

## 三维 GIS 中多分辨率纹理模型的研究

杨必胜<sup>1,2)</sup> 李清泉<sup>2)</sup> 史文中<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港, 九龙) <sup>2)</sup>(武汉大学空间信息与网络通信技术研发中心, 武汉 430079)

**摘要** 在三维地理信息系统(GIS)中,影像数据作为模型表面的纹理特征,对弥补复杂模型的几何特性以及提高三维显示的效果具有十分重要的意义.为了提高三维模型显示的速度和效果,以及为了降低纹理贴图时,影像的数据量,提出了一种与观察视点相关的动态多分辨率纹理模型,并设计了相应的数据结构用于管理纹理数据,另外在讨论观察视点与纹理分辨率之间关系的基础上,开发了基于视点的确定纹理分辨率的算法,以用于交互三维显示时的纹理映射,最后给出了部分实验结果.实验结果表明,多分辨率纹理模型的映射机制可以取得较好的可视化效果.

**关键词** 地理信息系统(420·3040) 多分辨率 纹理模型 可视化 三维地理信息系统

**中图分类号**: TP391.41 P208 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)03-0328-06

### Research on Multi-resolution Texture Model in Three-dimensional GIS

YANG Bi-sheng<sup>1,2)</sup>, LI Qing-quan<sup>2)</sup>, SHI Wen-zhong<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Advanced Research Center for Spatial Information Technology, Department of Land Surveying and Geo-informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

<sup>2)</sup>(Research and Development Center for Spatial Information and Network Communication, Wuhan University, Wuhan 430079)

**Abstract** With the development of digital earth and cyber city, there is an increasing equipment on management and vitalization of integrated 3D model data and image data. How to improve the speed and visualization effect of three-dimensional(3D) model is a major research issue in 3D GIS. In order to improve the speed of 3D visualization, such as flying/walking through, many algorithms have been developed to reduce the data volume of 3D model, for instance, Level-of-Detail(Lod) algorithm. However, image data is also another important factor effecting the operation speed and reality of 3D model. Image data as the texture of surface of 3D model can enhance the reality of 3D model. For the reason that different graphic cards may have different restriction in the size of texture, the texture has to be managed very carefully. This paper proposes a new method to manage image data when a image is used as the texture for a 3D GIS environment. First, the data structure of multi-resolution texture model, which is developed to manage the large texture, is presented. Secondly, the algorithm that creates the multi-resolution texture model is developed, which is of vital importance for the texture mapping. Thirdly, the method of determining a proper texture resolution to map texture on the surface of 3D model based on viewer conditions is discussed. Finally, several experiments are illustrated.

**Keywords** Multi-resolution, Texture model, Visualization, 3D geographic information system(GIS)

## 0 引言

计算机图形界对图象(影像)的研究十分广泛和深入,其中纹理映射(texture mapping)是其最为成功的技术之一,这种技术是通过将图象粘贴于几何模型表面来增强图形的真实感.作为一种既能增加

绘制真实感和提高丰富度,又不影响几何图形本身几何复杂度的方法,由于该方法可以使本来呆板的图形变得多姿多彩,因而使得纹理映射技术在计算机图形学领域中变得十分流行<sup>[1~4]</sup>.目前纹理映射普遍采用 Mip-map 技术,但该技术受到硬件渲染设备对纹理映射尺寸的限制<sup>[5]</sup>.例如:目前 OpenGL 渲染机制支持的单张影像的最大范围为 2 048×2 048.

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(69833010); 数字香港的基础设施发展项目(1.34.37.9709); 湖北省科技攻关项目(2001AA104A01).

**收稿日期**: 2002-03-25; **改回日期**: 2002-06-26

该限制条件在一定情况下就限制了大范围场景范围内的纹理映射。为了消除这一限制条件, 以实现高分辨率影像的映射, 国外的一些计算机公司 (SGI, IRIS Performer 2.1<sup>[6]</sup>) 在软件和硬件设备上做了一定的改进, 提出了 Clip-map 技术, 该技术能够突破 Mip-map 技术对纹理尺寸的限制。Clip-map 技术通过定义一定的纹理大小, 用于限制不同层的 Mip-map 层的大小, 该纹理的尺寸被称为 Clip-size。由于在 Clip-map 中, 定义了 Clip-size 的尺寸, 从而任意一层的 Mip-map 的尺寸不会超出这个限制。如果某一层的 Mip-map 的尺寸大于 Clip-size 的限制, 则在映射时, 使用 Clip-size 的尺寸来对纹理数据的装载进行剪切, 反之, 则全部装入<sup>[6]</sup>。

在 3D GIS 中, 影像主要是用于增强 3D 模型显示的真实感和信息量, 但由于三维场景的范围较大, 因而地形表面的影像可能会超出限定纹理的尺寸。如果直接使用 Mip-map 机制进行纹理映射, 则需要对大的影像进行缩小, 使其尺寸在限定范围之内, 这势必引起信息量的丢失和造成较差的视觉效果。在大范围的三维场景内, 由于模型不同部分距离观察者具有不同的距离, 这将造成不同的纹理映射效果, 因此对于距离观察者较远的部分使用较低分辨率的影像, 而对较近的部分则使用较高分辨率的影像进行纹理映射, 对于三维地物模型 (如建筑物) 亦可如此。显然, 观察者的位置信息对于确定用于纹理映射的合适分辨率影像具有十分重要的作用 (在本文中由于涉及的影像都是作为三维模型表面的纹理贴图使用, 因此在本文中, 影像和纹理指同一概念)。

为了将用于纹理映射的与观察位置相关的多分辨率影像作为纹理模型, 以克服 Mip-map 机制的对纹理大小的限制, 必须对大尺寸的影像进行分割, 即首先使原始的大纹理影像变为一系列相连的纹理影像子块, 然后对每个纹理子块建立多级不同分辨率的纹理子块。而在三维显示时, 则根据不同区域内视点的位置来确定纹理的合适分辨率, 以使不同的区域形成具有不同分辨率的纹理 (如图 1 所示)。

### 1 多分辨率纹理模型的建立

根据前面的论述可知, 为了克服 Mip-map 机制对纹理尺寸大小的限制, 必须对大范围的影像进行分割, 使其变为一系列互不重叠的区域。图象分割是一项十分复杂的工作, 现已具有许多不同的分割方

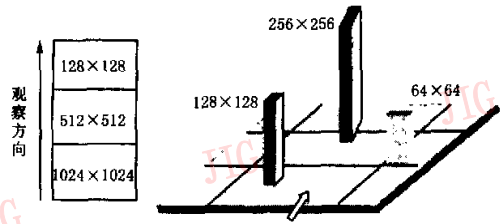


图 1 与视点相关的多分辨率纹理模型示意图

法, 如基于小波的分割、顾及影像特征的分割等方法<sup>[7,8]</sup>。本文所涉及到的影像分割, 由于只是在平面空间上把影像分割成一系列规则的区域, 并不涉及到影像特征的提取和顾及特征的分割, 从而便于大范围的影像分割和多分辨率影像模型的建立。

#### 1.1 影像分割的一些规则

设  $I$  是整个影像空间,  $I_1, I_2, \dots, I_n$  是影像空间  $I$  上的一些子集, 则在对影像进行分割时, 上述子集空间满足下列条件:

- (1)  $I = \bigcup_{i=1}^n I_i$ ;
- (2)  $I_m \cap I_n = \emptyset, m \neq n$ ;
- (3)  $I_m \subset I, m < n$ ;
- (4)  $I_m \subset \{X_1, Y_1, X_2, Y_2\}$ .

上述约束条件的几何意义是: 条件 1 表示把影像  $I$  分割成  $n$  个区域, 条件 2 表示任何两个不同的区域, 它们的交集为空, 条件 3 表示被分割成的任何一个区域  $I_m$  都是原始影像区域  $I$  的一个子集, 条件 4 是表示任何一个影像子区域, 其在几何空间上对应的几何空间区域  $((X_1, Y_1)$  是几何空间区域的左下角空间坐标;  $(X_2, Y_2)$  是几何区域的右上角的空间坐标), 它能够确定颜色空间到平面空间的正确映射。对于三维地物 (如建筑物), 由于其表面的影像的尺寸一般不是很大, 因此不需要对它们进行分割, 而对于此类影像可以直接通过建立多级金子塔模型和利用 Mip-map 机制来进行映射。对原始的影像进行分割后, 为了便于以后的纹理映射和保证三维交互显示时, 影像数据调度的高效性, 必须通过建立合适的数据结构来管理这些纹理数据。

#### 1.2 影像模型的数据结构

根据上述分析可以知道, 需要处理的纹理可分为如下两类: 一类是地形表面纹理, 这一类需要进行图象分割; 另外一类是地物表面纹理, 其不需要进行图象分割, 但是它们具有一个共同的特点, 即对于分

割后的区域都需要建立不同级别的分辨率纹理模型。为了便于进行纹理数据的管理以及便于在三维模型纹理映射时,进行有效调度和进行合理的分辨

率确定,作者设计了如下的数据结构,用于管理 3D GIS 中三维模型的纹理数据(如表 1 所示)。

表 1 多分辨率纹理模型的数据结构

图象	影像的属性	空间位置	分辨率的级别	影像的尺寸	影像数据
图象 1	1	$x_1, y_1, x_2, y_2$	4	1024×1024	01010101...
图象 2	1	$x_1, y_1, x_2, y_2$	3	512×512	01010101...
图象 3	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....
图象 n	0	$x_1, y_1, x_2, y_2$	2	64×64	01010101...

从表 1 中可以看出,纹理数据是由一些子块影像数据构成的,其中每一子块影像具有一定的属性特征。表的右半部分表示与子块影像数据对应的属性特征,其由 5 个属性字段组成,其中,影像的属性字段用于描述该影像所对应的几何对象,其中 1 表示的是地形部分,0 表示的是建筑物或其他对象的表面纹理;空间位置表示该影像被映射的范围;影像的分辨率级别表示在纹理映射时,该子块区域可供选择的分辨率数目,如分辨率级别 4 表示可以有 4 个不同分辨率的纹理供选择,其余依此类推;影像的尺寸指该子块影像的高和宽,影像的数据用于存储该子块影像最高分辨率时的影像数据。

## 2 多分辨率纹理模型的生成算法

根据前面的分析可以知道,一旦确定了影像的最小分割单元,即可对原始大范围的影像进行分割,这就为下一步的多分辨率纹理模型的建立打下了基础。多分辨率纹理模型的建立主要分为原始影像模型的分割和建立每个子块区域的多级分辨率纹理模型两个阶段,其步骤如下:

- (1) 读入原始影像,并判断原始影像的大小;
- (2) 根据分割时设定的最小单元来计算原始影像将要被分割的块数,假定最后分割的结果为  $N$  块;
- (3) 根据原始影像及其所对应的 3D 模型的表面范围来确定每一子块区域的范围( $x_1, y_1, x_2, y_2$ )以及每一子块区域内的影像数据;
- (4) 根据设定的子块区域的分辨率的级别数目来建立每一个图象子块的金子塔模型,直到所有的图象子块建立完毕为止;
- (5) 逐个把建立完毕的图象子块按照设计的数据予以存储,直到所有的图象子块处理完毕为止;
- (6) 对于建筑物表面图象的处理的过程同步

4、步骤 5;

(7) 结束。

对于分割后的影像的数据,可按照其对应的空间位置建立一定的索引机制,以便为进一步合理、快速的影像调度打下基础。对于纹理映射时,某一子块影像区域分辨率级别的确定与调度,可以在三维显示时,根据观察者的位置和观察角度来动态确定。

## 3 纹理模型与几何模型间的映射

利用分割算法只是把原始的影像进行了分割和建立了不同影像区域的索引,但是在交互三维显示时,如何确定不同区域的合理分辨率影像,并对其进行纹理映射,以取得较好的显示效果和较快的渲染速度是至关重要的。

在三维交互显示时,对于几何模型而言,几何模型空间上一定尺度的变化(如长度)都会在投影平面上产生不同大小的投影值(如果该投影值的变化能够被人眼所接受,则该变化不会引起视觉效果上的突变),而且这种几何空间上的变化在投影面上的投影结果,与观察者的距离及方向(观察条件)都具有一定的关系,作者把上述几何模型空间上的变化应用到影像空间(颜色空间),即:对于某一区域,如果使用同一影像的两个不同分辨率影像作为该区域表面的纹理属性,那么根据纹理映射的原理知道,该区域所对应的颜色空间也存在一定的变化,同理,该变化在投影面上也会产生一定大小的投影值。在观察条件一定的情况下,如果该变化没有引起视觉效果的变化,则可以使用其中较低分辨率的影像作为该表面的纹理属性,由于能够减少影像数据的装载量和提高纹理映射的速度,因此可根据视点与模型位置之间的关系来建立影像分辨率与观察位置之间的相互关系。

### 3.1 纹理分辨率的确定

图 2 描述了在一定的观察条件下,几何模型空

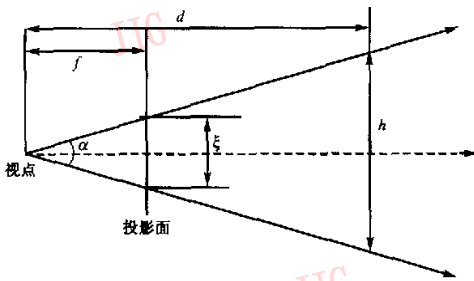


图2 透视投影原理图

间的某一不同尺度大小的变化值在投影面上的投影值。根据透视投影的原理可以知道:当该变化值的方向与投影面的方向平行时,该变化值经过投影变换后,在投影面上的投影值最大<sup>[9,10]</sup>。假设观察者到投影面的距离为  $f$ ,到变化位置的距离为  $d$ ,该变化位置与视线范围的张角的大小为  $\alpha$ ,其中假设变化值大小为  $h$ ,则在该观察条件下, $h$  在投影面上的投影值  $\xi$  为

$$\xi = f \times h / d \quad (1)$$

式(1)的几何意义是对于一个特定尺寸的几何对象,当其观察者的距离越远时,其在投影面上的投影值就越小。假设投影平面与计算机屏幕大小的比例为1,则反映的几何意义是其在屏幕空间上占据像素的多少。根据纹理映射的机制,当采用一定分辨率的影像对一尺寸范围确定的区域表面进行映射时,由于其单位像素的大小对应于该几何区域上一一定的几何长度大小,因而,同一几何对象的不同分辨率影像对同一区域进行纹理映射时,其单位像素所对应的几何长度大小是不一样的。例如:一幅原始影像尺寸为  $256 \times 256$ ,设其单位像素所对应的几何长度是  $\xi_0$ ,则在同样的纹理映射条件下,如果使用另外一分辨率的影像(假设为  $128 \times 128$ ),那么其单位像素所对应的几何长度是  $2\xi_0$ ,因此两者之间存在的差值为  $\xi_0$ 。根据公式(1),可以计算出变化数值为  $\xi_0$  的影像在投影面上的投影值,所以可以认为该投影数值的产生是由颜色空间的变化而导致的结果。由此可见,一旦知道了颜色空间上变化值的大小,则根据观察者的条件就可以计算出该变化在投影面上所产生的变化值。也就是说,在观察条件一定的情况下,对同一几何区域,根据式(1)就可以计算出不同分辨率的影像及其映射在投影面上所产生的投影值大小,根据投影值与设定的阈值进行比较的结果,就可以确定应该使用的影像分辨率。

### 3.2 纹理分辨率的算法设计

为实现基于上述纹理映射机制的纹理分辨率的选择,作者设计了相应的算法,用于确定纹理的分辨率,该算法的主要步骤如下:

假设每个子区域的原始纹理影像可以生成  $n$  个不同分辨率的子纹理数据  $\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$ ,则当前该几何区域,其纹理数据的分辨率为  $\delta_i$ ,允许的像素变化限定阈值为  $\tau$ 。

Algorithm DecideTextureResolutionOfTile() // 确定区域纹理影像的合理分辨率

(1)根据纹理映射的机制,由于通过映射区域的几何范围和纹理影像之间的映射关系,可以计算出与单位像素对应的几何区域上的几何长度大小,因此,对于  $n$  个不同分辨率的纹理数据  $\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$ ,可以分别计算出各自的与单位像素对应的几何区域上的几何长度集合  $\{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ ;

(2)由纹理数据和几何区域之间的映射关系,对于当前分辨率为  $\delta_i$  的纹理影像,根据其单位像素对应的几何区域上的长度  $h_i$ ,以及当前的透视投影的参数和观察者的位置,利用式(1)就可以计算出  $h_i$  在屏幕上投影的数值大小(像素的数目)  $\xi_i = f \times h_i / d$ ;

(3)根据当前设定的阈值进行判别,如果选择其他分辨率的纹理数据,那么其与单位像素对应的几何长度在屏幕上的投影值大小的范围为  $\xi_i - \tau \leq \xi \leq \xi_i + \tau$ ,而根据式(1)以及透视投影的几何关系,则选择的纹理单位像素对应的几何长度的范围大小应满足如下的条件:

$$(\xi_i - \tau) \times d / f \leq h \leq (\xi_i + \tau) \times d / f$$

(4)根据第3步计算的结果和与所有的候选纹理单位像素对应的几何区域上的几何长度集合  $\{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ ,就可以选取所需要纹理的影像,而选取合理分辨率纹理影像的条件是  $|h - h_i| = \min(1 \leq i \leq n)$ ;

(5)根据第2、3、4步结果,就可以确定不同几何范围内纹理映射的合理分辨率;

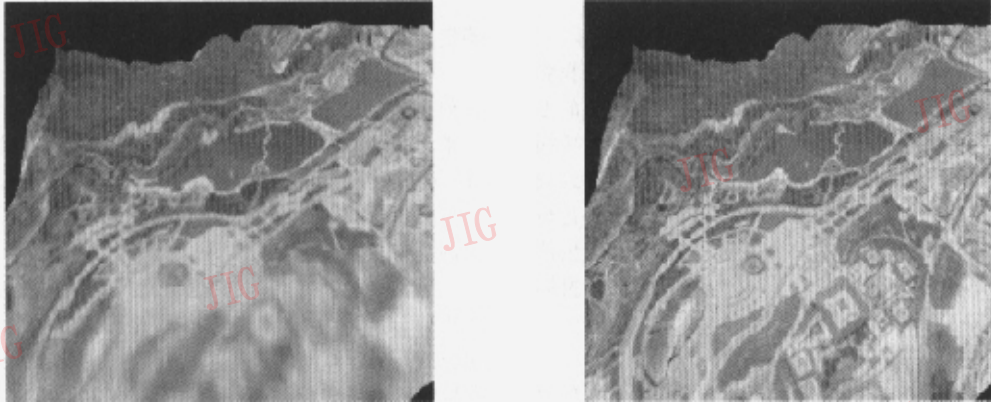
(6)结束。

显然,按照上述机制进行纹理映射的结果是:距离观察者远近不同的区域,其纹理具有不同的分辨率,即映射的结果是距离观察者较远的区域,其纹理具有较低的分辨率;反之,则具有较高的分辨率,实践证明,其映射结果符合视觉特征。

## 4 实验分析

为了检验该映射机制的纹理映射效果,以一幅  $4\ 096 \times 4\ 096$  的影像为研究对象,实验时,设定最小的影像分割单元为  $128 \times 128$ ,据其对上述影像进行分割,同时根据本文算法确定不同区域的分辨率,再使用 OpenGL 和 VC++ 编制相应的程序,然后用其

对某一几何对象表面区域进行纹理的映射,部分实验结果如图 3 所示(其中图 3(a)是全局统一分辨率模型的映射结果).由上述纹理映射机制可见,由于相邻的区域可能采用不同分辨率的影像作为纹理,因此在接边处,会出现缝隙(颜色空间上的不连续现象),为了弥补上述不足,可通过对接边处的影像进行线性插值来保证颜色空间上的连续性,以消除缝隙现象.



(a) 全局统一分辨率纹理模型映射结果

(b) 多分辨率纹理模型映射结果

图 3 统一分辨率与多分辨率模型纹理模型的纹理映射比较

根据上述算法的分析和纹理映射机制可知,在分割不同尺寸原始纹理影像时,需要确定最小分割单元的尺寸,为了确定不同分割单元的尺寸对纹理映射时间的影响,作者分别对下述 3 组不同尺寸的原始纹理影像,采用  $64 \times 64$ ,  $128 \times 128$ ,  $256 \times 256$ ,  $512 \times 512$  4 种不同大小的分割单元来对原始的纹

理进行分割,同时计算了不对纹理进行分割(采用全局统一的分辨率)而直接进行纹理映射所耗费的时间.表 2 列出了用不同分割单元对纹理影像进行纹理映射所耗费的时间,该耗费的时间是从装载原始纹理影像到纹理映射完毕的时间.

表 2 不同划分单元的纹理映射时间比较

单位:s

原始纹理影像尺寸 (长×高)	不同划分单元尺寸				统一分辨率模型
	子块大小 (512×512)	子块大小 (256×256)	子块大小 (128×128)	子块大小 (64×64)	
6 992×5 328	19.09	18.24	17.18	18.56	19.72
2 048×2 048	2.68	2.78	2.65	2.64	4.16
1 024×1 024	0.86	0.82	0.81	0.92	0.70

由表 2 可以看出,和其他分割单元的大小相比较,由于使用  $128 \times 128$  大小的分割单元所耗费的时间最少,因此在本实验中,所采用的分割单元为  $128 \times 128$ . 另外还可见,随着影像大小的不断变大,基于多分辨率纹理模型的纹理映射所耗费的时间比全局统一分辨率模型的纹理映射时间要短,而且由图 3 可以看出,多分辨率纹理映射的图形效果较好.

## 5 结论

为了提高 3D GIS 中,三维模型交互操作的显示速度和可视化效果,本文提出了基于视点的多分辨率纹理模型及其数据结构和构造算法,并在观察视点确定的状态下,对不同区域纹理分辨率的选取

进行讨论的基础上,开发了基于视点确定纹理分辨率的算法,同时还实现了与视点位置相关的多分辨率纹理映射机制,并比较了与全局具有统一分辨率的纹理映射机制及其三维显示效果的差别。实验结果证明,多分辨纹理映射机制不仅能够取得较好的三维显示效果和较快的纹理映射速度,而且能够对大尺寸影像进行纹理映射,从而为3D GIS中,大范围区域的三维模型的快速漫游打下了一定的基础。

## 6 讨论

在实际的情况中,由于三维场景的范围很大,因此为了保证纹理映射的高效性而把所有影像数据都装载在内存中是不现实的。为了保证三维显示时,能获得较好的视觉效果和较快的漫游速度,必须能够保证内存中,存在较少的纹理数据,但是由于交互显示时,观察位置不断变化,因此内存中的纹理数据也必须不断地变化,这样才能够适应几何模型空间范围的变化,以保证正确的纹理映射。由此可见,建立高效的索引机制和纹理缓存机制是进行快速纹理映射的前提条件,因为只有这样才能够在交互显示的过程中,快速地检索到需要装载的纹理数据,然后才能确定其合适的分辨率。这些将是作者下一步研究的内容。

### 参考文献

- 1 Blow J. Implementing a texture caching system[EB/OL]. Game Developer. <http://www.gdmag.com>. 1998.
- 2 Hill, Francis S. Computer graphics; using OpenGL [M]. Englewood Cliffs, N J, USA; Prentice Hall, 2001.
- 3 Gahegan M. Four barriers to development of effective exploratory visualization tools for geosciences[J]. International Journal of Geographical Information Science. 1999. 13: 289~309.

- 4 杨宝明,朱一宁. 分布式虚拟现实技术及其应用[M]. 北京:科学技术出版社,2000.
- 5 Williams L. Pyramidal parametrics [A]. In: Proc. of the Computer Graphics (SIGGRAPH'83) [C]. Detroit Michigan, USA, 1983:1~11.
- 6 IRIS Perform 2.1 API references[EB/OL]. <http://reality.sgi.com/performer/perf-99-07/0103.html>. 1999.
- 7 杜啸晓,杨新,施鹏飞. 一种新的基于区域和边界的图象分割方法[J]. 中国图形图象学报,2001,6A(8):755~759.
- 8 章毓晋. 图象分割[M]. 北京:科学出版社,2001.
- 9 Tanner C, Migdal C J. The Clipmap: A virtual mipmap[A]. In: Proc. of the Computer Graphics (SIGGRAPH'98)[C]. Orlando Florida, USA, 1998:99~106.
- 10 唐泽圣. 三维数据场可视化[M]. 北京:清华大学出版社,1999.



杨必胜 1974年生,武汉大学摄影测量与遥感专业博士研究生。主要从事三维GIS、虚拟现实、三维重建、地理信息系统软件等方面的理论和技术研究。



李清泉 1965年生,博士,武汉大学教授,博士生导师。主要从事空间数据模型、空间信息发布、激光测量技术、无线通信等方面的理论和技术研究。

史文中 1963年生,1994年获德国澳斯那布吕克大学博士学位,现任香港理工大学建设与地政学院土地测量与地理资讯学系副教授,地球资讯科技研究中心主任。主要从事空间数据质量、GIS、遥感、虚拟现实、GIS中三维动态数据模型、GIS设计与开发、GIS与遥感集成、高分辨率卫星影像中的特征提取等方面的理论和技术研究。