

# 基于 OpenGL 实现真实感地形表现的研究

薛安<sup>1,2)</sup> 马蔼乃<sup>3)</sup> 李天宏<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>(北京大学环境科学中心, 北京 100871) <sup>2)</sup>(北京大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

<sup>3)</sup>(北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

**摘要** 三维真实感图形是科学可视化、计算机动画、虚拟现实的技术核心,也是时空一体化地理信息系统的关键技术,而 OpenGL 又是目前最新的三维图形国际标准. 为了实现地形的真实感显示,讨论了三维真实感地形表现在 OpenGL 支持下的地形模型映射、遥感影像与地形的融合、专题信息与地形的融合、以及动画与虚拟现实等技术实现方法,并在荆江分洪区洪水演进模拟系统等开发中得到应用.

**关键词** 可视化 真实感图形 融合 地理信息系统 三维地形

**中图分类号:** P333.9 TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)08-0800-06

## A Study on the Representation of Terrain Realistic Image Based on OpenGL

XUE An<sup>1,2)</sup>, MA Ai-nai<sup>3)</sup>, LI Tian-hong<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>(Center of Environmental Science, Peking University, Beijing 100871)

<sup>2)</sup>(Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100871)

<sup>3)</sup>(Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract** A 3D realistic image is a core technique of scientific visualization, computer animation, and virtual reality, and an important technique of spatio-temporal GIS. OpenGL is the current international standard of 3D image. This article discussed the implementing method for the representation of terrain realistic image based on OpenGL, such as the digital terrain model mapping, the blend of remote sensing image and terrain data, the blend of thematic information and terrain data, animation, virtual reality, and etc. The mapping methods respective to the DTM format such as TIN, GRID and Contour, the direct and indirect blending methods of remote sensing image and terrain data, and the blending method of thematic information and terrain data based on the 2D transparent texture were presented mainly. Based on aforementioned methods, a flood routing visualization system for Jingjing diversion area was developed and the results fit the participant goals well.

**Keywords** Visualization, Realistic image, Blend, GIS, 3D terrain

## 0 引言

在 Windows 平台下,OpenGL 和 DirectX 是两个开发三维图形应用程序的标准,其中 DirectX 虽能提供实时三维图形生成功能,但主要应用在游戏等低端图形应用程序方面;而 OpenGL 则提供了二

维和三维建模、变换、光线处理、色彩处理、纹理映射、运动模糊、动画和实时交互等功能,是绘制真实感三维图形、建立三维交互场景、实现虚拟现实的高性能图形开发工具软件包<sup>[1]</sup>. 与 DirectX 相比,用 OpenGL 来绘制三维地形具有图形质量高、程序可移植性好等优点. 图 1 是用 OpenGL 绘制真实感三维地形的基本框架.

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(59890200)

**收稿日期:** 2000-02-15; **改回日期:** 2000-09-01

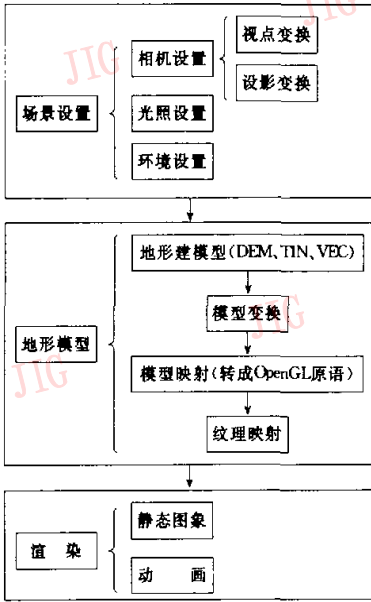


图1 绘制真实感三维地形图形的基本框架

### 1 地形模型映射

地形模型映射就是把数字形式的地形数据转成 OpenGL 的基本格式,并计算相关的参数(顶点颜色和法向量等)的过程。目前地形模型的数字表达方式主要有不规则三角网(TIN)、规则格网(DEM)和等值线(VEC)3种,但这3种格式的地形模型数据不能在 OpenGL 上直接使用,必须把数字地形模型转成 OpenGL 原语,以生成 OpenGL 可识别的原语序列。OpenGL 不仅提供了点、线、多边形等建模原语,而且通过这些原语还可把地形模型数据表示成点型原语序列、线型原语序列及多边形原语序列。由于 OpenGL 要求多边形必须是凸多边形,因此在软件实现中采用了三角面原语序列表达地形模型。

对于不同的数字地形模型表示形式,其三角面序列转换方式是有差别的,其中,不规则三角网(TIN)可直接转成 OpenGL 的三角面:

```
glBegin(GL_TRIANGLES);
glVertex(x1,y1,z1);
glVertex(x2,y2,z2);
glVertex(x3,y3,z3);
...
glEnd();
```

而规则格网(DEM)则需要转成 OpenGL 的三角面

序列:

```
glBegin(GL_TRIANGLES_STRIP);
...
glVertex(x1,j,y1,j,z1,j); //第I行j列点
glVertex(x1+1,j,y1+1,j,z1+1,j); //第I+1行j列点
glVertex(x1,j+1,y1+1,j,z1+1,j); //第I行j+1列点
glVertex(x1+1,j+1,y1+1,j+1,z1+1,j+1); //第I+1行j+1列点
...
glEnd();
```

等值线可直接转成 OpenGL 的线串序列:

```
glBegin(GL_LINE_STRIP);
...
glVertex(x1,y1,z1);
glVertex(x1+1,y1+1,z1+1);
glVertex(x1+2,y1+2,z1+2);
...
glEnd();
```

由于 OpenGL 不直接计算每个顶点的法向量,因此若需获得较佳的视觉效果或模拟特殊的地景,在 TIN、DEM 转成 OpenGL 的三角面串序列时,就需为每一个顶点计算出它的法向量,且所有顶点的法向量应保持一致,否则有的三角面将不可见。这样,顶点的法向量与顶点坐标的计算与设置步骤如下:

```
glBegin(GL_TRIANGLES);
...
CalcNormal(nx,ny,nz); //计算顶点的法向量
glNormal3f(nx,ny,nz); //设置当前顶点的法向量
glVertex(x,y,z); //顶点的坐标
...
glEnd();
```

在荆江分洪区洪水演进模拟系统中,为了获得平滑的洪水波演进效果,每个顶点的法矢量均取围绕该顶点所有三角面的法向量的平均值。

### 2 真实感地形生成

所谓真实感地形是指通过对地形进行透视投影、消隐等操作后,生成像照片那样的黑白图象或彩色图象,产生出仿真效果<sup>[2]</sup>。

在 OpenGL 支持下,经过模型生成与变换、视点变换、投影变换、浓淡阴影处理、纹理生成等一系列参数的设置和函数的调用,就可生成真实感地形。在此基础上,通过 OpenGL 提供的纹理映射技术功能把遥感影像、专题图件和数字地形进行融合,从而提高地形的表现力。

## 2.1 纹理映射技术

Catmull 于 1974 年提出了纹理映射技术,用以提高物体显示的真实感。纹理映射过程是将已选择好的二维纹理函数映射到三维景物表面上,其映射计算即为求出二维纹理空间  $(u, v)$  与以参数  $(s, t)$  表示的三维曲面之间的对应关系<sup>[3,4]</sup>。

OpenGL 提供两类纹理,其中一类纹理图象的大小必须是几何级数的,另一类 Mipmaps 纹理可为任意大小,遥感影像、专题图件和数字地形的融合,可以使用 Mipmaps 纹理映射技术。

## 2.2 遥感影像与地形的融合

在 Mipmaps 纹理映射技术的基础上,可把研究区域的遥感影像与地形融合在一起,取得更为逼真的三维视觉效果。遥感影像与数字地形进行融合的步骤如下:

(1) 把地形数据和遥感影像配准,生成与地形配准的二维图象;

(2) 把配准后的二维图象转成 Mipmaps 二维纹理图象;

(3) 计算每个数字地形剖分顶点的纹理坐标,利用纹理映射技术把二维纹理图象映射到数字地形上。

把遥感影像与数字地形进行配准,分虚、实两种,其中,虚配准方案不对数字地形和遥感影像进行任何处理,其配准过程是为了获得两者的匹配方程,从而为计算纹理坐标提供相应的参数;而实配准方案则需预先通过同名控制点,来建立坐标匹配方程,把数字地形由大地坐标系转到遥感影像坐标系,或把遥感影像经过几何变换重采样等处理获得和数字地形坐标系相应的新影像。与虚配准方案相比,实配准方案可减少纹理坐标计算时的计算量,从而提高影像生成的速度。

生成 Mipmaps 二维纹理图象的过程,实质上就是把影像数据通过比例变换等处理,生成满足纹理映射技术要求的纹理图象。若遥感影像宽为  $w$ 、高为  $h$ 、每个像素 8bit, 图象数据信息放在 data 内存块中,则按如下方式调用 gluBuild2Dmipmaps 函数就可生成二维纹理图象:

```
gluBuild2DMipmaps(GL_TEXTURE_2D, 3, w, h, GL_RGB, GL_UNSIGNED_BYTE, data);
```

若 OpenGL 中的纹理坐标空间  $(u, v)$  为  $u: 0.0 \sim 1.0; v: 0.0 \sim 1.0$ , 则数字地形与影像融合的纹理映射过程,其关键就是计算出各剖分点在纹理空间  $(u, v)$  中的坐标。计算数字地形剖分点纹理坐标

的一般过程如下:

```
glBegin(GL_TRIANGLES);
...
CalcTexCoord(tx, ty); //计算顶点的纹理坐标
glTexCoord2f(tx, ty); //设置当前顶点的纹理坐标
glVertex(x, y, z); //顶点的坐标
...
glEnd();
```

对于实配准方案,以 DEM 为例,若 DEM 是  $N \times M$  的格网,影像匹配参数为:

```
struct {
...
float leftTex; //0.0~1.0
float rightTex; //0.0~1.0
float topTex; //0.0~1.0
float bottomTex; //0.0~1.0
...
}TexCtrlInfo;
```

则任一格网点  $P(x, y)$  ( $x: 0 \dots N-1; y: 0 \dots M-1$ ) 的纹理坐标计算如下:

$$u = x/(N-1);$$

$$u = leftTex + (rightTex - leftTex) \times u;$$

$$v = y/(M-1);$$

$$v = topTex + (bottomTex - topTex) \times v;$$

对于虚配准方案,则要根据匹配方程的参数,首先计算出数字地形上每一点在遥感影像上的坐标  $(u, v)$ ,然后再分别除以影像的宽和高,就可计算出纹理坐标。

图 2 是深圳河流域地形的光照渲染效果;图 3 是利用 1994 年夏季的 TM 假彩色合成影像和  $128 \times 83$  大小的 DEM 数据,通过实配准方案,把数字地形匹配到 TM 影像坐标系中,将遥感影像与数字地形进行融合,所取得的三维显示效果。



图 2 深圳河流域地形的光照渲染效果

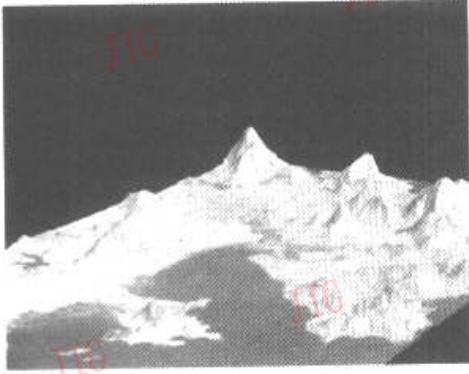


图3 地形与遥感影像的融合

### 2.3 专题数据与数字地形的融合

众所周知,三维地理信息系统的目标就是为三维空间数据提供表示、管理、处理、分析、三维可视化等功能,但到目前为止,还没有一个成熟的三维地理信息系统可供使用。若把二维专题地理数据与数字地形融合起来,提供专题地理数据的三维表现形式,则不仅可提高专题地理数据和数字地形的表现和利用效果,而且还可部分地实现三维地理信息系统的目标。

二维专题数据与数字地形融合的一般方案是先把每个二维专题数据匹配转换到数字地形上,然后求出每个二维专题数据的三维形式,绘出三维形式的专题数据,但这种方案不仅需要大量的计算,而且由于计算误差的影响,其表现效果不甚理想。

本研究利用纹理映射技术实现了另一种二维专题数据与数字地形进行融合的方案,其核心是先把二维专题数据转换生成带有透明度信息的图象,再把带有透明度信息的图象转换生成纹理图象,然后用纹理映射技术把纹理图象映射在数字地形上。本方案思路简洁、易于实现,表现效果较好,实现的过程如下:

- (1)把专题数据与地形数据进行配准,生成与地形配准的带有透明度信息的二维图象;
- (2)把带有透明度信息的图象转成二维纹理图象;
- (3)利用纹理映射技术把二维纹理图象映射在数字地形上。

它与遥感影像与数字地形的融合过程类似,但关键问题是如何把专题数据转换成可用于纹理映射的二维透明纹理图象,并使得渲染后,对应于专题数据上空白区部分的数字地形不被专题图所覆盖,而

其他部分则由纹理图象上的颜色信息、透明度信息以及地形信息的合成值来确定。

二维透明纹理图象生成方法如下:

利用透明处理方法,为要生成的图象中的每一个象素设置透明度,空白区设置为 $(0,0,0,0)$ ,其他部分设置为 $(R,G,B,A)$ ,其 $R,G,B$ 值由图象生成软件根据地物类别确定,这样每一个象素由4位 $(R,G,B,A)$ 表示,其中, $(R,G,B)$ 表示其颜色; $A$ 表示透明度,其值为0,表示全透明,255表示不透明,据此,即把专题数据中的点、线、面等形态的地物数据转成带有透明信息的图象。

若生成的是宽为 $w$ 、高为 $h$ ,每个象素8bit的图象,且图象数据信息存放在 $data$ 内存块中,则按如下方式调用 $gluBuild2Dmipmaps$ 函数,就可获得带有透明信息的纹理图象:

```
gluBuild2DMipmaps(GL_TEXTURE_2D,A,w,h,GL_RGBA,GL_UNSIGNED_BYTE,data);
```

纹理映射时,可根据图象颜色、透明度、及地形自身的颜色计算出每个象素的颜色值,其计算方法简述如下:

设 $I(x,y)$ 为图象上 $(x,y)$ 点的颜色值; $A(x,y)$ 为透明度; $O(x,y)$ 为地形自身的颜色; $N(x,y)$ 为纹理映射后的颜色。

$$N(x,y) = O(x,y) \times (1 - A(x,y)) + I(x,y) \times A(x,y)$$

## 3 动画与虚拟现实

OpenGL 提供了双缓存技术,通过它可制作动画和实现数字地形的飞行漫游,其基本原理是提供前、后台两个缓存,在显示前台缓存内容中的一帧图象画面时,后台缓存正在绘制下一帧画面,后台绘制完毕后,再交换前后台缓存,这样不断循环,即可得到连续的动画效果。也就是在 OpenGL 技术支持下,一方面可实现静态数字地形的飞行漫游,另一方面可图示仿真地表各种动态变化过程,还能动态模拟地形的升降、地貌的变化等。更为理想的虚拟现实(Virtual Reality)也是以三维图形为基础,结合立体视觉技术、传感技术、多媒体技术等来实现的。它对于数字地形的表现、时空一体化的地理信息系统的实现都有重要的价值<sup>[6]</sup>。

在 Windows 系列操作系统环境下,基于 OpenGL 的虚拟现实浏览器可交互式地浏览虚拟现

实世界,而且这些浏览工具一般都支持虚拟现实标记语言(VRML)。在 OpenGL 或 OpenInventor 开发环境下把数字地形数据、地理信息系统中的时空数据转成虚拟现实标记语言,即可快捷地实现数字地形数据、地理信息系统中时空数据的虚拟现实化。

#### 4 动画技术的实例应用

在荆江分洪区洪水演进模拟研究中,洪水演进数值模拟模型算出了 300h 共 1 800 个时段的洪水水深数据,这些水深数据需要匹配在分洪区地形上,才能以三维动画形式表现出洪水演进过程。本文在 OpenGL 支持下,设计了基于时间栈的动态演示系统,该系统由时钟模拟模块、事件栈管理模块、事件执行模块、对象管理模块、三维表现模块等组成,其中,事件执行模块接受时钟模拟模块、事件栈管理模块、以及各对象发送来的消息,并执行相应的事件;三维表现模块则接受各对象的指令,生成三维场景,并用双缓存技术来实现洪水演进的动态模拟;对象管理模块用于管理各种模拟分洪区内地物各类型的对象,各对象不仅有它的生命周期,即在系统生命期的某一时刻出现、到某一时刻消失,而且根据对象状态在它自己的生命期内是否改变分为静态对象和动态对象两大类,其中静态对象在它生命期内保持不变;动态对象在它生命期内,其内部状态则发生变化,而根据状态变化的方式,动态对象又分为模型对象和时间栈对象两类,其中模型对象状态的变化由对象内部的模型演算模块产生;而时间栈对象则带有一个时间栈,它在栈中记录有该对象在各个时间段上的状态值。

在洪水模拟演进中,其水深分布数据有模型对象和时间栈对象两种。由于洪水演进数值模拟的计算速度较慢,平均 1min 计算一个时段,不便于快速的动态演示,因此在动态演示时,系统设计了时间栈对象来表示水深数据。另外,水深数据对象内部还有一地形参考对象,它引用了系统中的静态地形对象。当系统的事件执行模块请求水深数据对象输出 OpenGL 原语序列时,水深对象引用地形参考对象生成 OpenGL 原语,并根据水的深度来设置相应的法向量值,从而在质地上区分出分洪区内的洪水淹没区、安全台及非淹没区。

利用 OpenGL 的动画支持功能,在 Pentium 350 微机上 Windows 98/NT 操作系统下实现了洪

水演进模拟演示系统,该系统平均每秒钟能生成 9 帧图象,图 4 和图 5 是 1 800 个时段中的两个时段的三维显示效果图,其中图 4 是第 100 计算时段的图象,对应的实际时间是第 16 小时,图 5 是第 275 计算时段的图象,对应的实际时间是第 46 小时。在 OpenGL 基础上实现的洪水演进模拟演示系统,其程序开发周期短,图形绘制质量高,更重要的是开发人员能把主要精力集中于洪水演进模型的设计与实现上。

基于时间栈对象的洪水演进过程可视化系统虽能表现出洪水演进的动态效果,但毕竟不是模型实时计算的动态效果。如要进一步实现具有较理想动态显示效果的基于模型对象的可视化系统,可以采用基于数据流的可视化系统构造方案,即在多台计算机组成的网络环境下,构造模型与可视化并行计算的基于数据流的可视化系统。而在 OpenGL 基础上实现的 VTK 可视化程序包可作为系统实现的基础。

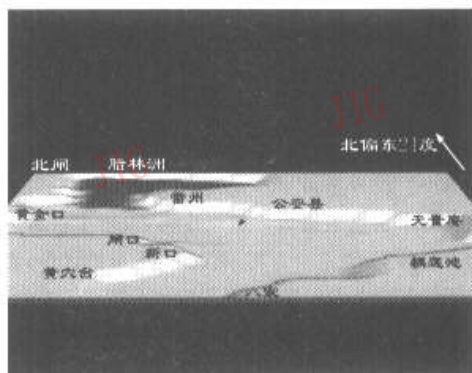


图4 洪水演进第100时段状况

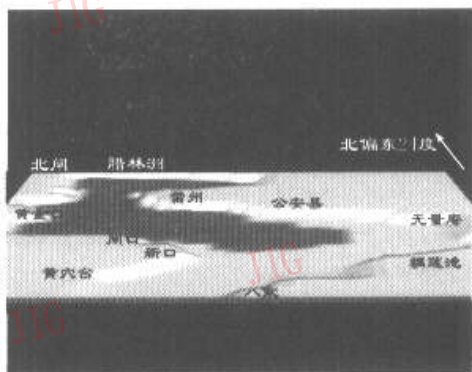


图5 洪水演进第275时段状况

### 5 结 语

由于 OpenGL 为真实感三维地形表现、时空一体化地理信息系统的实现提供了非常有利的三维静态、动画图形的开发基础,且在其上开发可视化软件具有较高的效率和很好的程序可移植性,因而为地理信息系统和虚拟现实技术的接轨提供了图形表现上的技术保障。

#### 参 考 文 献

- 1 廖朵朵,张华军. OpenGL 二维图形程序设计,北京:星球地图出版社,1996.
- 2 彭群生等. 真实感图形的计算机生成. 计算机学报,1989,(3): 226~237.
- 3 张英杰. 快速映射技术. 微电子与计算机,1994,(4):18~21.
- 4 亢积真等. 生成真实感图形的四大关键技术. 计算机应用研究, 1994,(4):57~59.
- 5 Feiner. Steven K. Developing advanced virtual reality applications. In:Proceeding of SIGGRAPH, 1994:1~345.



薛 安 1969 年生,1997 年获北京大学遥感与地理信息系统研究所地图学与遥感理学博士学位,现在北京大学环境科学中心从事 GIS 空间分析和模型系统的研究。



马隽乃 1936 年生,教授、博士生导师,现在北京大学遥感与地理信息系统研究所从事地理信息科学研究与教学。



李天宏 1970 年生,1998 年获北京大学遥感与地理信息系统研究所地图学与遥感理学博士学位,现在北京大学环境科学中心从事 GIS 与遥感图象处理系统研究。