

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.032

农作物生长模拟三维场景整合平台设计*

陆声链 郭新宇 赵春江 肖伯祥 温维亮

(国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097)

【摘要】 提出了基于组件和插件的农作物生长三维场景整合平台。该平台提供了一系列3D几何与计算组件,包括曲面、高度场、地形等3D对象,场景组织、绘制引擎、碰撞检测、动画生成等计算组件,以及光照、摄像机的虚拟对象;基于统一定义的插件接口,能够将由不同研究团队开发的植物生长可视化模拟模型嵌入到平台中,从而为农林植物生长模拟模型的整合、重用和互操作提供一个灵活的工具。平台提供了图形化的交互式设计界面,用户能够快速构建一个复杂的三维农业生产场景,并进行交互式的农作物生长模拟。实验结果表明,平台的交互设计和三维场景绘制能够达到实时的速度,在600万多边形规模的场景中,场景绘制的刷新率达到18帧/s,能够满足实时交互的需要。

关键词: 植物生长模拟 可视化 三维场景 整合平台 交互式建模

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0153-07

Design of Framework for Integrating 3D Scene of Crops Production

Lu Shenglian Guo Xinyu Zhao Chunjiang Xiao Boxiang Wen Weiliang

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

Abstract

A flexible component and plugins-based hybrid framework for integrating 3D scene of crops growth and its process was presented. This framework was designed to facilitate the integration, reusability and interoperability of heterogeneous models and techniques. The proposed framework was consisted of a complete set of 3D-geometric components for modeling and visualization, including surfaces, height fields, terrain and lights, and a group of computing components, such as scene organization, rendering engine, collision detection, animation generation and so on. Based on the united defined plug-in interfaces, models for visual simulation of plant growth which developed by different research teams could be embedded into this framework. Users could create rapidly a prototype of 3D agricultural production scene and simulate the growth of crops, by using a graphical designing environment. The experimental results demonstrated that the interactive design and 3D scene rendering could be done in real time. The rendering speed would reach to 18 fps in 3D scene with up to 6 000 000 polygons.

Key words Plant growth simulation, Visualization, 3D scene, Scene integrationm, Interactive modeling

引言

虚拟植物是在计算机生成的三维空间中展示植

物的生长过程及其与环境的相互作用,以便帮助人们理解关于植物生长和功能发展的底层生理过程^[1~4],从而进一步地为农业生产提供有效的管理

收稿日期:2010-05-17 修回日期:2010-06-25

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA10Z226)、国家自然科学基金资助项目(30700493)和北京市自然科学基金资助项目(4081001)

作者简介: 陆声链,助理研究员,博士,主要从事计算机图形学、虚拟现实研究, E-mail: lusl@nercita.org.cn

通讯作者: 赵春江,研究员,博士生导师,主要从事农业信息技术研究, E-mail: zhaocj@nercita.org.cn

措施。为实现这个目标,需要使用和整合来自于不同科学领域的模型或计算方法,以便从不同尺度上分析、仿真和理解复杂的植物生长过程。但目前虚拟植物研究领域,主要研究都是围绕某种植物或某项技术展开,尚未形成成熟的平台软件,进行诸如农业生产过程模拟、生态仿真等较大规模的应用开发仍然是具有挑战性的任务。近年来,部分学者采用 Multigen Creator、Virtools 等商业虚拟仿真开发平台进行农业生产场景、农业园区景观等的虚拟仿真。但由于这些仿真开发平台没有整合植物的生长知识和植物生长模型,因此利用这些平台只能进行农作物生长三维场景的静态重构,难以进行农作物生长过程和农事管理过程的模拟。在植物生长可视化模拟领域,尽管研究者也开发了包括 L-Studio、AMAPmod 等在内的各种软件系统^[5~9],或者各种专用的植物可视化模型^[10~11],但在一个软件系统下重用、整合和互操作这些由不同研究团队、用不同程序语言开发的植物模型仍然十分困难。

为解决该问题,Pradal C 等开发了一个开源的植物模拟软件平台 OpenAlea^[12]。该平台采用基于组件的体系结构,重点在于为不同的研究团队从更细微的尺度上实现异构植物模拟模型和数据结构之间的整合和互操作提供方便,其目标不仅仅是开发者和计算机科学家,还有希望能够用最少的编程进行异构模型整合的生物学家。但是,该软件平台仍然没有从农作物生长模拟过程的虚拟设计和可视化模拟方面进行考虑,利用该平台还难以进行这方面的应用开发。

本文提出基于组件和插件的农作物生长模拟三维场景仿真平台,旨在为农林植物的模拟和可视化计算分析提供一个功能强大、灵活的软件平台,方便来自于不同研究团队开发的植物模拟模型和数据结构的整合,提高模型的可重用性和互操作性。利用该平台,研究者能够通过交互设计的方式进行农作物生长过程的可视化设计和模拟。

1 设计目标 and 需求

平台的主要目标是提供一个方便易用的框架,辅助研究者进行农作物生长三维场景的设计和可视化模拟,同时整合由不同研究团队开发的植物生长可视化模拟模型,提高模型的可重用性和互操作性,支持虚拟仿真环境的快速构建,开展地块尺度上的农作物生长过程的可视化设计和模拟。平台应该满足如下要求:

(1)方便整合。基于统一定义的插件接口,平台能够整合各种植物生长可视化模拟模型。平台并

不需要关心插件的具体实现细节,模型开发者能够用不同的描述方法、数据结构和语言,从不同的尺度上进行实现。

(2)易于使用。平台提供一系列计算与几何组件,以及交互式的可视化设计界面。在仿真初始化及仿真运行过程中,使用者可以在三维空间中产生、操纵、删除抽象空间中的仿真对象并设置或改变其属性。从而易于创建三维虚拟环境,整合各种植物生长可视化模拟模型,形成新的应用。

(3)可重用性和可扩展性。平台方便软件组件的共享、重用和整合,特别是来源于不同研究团队开发的植物生长可视化模拟模型,这些模型往往具有不同的实现语言、算法和数据结构。使平台对多学科项目和多尺度的农业生物模拟十分有用。

(4)绘制技术。平台需要能够正确地绘制虚拟场景,正确地表现场景中各种三维对象的效果,并通过有效、快速的绘制算法,完成场景绘制,满足应用的性能需求。

2 平台组成

2.1 总体结构及功能

为实现系统的重用和可扩展要求,采用组件和插件结合的系统构建。主要是将图形操作和场景控制等常用的函数按功能划分为组件,以组件的方式实现,并将可能由不同研究团队开发的生物模拟模型、虚拟环境模型等以插件的形式嵌入系统,以最大程度提供平台的可扩展性。

基于组件的软件开发(component based development,简称 CBD)方法是近几年来日益成熟的软件开发方法,组件化程序设计思想是将复杂的应用程序设计成一些小的、功能单一的组件模块,组件之间可以通过平台进行通信,使用组件时并不需要了解其内部结构,只需了解组件所提供的服务,其目的是提升软件系统开发的效率和质量。目前组件标准主要有微软提出的 COM+、OMG 提出的 CORBA 和 Sun 提出的 Java Bean EJB。这3种组件规范皆是针对二进制代码组件制定的,为基于组件的软件开发提供了一个对象管理的基础环境。

基于插件的开发是另一种增强系统扩展性的软件系统开发方法。插件的本质是在不修改程序主体的情况下对软件功能进行加强。一个基于插件的软件框架一般包括2个部分:主程序(host)和插件(plugin)。主程序即是“包含”插件的程序。插件必须实现若干标准接口,即插件接口函数,由主程序在与插件通信时调用。当插件的接口函数被公开时,任何人都可以自己制作插件,相同的函数或功能

可以有不同的实现。与组件相比,插件更加独立、具有更大的灵活性和可扩展性。

组件化开发具有开发速度快、系统独立性好、针对性强、基本功能不必底层实现等优点。但这种方式也存在一定的问题:①系统功能紧密耦合,系统更新困难。②系统的移植性不强,重复建设现象严重。③灵活性不足,难以满足不同团队、不同层次上开展生物模拟研究的需求。因此,本平台采用了结合组件和插件的系统构架(图 1)。

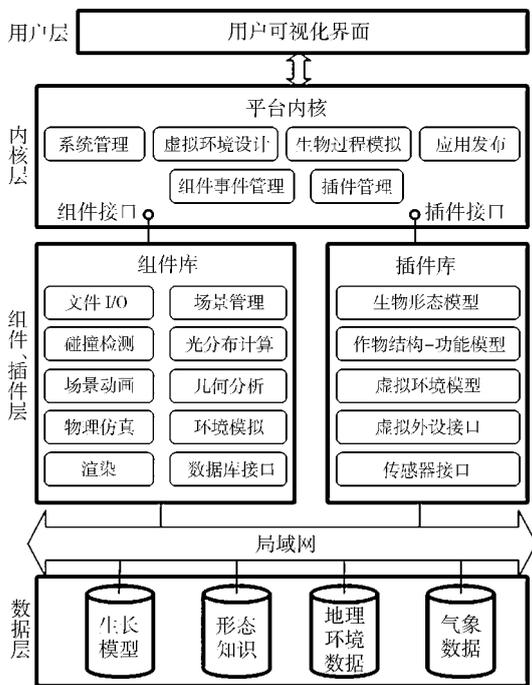


图 1 系统体系结构框图

Fig. 1 System framework

如图 1 所示,采用组件和插件结合的体系结构,系统框架只提供有限的功能,负责建立系统的图形化操作界面,以及提供核心的虚拟环境设计与生物模拟功能。此外,系统框架还负责完成组件和插件的管理:包括管理模型入口、添加/注册组件和插件、建立/取消连接。通过调用已有的插件,利用框架提供的添加与注册功能完成框架中可用组件的添加、注册,加入插件库中,由组件库中相应模块负责组织,为下一步的模型合成和连接提供模块。框架完成组件和插件的添加与注册后,这些模块才可以使用,同时将模块实例化添加到进程管理链接工具中,由进程管理链接工具管理使用。

2.2 主要功能

根据平台的设计目标 and 需求,平台的主要功能为:

(1) 基本几何对象编辑。可以创建基本的 2D/3D 几何对象,包括平面、样条曲线、圆锥体、圆柱体、立方体、BEZIER 曲面、球体、胶囊体等。基于这些

基本几何对象,用户可以创建更加复杂的几何体。此外,平台还具有地形、地块、温室等环境对象建模功能。

(2) 多源数据整合。可以整合 2D/3D、图像和音频等异构数据,实现生产场景的可视化建模。具体地,通过文件 I/O 组件,可以导入 3DS、DXF、OBJ 等通用的三维格式文件,可以将图片、音频文件整合到场景中,利用这些导入功能可以方便地对已有的各种数据模型进行利用,将其导入到场景中进行整合;能够对场景中的对象进行位置、方向精确调整,能够组合对象。对已经创建的模型,平台提供各种基本的编辑操作,如点操作、移动、旋转、平移等,以及相关的颜色、材质、贴图等操作。同时提供方便灵活的对象组合功能,用户可以自由地将场景中的对象进行灵活的分组,所有操作均可用鼠标拖动的方式实现。

(3) 生物模型整合。利用插件框架,能够集成由不同团队开发的、不同层次的生物模拟模型,如植物形态模型、结构-功能模拟模型等插件。系统能够集成按照系统规定的接口开发的植物生长模型插件,用户可自由开发自己的植物生长模拟插件,并嵌入平台中,成为平台的一个组件。

(4) 农作物生长过程可视化模拟。通过应用不同作物的结构-功能模拟模型,能够实现环境因素作用下农作物生长过程的可视化模拟。

(5) 种植规划。用户能够设置地块的土壤属性,选择种植的品种,设置行间距,模拟过程中可以加入人工的干涉,如施肥、浇水等简单的管理措施。

(6) 生物计算。平台集成了光分布计算、形态结构分析、生物体三维模型的物理模拟等通用计算组件。

(7) 场景动画制作。提供了在模型基础上变形的基本动画功能,对已有静态模型提供位移操作和基本的线性变形功能。也可以为场景中的任何物体设置关键帧动画,包括摄像机和灯光的运动路径设置,利用该功能可以实现良好的场景漫游展示。

(8) 运动数据整合。支持导入 X 格式或 FBX 格式的骨骼动画文件,以便实现施肥、浇水等动作,以及人物走动、飞行、害虫飞舞等行为动画。

(9) 场景漫游。提供行走、飞行两种漫游方式,以及自动和手动控制方式,可以设置漫游路线,跟踪、录制漫游路径。

(10) 图像/视频输出。所有的场景动画和漫游过程都可以导出为图像和视频文件。

(11) 网络可视化。能够将虚拟场景和动画导出为 VRML 文件,通过 Internet 进行发布。

3 系统实现及关键技术

平台采用 Visual C++ 2005 开发平台和 OpenGL 图形接口进行开发,平台运行主界面如图 2 所示。

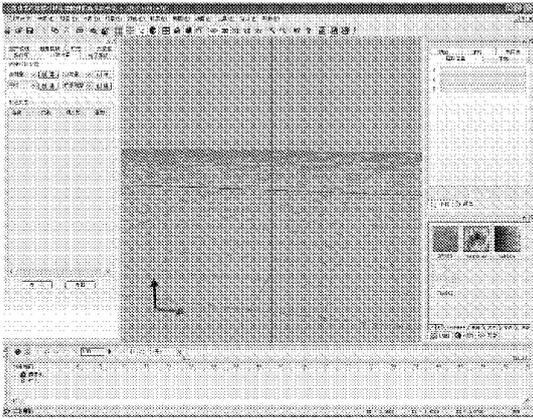


图2 系统运行主界面图

Fig.2 Main running interface of system

3.1 插件接口定义和管理

基于插件的构架是平台关键技术之一。在实现上,一个插件框架包括两个部分:一是主体程序的插件处理机制,用来进行初始化每个插件的过程,并且管理好每个插件接口;另一部分是插件的接口函数定义,即将所有的插件接口函数进行封装,以便开发者自由调用。

当前实现插件式应用程序主要有 3 种技术,分别是基于动态链接库 DLL 的插件、基于组件对象模型 COM 的插件和基于 .Net 反射技术的插件。平台采用 Visual C++ 2005 进行开发,因此可以采用 COM 或 DLL 两种实现方式。若采用 COM 方式进行开发,系统相对更容易扩展,因为 COM 的机制使得采用其他编程语言按照约定接口实现的模块也很容易添加到系统中,但开发难度较大。而采用普通 DLL 的好处就是比 COM 方式更加简单,易于实现。考虑到平台插件的主要开发者是进行动植物生长模拟和分析的不同研究团队,其程序开发能力普遍较低,综合衡量,采用了基于 DLL 的方式进行插件实现。

3.1.1 插件接口函数定义

插件定义了严格的访问接口函数,接口函数保证了统一的插件行为,也是插件与系统框架之间的通信渠道。

平台主要包括生物形态模型、作物结构-功能模型、虚拟环境模型、虚拟外设接口 4 种插件,每类插件都具有独立的接口函数。以生物形态模型插件为例,接口函数定义了诸如品种名称、绘制、交互设计、修改参数、获取数据、导出模型等方法。品种名称接

口(GetName)提供插件所实现的品种名称;绘制接口(Draw)负责将模型的几何形体绘制到屏幕上;交互设计接口(ShowDesignUI)弹出交互式的设计界面,以使用户可以对形态模型进行交互式的调整;修改参数接口(ModifyParameters)负责模型参数的修改;获取数据接口(GetData)用来取得模型的几何数据;释放接口(Release)负责回收模型申请和使用的内存与硬盘空间,以及其他资源。

具体的模型接口类 ShapeModel 设计代码如下:

```
class ShapeModel : public CObject
{
public :
    virtual ~ShapeModel () {}
    virtual void Inititalize() = 0;
    virtual CString GetName () const = 0 ;
    virtual void Draw() = 0;
    virtual void SetRenderMode(int) = 0;
    virtual void ShowDesignUI() = 0;
    virtual void ModifyParameters(vector <CString >) = 0;
    virtual void GetData(vector <Mesh >) = 0;
    virtual void Export (CString) = 0 ;
    virtual void Serialize (CArchive& ar) = 0;
    virtual void Release() = 0;
    :
};
```

模块插件继承模型接口类 ShapeModel ,此外还需要继承 CObject 类。在插件类中,根据需要继承自类 ShapeModel 的一些方法声明为槽,如槽 ShapeModel()、GetName()等,此外,还需要添加初始化和撤销方法,如 Inititalize()、Release()等。

3.1.2 插件管理

插件的管理由平台框架中的插件管理模块负责,包括管理插件入口、添加/注册插件、建立/取消连接。平台框架完成插件的添加与注册后,这些插件才可以使用,同时将插件实例化添加到进程管理工具中,由进程管理工具管理使用。

需要说明的是,只有实现了平台框架中指定的插件接口函数的插件才能被平台识别,这个检测会在插件的添加过程中执行。

3.2 场景组织和绘制

农作物生长场景需要整合大量的三维模型和环境资源,农作物生长模拟过程中也会产生大量的三维数据,组织、管理和绘制农业生产场景是平台的一个重要任务。为此,采用场景图技术进行场景的组织管理。

场景图是一种将场景中各种数据按层的形式组织在一起的场景数据管理方式。场景图是一个 k - 树型结构,如图 3 所示,根节点是场景,树中每个节点可以有任意多个子节点,每个节点存储场景的数据结构,如场景的三维物体、光源、相机、变换、其他属性等。由于场景图能够简化编程操作、方便可见性剔除、并对被渲染的物体通过状态的相似性进行排序,相对于其他结构更便于场景的组织管理,因此被广泛用作视景系统的数据结构。著名的视景仿真引擎 Vega、SGI 公司开发的 IRIS Inventor 和 IRIS Performer 等都采用了场景图技术。

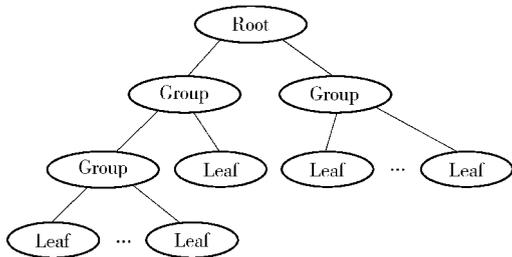


图 3 场景图结构示意图

Fig. 3 Main running interface of system

在农业生产场景中,包含各种不同类型的元素,如几何对象、光照、相机等,主要节点类型如表 1 所示。

表 1 节点类型表

Tab. 1 Types of node

节点类型	描述
Group	组节点,包含一组对象和组节点列表
GeoNode	几何对象节点,包括圆、立方体、圆锥、圆柱、样条曲线、曲面等基本几何对象
BioModel	生物对象,包括动植物的形态结构模型或者结构-功能模型
Field	地块对象,包括地块的几何形态,以及肥力、水分含量等属性信息
Terria	地形对象
Text	显示三维文本
Light	灯光对象,定义光源和光照属性
Camera	用于模拟照相机的功能
Audio	音频对象,为场景增加声音效果
PartSystem	粒子系统,用于模拟火、风、雨、雪、水流等现象
SubGeo	实体子对象,表示构成某个几何对象的子几何实体

采用场景图后,将按照场景对象的数据类型,对场景图中的节点和子节点进行管理,包括场景对象的添加、删除、属性信息的维护,以及对象位置、运动方式的管理。系统运行过程中,所有用户添加到场景中的对象,以及系统动态生成的对象都按场景图的组织结构进行组织,用户也可以自由地将多个对

象或 Group 组合成 Group。

基于场景图的对象组织也使得场景的绘制变得方便和灵活,具体的绘制策略是:根据场景图的层次结构来实现场景的显示,通过遍历场景图中的节点,根据节点类型及节点的位移、缩放等属性,同时利用可见性判断方法,对视锥体外的对象进行排除,最终实现场景的绘制。

3.3 环境数据接口

为了进行生物生长模拟,需要平台具有环境参数接口,即在模拟过程中能够结合用户设定的环境参数,或者利用环境模拟模型产生的参数,或者从传感器实时获取参数,进行生物过程模拟。

为此,平台提供了两个接口实现对环境数据的支持。第 1 个是通过“环境模拟”组件来设置主要的气候参数和地块环境,其中气候参数包括空气温湿度和太阳辐射,而地块环境包括地块的三维形态和土壤属性,用户可以设置地块的大小、网格划分粒度,也可以加上纹理,以展示不同类型的地块形态,以及设置土壤的温湿度、养分等(图 4);第 2 个是“传感器接口”插件,平台框架通过定义一组该插件的接口函数后,用户就可以自行开发支持从外部传感器获取实时采集数据的插件,以满足用户进行结合真实环境参数进行作物生长模拟的需要。

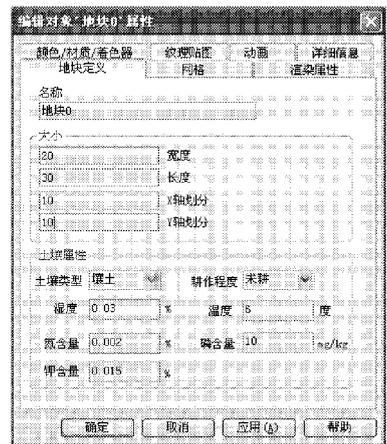


图 4 地块属性设置界面

Fig. 4 Interface for setting characteristics of field

此外,与生物体本身相关的形态和生理生化参数(如光合速率、蒸腾速率)都可以在生物模型插件中设置。

3.4 动画格式重用

在农业生产中,往往涉及到人的管理措施,如施肥、喷药、剪枝等,为了可视化展示这些动作,现有的虚拟现实仿真软件一般采用在三维人体模型上加入骨骼动画的形式。目前,有几种 3D 模型格式支持骨骼动画,包括 Microsoft 的 .X 格式, MilkShape 的

MS3D 格式、Half Life 的 MDL 格式、ID Software 的 MD5 格式等。

平台支持导入 Microsoft 的 .X 格式三维模型动画文件。X 文件应用了当前最成熟的主流三维动画技术——骨骼动画来实现各种模型的动画表现。X 文件的导入在文件 I/O 组件中实现。由于这种文件包含动画数据,与静态的三维数据不同,因此在实现时特别开发了一个新的类。虽然该类具有动态改变的特点,但是每一个具体时刻,动态模型仍应该具有固定的顶点数据,所以该类仍然与其他静态三维模型一样基于相同的基类。

3.5 自然现象模拟

为了模拟雨、雪、云雾、烟、火、水流、喷池等自然现象或各种流体运动,平台集成了 5 种粒子系统实例,用户可应用这些粒子系统实现以上自然现象的可视化模拟。

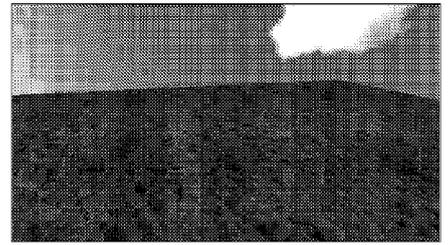
3.6 场景动画

场景动画包括虚拟场景中每个对象的运动设置、整个场景的漫游、虚拟外设与场景的实时互动,以及导入的骨骼动画。本平台中,对于场景中的每个对象,都可以设置其运动方式,提供了在模型基础上变形的基本动画功能,通过对已有静态模型提供位移操作和基本的线性变形功能。也可以为场景中的任何物体设置关键帧动画,包括摄像机和灯光的运动路径设置,利用该功能可以实现良好的场景漫游展示。

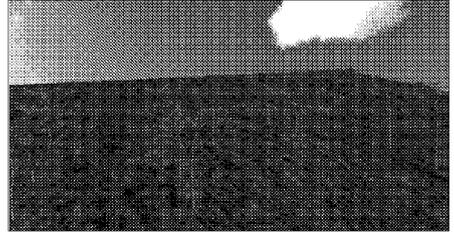
4 应用示例

为演示所设计的平台,基于 3.1.1 节给出的插件接口函数分别开发了黄瓜和西瓜两个品种的生长过程可视化模拟插件,插件中采用基于积温的方法模拟单个器官的生长速率。这里给出 2 个应用示例。第 1 个示例利用平台设计了一个虚拟地块,在地块上播种了 15 棵(5 行×3 列)黄瓜幼苗,然后模拟这些幼苗在正常温度条件下的生长过程。图 5 给出了模拟得到的该黄瓜群体生长的 3 个阶段的植株形态。

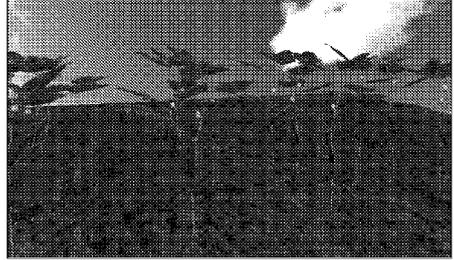
第 2 个示例测试平台在大规模三维场景实时绘制上的性能。首先构建了如图 6 所示的三维西瓜幼苗群体,群体总植株数为 6 000,整个三维场景的多边形数为 6 120 756 个;然后通过鼠标和键盘控制在场景中进行漫游体验。在此规模的三维场景中,虚拟漫游时屏幕刷新率为 18 帧/s,具有较好的实时漫游效果。此外,经试验当三维场景规模不超过 300 万个多边形时,场景的绘制速度能够保证在 25 帧/s 以上。



(a)



(b)



(c)

图 5 模拟黄瓜群体生长过程

Fig. 5 Simulating development of cucumber canopy

(a) 幼苗阶段 (b) 抽蔓期 (c) 结果期

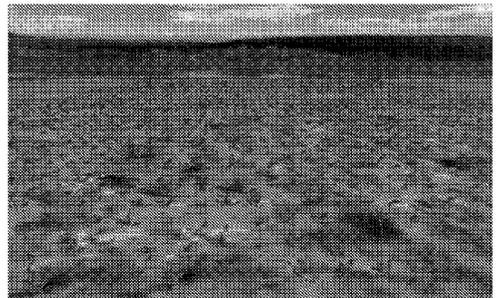


图 6 一个西瓜幼苗群体三维场景

Fig. 6 3D scene of group of seedling watermelon

5 结束语

设计了一个以提高异构植物生长可视化模拟模型的重用性、交互性和整合性,方便进行农作物生长过程可视化设计和模拟为目标的软件平台。该平台极大地提高了共享、重用植物模拟模型的潜力,特别是通过基于插件的体系结构以及一组专用的几何计算和可视化组件,使得整合现有的植物模拟模型并形成新的应用变得更加容易,特别是应用于农业生产过程的可视化设计和模拟。目前,该平台能够整合采用 C 或 C++ 语言、根据文中介绍的接口规范开发的植物生长模拟模型插件。对于已有的基于 C 或 C++ 实现的植物生长模拟模型,可以很容易地根据平台定义的接口规范进行封装;进一步的工作

还包括采用 CORBA、DCOM 等中间件技术或者 Web Services 技术,实现对基于其他语言(Java、Python 等)实现的模型的无缝整合。特别是考虑到不同研

究团队开发的模型中,模型参数和输入的环境参数都可能存在较大的区别,需要采用一种跨语言的接口智能抽取技术,实现异构模型组件的透明调用。

参 考 文 献

- 1 Hanan J. Virtual plants-integrating architectural and physiological models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 1997, 12(1): 35 ~ 42.
- 2 Prusinkiewicz P. Art and science for life: designing and growing virtual plants with L-systems[J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 630: 15 ~ 28.
- 3 Godin C, Sinoquet H. Functional-structural plant modelling[J]. *New Phytologist*, 2005, 166(3): 705 ~ 708.
- 4 Vos J, Marcelis L F M, De Visser P H B, et al. Functional-structural plant modelling in crop production[M]. Netherlands: Springer, 2007.
- 5 Karwowski R, Prusinkiewicz P. The L-system-based plant-modeling environment L-studio 4.0[C] // Proceedings of the 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Viala Montpellier, France, 2004:403 ~ 405.
- 6 Federl P, Prusinkiewicz P. Virtual laboratory: an interactive software environment for computer graphics[C] // Proceedings of Computer Graphics International, 1999: 93 ~ 100.
- 7 Godin C, Costes E, Caraglio Y. Exploring plant topological structure with the AMAPmod software: an outline[J]. *Silva Fennica*, 1997, 31(3): 357 ~ 368.
- 8 Kniemeyer O, Buck-Sorlin G, Kurth W. GroIMP as a platform for functional structural modelling of plants[M] // Functional-structural plant modelling in crop production, Netherlands, 2006:43 ~ 52.
- 9 Goreaud F, Alvarez I, Courbaud B, et al. Long-term influence of the spatial structure of an initial state on the dynamics of a forest growth model: a simulation study using the capsis platform[J]. *Simulation*, 2006, 82(7): 475 ~ 495.
- 10 郭新宇,赵春江,刘洋,等. 基于生长模型的玉米三维可视化研究[J]. *农业工程学报*,2007,23(3):121 ~ 125.
Guo Xinyu, Zhao Chunjiang, Liu Yang, et al. Three-dimensional visualization of maize based on growth models [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(3):121 ~ 125. (in Chinese)
- 11 张吴平,郭焱,李保国. 小麦苗期根系三维生长动态模型的建立与应用[J]. *中国农业科学*,2006,39(11):2 261 ~ 2 269.
Zhang Wuping, Guo Yan, Li Baoguo. Development and application of three-dimensional growth model of root system in wheat seedling[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(11): 2 261 ~ 2 269. (in Chinese)
- 12 Pradal C, Dufour-Kowalski S, Boudon F, et al. OpenAlea: a visual programming and component-based software platform for plant modelling[J]. *Functional Plant Biology*, 2008, 35(9 ~ 10):751 ~ 760.
- 13 王雪,郭新宇,陆声链,等. 基于骨架模型的玉米生长运动仿真与动画生成技术[J]. *农业机械学报*,2009,40(增刊): 198 ~ 201.
Wang Xue, Guo Xinyu, Lu Shenglian, et al. Growth simulation and animation creation of corn based on skeleton model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(Supp.):198 ~ 201. (in Chinese)
- 14 孟庆瑞,田兆锋,阎楚良. Ajax 技术在农业装备信息网中的应用[J]. *农业机械学报*,2008,39(12):132 ~ 135.
Meng Qingrui, Tian Zhaofeng, Yan Chuliang. Application of Ajax in the agricultural mechanization information network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008,39(12):132 ~ 135. (in Chinese)
- 15 田兆锋,阎楚良. 基于资源管理和 Silverlight 的农业装备信息网络平台[J]. *农业机械学报*,2008,39(11):151 ~ 155.
Tian Zhaofeng, Yan Chuliang. Agricultural equipment information network based on resource management and silverlight[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008,39(11):151 ~ 155. (in Chinese)