

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 **2**  
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

## 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012 年 2 月 第 17 卷 第 2 期(总第 190 期)

## 目 次

## 综述

内容感知图像缩放技术综述 ..... 施美玲,徐丹(157)

## 图像处理和编码

引入纹理相似性的纺织品图像增强 ..... 杨学志,田晓梅,方静,卢洁(169)

保持边缘特征和增强对比度的图像缩放算法 ..... 计忠平,方美娥,王毅刚,吴向阳(178)

以图像认证为目的的分形编码数字水印算法 ..... 黄晓晴,于盛林(183)

结合运动矢量和像素递归的全局运动估计方法 ..... 赵亚湘,刘少强,樊晓平(191)

无缝栅格数据小波金字塔构建 ..... 马伯宁,冷志光,汤晓安,匡纲要(197)

## 图像分析和识别

伪彩色空间完全非结构化道路检测方法 ..... 胡晓辉,孙苗强,苏晓许(203)

未知环境下机器人障碍物检测技术 ..... 王文格,武凯宾,朱江,段文彬,许重阳(209)

局部 GAC 模型在医学图像分割中的应用 ..... 张建伟,方林,陈允杰,詹天明,罗春燕(215)

判别割(Dcut)的图像分割及其快速分割算法 ..... 邹小林,陈伟福,冯国灿(222)

改进的遮挡条件下瞳孔检测方法 ..... 潘林,魏丽芳,郑炳锟,余轮(229)

木材显微图像的局部水平集分割方法 ..... 汪杭军,祁亨年(236)

关键点检测的线要素综合算法 ..... 黄志坚,张金芳,徐帆江(241)

GPU 加速的高分辨率 DEM 图像地形特征线提取算法 ..... 刘洲俊,胡包钢(249)

改进 GVF 的自动 Snakes 模型 ..... 周亚男,程熙,骆剑承,沈占锋,胡晓东(256)

曲波变换用于磨粒图像不变矩的提取 ..... 张云强,张培林,任国全,王国德,徐超,李兵(263)

## 图像理解和计算机视觉

深度图像中基于轮廓曲线和局部区域特征的 3 维物体识别 ..... 吴莉婷,张宇,杨一平,田原(269)

机载 LiDAR 数据的 LZD 航带平差 ..... 王丽英,宋伟东(279)



计算机图形学

基于 Z 曲线的瓦片地图服务空间索引 ..... 聂云峰,周文生,舒坚,许虎(286)

虚拟现实和增强现实

GPU 加速的台风可视化方法 ..... 秦绪佳,张勤锋,陈坚,郑红波,徐晓刚(293)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健      月刊(1996 年创刊)      第 17 卷 第 2 期      2012 年 2 月 16 日出版

|         |                                                                                                                     |                   |                                                                                                                                                      |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主管单位    | 中国科学院                                                                                                               | Superintended by  | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                          |
| 主 办     | 中国科学院遥感应用研究所<br>中国图象图形学学会<br>北京应用物理与计算数学研究所                                                                         | Sponsored by      | Institute of Remote Sensing Application,<br>CAS China Society of Image and Graphics<br>Institute of Applied Physics and Computational<br>Mathematics |
| 主 编     | 李小文                                                                                                                 | Chief editor      | LI Xiaowen                                                                                                                                           |
| 编辑出版    | 《中国图象图形学报》编辑出版委员会<br>北京 9718 信箱 邮编 100101<br>电子信箱:jig@irsa.ac.cn<br>电话:010-68407995 010-82614429<br>网 址:www.cjig.cn | Editor ,Publisher | Editorial and Publishing Board<br>of Journal of Image and Graphics<br>( P. O. Box 9718 ,Beijing 100101 ,China)<br>E-mail:jig@irsa.ac.cn              |
| 印刷装订    | 北京北林印刷厂                                                                                                             | Distributed by    | Beijing Bureau for Distribution of Newspapers<br>and Journals                                                                                        |
| 广告经营许可证 | 京朝工商广字第 0346 号                                                                                                      | Domestic          | All Local Post Offices in China                                                                                                                      |
| 总 发 行   | 北京报刊发行局                                                                                                             | Foreign           | China International Book Trading Corporation<br>( P. O. Box 399 ,Beijing 100044 ,China)                                                              |
| 订 购     | 全国各地邮局                                                                                                              | Printed by        | Beijing Beilin Printing House                                                                                                                        |
| 国外发行    | 中国国际图书贸易总公司<br>( 中国国际书店 )<br>( 北京 399 信箱 邮编 100044 )                                                                |                   |                                                                                                                                                      |

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 2 February 2012

## Contents

### Review

Survey on content-aware image resizing techniques ..... Shi Meiling, Xu Dan (157)

### Image Processing and Coding

Enhancement of textile image with texture similarity ..... Yang Xuezhi, Tian Xiaomei, Fang Jing, Lu Jie (169)

Edge-preserving and contrast-enhancement image scaling ..... Ji Zhongping, Fang Mei'e, Wang Yigang, Wu Xiangyang (178)

Watermarking method on fractal coding for image authentication ..... Huang Xiaoqing, Yu Shenglin (183)

Global motion estimation method with motion vectors and pixel recursion ..... Zhao Yaxiang, Liu Shaoqiang, Fan Xiaoping (191)

Seamless wavelet pyramid construction for raster data ..... Ma Boning, Leng Zhiguang, Tang Xiao'an, Kuang Gangyao (197)

### Image Analysis and Recognition

Completely unstructured road detection for pseudo-color space ..... Hu Xiaohui, Sun Miaoqiang, Su Xiaoxu (203)

Obstacle detection for robot in unknown environment .....  
..... Wang Wenge, Wu Kaibin, Zhu Jiang, Duan Wenbin, Xu Chongyang (209)

Application of local GAC model for medical image segmentation .....  
..... Zhang Jianwei, Fang Lin, Chen Yunjie, Zhan Tianming, Luo Chunyan (215)

Fast image segmentations of Deut ..... Zou Xiaolin, Chen Weifu, Feng Guocan (222)

Improved method for the pupil measurement under occlusion ..... Pan Lin, Wei Lifang, Zheng Bingkun, Yu Lun (229)

Segmentation method of wood microscopic image based on local level set ..... Wang Hangjun, Qi Hengnian (236)

Algorithm of line generalization with key point detection ..... Huang Zhijian, Zhang Jinfang, Xu Fanjiang (241)

High resolution DEM topographic feature line extraction algorithm using GPU ..... Liu Zhoujun, Hu Baogang (249)

Automatic snakes model based on modified GVF ..... Zhou Yanan, Cheng Xi, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, Hu Xiaodong (256)

Invariant moment extraction by curvelet transform for wear particle images .....  
..... Zhang Yunqiang, Zhang Peilin, Ren Guoquan, Wang Guode, Xu Chao, Li Bing (263)

### Image Understanding and Computer Vision

Three-dimensional free-form object recognition based on contour curve and local surface patches in range images .....  
..... Wu Liting, Zhang Yu, Yang Yiping, Tian Yuan (269)

Least Z-difference strip adjustment of airborne LiDAR data ..... Wang Liying, Song Weidong (279)

### Computer Graphics

Spatial index for tile map service based on Z curve ..... Nie Yunfeng, Zhou Wensheng, Shu Jian, Xu Hu (286)

### Virtual Reality and Augmented Reality

GPU accelerated typhoon visualization method ..... Qin Xujia, Zhang Qinfeng, Chen Jian, Zheng Hongbo, Xu Xiaogang (293)

中图法分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)02-0286-07

论文引用格式: 聂云峰, 周文生, 舒坚, 许虎. 基于 Z 曲线的瓦片地图服务空间索引 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2): 286-292

# 基于 Z 曲线的瓦片地图服务空间索引

聂云峰<sup>1</sup>, 周文生<sup>2</sup>, 舒坚<sup>1</sup>, 许虎<sup>1</sup>

1. 南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330063; 2. 清华大学建筑学院, 北京 100084

**摘要:** 瓦片空间索引是提高瓦片查询效率的关键技术, 其性能直接影响地理信息网络服务的整体性能。分析当前广泛应用于瓦片地图服务的格网索引和瓦片四叉树索引的基本原理, 利用 Z 曲线的聚类 and 降维特性, 设计一种基于 Z 曲线的瓦片空间索引 Z-Index, 并给出了具体实现。实验结果表明, Z-Index 在海量瓦片数据的情况下具有优于格网索引和四叉树索引的瓦片查询效率。

**关键词:** 瓦片地图服务; 空间索引; Z 曲线; 瓦片四叉树索引; 格网索引

## Spatial index for tile map service based on Z curve

Nie Yunfeng<sup>1</sup>, Zhou Wensheng<sup>2</sup>, Shu Jian<sup>1</sup>, Xu Hu<sup>1</sup>

1. College of Information and Engineering, Nanchang Hangkong University, NanChang 330063, China;

2. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** Tile spatial index is a key technology to improve the tile fetching efficiency and its performance directly affects the overall performance of geographic information network services. This article analyzes the basic principles of grid index and quad-tree index which are widely used in tile map service. Because Z curve has good locality-preserving behavior and a good reduction of dimensionality behavior, we design a new tile spatial index based on Z-curve, called Z-Index. Experimental results show that the performance of Z-Index is better than grid and quad-tree indexing when applied on massive tile datasets.

**Key words:** tile map service; spatial index; Z curve; tile quadtree index; grid index

## 0 引言

瓦片地图服务(TMS)作为一种高效、简洁的地理信息共享和发布模式已成为地理信息网络服务的事实标准<sup>[1-2]</sup>。当前, 瓦片地图服务研究主要集中在瓦片金字塔模型<sup>[3-6]</sup>、瓦片存储<sup>[6-8]</sup>、瓦片缓存置换策略<sup>[7-10]</sup>及客户端技术<sup>[1]</sup>等方面, 其中瓦片金字塔模型已成为当前研究的热点问题。瓦片金字塔模型是一种可变分辨率层次模型, 具有海量数据及动态变化两大特性。以世界地图为例, 第 1~20 缩放

级别的瓦片总数达近  $3 \times 10^{12}$ , 因此为了提高瓦片查询效率, 必须建立高效的索引机制。此外, 地图的动态变化, 例如地图编辑或动态对象如缓冲分析结果的实时叠加显示等对瓦片金字塔模型的动态更新及维护提出了更高的性能需求。空间索引技术是提高海量空间数据查询效率的关键技术<sup>[11-13]</sup>, 采用空间索引进行瓦片金字塔的管理和维护具有重要应用价值, 其性能直接影响地理信息网络服务的整体性能。分析当前广泛应用于瓦片金字塔模型的格网索引和瓦片四叉树索引的基本原理及其优缺点, 设计一种基于 Z 曲线的空间索引 Z-Index, 利用 Z 曲线的

收稿日期: 2011-01-13; 修回日期: 2011-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101426)

第一作者简介: 聂云峰(1980—), 男, 讲师, 2008 年中国科学院广州地球化学研究所获地理信息系统专业博士学位, 主要研究方向为 GIS、无线传感器网络。E-mail: nieyunf@gmail.com

聚类 and 降维特性将地图瓦片的格网行、列坐标及缩放级别构成的高维空间映射至1维空间并保持良好的空间聚集性,就可以借助数据库已有的B树索引进行快速查询,减少瓦片查询时的比较次数,提高瓦片查询效率。

## 1 瓦片格网索引

格网空间索引的基本思想是将地理空间按照一定分辨率级别进行行、列剖分得到的矩形格网排列<sup>[12]</sup>,其中任意网格单元对应一个地图瓦片,将覆盖同一地理区域的不同分辨率级别的格网按序叠加就构成了该区域的多分辨率瓦片金字塔模型。对任何一个地图瓦片可以用三元组  $TileXYZ = \{tileX, tileY, tileZ\}$  进行标识,其中: $tileZ$  代表分辨率级别,表示瓦片位于金字塔中的第  $tileZ$  层; $tileX$  和  $tileY$  分别表示瓦片在  $tileZ$  层中的行坐标和列坐标。定义  $GridBound$  和  $TileBound$  分别为瓦片金字塔中任意格网和瓦片所覆盖的地理范围,  $Resolutions$  为存储瓦片金字塔各层分辨率的有序数组,则

$$\begin{cases} TileWidth = TileBound.RTLon - TileBound.LBLon \\ \Delta X = TileBound.LBLon - GridBound.LBLon \\ \Delta Y = TileBound.LBLat - GridBound.LBLat \\ tileX = \left\lfloor \frac{\Delta X}{TileWidth} + 0.5f \right\rfloor \\ tileY = \left\lfloor \frac{\Delta Y}{TileWidth} + 0.5f \right\rfloor \\ TileResolution = \frac{TileBound.RTLat - TileBound.LBLat}{TilePixels} \\ tileZ = Indexof(Resolutions, TileResolution) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $RTLon$  和  $RTLat$  分别为右上角地理坐标;  $LBLon$  和  $LBLat$  分别为左下角地理坐标;  $TilePixels$  为瓦片的像素宽度;  $TileResolution$  为瓦片的像素分辨率,即单位像素所代表的地理单位长度。根据式(1)可计算任意瓦片在金字塔中的3维坐标。格网索引可以看做是一张三元组构成的线性表,因此具有编码和算法实现简单等优点,但由于获取任意一个瓦片需要对3个字段进行联合查询,在数据量巨大的情况下,瓦片查询效率非常低。此外,格网索引的空间聚集性较差,而瓦片往往具有较强的空间相关性,因此瓦片格网索引仅适用于地理范围较小或分辨率级别较少的小型应用场合。

## 2 瓦片四叉树索引

瓦片四叉树是多分辨率地形表达的常用数据结构<sup>[4,13]</sup>。考虑到瓦片金字塔模型的索引结构具有相对稳定性,较少进行插入及删除操作,因此一般采用线性四叉树索引,其基本原理是:将整个空间编码为0,用水平线和垂直线将空间划分为相等的4个部分,各部分按顺时针依次编码为00、01、02和03;对划分后的网格单元按照同样的方式继续划分,以此类推,最终划分的层数取决于应用需求。瓦片四叉树索引建立在经典的线性四叉树索引基础之上,具有编码简单、易于实现等优点,因此在Google Map、Microsoft Bing Map及Yahoo Map等在线地图服务中得到了广泛应用。上述在线瓦片地图服务普遍采用四进制编码的瓦片四叉树索引,满足以下关系:

$$\begin{cases} Resolutions(i) = BaseResolution \times 2^{-2i} \\ (ZoomLevel_{min} \leq i \leq ZoomLevel_{max}) \\ i = Lengthof(QuadKey) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $ZoomLevel_{min}$  为金字塔的最小分辨率级别,  $ZoomLevel_{max}$  为金字塔的最大分辨率级别,  $BaseResolution$  表示金字塔第  $ZoomLevel_{min}$  层的像素分辨率,  $QuadKey$  为任意一个瓦片的四进制四叉树索引值。由式(2)可知:瓦片四叉树索引只能对分辨率固定的金字塔模型进行索引,具有一定局限性;瓦片四叉树索引值为变长字符串,其基本码元一般为字符0,1,2,3,索引值的长度等于该瓦片对应的分辨率级别,由于采用变长字符串作为索引,因此具有存储开销大和数据库查询效率低的缺点。瓦片四叉树索引与瓦片行、列及缩放级别的映射关系较为简单,正算法的时间复杂性均为  $O(n)$ ,其转换关系如下:

### 1) 正算算法

//将瓦片3维坐标转换为四进制四叉索引值

$TileXYZToQuadKey(tileX, tileY, tileZ)$  begin

String quadKey = "";

for(int i = tileZ; i > 0; i--)

begin

char digit = '0';

int mask = 1 << (i - 1);

if((tileX & mask) != 0) digit++;

if((tileY & mask) != 0) digit += 2;

quadKey += digit;

end

return quadKey;

end

## 2) 反算算法

//将四叉树索引值转换为瓦片金字塔 3 维坐标

QuadKeyToTileXY(quadKey)

begin

TileXYZ tileXYZ = new TileXYZ();

tileXYZ.tileZ = quadKey.Length;

for(int i = tileXYZ.tileZ; i > 0; i--)

begin

int mask = 1 << (i - 1);

switch (quadKey[tileXYZ.tileZ - i])

begin

case '0': break;

case '1': tileXYZ.tileX |= mask;

break;

case '2': tileXYZ.tileY |= mask;

break;

case '3': tileXYZ.tileX |= mask;

tileXYZ.tileY |= mask; break;

end

end

return tileXYZ;

end

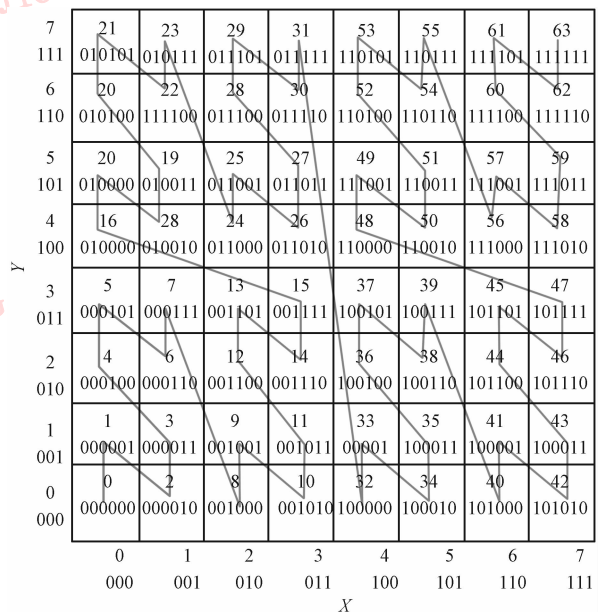


图 1 2 维 Z 曲线

Fig. 1 2D Z-ordering curves

$$\begin{cases} \text{KeyPrefix}_{k+1,i} = (\text{KeyPrefix}_k \ll 2) + i \\ \text{Depth}_{k+1,i} = \text{Depth}_k + 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$(i = 0, 1, 2, 3)$$

2) 定义 *Begin* 和 *End* 分别为第  $k$  层子树的叶结点的最小值和最大值,  $S$  为该子树的叶结点集合, 由式(3)可得

$$\begin{cases} \text{Begin} = \text{KeyPrefix}_k \ll (\text{DEPTH} - \text{Depth}_k) \times 2 \\ \text{End} = \text{Begin} + (1 \ll (\text{DEPTH} - \text{Depth}_k) \times 2 - 1) \\ S = \{\text{Begin} \leq \text{ZValue} \leq \text{End}\} \end{cases} \quad (4)$$

3) 定义第  $k$  层某子树关联的空间范围, 令  $\text{MidX} = \text{LowerLeftX} \gg 1 + \text{UpperRightX} \gg 1$ ,  $\text{MidY} = \text{LowerLeftY} \gg 1 + \text{UpperRightY} \gg 1$ , 则该子树的 4 个孩子所表达的空间范围为

$$\begin{cases} \text{Box}_{k+1,0} = (\text{LowerLeftX}, \text{MidY}, \text{MidX}, \text{UpperRightY}) \\ \text{Box}_{k+1,1} = (\text{MidX}, \text{MidY}, \text{UpperRightX}, \text{UpperRightY}) \\ \text{Box}_{k+1,2} = (\text{LowerLeftX}, \text{LowerLeftY}, \text{MidX}, \text{MidY}) \\ \text{Box}_{k+1,3} = (\text{MidX}, \text{LowerLeftY}, \text{UpperRightX}, \text{MidY}) \end{cases} \quad (5)$$

瓦片金字塔是一种可变分辨率层次模型, 是一种典型的 2.5 维模型, 若运用 3 维 Z 曲线对其进行索引则必然导致 Z 值不连续且跳越较大, 若运用图 1 所示的 2 维 Z 曲线对其进行索引, 则由于缺失分辨率级别信息而产生大量重复索引。针对上述问题, 设计一种扩展 2 维 Z 曲线 Z-Index, Z-Index 索引

## 3 Z-Index 索引

### 3.1 Z-Index 索引结构

Z 曲线是一种重要的空间映射方法<sup>[12-16]</sup>, 具有将多维空间中的点集映射至 1 维空间并保持良好空间聚集性的优点, 通过使用 Z 曲线对空间实体进行降维处理, 映射至 1 维空间进行编码, 就可以借助关系数据库已有的 B 树索引等技术进行快速查找。Z 曲线的构造过程如图 1 所示, 若 2 维空间中网格单元  $G = \{X = (X_{n-1}, \dots, X_1, X_0)_2, Y = (Y_{n-1}, \dots, Y_1, Y_0)_2\}$ , 则该网格单元在曲线上的位序称为该网格的 Z 值  $\text{ZValue}(G) = (X_{n-1}Y_{n-1}X_1Y_1X_0Y_0)_2$ , 将各网格单元的 Z 值按照升序顺次相连即得 2 维空间 Z 曲线。若将 Z 曲线划分的 2 维空间看做一棵深度  $\text{Depth}$  的满四叉树, 根据线性四叉树与 Z 曲线的天然关系及位交叉编码规则, 存在以下规律:

1)  $\text{ZValue}$  的最高两个比特代表深度为 1 的子树的编码, 次高两个比特代表深度为 2 的子树编码, 以此类推, 最低两位为该叶子结点的编码。定义第  $k$  层子树的编码前缀为  $\text{KeyPrefix}_k$ , 深度为  $\text{Depth}_k$ , 则有



以8字节长整型存储  $ZValue$  值,其比特分配如图2所示。其中:最高位为符号位;次高5位是缩放级别,可表示的缩放级别为0~31级,其中有效的级数为0~29级;低58位为瓦片在格网矩阵中的行、列坐标,可表示  $2^{29} \times 2^{29}$  的格网矩阵,即最大缩放级别可以存放  $2.88 \times 10^{17}$  个瓦片索引,基本满足大中型应用需求。 $Z\text{-Index}$  以得到的  $ZValue$  值来命名对应的瓦片。 $Z\text{-Index}$  的优点是既保证各分辨率级别内部的Z曲线是连续的,又能有效避免  $ZValue$  值的重复。

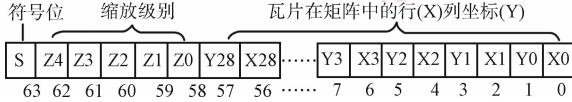


图2 ZValue 码位分配示意

Fig. 2 Bit distribution of ZValue

### 3.2 Z-Index 的算法实现

$Z\text{-Index}$  索引与瓦片行、列及缩放级别的映射关系较为简单,正反算法的时间复杂性均为常数,与瓦片的位置无关。正算算法  $\text{TileXYZToZValue}$  根据瓦片在格网矩阵中的行、列坐标及缩放级别计算瓦片的  $ZValue$  值; $\text{ZValueToTileXYZ}$  算法实现由  $ZValue$  值反算瓦片在格网矩阵中的行、列坐标及缩放级别; $\text{GetZValuesByRegion}$  算法实现瓦片窗口查询。定义  $MAGIC = \{0 \times 5555555555555555L, 0 \times 3333333333333333L, 0 \times 0F0F0F0F0F0F0F0FL, 0 \times 00FF00FF00FF00FFL, 0 \times 0000FFFF0000FFFFL, 0 \times 00000000FFFFFFFL, 0 \times 0000000000000003FL\}$ 。相关算法描述如下:

#### 1) 正算算法

```

TileXYZToZValue(tileX, tileY, tileZ)
begin
    long zValue;
    tileX = (tileX | (tileX << 24)) & MAGIC [4];
    //填充行坐标
    tileX = (tileX | (tileX << 23)) & MAGIC [3];
    tileX = (tileX | (tileX << 22)) & MAGIC [2];
    tileX = (tileX | (tileX << 21)) & MAGIC [1];
    tileX = (tileX | tileX << 20)) & MAGIC [0];
    tileY = (tileY | (tileY << 24)) & MAGIC [4];
    //填充列坐标
    tileY = (tileY | (tileY << 23)) & MAGIC [3];
    tileY = (tileY | (tileY << 22)) & MAGIC [2];
    tileY = (tileY | (tileY << 21)) & MAGIC [1];
    tileY = (tileY | (tileY << 20)) & MAGIC [0];
    tileZ = tileZ << 58;
    zValue = (tileX | tileY << 1) | tileZ; //填充缩放级别

```

```

return zValue; //返回 ZValue 索引值

```

```

end

```

#### 2) 反算算法

```

ZValueToTileXYZ(zValue)

```

```

begin

```

```

    long tileZ = zValue >> 58; //提取缩放级别

```

```

    zValue = zValue & MAGIC [6];

```

```

    long tileX = zValue & MAGIC [0];

```

```

    tileX = (tileX | tileX >> 20) & MAGIC [1]; //提取行坐标

```

```

    tileX = (tileX | tileX >> 21) & MAGIC [2];

```

```

    tileX = (tileX | tileX >> 22) & MAGIC [3];

```

```

    tileX = (tileX | tileX >> 23) & MAGIC [4];

```

```

    tileX = (tileX | tileX >> 24) & MAGIC [5];

```

```

    long tileY = (zValue >> 1) & MAGIC [0]; //提取列坐标

```

```

    tileY = (tileY | tileY >> 20) & MAGIC [1];

```

```

    tileY = (tileY | tileY >> 21) & MAGIC [2];

```

```

    tileY = (tileY | tileY >> 22) & MAGIC [3];

```

```

    tileY = (tileY | tileY >> 23) & MAGIC [4];

```

```

    tileY = (tileY | tileY >> 24) & MAGIC [5];

```

```

    long[] result = { tileX, tileY, tileZ };

```

```

    return result;

```

```

end

```

#### 3) 区域查询算法

//queryWindow 为查询窗口;currentRange 为当前子树覆盖的空间范围,初始为瓦片金字塔最大覆盖范围; //currentDepth 为当前子树的深度;ZoomLevel 表示当前查询的是瓦片金字塔的第 ZoomLevel 层;depth 是性能参数,为//算法的最大搜索深度

```

GetZValuesByRegion(queryWindow, currentRange, currentDepth, ZoomLevel, depth)

```

```

begin

```

```

    zValues =  $\Phi$ ;

```

```

    if (overlap(queryWindow, currentRange) == false)

```

```

        //判断当前子树是否与查询窗口相交

```

```

        then return zValues;

```

```

        //判断是否继续向下搜索子树

```

```

        if (currentDepth >= Depth or EQUALS (queryWindow, currentRange))

```

```

            then

```

```

                begin

```

```

                    通过式(4)计算当前子树的叶结点集合 S;

```

```

                    对 S 中的各个值的高位填充分辨率级别 ZoomLevel;

```

```

                    return zValues  $\cup$  S;

```

```

                end

```

```

                由式(5)计算当前子树的 4 棵子树的空间覆盖范围

```

```

                childi;

```



```
for(int i = 1; i < = 4; i + + )
begin
childWindow = Childi ∩ queryWindow; // 查询窗口裂解
S = GetZValuesByRegion( childWindow, childi, currentDepth + 1,
ZoomLevel, depth );
zValues = zValues ∪ S; // 合并子树搜索结果
end
return zValues;
end
```

4 算法性能分析与实验验证

4.1 实验数据

为验证瓦片空间索引的查询效率,实验比较

Z-Index、格网索引 Grid 及瓦片四叉树索引 Quadkey 之间的性能差异。实验环境: Intel 2. 2 GHz 双核处理器、1GB 内存、Windows XP、MyEclipse8. 0GA、H2、SQL Server 2000、MySQL5。测试数据:采用世界地图矢量数据,随机生成 5 ~ 10 级共 1,400,832 条瓦片记录。表 1 是瓦片空间索引表的基本结构,其中: X、Y、Z 字段分别表示瓦片的行、列坐标及缩放级别,格网索引针对 X、Y、Z 字段建立联合索引; ZVALUE 和 QUADKEY 字段分别表示瓦片的 Z-Index 和 Quadkey 编码值,分别建立 B 树索引。

4.2 实验结果分析

实验 1 考察单个瓦片查询的平均响应时间,实

表 1 空间索引表结构  
Table 1 Spatial index table structure

| 列名       | 类型            | 描述          | 列名           | 类型      | 描述       |
|----------|---------------|-------------|--------------|---------|----------|
| ID       | bigint        | 自增字段        | SRS_ID       | int     | 坐标系标识    |
| LAYER_ID | bigint        | 图层标识        | CREATED      | bigint  | 创建时间     |
| ZVALUE   | bigint        | Z-Index 索引值 | ACCESS_LAST  | bigint  | 最后一次访问时间 |
| QUADKAY  | varchar( 18 ) | Quadkey 索引值 | ACCESS_COUNT | bigint  | 访问次数     |
| X        | bigint        | 瓦片行坐标       | LOCK         | bigint  | 锁定时间     |
| Y        | bigint        | 瓦片列坐标       | IS_VALID     | boolean | 瓦片是否有效   |
| Z        | bigint        | 缩放级别        | FORMAT_ID    | int     | 图片格式标识   |

验 2 考察 4 × 4 瓦片窗口查询的平均响应时间。实验步骤如下:随机生成 1 万 ~ 10 万个瓦片及 4 × 4

的瓦片窗口;分别统计各组数据的平均响应时间。实验结果如表 2 所示。

表 2 Z-Index 与 Grid 及 Quadkey 索引的瓦片检索性能比较  
Table 2 Performance comparison among the proposed Z-index, Gird and Quadkey

| 索引类型    | 索引结构  | 索引建立开销 | 单个瓦片查询性能 |       |           | 窗口查询性能 |       |           | 适用范围   |
|---------|-------|--------|----------|-------|-----------|--------|-------|-----------|--------|
|         |       |        | H2       | MySQL | SQLServer | H2     | MySQL | SQLServer |        |
| Grid    | 三元组   | 低      | 0. 33    | 2. 32 | 2. 7      | 0. 85  | 4. 95 | 3. 83     | 数据量较小  |
| Quadkey | 变长字符串 | 高      | 0. 27    | 2. 23 | 2. 44     | 0. 48  | 3. 15 | 2. 99     | 海量瓦片数据 |
| Z-Index | 长整型   | 较高     | 0. 22    | 2. 14 | 2. 26     | 0. 37  | 2. 97 | 2. 65     | 海量瓦片数据 |

由表 2 可以看出,瓦片的 Grid 索引可由式(1)直接计算得到,因而其索引建立开销最小,而 Quadkey 和 Z-Index 索引在式(1)的基础上还必须计算 Quadkey 和 Z-Value 值,因而索引建立开销相对较大,其中由于 Quadkey 采用四进制变长字符串编码,其算法复杂度为  $O(n)$ ,相比 Z-Index 采用的位

运算及整型键值,其索引建立开销最大;从单个瓦片的查询性能看,由于 Z-Index 索引存储的是连续整型键值,能充分发挥数据库 B 树索引的查询优势,因而查询效率明显优于采用变长字符串编码的 Quadkey 索引;从窗口查询性能来看,由于 Grid 涉及到 3 个索引字段的范围查询,因而性能最差,

Quadkey 与 Z-Index 则采用基于四叉树的范围查询方式,在算法查询的时间复杂度上均为  $O(n \lg n)$ ,但由于 Z-Index 的索引值为连续整型,数据库对整型键值比字符型键值具有更快的查询效率,因而 Z-Index在窗口查询方面比 Quadkey 的性能有较大提升,从表 2 可以看出,Z-Index 在窗口查询方面比单

个瓦片查询更具显著的性能提升,充分展现出 Z-Index在空间聚集性方面的优势。结果如图 3、图 4 所示对上述索引在不同数据库中的具体实现进行了比较,在单个瓦片查询及窗口查询方面,H2 数据库比 MySQL 及 SQL Server 数据库均具有更佳的性能。

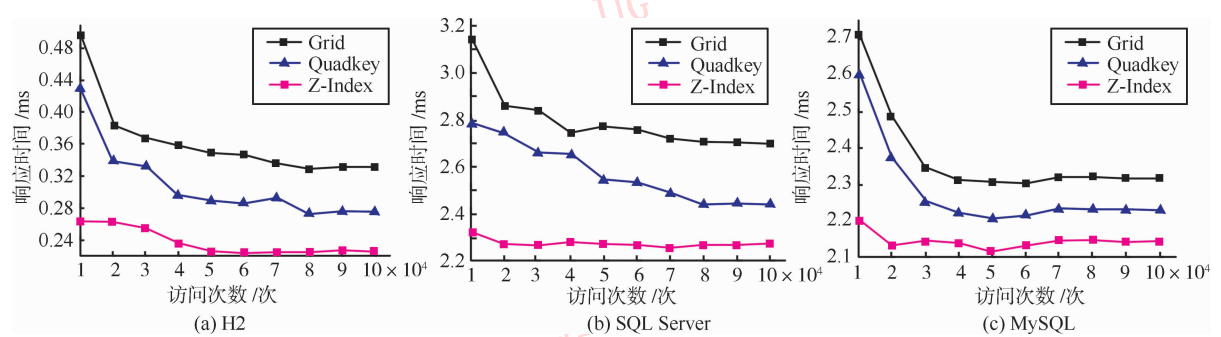


图 3 单个瓦片查询平均响应时间性能对比  
Fig. 3 Comparison of single tile query response time with Grid, Quadkey and Z-Index

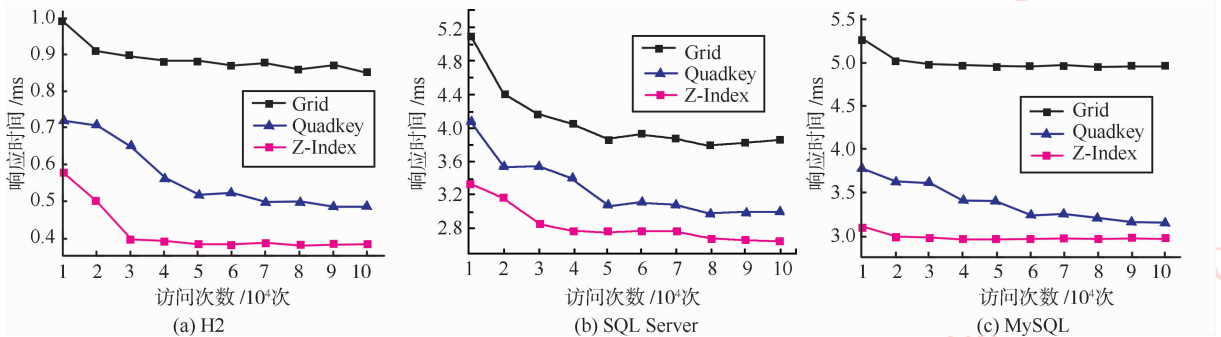


图 4 窗口查询平均响应时间性能对比  
Fig. 4 Comparison of window query response time with Grid, Quadkey and Z-Index

5 结 论

Z-Index 瓦片空间索引具有结构简单、空间聚集性强和性能稳定等优势,能够有效提高瓦片地图服务的查询效率,具有较强的应用价值。实验结果表明:在海量瓦片数据的情况下,Z-Index 与 Grid 和 Quadkey 相比,单个瓦片查询和窗口查询方面均具有更高的查询效率;Z-Index 在 H2 数据库中比 SQL Server 2000 和 MySQL 中具有更好的性能,建议在瓦片地图服务器端使用 H2 内存数据库可以进一步提高瓦片地图服务的瓦片查询效率。

参考文献 (References)

[ 1 ] Joan M, Keith P, Nuria J. OpenGIS Web Map Tile Service Implementation Standard [ EB/OL ]. [ 2010-11-24 ]. [http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact\\_id=35326](http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=35326).  
[ 2 ] Xu H, Nie Y F, Shu J. Design and implementation of a tile map service based on the middleware [ J ]. Journal of Geo-Information Science, 2010, 12 ( 4 ) : 562-567. [ 许虎, 聂云峰, 舒坚. 基于中间件的瓦片地图服务设计与实现 [ J ]. 地球信息科学学报, 2010, 12 ( 4 ) : 562-567. ]  
[ 3 ] Li D R, Xiao Z F, Zhu X Y, et al. Research on grid division and encoding of spatial information multi-grids [ J ]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35 ( 1 ) : 52-56. [ 李德仁, 肖志峰, 朱欣焰, 等. 空间信息多级网格的划分方法及编码研究 [ J ]. 测绘

- 学报,2006,35(1):52-56. ]
- [ 4 ] Zhang Y S, Ben J, Tong X C. Geospatial Information Spherical Discrete Grid: Principle, Algorithm and Application [ M ]. Beijing: Science Press, 2007: 22-25. [ 张永生, 贡进, 童晓冲. 地球空间信息球面离散网格: 理论、算法及应用 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2007: 22-25. ]
- [ 5 ] Kangy K, Kim K C, Kim Y S. Probability-based tile pre-fetching and cache replacement algorithms for web geographical information systems [ C ]//Proceedings of 5th East European Conference on Advances in Databases and Information Systems. Vilnius, Lithuania: IEEE, 2001: 127-140.
- [ 6 ] Chao W Y, David W W, Rui X Y, et al. Performance-improving techniques in web-based GIS [ J ]. International Journal of Geographical Information Science, 2005, 19(3): 319-342.
- [ 7 ] Young-Sub C. A Client-side Web GIS Using Tiling Storage Structure and Hybrid Spatial Query Processing Strategy [ D ]. Incheon, Korea: INHA University, 1999.
- [ 8 ] Wang H, Yu Z W, Zeng W, et al. Massive spatial data cache replacement policy based on tile lifetime and popularity [ J ]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(6): 667-670. [ 王浩, 喻占武, 曾武. 基于瓦片寿命和访问热度的海量空间数据缓存置换策略 [ J ]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(6): 667-670. ]
- [ 9 ] Yu Z W, Zheng S, Li Z M. A large-scale terrain transmission mechanism based on hybrid P2P [ J ]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 27(2): 243-249. [ 喻占武, 郑胜, 李忠民. 一种混合式 P2P 下的大规模地形数据传输机制 [ J ]. 测绘学报, 2008, 37(2): 243-249. ]
- [ 10 ] Li Y J, Zhong E S, Wang E Q, et al. Markov Model in Prefetching Spatial data [ J ]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010, (7): 1-5. [ 李云锦, 钟耳顺, 王尔琪等. 马尔可夫模型在空间数据预取中的应用 [ J ]. 测绘通报, 2010, (7): 1-5. ]
- [ 11 ] Wu X C. Spatial Database [ M ]. Beijing: Science Press, 2009. 154-156. [ 吴信才. 空间数据库 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2009. 154-156. ]
- [ 12 ] Sagan H. Space-filling Curves [ M ]. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag. 1994.
- [ 13 ] Samet H. Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures [ M ]. San Francisco: Morgan Kaufman Publishers, 2006.
- [ 14 ] Aref W G, Kamel I, Mokbel M F. Analysis of multi-dimension space filling curves [ J ]. Geoinformatica, 2003, 7(3): 179-209.
- [ 15 ] Chen K L, Chang Y I. Neighbor-finding based on space-filling curves [ J ]. Information Systems. 2005, 30(3), 205-226.
- [ 16 ] Gong J Y. A kind of linear quadtree code based on natural number [ J ]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1992, 21(2): 90-99. [ 龚健雅. 一种基于自然数的线性二叉树编码 [ J ]. 测绘学报, 1992, 21(2): 90-99. ]