

多比例尺下细节层次可视化的实现机制*

李军, 景宁, 孙茂印

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

E-mail: myslone@yahoo.com.cn

http://www.nudt.edu.cn

摘要: 基于空间数据库技术提出了一种多比例尺下细节层次可视化的实现机制.通过建立 V-Reactive 树索引结构,可以表示不同的细节层次,同时集成了实现多比例尺综合技术.通过采用透视查询算法,简化了该机制实现的复杂度.根据三维可视化的特点,对 V-Reactive 树进行优化,增强了图像质量.实验结果表明,该机制适用于具有海量数据的三维 GIS 中.

关键词: 三维 GIS;细节层次;多比例尺;空间数据库;三维可视化

中图法分类号: TP311 **文献标识码:** A

目前,地理信息系统(geographic information system,简称 GIS)的研究和应用主要是表示二维对象,许多空间信息无法得到利用.为了更加完整地描述三维空间信息,三维 GIS 的研究逐步兴起.

细节层次(level of detail,简称 LoD)是一种典型的三维可视化技术.根据人的视觉特性,对于离视点不同距离或具有不同重要性的物体显示不同的细节,从而用较小的真实感损失换取更高的三维场景绘制速度.

多比例尺(multi-scale)技术已经在 GIS 领域得到广泛应用.为了减少数据量,提高数据存取效率,需要在数据库基础上,采用综合(generalization)技术,使得较小比例尺下的地理对象通过对较大比例尺下的地理数据进行处理后得到.

在三维 GIS 应用中,细节层次和多比例尺综合技术是必不可少的^[1].但是由于二者之间的差异,许多技术无法有效地应用于三维 GIS 中.传统的三维可视化技术采用文件系统,虽然可以提供较快的数据存取,但是丧失了数据库管理的许多优点,如数据共享、事务控制等.而且,对于具有海量数据的三维 GIS,由于无法预先将整个场景的数据全部装载至内存,文件系统只能将大型场景分割成若干小场景,导致其相互之间难以实现无缝查询等空间操作.因而三维 GIS 要求基于数据库实现细节层次技术,而多比例尺综合技术通常需要基于数据库建立特殊的索引结构.因此,必须通过数据库技术将二者集成在三维 GIS 应用中.

本文提出了采用空间索引 V-Reactive 树和透视查询方法实现多比例尺下细节层次可视化的机制.这种机制的特点在于:通过空间索引的层次结构表示不同的细节层次,利用透视查询提高三维可视化效率,多比例尺综合和细节层次技术在空间查询中得到集成实现.

1 Alternative Reactive 树的结构

多比例尺综合就是通过详细的大比例尺地图创建小比例尺的地图.为此,通常需要移去一些不必要或小的地理对象,使得小比例尺下具有更少的地理对象,这种操作称为选择(selection)(本文涉及的多比例尺综合主要

* 收稿日期: 2000-12-12; 修改日期: 2001-02-15

基金项目: 国家 863 高科技发展计划资助项目(863-306-ZD09-02-4)

作者简介: 李军(1973 -),男,湖南益阳人,博士,讲师,主要研究领域为地理信息系统,空间数据库,信息可视化技术;景宁(1963 -),男,重庆人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为地理信息系统,数据库技术,计算机网络信息服务;孙茂印(1941 -),河南巩县人,教授,博士生导师,主要研究领域为图形、图像处理,科学可视化技术.

是指选择).常用的方法是根据空间对象的重要性等因素给每个对象赋予一个正整数权值,该权值对应此对象存在的最小比例尺,越重要的物体权值越高.结合权值对所有空间对象建立索引,使得通过对索引树的空间查询能够快速得到某比例尺下的所有空间对象.

大多数多比例尺索引结构都以 R 树^[2]为基础进行改进.Oosterom 提出的多比例尺索引结构 Alternative Reactive 树^[3],其基本结构和算法与 R 树相同,只是增加了一个权值维,使得二维对象通过三维最小包围框 (minimal bounding box,简称 MBB)建立索引.

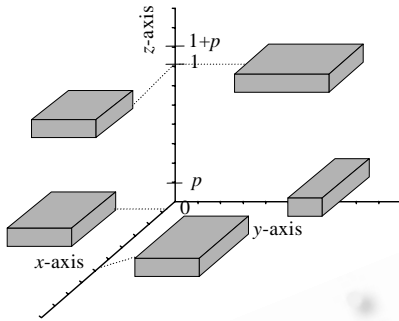


Fig.1 Structure of the alternative reactive tree

图 1 Alternative Reactive 树的结构

Alternative Reactive 树的结构如图 1 所示.图 1 表示了具有两种权值的空间对象的 MBB, x 轴和 y 轴表示二维平面空间, z 轴代表扩展的权值维,二维对象的三维 MBB 由其二维 MBB 和其在 z 轴上的权值构成.规定每个 MBB 在权值维上的宽度为 p ,权值为 k 的对象其 MBB 在 z 轴上的投影为 $k \sim k+p$.当 p 很小时,具有相同权值的对象能够优先聚合在一起.

Alternative Reactive 树完全采用 R 树算法,实质上增加了一个特殊维数的三维 R 树.通过查询权值在某区域范围内的对象,可以快速得到某比例尺下的所有空间对象.

2 基于 V-Reactive 树实现多比例尺下的细节层次可视化

2.1 V-Reactive 树的结构

在三维 GIS 中空间数据库的管理下,多比例尺综合和细节层次技术要求基于空间索引得到实现.例如,基于 Alternative Reactive 树的多比例尺综合^[3]和基于 R 树的细节层次技术^[4].如果可视化数据同时依赖于两种空间索引,则得到的三维场景的数据将不一致,需要将二者融合在一起.这种处理方法将降低索引性能,直接影响三维场景的图像质量以及三维场景的空间查询和分析.

直接利用多比例尺索引树实现细节层次技术是最佳的集成机制.有一些典型的多比例尺索引树(如 Reactive 树^[3])破坏了 R 树的动态平衡结构,其对象项存储在任意层次,索引树无法表示不同的细节层次.而 Alternative Reactive 树由于完全采用 R 树的结构和算法,其实质是高维 R 树,可以同时实现细节层次技术.

V-Reactive 树(V 代表 Visual)是 Alternative Reactive 树在三维空间的扩展和改进,通过改变其空间查询算法,同时针对三维可视化特点对路径选择等算法进行优化,可以高效地实现多比例尺下的选择、简化等多比例尺综合和细节层次技术.

V-Reactive 树的基本结构是四维 R 树,在三维 R 树的基础上扩展了一个权值维.预先给每个对象分配一定的权值,该权值与对象类型、对象大小、属性性质等相关,通常可映射到一个连续的整数区间.通过查询权值在某区域范围内的对象,可以较好地实现多比例尺综合.同时,利用其类似于 R 树的层次结构,可以实现多比例尺下的细节层次可视化.

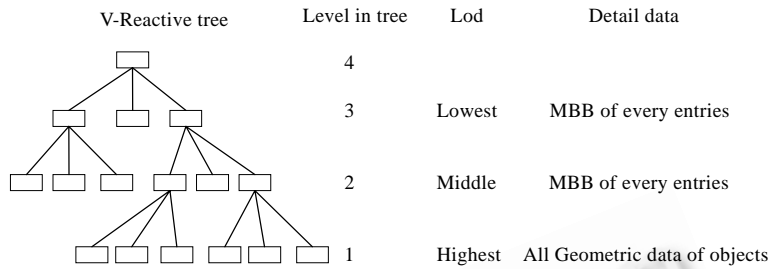
V-Reactive 树的节点包含节点项和对象项两类.对象项存在于叶节点,其表示是(MBB, Object-id).其中,MBB 是包含地理对象的最小平行于坐标轴的四维包围框.V-Reactive 树通过将对象的三维最小包围框和权值 imp-value 组合成一个四维的 MBB 进行插入、删除以及查询等操作.Object-id 是数据库中各对象的对象标志符(所有地理对象存储于面向对象数据库中).节点项位于各个非叶节点中,其表示是(MBB, Child-pointer).其中,Child-pointer 是指向子节点的指针.

2.2 多比例尺下细节层次可视化的原理

Kofler 提出了一种细节层次思想:利用 R 树的不同层次表示不同的细节^[4].各个非叶节点采用其 MBB 表示几何数据,由于每个层次节点的 MBB 是其所有子节点的 MBB 的最小包围框,因此越靠近根节点,MBB 越大,表

示的细节越少.叶节点采用数据库中的几何数据表示详细的细节.这种表示方法利用了 R 树的层次结构,只需较少的存储空间.

我们以 V-Reactive 树为基础,利用 Kofler 的细节层次思想,提出了多比例尺下的细节层次可视化机制.如图 2 所示,V-Reactive 树的最底层的叶节点代表最高细节层次,树的其他中间层次代表不同的细节层次.不同比例尺下的数据可以通过判断各节点的权值获取.



树的层次, 细节层次, 细节数据, 最低, 各节点项的 MBB, 中等, 最高, 地理对象的所有几何数据.
Fig.2 LoD representation based on V-Reactive tree

图 2 基于 V-Reactive 树的细节层次表示

以对一个城市的 fly-over 为例,来描述这种多比例尺下的细

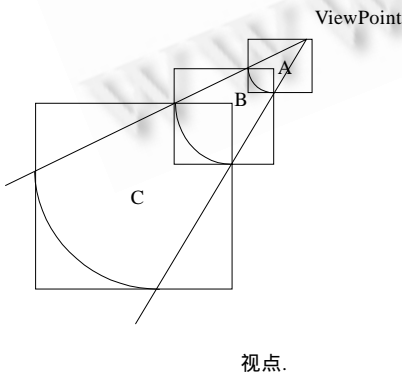
节层次可视化技术.最初,我们远离一个城市,整个城市用一个立方体表示.当靠近该城市时,城市逐渐显示各个行政区域的 MBB.接近城市时,一些靠近视点、离视线方向近的地理对象显示详细的几何细节.当在任意时刻改变比例尺时,会发现许多对象或 MBB 的显示或隐藏.

2.3 基于V-Reactive树的透视查询

对于具有海量数据的三维 GIS 应用,无法一次性加载和显示整个场景的数据.为此,在实现三维可视化时,根据视点的位置和视线的方向,只处理那些位于可视区域内的地理对象.因此,需要通过空间查询从数据库中获取位于当前可视区域内的地理对象数据.可视区域通常为一个棱锥,查询可视棱锥内的空间对象称为透视查询 (perspective query).透视查询技术在许多三维可视化系统中得到应用.Kofler 讨论了基于透视查询实现细节层次技术的机制:将可视棱锥按照细节层次的划分为多个子区域,查询每个子区域包含的空间对象,获取不同的细节数据^[5].

我们将这种透视查询技术和 V-Reactive 索引结构结合起来:将可视棱锥根据与视点的距离划分为多个子区域,根据比例尺度确定查询的权值区间.对于每个子区域,叠加权值区间扩展成四维区域,查询不同子区域包含的空间对象,搜索 V-Reactive 索引树的不同层次,在满足权值条件的基础上,将索引树不同层次的几何数据或 MBB 作为细节数据.

V-Reactive 树的不同层次代表不同的细节(如图 2 所示),对于不同细节层次下的对象的搜索,并不需要全都搜索至索引树的最底层,而只需搜索至相应层次的节点,显示相应的细节.对于叶节点,我们从数据库中存取各个对象的几何数据,而对于非叶节点,将各个节点项的 MBB 作为其几何数据.



视点.

Fig.3 LoD in perspective query (2D projection)
图 3 透视查询的细节层次划分(二维投影)

以图 3 为例,说明透视查询的过程.其中可视区域为一个可视棱锥,该棱锥根据与视点的距离分为 3 个子区域 A,B,C,分别对应不同的细节层次.各个子区域根据目标权值区间扩展为四维子区域.假定这 3 个细节层次分别对应着图 2 中 V-Reactive 索引树的第 1、2 和 3 层,分别称为 LoD1,LoD2,LoD3,则透视查询算法可以分成 3 个步骤:

- (1) 从 V-Reactive 树的根节点搜索至最底层(第 1 层),查询与区域 A 相交的所有节点项,显示详细的几何细节;
- (2) 从根节点搜索至第 2 层,查询在第 2 层中与区域 B 相交的所有节点项,显示其 MBB;
- (3) 从根节点搜索至第 3 层,查询在第 3 层中与区域 C

相交的所有节点项,显示其 MBB.

随着视点和视线的不断变化,可视棱锥内各个子区域的形状也不断发生变化,空间查询计算复杂度较高.因此,我们将各个区域扩展成一个包含该区域的平行于坐标轴的最小包围框(如图 3 所示).同时,各个区域的包围框叠加权值区间,扩展成四维包围框.这样,多比例尺综合和细节层次技术在透视查询中同时得到实现.

我们在此对透视查询算法作简单的性能分析.假定对象在区域 T 中均匀分布,索引树的度为 M ,可视区域及各个细节区域 A, B, C 包含的对象数目分别为 $p, a, b, c(p=a+b+c)$,则这种区域内对象查询的计算量与其实际包含的对象数目基本成正比.设整个可视区域的空间查询需要计算 N 次,则区域 A 的查询需要大约 $N*a/p$ 次计算;区域 B 的查询至树的第 2 层停止搜索,节点数目减少了 M 倍,约需 $N*b/(p*M)$ 次计算;区域 C 的查询约需 $N*c/(p*M^2)$ 次计算.因此,透视查询共需大约 $N(a+b/M+c/M^2)/p$ 次计算.一般索引树的度 M 可以大于 $10^{[6]}$,因此,透视查询的计算量大大减少.而且,由于只有区域 A 内的对象需要从数据库中存取数据,所以数据的存取量也有很大降低.

我们可以通过对细节区域的体积和细节层次的调整来改变计算复杂度和数据存取量.调整区域 A 的大小既可以改变该区域内实际包含的对象数目,又可以改变存取的数据量和空间查询时间,同时也可以进一步增加或减少细节层次,改变细节层次对应的索引树的层次,这些都将改变三维场景的绘制时间,保证三维可视化的速度,起到动态性能调整的作用.

这种透视查询方法也存在一些缺陷,它只是根据对象与视点的距离来判断细节层次,没有综合其他判断依据(如对象大小、视线方向等).而且,由于各区域扩展成其最小包围框,各个子区域的体积增大,将会导致许多冗余数据的出现.

2.4 路径选择算法的优化

在三维 GIS 中,随着空间维数的增加,以 R 树为基础的索引结构会遇到空间对象的 MBB 重叠程度的增加等多维空间固有的问题^[6],严重影响了索引效率.而且, V-Reactive 树由于引入了权值维,其导致的三维欧氏空间的混叠也会引起细节层次 LoD2 中 MBB 的混叠,直接反映在绘制的三维场景中.鉴于 R*树^[7]等空间索引方法在高维空间取得的成果,我们根据三维空间的特点,融合一些高维索引技术,对 V-Reactive 树插入算法中的路径选择算法进行改进,以减少重叠度,优化三维对象的聚合.

R 树在路径选择上只采用了最小体积扩展法,即选择为包含某立方体其 MBB 需要扩展的体积最小的子节点.为此,我们在路径选择算法中引入最小重叠扩展法,即选择为包含某立方体其 MBB 扩展后与其他子节点的 MBB 重叠度最小的子节点.但是,单独采用最小重叠度法也会有损索引方法的整体性能,而且最小重叠度的计算复杂度较高,因此,只在最必要的节点上采用最小重叠扩展法,其他节点仍采用最小体积扩展法.

考虑到越往底层叶节点,MBB 的重叠对索引性能的影响会越大的特点,在细节层次可视化中,LoD2 对应的层次(假定为 K)的节点在三维欧氏空间的重叠度直接影响图像质量,需要特别降低三维欧氏空间的重叠度.而其下的层次,则应在减小重叠度的同时,应提高多比例尺的索引效率.因此,我们将路径选择方法分为 3 个步骤:

- (1) 对于大于 $K+1$ 的层次,节点在三维欧氏空间的聚合关系到图像的重叠,采用三维最小体积扩展法;
- (2) 对于 $K+1$ 层次,为了减小 K 层次节点在三维欧氏空间的重叠度,采用三维最小重叠度扩展法;
- (3) 对于小于 $K+1$ 的层次,由于底层节点的重叠度对性能的影响最大,同时为了提高多比例尺索引效率,采用四维最小重叠度扩展法.

在 V-Reactive 树中,考虑到通常距离较远的立方体其重叠度最小的可能性较小,因此,为了减少最小重叠度的计算时间,可以先采用最小体积扩展法筛选出若干子节点,再对这些子节点进行最小重叠度的计算.

修改后的路径选择算法如下:

- (1) 设 N 为根节点, K 为 LoD2 对应的索引树层次.
- (2) if (N 是叶节点)
 - return N ;
 - else
 - { if (N 的层次 $> K+1$)
 - 选择需要三维最小体积扩展的节点项;

if (N 的层次= $K+1$)

对节点 N 中各节点项按三维最小体积扩展法进行升序排序;

设 A 为前 p 项的集合;

考虑 N 中的所有节点项,从 A 中选择具有三维最小重叠扩展的项.

if (N 的子节点的层次 $<K+1$)

对节点 N 中各节点项按四维最小体积扩展法进行升序排序;

设 A 为前 p 项的集合;

考虑 N 中的所有节点项,从 A 中选择具有四维最小重叠扩展的项.}

(3) N 重新赋值为所选择的节点项指向的子节点,重复步骤(2).

最小重叠扩展法可以较好地减小节点的重叠度,这在 R^* 中得到了验证^[7].我们采用最小重叠度方法应用于 LoD2 对应的层次,并且在不同的层次应用不同维数的 MBB,从而提高图像的质量.

3 实验分析

在面向对象数据库管理系统 Jasmine 的基础上,我们实现了三维 GIS 实验系统.系统根据当前比例尺确定不同的多比例尺权值区间.三维场景数据的获取是通过将可视区域和多比例尺权值区间扩展成的一个四维包围框,并以 V-Reactive 树为基础对该包围框进行透视查询形成的,可同时实现细节层次技术和多比例尺综合技术.

我们自行创建了一批三维对象数据应用于实验.为了使不同细节层次间具有明显的差别,所有的三维空间对象都是大小一样的四棱锥,包含 6 个三角面.整个场景共有 550 个空间对象,在二维平面坐标(0, 0)~(500, 500)之间随机均匀分布.整个场景分为 4 个比例尺度,所对应的不同比例尺的地理对象具有 4 种不同的权值 0,1,2,3,并分配 4 种不同颜色:红、绿、蓝、白.权值维宽度固定为 0.5.在将数据存储于面向对象数据库的同时,基于各个对象的对象标识符建立 V-Reactive 索引文件.为了仿真海量数据环境,规定索引树的度为 3,从而索引树的高度达到 7 层,可以表示出不同的细节层次.

图 4 表示了 6 种不同条件下的三维场景.在图 4(a)中,透视查询的多比例尺权值区间([0,4])最宽,包含所有的权值,所有比例尺下的对象全部显示,显示的四棱锥具有 4 种颜色:红、绿、蓝、白(此处表现为 4 种灰度).远处的四方体群是透视查询形成的第 2 个细节层次 LoD2,采用 V-Reactive 树的倒数第 2 层节点的 MBB 形成.图 4(b)是比例尺缩小后形成的三维场景.由于当前比例尺小于某个阈值,从而改变权值区间([2,4])进行透视查询,得到了只有最高两种权值的地理对象,具有两种颜色:蓝、白.这样,随着比例尺的缩小,一些重要性较低的地理对象将在三维场景中消失,从而实现了选择操作.

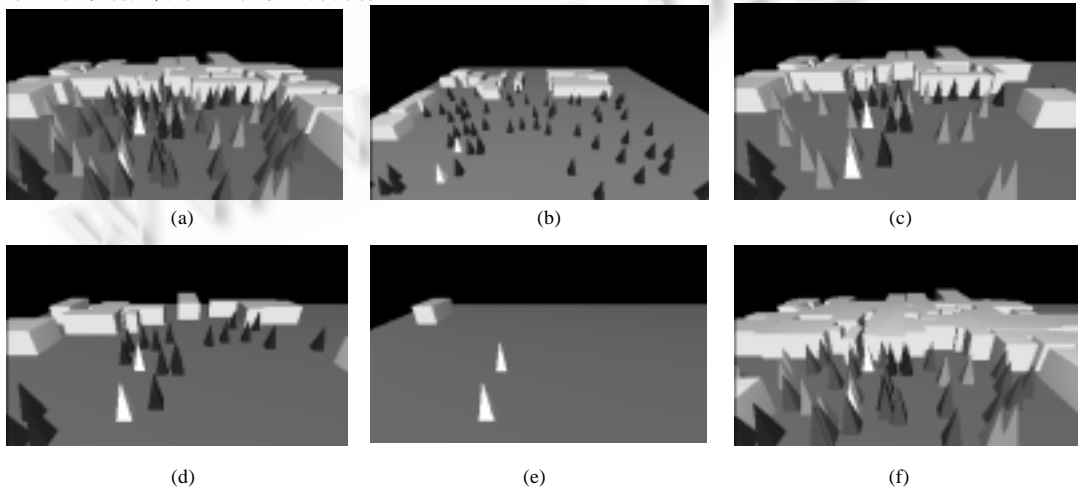


Fig.4 Scenes in 3D GIS experiment system

图 4 三维 GIS 实验系统中的场景

固定当前的比例尺以及视点位置和视线方向,只改变比例尺阈值,从而得到当前比例尺在不同阈值区域所获取的三维场景.图 4(c)~图 4(e)分别包括 3 种、2 种、1 种权值的地理对象,具有不同的颜色.图 4(f)在图 4(a)的基础上,通过缩小透视查询中最高细节层次 LoD1 区域的体积,使得 LoD1 中包含的地理对象减少,因此显示的四棱锥数量大大减少.

但是,从图 4 中也可以看到,在细节层次 LoD2 中,大部分的四方体连接成一片,难以看出空间对象的大致形状.这主要是由于数据是随机产生,索引树也是动态建立的,导致了各节点的重叠度较高.而且,LoD2 是通过索引树倒数第 2 层的 MBB 形成的,因此,绘制的可视场景中的四方体只是表现一种大致的分布状况.由于 LoD2 的显示也与多比例尺相关,因此,图 4(d)中只显示两个比例尺下对象时细节层次 LoD2 的重叠度减少.

通过优化路径选择算法,可以改善图像质量,尤其是减少 LoD2 区域的 MBB 重叠度,如图 5 所示.图 5(a)中采用传统的 R 树中的路径选择算法,图 5(b)中对路径选择算法进行了优化,然后重新创建 V-Reactive 索引树.可以看出,图 5(b)中 LoD2 区域 MBB 的重叠度减少,图像质量得到提高.

本文提出的方法在一些对真实感要求较高的应用中有一定的局限性.但对于数字城市等具有海量数据,空间对象模型基本相似且各空间对象重叠较少的应用,则具有很好的实用价值.图 6 中显示了空间对象都为四方体的三维场景,虽然其数据是随机产生的,会造成较大的重叠,但仍然可以看出图像质量得到改善.

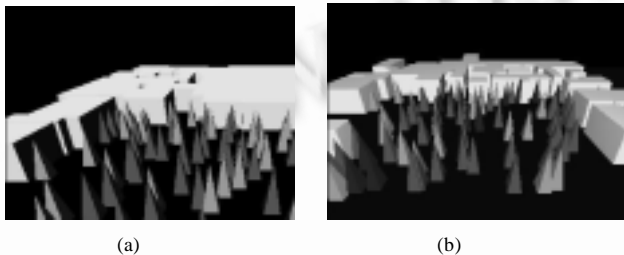


Fig.5 Improvement of image quality by optimized algorithm
图 5 优化路径选择算法对图像质量的改善

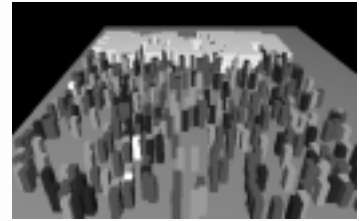


Fig.6 3D scene with cubes
图 6 对象为四方体的三维场景

4 结束语

本文提出了多比例尺下的细节层次可视化机制,适合于具有海量数据的三维 GIS 应用.通过对多比例尺空间索引结构 Alternative Reactive 树进行扩展、改进和优化,建立了空间索引 V-Reactive 树,在实现多比例尺综合的同时,还能够表示不同的细节层次.结合 V-Reactive 树的透视查询可进一步减少数据的存取量和绘制时间复杂度.通过对路径选择算法的优化,改善了图像质量.通过三维 GIS 实验系统的实现,验证了这种机制的可行性.

但是,这种可视化机制也存在一些缺点,主要集中在不同细节层次之间的差别过大上,会在一些对真实感要求较高的应用中有一定的局限性.我们下一步将通过与传统的细节层次技术结合,增加细节表示的层次,改善场景的真实感,并通过动态性能调整技术和动态缓冲管理技术的应用,实现 fly-over 等虚拟现实功能.

References:

- [1] Turner, A.K. Three Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [2] Guttman, A. R-Trees: a dynamic index structure for spatial searching. In: Youmark, B., ed. Proceedings of the ACM International Conference on Management of Data. Boston, MA: ACM Press, 1984. 47~57.
- [3] Oosterom, P.V. Reactive Data Structures for Geographic Information Systems. New York: Oxford University Press, 1993.
- [4] Kofler, M., Rehatschek, H., Gruber, M. A database for a 3D GIS for urban environments supporting photo-realistic visualization. In: Proceedings of the International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1996. 198~202.
- [5] Kofler, M., Gervautz, M., Gruber, M. The styria flyover——LoD management for huge textured DTM models. In: Wolter, F.E., Patrikalakis, N.M., eds. Proceedings of the Computer Graphics International'98. Hannover, NY: IEEE Society Press, 1998.

- [6] Jing, Ning, Huang, Y.W., Elke, A.R. Hierarchical encoded path views for path query processing: an optimal model and its performance evaluation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1998,10(3):409~432.
- [7] Beckmann, N., Kriegel, H.P., Schneider, R., *et al.* The R*-tree: an efficient and robust access method for points and rectangles. In: Molina, H.G., Jagadish, H.V., eds. *Proceedings of the ACM International Conference on Management of Data*. Atlantic, NJ: ACM Press, 1990. 322~331.

A Mechanism of Implementing Visualization with Level of Detail at Multi-Scale*

LI Jun, JING Ning, SUN Mao-yin

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

E-mail: myslone@yahoo.com.cn

<http://www.nudt.edu.cn>

Abstract: In this paper, a mechanism of implementing visualization with level of detail (LoD) at multi-scale is proposed on spatial database. Based on the spatial index V-Reactive tree, different LoDs can be represented, at the same time generalization at multi-scale can be implemented. Furthermore, the perspective query algorithm can decrease the complexity of implementing the mechanism. According to the characteristics of 3D visualization, the index tree is optimized for better image quality. The experimental results show that the mechanism is fit for 3D GIS applications with mass data.

Key words: 3D GIS; level of detail; multi-scale; spatial database; 3D visualization

* Received December 12, 2000; accepted February 15, 2001

Supported by the National High Technology Development 863 Program of China under Grant No.863-306-ZD09-02-4