light absorption? [J]. Ecological Modeling, 2006,198(1~2):219~228.
- 12 Hervé Rey, Jean Dauzat, Karine Chenu, et al. Using a 3-D virtual sunflower to simulate light capture at organ, plant and plot levels: contribution of organ interception, impact of heliotropism and analysis of genotypic differences[J]. Annals of Botany, 2008,101(8):1139~1151.