

植物立体可视化模拟系统原型 StereoPlants 的构建

郭浩¹, 朱德海^{1*}, 戈振扬², 马钦¹, 刘柯楠²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 昆明理工大学农业工程学院, 昆明 650224)

摘要: 随着虚拟植物可视化研究的深入, 植物群体以及复杂的植物器官或微观显微结构模拟已成为趋势。目前植物模拟中可视化结果展示方式多是对渲染的图像进行平面显示, 不便于对大场景植物群体或复杂微观显微结构可视化结果的认知。为此, 该文提出并实现了一个立体显示植物模拟的系统原型, 该系统完成植物可视化立体内容的生成到立体展现, 系统的软件部分基于跨平台的 FLTK 界面库与 OpenGL 图形库完成植物模拟立体可视化架构, 支持对现有的基于该图形库的可视化模拟模型的移植, 硬件部分由计算机与被动式立体展示系统组成。为了测试系统的可行性与有效性, 在立体可视化框架上移植现有植物根系可视化模拟, 结果显示, 该立体显示植物模拟系统原型可生动地、沉浸式地立体显示植物可视化模拟。该原型系统使得植物群体以及复杂的植物器官或微观显微结构的可视化更直观、更容易被认知。

关键词: 植物, 模拟, 可视化, 立体显示, 显微结构

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.15.018

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-15-0113-05

郭浩, 朱德海, 戈振扬, 等. 植物立体可视化模拟系统原型 StereoPlants 的构建[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 113-117.

Guo Hao, Zhu Dehai, Ge Zhenyang, et al. Construction of plant stereo visualization simulation system prototype—StereoPlants[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 113-117. (in Chinese with English abstract)

0 引言

植物生长的生理生态建模模拟, 已成为植物生态学应用于农业和森林科学的重要工具^[1], 作为数字农业研究的重要基础之一, 建立和模拟结构功能模型是虚拟植物研究的新方向^[2], 其中可视化是建立结构功能模型的关键技术之一^[3-4]。

近年来随着计算机性能和显卡图形处理器(graphics processing unit, GPU)的发展, 大尺度的植物群体可视化有很大的发展。为模拟森林植物群体规律, 建立了植物群体的分布模拟模型, 单株植物可视化利用 L 系统生成, 最终可视化森林植物群体, 并模拟了森林植物的聚集和繁衍规律^[5]。为了提高对遥感地形植被数据可视的直观性, 采用了连续层次细节技术, 基于遥感数据中的归一化植被指数建立了大场景地形的绿色植被可视化模型^[6]。为可视化模拟复杂大场景的森林, 建立了对应的光照和阴影模型, 最后基于 GPU 实现其实时可视化^[7-8]。结合决策支持系统和大尺度可视化, 实现对森林管理效能的提高^[9]。利用试验证明了结合三维显示森林管理系统的高效性^[10]。为提高小麦群体可视化的真实感与实时性, 提出一

种基于多技术融合的小麦群体生长实时绘制方法^[11]。为高效实现农地整理, 将 GIS 与农地整理相结合, 探索基于 GIS 的农地整理三维可视化的新方法^[12]。与此同时, 研究植物微观复杂结构可视化可很好的帮助植物学家对植物生理规律的理解, 进而促进深层次的虚拟植物功能模拟, 随着断层扫描技术、核磁共振和光学投影层析成像等微观观察技术在植物研究上的应用, 植物微观复杂结构的研究和模拟也涌现出不少成果。为增强对电子层析成像得到的复杂微观分子数据的可视化认知效果, 通过分割重建可视化复杂分子内部复杂结构^[13]。为准确高效地对共聚焦成像得到的数据进行可视和测量, 采用主动式立体显示技术, 对细胞的复杂结构和关系进行更好的分析和可视化^[14]。为研究植物细胞分裂规律, 进行植物细胞的自我复制、细胞信息传递和三维扩展等模拟^[15]。建立了水果细胞的水传递、气孔和三维扩展模拟模型^[16], 利用同步辐射计算机断层成像技术对水果内部分子结构和组织进行了三维可视化模拟^[17], 为研究与水果机械损伤和水分相关的品质检测提供理论依据。为研究植物分生组织的裂变规律, 利用共聚焦激光扫描设备对西红柿分生组织进行细胞尺度的观察, 并建立基于传输模型的叶脉和叶序生成规律的可视化三维模拟程序^[18]。在上述大尺度植物群体和植物微观复杂结构可视化模拟研究中, 可视化展示多为二维平面显示, 一定程度上阻碍了可视化模拟结果的认知。

现实世界是一个三维立体世界, 随着科学技术的发展, 三维立体显示应运而生, 并不断得到发展应用, 在医学、航空等领域已有研究报道^[19], 并且成为将来科学

收稿日期: 2011-11-23 修订日期: 2012-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971115, 60371047)

作者简介: 郭浩(1985—), 男, 陕西咸阳人, 研究方向为植物三维模拟及科学计算与信息可视化。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: guohaolys@gmail.com

*通信作者: 朱德海(1962—), 男, 北京人, 博士, 教授, 主要研究方向为农业信息化。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。

Email: zhudehai@263.net

可视化展示的方向^[20]，但在虚拟植物领域目前鲜有报道。因此，结合立体显示技术和虚拟植物应用于数字农业是必要的，本研究构建出植物立体可视化模拟系统原型，以供研究大尺度植物群体和植物微观复杂结构可视化的学者参考。首先搭建被动式立体显示终端的硬件环境，其次在 Linux 系统上提出并实现跨平台的立体植物可视化模拟框架 StereoPlants，在此基础上移植现有根系模拟系统验证整个软硬件系统。

1 立体显示硬件系统实现

1.1 立体显示原理

三维立体显示技术，按其基本工作原理是否为双目视差将三维立体显示分为基于双目视差原理和非基于双目视差原理。基于双目视差原理的三维立体显示为观看者的左右眼提供同一场景的立体图像对，采用光学等手段让观看者的左右眼分别只看到对应的左右眼图像，这样便使观看者感知到立体图像。此类三维立体显示的技术相对成熟，分为被动式和主动式显示。非基于双目视差原理的各种三维立体显示的工作原理各不相同，如利用光学干涉衍射原理、人眼视觉暂留效应以及人眼视错原理等，此类技术多数不成熟并比较昂贵。考虑到本研究需要立体展示大尺度群体植物或复杂微观结构，主动式显示需要接受信号的硬件和比较贵的快闪式眼镜，基于双目视差原理的被动式屏幕投影系统满足本研究的要求且性价比高，所以选择被动式屏幕投影系统。

2.2 硬件系统构建

图 1 为硬件系统框图，图 1 中计算机负责左右眼立体内容生成，即执行植物立体可视化模拟程序，通过显卡 DVI 接口连接多屏宝设备，多屏宝将把左右眼的数据分开并输出到 2 台垂直叠加的投影机，这样用 2 台投影机同时同步投射，分别投射左右眼图像，2 台投影机通过偏振光片采用不同的极化方向，再通过被动立体眼镜左右眼的偏振极化镜片，左右眼的数据分别到达观察者的左右眼，最终由人脑来合成感知立体效果。该立体投影方式是目前效果较好的立体投影技术，投影的光通效率高，可达到 50%左右，同时因没有左右眼的影像来回切换，因此不存在主动立体投影中让人眩晕的问题，立体眼镜的价格很便宜，重量较轻，长时间戴也不会有疲劳的感觉，因不需要与红外发射装置同步，因此使用者可随意走动，灵活性较高，被动立体显示已成

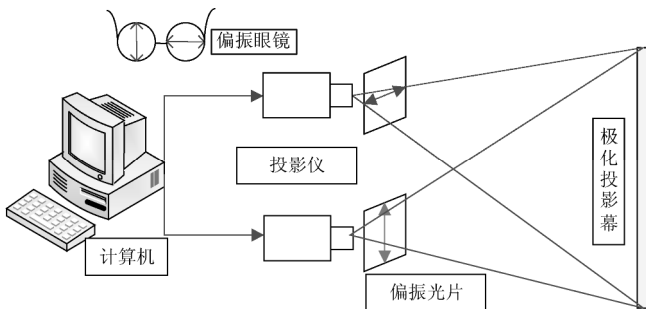


图 1 硬件系统
Fig.1 Hardware system

为立体投影的主流技术。本硬件系统可通过添加融合器设备或软件融合扩展成多通道环幕投影系统，增强沉浸感和显示效果，但需要额外的投入。

2 软件系统设计

2.1 立体显示内容生成模型

为了满足所搭建的立体显示终端的输入，需要模拟程序渲染出左右眼图像数据，本研究采用左右（side by side）立体传输标准格式，该格式也符合目前 3D 电视的 HDMI1.3a+传输标准 这样可视化立体显示终端也可以接到 3D 电视上，增加了对显示终端的兼容性。目前，图形学上常用的计算出左右眼数据的方法有 2 种，分别是不平行对称视景体投影(Toe-in)和平行不对称视景体投影(Off-axis)方法^[21]，其中 Toe-in 方法是早期的一种会产生纵向视差的简便方法，与人眼的只会产生横向视差的规律不符，Off-axis 是后期提出的方法，它不仅不会产生纵向视差，由于利用的是不对称视景体进行投影的，所以产生的左右眼的数据更符合人类视觉的习惯^[21]。

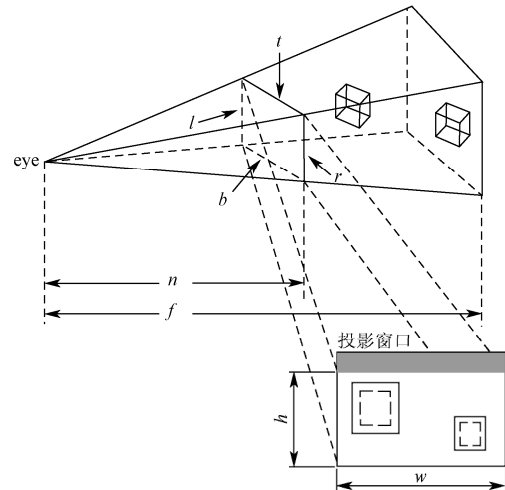


图 2 视景体模型
Fig.2 Frustum Model

如图 2 所示，图 2 是 OpenGL 中视景体模型，为了渲染出左眼或右眼图形数据，必须利用左眼或右眼的摄像机参数，来计算视景体的变换矩阵，为此，建立左右眼摄像机模型，图 3 为左右眼摄像机模型俯视图，C 是无立体可视时对应的摄像机，C 左和 C 右分别为左右眼对应的摄像机。

如图 2、3，设（以下假设中涉及的距离单位为像素，角度的单位为弧度）：两眼间距为 es ，摄像机水平视场角度为 fov_x ，摄像机视景体上下远近左右平面参数分别为 t, b, f, n, l, r ，摄像机投影矩阵为 R ，摄像机的焦距距离为 fo ，渲染结果图像输出宽度高度分别为 w, h, d 为 C 左或 C 右对应的对称视景体与非对称视景体近平面之间的水平移动距离，其中 es, fov_x, n, f, fo, w 为已知参数，需要模拟用户设定或程序按照模拟结果进行调整。如图 3 所示，对于右眼的参数，由几何约束可得：

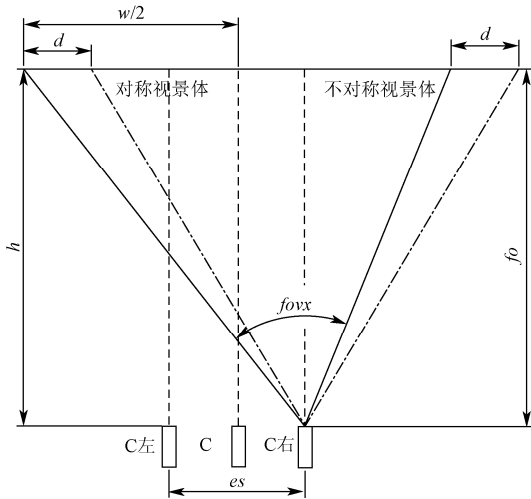


图 3 左右眼摄像机模型示意图

Fig.3 Illustration of Left and Right Eye Camera Model

$$t = n \times \tan(fovx/2) \quad (1)$$

$$d = 0.5 \times es \times n / fo \quad (2)$$

$$b = -t \quad (3)$$

$$l = -(w/h) \times n \times \tan(fovx/2) - d \quad (4)$$

$$r = (w/h) \times n \times \tan(fovx/2) - d \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{2n}{r-l} & 0 & \frac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \frac{2n}{t-b} & \frac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(f+n)}{f-n} & \frac{-2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式 (1) ~ (6) 计算和推理得到右眼视景体的投影矩阵 R ，左眼类似于右眼的计算。在图形库中利用函数操作设定好 R ，渲染出左右眼数据等由渲染管道自行完成。以下是利用图形库实现 Off-axis 方法的渲染出右眼数据的伪程序：

```

初始化相机相关参数；
计算 l, r 等参数；
glMatrixMode(GL_PROJECTION);
glLoadIdentity();
glViewport(w/2, 0, w/2, h);
glFrustum(l, r, b, t, n, f); //R 计算设置由此函数实现
glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
glLoadIdentity();
gluLookAt(pos.x + right.x, pos.y + right.y,
pos.z + right.z, pos.x + right.x + dir.x, pos.y
+ right.y + dir.y, pos.z + right.z + dir.z, up.x,
up.y, up.z);
drawplants(); //绘制植物模拟程序
    
```

在以上代码中，pos、right、dir、up 是摄像机的参数，分别为位置、右边向量、观看方向向量、向上向量，其他 l、r 等参数与图 2 与 3 中对应。对于左眼的程序和右眼类似，只需要更改视窗口的位置参数即可。

2.2 StereoPlants 架构设计

目前，已有植物可视化模拟的不少研究，为了可以

让其他的植物可视化模拟容易移植到 StereoPlants 上立体展示，本研究采用的库都为跨平台的，以 FLTK 作为操作界面的软件库，以 OpenGL 作为图形生成库，模型相关的数据通过 MySQL 来进行管理，采用面向对象的 C++ 为编程语言，在 Linux 平台上搭建了 StereoPlants 框架。

如图 4 所示，整个框架主要由三部分组成，分别为模型知识数据管理、模型立体可视化、交互界面设计，其中模型知识数据管理，完成对植物模拟模型相关的统计数据和知识的读取、添加、修改等操作，模型立体可视化负责利用模型数据和可视化模拟模型进行立体可视化，交互界面完成在模型知识数据管理和模型立体可视化当中相关的用户交互。整个软件框架尽量做到简洁，以便于其他现有模型在此基础上进行移植扩展。

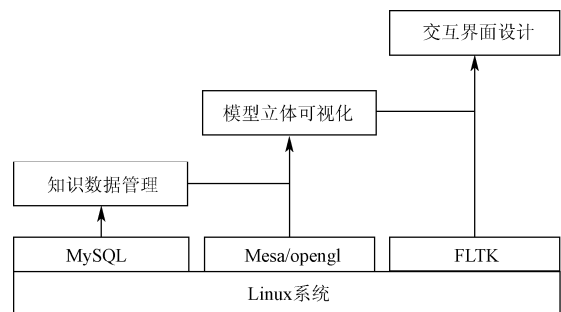


图 4 StereoPlants 框架

Fig.4 Architecture of StereoPlants

3 系统集成测试与结果分析

为了测试系统的可行性与有效性，测试在中国农业大学虚拟现实实验室进行，采用如下测试软硬件环境，边缘融合处理器 Multiview Plus+™MVCR、偏振眼镜、极化环幕、投影仪为 NEC NP4100+、计算机显卡为 GeForce GT 440、操作系统为 Ubuntu11.10、FLTK1.3.0、OpenGL4.0，其中边缘融合处理器是用来对不同通道的投影图像数据进行校正和无缝接合的，其他组件的功能显而易见。将现有的根系模拟系统移植到本文实现的立体可视框架下，集成测试结果如图 5 所示，图 5 中右边普通显示器上显示 side by side 的格式，就是将左右眼图像平分绘制于屏幕的左右两边，人无法感知立体效果，左边为环幕投影下立体可视效果，拍照时得到的有重影的照片，但观察者通过佩戴偏振眼镜，观察者左右眼就可以分别得到根系模拟的左右眼图像数据，从而达到立体可视的结果。影响立体效果有很多因素，主要分两方面，一是与投影设备等硬件及其安装有关，二是立体可视化程序有关。投影设备安装由专业设备提供人员完成，并且不易多次调节，所以合适的配置立体可视化程序配合现有的硬件系统，从而达到理想的立体可视效果是比较合理的方案，在测试过程中，根据安装好的投影设备的几何位置和关系，选择摄像机水平视场角度为 fovx 在 45~60°之间较为合适。

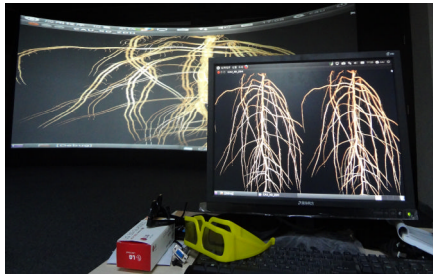


图 5 集成测试结果

Fig.5 The Results of Integration Test

摄像机的聚焦距离为 f_0 与观察者距离屏幕的距离相等时,此时双目的视差为零,渲染的植物与屏幕在同一个平面上,渲染植物的聚焦距离小于 f_0 时视觉上的立体效果较强,反之亦然。当两眼之间的距离为距离屏幕距离的 $1/30$ 时,效果较好,否则观看者会感觉严重失真,眩晕等。

4 结论与讨论

针对虚拟植物目前向着群体大尺度和微观小尺度模拟的趋势发展,而展示方式只是对渲染图像的平面显示,一定程度上阻碍了可视化结果的认知,提出并实现了一个立体显示植物模拟的系统原型,该系统能够完成植物可视化立体内容的生成到立体展现,基于跨平台的 FLTK 界面库与 OpenGL 图形库实现植物模拟立体可视化架构,支持对现有的基于该图形库可视化模拟模型的移植扩展,立体格式与现有的 3D 电视标准兼容,显示终端可采用 3D 电视,从移植现有的植物根系可视化模拟的集成测试结果显示看,该立体显示植物模拟系统原型可生动地、沉浸地立体显示植物可视化模拟,系统使得植物群体以及复杂的植物器官或微观显微结构的可视化更直观、更容易被认知;本文提出的立体显示植物模拟系统还只是原型,对功能模型的支持尚需加强,系统在交互性上仍需提高;随着虚拟植物向着植物群体和微观复杂结构研究的发展趋势,以及 3D 电视的普及,本研究实现的可视化方式将成为主流。

[参 考 文 献]

- [1] Dornbusch T, Wernecke P, Diepenbrock W. A method to extract morphological traits of plant organs from 3D point clouds as a database for an architectural plant model[J]. *Ecological Modeling*, 2007, 200(1): 119—129.
- [2] Fourcaud T, Zhang Xiaopeng, Stokes A, et al. Plant growth modelling and applications: the increasing importance of plant architecture in growth models[J]. *Annals of Botany*, 2008, 101(8): 1053—1063.
- [3] 伍艳莲, 曹卫星, 汤亮, 等. 基于 OpenGL 的小麦形态可视化技术[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 121—126.
Wu Yanlian, Cao Weixing, Tang Liang, et al. OpenGL-based visual technology for wheat morphology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(1): 121—126. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郭浩, 戈振扬, 葛勇, 等. 基于点云的作物地下变态根可视化模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 214—218.
Guo Hao, Ge Zhenyang, Ge Yong, et al. Visual simulation of underground modified roots of crops based on point clouds[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(6): 214—218. (in Chinese with English abstract)
- [5] Brendan L, Przemyslaw P. Generating spatial distribution for multilevel models of plant communities[C]//*Proceedings of Graphics Interface*, 2002, 69—80.
- [6] Roettger S. NDVI-based vegetation rendering[C]//*Computer Graphics and Imaging*, 2007, 553: 10—17.
- [7] Florent C, Philippe D, Fabrice N. GPU-Based lighting and shadowing of complex natural scenes[C]//*2004 International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, California, 2004: 91—91.
- [8] Philippe D, Fabrice N. Rendering forest scenes in real time[C]//*2004 Eurographics Symposium on Rendering*, 2004: 93—102.
- [9] Falcao A O, Santos M P, Borges J G. A real time visualization tool for forest ecosystem management decision support[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006, 53: 3—12.
- [10] Lewis J L, Sheppard S R J. Culture and communication: Can landscape visualization improve forest management consultation with indigenous communities?[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77: 291—313.
- [11] 汤亮, 雷晓俊, 刘小军, 等. 小麦群体生长状态实时绘制技术及实现[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 128—135.
Tang Liang, Lei Xiaojun, Liu Xiaojun, et al. Real-time rendering of wheat population growth status and its realization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(9): 128—135. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李睿璞, 卢新海, 马才学. 基于 GIS 的农地整理三维可视化[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 302—305.
Li Ruipu, Lu Xinhai, Ma Caixue. Three-dimensional visualization of farmland consolidation planning based on GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(5): 302—305. (in Chinese with English abstract)
- [13] Bajaj C, Yu Zeyun, Auer M. Volumetric feature extraction and visualization of tomographic molecular imaging[J]. *Journal of Structural Biology*, 2003, 144: 132—143.
- [14] Guan Y Q, Cai Y Y, Opas M, et al. Virtual reality enhanced volumetric cellular visualization[J]. *Current Issues on Multidisciplinary Microscopy Research and Education*, 2005, 149—155.
- [15] Dupuy L, Mackenzie J, Rudge T, et al. A system for modeling cell-cell interactions during plant morphogenesis[J]. *Annals of Botany*, 2007, 101(8): 1255—1265.
- [16] Mebatsion H K, Verboven P, Ho Q T, et al. Modelling fruit microstructure using novel ellipse tessellation algorithm[J]. *Computer Modelling in Engineering and Sciences*, 2006, 14(1): 1—14.

- [17] Mebatsion H K, Verboven P, Endalew M A. A novel method for 3D microstructure modeling of pome fruit tissue using synchrotron radiation tomography images[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(2): 141—148.
- [18] Bayer E M, Smith R S, Mandel T, et al. Integration of transport-based models for phyllotaxis and midvein formation[J]. *Genes and Development*, 2009, 23: 273—384.
- [19] Fluke C J, Bourke P D. Digital planetariums for everyone: Astronomy visualization in reflection[J]. *The Planetarian*, 2005, 34(4): 10—15.
- [20] Fluke C J, Bourke P, Donovan D O. Future direction in astronomy visualisation[J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2006, 23(1): 12—24.
- [21] Bourke P. Calculating stereo pairs offaxis frustums-OpenGL [EB/OL]. <http://paulbourke.net/miscellaneous/stereographics/stereorender>, 2007.

Construction of plant stereo visualization simulation system prototype—StereoPlants

Guo Hao¹, Zhe Dehai^{1*}, Ge Zhenyang², Ma Qin¹, Liu Kenan²

(1. *College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;*

2. *Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)*

Abstract: With the development research of virtual plant visualization, simulation of plant communities and the complex plant tissues or microstructure has become a trend. Currently the display of visualization for plant simulation is just a two-dimensional display of rendering image. It is not visualized for cognizing the results of large plant communities or complex microstructure. Therefore, this paper proposed and implemented a system prototype to display plant simulation which accomplishes plant visualization stereo three-dimensional content from generating to stereo presentation. The software of this system is based on cross-platform FLTK graphical user interface library and OpenGL graphics library to complete plant simulation stereo visualization architecture, and supports to implant existing visualization simulation model based on OpenGL. The hardware system composes of computer and passive stereo projection system. In order to test the feasibility of this system, the existing visualization simulation of plant root was implanted into visualization framework. The integrated test results showed that this system prototype of stereo display plant simulation can vividly and immersed stereo display root visualization simulation. The prototype system makes the visualization of plant communities and the complex plant tissues or microstructure more intuitively and easily to be cognized.

Key words: plants, simulation, visualization, stereo display, microstructure