

doi:10.3799/dqkx.2011.042

基于整数小波变换的空间矢量数据压缩方法

余先川^{1,2}, 张君兰¹, 张立保¹

1. 北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 针对空间曲线矢量数据相邻坐标点间坐标值大小差别不大的特点, 提出一种新的矢量数据压缩方法: 首先将空间坐标点间的差值转换为整型的偏移量, 使用偏移量表示矢量数据的坐标点; 然后利用整数小波变换(IWT)处理偏移量序列, 最后对变换后的小波系数进行无损熵编码, 使用此方法对中国数字地理地图数据的 SHP 文件进行压缩, 实验结果显示, 压缩比超过 11, 高于其他类似方法, 表明本压缩方法能够实现较高压缩比的空间矢量数据无损压缩。

关键词: 空间矢量数据; 整数小波变换; Huffman 编码; 数据压缩; GIS。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2011)02-0381-05

收稿日期: 2010-06-22

Spatial Vector Data Compression Method Based on Integer Wavelet Transform

YU Xian-chuan^{1,2}, ZHANG Jun-lan¹, ZHANG Li-bao¹

1. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The curve vector data are characterized by small differences between coordinate values of adjacent points. So in this paper, differences between the coordinate values are converted to the integer offset and then the offset is used as the substitute for coordinates of vector data. The integer offset sequence is processed by integer wavelet transform and then lossless entropy coding is used to compress the wavelet coefficients. Compressing the China's digital geographic map data of SHP files by the presented method generates a compression ratio higher than 11. Experimental results show that, for the vector data lossless compression, the presented compression method can achieve a higher compression ratio than other similar methods.

Key words: spatial vector data; integer wavelet transform; Huffman coding; data compression; geographic information system.

地理信息系统 (geographic information system, 简称 GIS) 是由计算机、地理信息系统软件、空间数据、分析应用模型和用户界面及系统人员组成, 可对空间数据进行组织、管理、分析和输出的系统。随着数据获取能力的增强以及 GIS 软硬件系统的发展, 典型的 GIS 软件所能处理的数据量已经从几十 MB 增加到几十 Gb, 大型 GIS 软件的处理能力甚至以 Tb 来计算。巨大的数据量在满足 GIS 用户对空间信息和知识需求的同时, 也对 GIS 的运行效率提出了挑战。在不影响应用的前提下, 对原始数据进行无损或有损压缩, 是减小 GIS 负载、提高 GIS 运行效率的有效手段之一 (吴立新和史文中, 2003;

杨建宇等, 2004)。

空间矢量数据的压缩指对矢量化后以等高线形式出现的地形图或图形化符号 (如文字等) 等进行压缩处理的过程。曲线矢量数据的压缩是当前研究热点之一, 也是本文研究的着力点, 压缩方法的好坏直接影响 GIS 等软件系统的运算速度。

绝大多数曲线矢量数据压缩方法的核心思想是从矢量数据的坐标点运用某种计算方法抽取最能体现矢量数据特征的子集。代表性算法主要有: 角度限值法、垂距限值法、道格拉斯-普克法 (Douglas-Peucker)、Splitting 算法及其改进算法, 以及具有预测功能的曲线矢量数据压缩方法等 (Douglas and

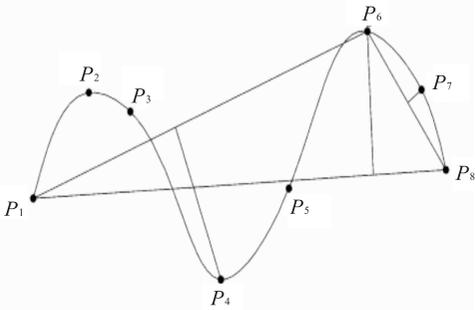


图 1 Douglas-Peucker 法示意

Fig. 1 Douglas-Peucker demonstration

Peucker, 1973; 黄培之, 1995; Kolesnikov and Aki-mov, 2007)。

(1) 道格拉斯-普克法。基本思想(图 1)是: 对每一条曲线的首末点虚连一条直线, 求所有点与直线的距离, 找出最大距离值 d_{\max} , 用 d_{\max} 与限差 D 相比: 若 $d_{\max} < D$, 这条曲线上的中间点全部舍去; 若 $d_{\max} \geq D$, 保留 d_{\max} 对应的坐标点, 并以该点为界, 把曲线分为两部分, 对这两部分重复使用该方法。

(2) 垂距法。基本思路是: 每次顺序取曲线上的 3 个点, 计算中间点与其他两点连线的垂线距离 d , 并与限差 D 比较, 若 $d < D$, 则中间点去掉; 若 $d \geq D$, 则中间点保留。然后顺序取下 3 个点继续处理, 直到这条线结束。

(3) 光栏法。基本思路是: 定义一个扇形区域, 通过判断曲线上的点在扇形外还是扇形内, 确定保留还是舍去。

上述的矢量数据压缩方法都是对矢量数据的有损压缩且是不可逆的。对于矢量数据表示的地图等信息, 有损压缩会造成不可预料的失真, 从而在实际应用中有一定的局限性。

鉴于此, 近年来, 矢量数据的无损压缩算法的研究得到重视。考虑到平面矢量地图文件的存储特性, 钟尚平和高庆狮(2004)结合“无附加码书”字典编码方法, 提出了一种可逆并能显著地压缩矢量地图的方法。王立胜和闵晓瑜(2004)则基于第二代小波变换理论实现了对空间矢量数据的无损压缩。

考虑到现实世界实际矢量数据文件的存储结构和曲线矢量数据的特性, 我们提出将浮点型的矢量数据坐标值预处理成整型值表示的坐标值之间的偏移量, 进而引入先进的整数小波变换对整型的偏移量序列进一步处理, 分析变换后的小波系数的幅值和分布等特征, 采用一种简洁高效的无损熵编码方案进行压缩存储。选用中国数字地图 SHP 格式文件

的数据压缩实验结果表明, 我们提出的压缩方法能够达到比较高的无损压缩比, 可满足相关 GIS 等软件的系统需求。

1 空间矢量数据的整型化

空间矢量数据文件一般包括表示数据属性和存储结构的元信息和实际曲线(图形)的坐标点序列, 其中浮点型坐标点序列占据了文件的绝大部分存储空间。因而对空间矢量数据文件进行压缩就转换成对空间坐标点序列进行压缩。

对于二维的平面矢量数据, 空间坐标点序列由 X 坐标序列和 Y 坐标序列组成。由于使用浮点型表示, 每个坐标值占用的存储空间为 8 个字节(其长度与机器字长和单精度, 双精度或更高精度浮点表示有关)。这里使用的是基于整数小波变换的压缩方法, 即整型数表示坐标点序列。

鉴于同一曲线与多边形实体的空间坐标点序列是顺序的和密集的, 其相邻点间的坐标值之差的 变化范围很小, 可以使用整型数来表示。由 N 个点序列 $[(X_n, Y_n], n=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 表示的曲线或多边形实体, 其坐标值整型化 $[(X'_n, Y'_n], n=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 计算步骤如下:

[1]: 记 X_0, Y_0 , 令 $X'_0=0, Y'_0=0$;

[2]: 对于 $n=1, 2, \dots, N-1, X'_n=X_n-X_{n-1}, Y'_n=Y_n-Y_{n-1}$;

[3]: 已知 X_n 的最高精度为 $10^{-p}, Y_n$ 的最高精度为 10^{-q} , 则:

$$X'_n = X'_n \times 10^p,$$

$$Y'_n = Y'_n \times 10^q.$$

表 1 展示了一组实际的空间矢量数据坐标序列的整型化。

2 整数小波变换

小波分析(Chui, 1992)是近年来发展的应用数学理论, 由于它同时具有时域和频域的良好局部化性质, 而且随着信号不同频率成分在时、空域取样的疏密自动调节, 因而可在任意尺度观察函数(信号、图像等)的任意细节并加以分析, 被誉为数学显微镜。特别是小波多分辨率分析(MRA)理论, 因其可提供在不同分辨率下分析表达信息的有效途径, 在 GIS 空间数据处理方面, 如: 在电子地图的无级缩放

表 1 浮点数矢量数据整形化

Table 1 Transforming float of vector data into integer

数据点 编号	原始矢量数据坐标点		坐标值偏移量表示		偏移量整数化	
	X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标
1	122.095 0	52.033 7	0	0	0	0
2	122.075 1	52.038 8	-0.019 9	0.005 1	-199	51
3	122.058 1	52.038 3	-0.017 0	-0.000 5	-170	-5
4	122.049 3	52.037 0	-0.008 8	-0.001 3	-88	-13
5	122.045 8	52.035 2	-0.003 5	-0.001 8	-35	-18
6	122.045 7	52.032 7	-0.000 1	-0.002 5	-1	-25
7	122.055 2	52.018 5	0.009 5	-0.014 2	95	-142
8	122.056 5	52.010 7	0.001 3	-0.007 8	13	-78
9	122.058 1	52.002 8	0.001 6	-0.007 9	16	-79
10	122.060 3	52.000 0	0.002 2	-0.002 8	22	-28
11	122.063 4	51.996 1	0.003 1	-0.003 9	31	-39
12	122.064 7	51.990 2	0.001 3	-0.005 9	13	-59
13	122.063 0	51.986 3	-0.001 7	-0.003 9	-17	-39
14	122.059 8	51.982 8	-0.003 2	-0.003 5	-32	-35
15	122.053 1	51.982 1	-0.006 7	-0.000 7	-67	-7
16	122.048 3	51.981 1	-0.004 8	-0.001 0	-48	-10
17	122.041 7	51.980 3	-0.006 6	-0.000 8	-66	-8
18	122.034 3	51.978 4	-0.007 4	-0.001 9	-74	-19
19	122.028 6	51.973 3	-0.005 7	-0.005 1	-57	-51
20	122.024 4	51.966 4	-0.004 2	-0.006 9	-42	-69
21	122.021 2	51.959 1	-0.003 2	-0.007 3	-32	-73
22	122.013 7	51.950 6	-0.007 5	-0.008 5	-75	-85
23	122.008 3	51.945 9	-0.005 4	-0.004 7	-54	-47
24	122.003 3	51.943 1	-0.005 0	-0.002 8	-50	-28
25	121.996 8	51.942 3	-0.006 5	-0.000 8	-65	-8
26	121.993 8	51.942 2	-0.003 0	-0.000 1	-30	-1
27	121.986 1	51.937 2	-0.007 8	-0.005 0	-78	-50
28	121.975 9	51.930 7	-0.010 2	-0.006 5	-102	-65

中,多细节的数据支持、多比例尺的图形数据表达、自动地图制图综合等问题中,小波多分辨率分析与它们有着天然的联系,为处理上述问题提供了新的途径(Chang and Wu,2004)。

第一代小波变换主要是利用小波滤波器组对图像行列分别滤波,进行卷积运算,由于都是在实数域的变换,即使待处理信号本身是整数序列,相应小波变换系数也是实数。由于数字图像一般都是用整数表示(速度快,且节省存储空间),我们也非常希望有一种“整数-整数小波变换”,将整数序列映射为整数小波系数,并且这种映射是可逆的,具有这种性质的小波变换称为整数小波变换(integer wavelet transform,简称 IWT)。Sweldens 等提出的提升(lifting)小波变换方法是一种新的小波变换工具,能够很容易地构造一般的整数小波变换(丁绪星,2004)。

整数小波变换用伪码表示如下:

$$s_{1,l}^{(0)} := S_{0,2l}$$

$$d_{1,l}^{(0)} := S_{0,2l+1}$$

for $i=1:(1):M$

$$\forall l: d_{1,l}^i = d_{1,l}^{i-1} - \lfloor \sum_k p_k^{(i)} s_{1,l-k}^{(i-1)} + \frac{1}{2} \rfloor$$

$$\forall l: s_{1,l}^i = s_{1,l}^{i-1} - \lfloor \sum_k u_k^{(i)} d_{1,l-k}^{(i-1)} + \frac{1}{2} \rfloor$$

end

整数小波逆变换由如下伪码描述:

for $i=M:(-1):1$

$$\forall l: s_{1,l}^{i-1} = s_{1,l}^i + \lfloor \sum_k u_k^{(i)} d_{1,l-k}^{(i)} + \frac{1}{2} \rfloor$$

$$\forall l: d_{1,l}^{i-1} = d_{1,l}^i + \lfloor \sum_k p_k^{(i)} s_{1,l-k}^{(i)} + \frac{1}{2} \rfloor$$

$$s_{0,2l+1} := d_{1,l}^{(0)}$$

$$s_{0,2l} := s_{1,l}^{(0)}$$

End

代码中 S 表示变换前的信号序列; s, d 表示变换后的小波系数; M 表示变换的层数; $p_k^{(i)}, u_k^{(i)}$ 表示提升计算中使用的预测因子和更新因子的系数。

3 使用整数小波变换(IWT)的矢量数据压缩

3.1 IWT 压缩流程

IWT 变换压缩曲线矢量数据的基本原理是通过 IWT 变换将空间域的坐标序列变换为频率域的小波系数序列,对系数序列进行量化和编码获得压缩数据流。在使用 IWT 变换前,需要将同一条曲线或者多边形实体的矢量数据组合一个待压缩子块,对每个子块中的 x 和 y 坐标序列使用第一节中整型化方法转化成整型的偏移量序列;然后对得到的整型偏移量序列进行整数小波变换,得到小波系数序列。最后对小波系数进行编码,得到压缩后的矢量数据。压缩流程如图 2 所示。

3.2 整数小波变换系数的编码

由于曲线坐标值偏移量序列的动态变化范围不大且存在很大的自相关性,对其使用整数小波变换得到的小波系数变化范围也不大,其中高频小波系数更是绝对值较小的整数数列,适合采用高效的无损熵编码方案。为了提升高频小波系数占比从而提高编码效率,本文实验采用两层整数小波变换。

Huffman 编码是常用的无损熵编码方案,但是本文方法得到的整数小波系数符号数较多,且多数符号出现的频率很低,会造成根据小波系数频率统计得到的 Huffman 编码表过大,进而影响编码解码效率。

本文采用了结合定长码编码和 Huffman 编码

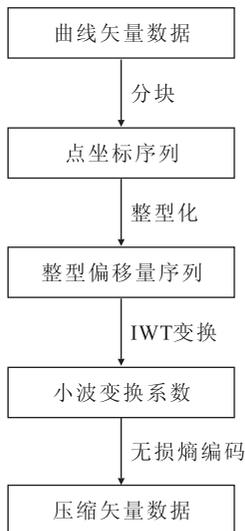


图 2 基于 IWT 的曲线矢量数据压缩流程

Fig. 2 Flow chart of curve vector data compression based on IWT

表 2 矢量数据压缩结果

Table 2 Vector data compression results

实验数据	原始数据大小(kb)	压缩后数据大小(kb)	压缩比
roa_4m. shp	583	54	10.8
rai_4m. shp	753	67	11.2
bou1_4l. shp	1 142	101	11.3
hyd1_4l. shp	1 151	101	11.4
hyd1_4p. shp	933	86	10.9

各自优点的编码方案,其压缩原理如下:(1)经过对整数小波系数的观察和分析,绝对值越小的系数特别是高频系数出现的频率越高,对于绝对值小于一定阈值的小波系数采用 Huffman 编码。(2)绝对值较大的小波系数出现的频率很低,但其变化范围相对较大,对于这类系数适合采用码长较长的定长码进行编码。

基于以上压缩原理,本文提出的对整数小波变换的压缩流程如下:(1)根据数据的分布特性选择合适的阈值,本文以小于此阈值的小波系数所占比例超过 90 为标准;(2)对小于此阈值的小波系数使用 Huffman 编码;(3)对大于此阈值的整数小波系数根据数值变化幅度范围选择适宜的定长编码长度,进行定长编码。

4 实验与分析

实验数据来自国家基础地理信息中心的中国数字地理地图数据,包含中国国界线矢量数据,中国境内铁路线、公路线、河流分布等矢量数据,有代表性。待压缩的空间数据格式为 GIS 普遍使用的 SHP 格式。实验采用本文提出的压缩编码方案,根据整数小波变换后系数的分布情况,由于绝对值小于 12 的整数小波变换系数出现的频率超过 90%,因此,我们选择值 12 为阈值,对绝对值小于 12 的系数使用 Huffman 编码,对绝对值大于 12 的系数使用编码长度为 8 位的定长编码。实验结果如表 2 所示,平均无损压缩比在 11 以上。李琦等(2000)提出的单独使用矢量数据整型化压缩方法实现的压缩比理论上能达到 8 倍;而瑞典 Idevio 公司的 RaveGeo 系统,其对 SHP 格式的矢量数据文件的无损压缩比是 10 左右(www.idevio.com)。

5 结论

由于 GIS 应用中曲线矢量数据非常多,并且往

往涉及到很多曲线之间空间关系的判定等大量计算. 而 GIS 地图数据中的曲线或多边形矢量数据的空间坐标相邻点间的坐标值之差的变化范围很小, 可以考虑使用整型数表示, 并且由于空间坐标点序列内部存在很大的相关性, 可以通过对浮点型的坐标点序列转换成整型偏移量序列, 再进行整数小波变换和采用合适的编码压缩方案进行此类矢量数据的压缩.

实验结果也表明, 使用本文的基于整数小波变换的曲线矢量数据压缩方法, 能够达到比较高的无损压缩比, 这对提高 GIS 性能(速度快与存储空间节省)非常重要和有效.

References

- Chang, Z. Q., Wu, L. X., 2004. Montanic grid DEM data compression based on Wavelet transform and mixed entropy coding. *Geography and Geo-Information*, 20(1): 24—27.
- Chui, C. K., 1992. An introduction to Wavelets. Academic Press, New York, 2(2): 50—61.
- Ding, X. X., 2004. Study and implementation of image coding based on integer wavelet transform (Dissertation). Nanjing University of Science and Technology, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Douglas, D. H., Peucker, T. K., 1973. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *The Canadian Cartographer*, 10: 112—122. doi: 10. 3138/FM57—6770—U75U—7727
- Huang, P. Z., 1995. Vector data compression with prediction function. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 24(4): 316—320, 249 (in Chinese with English abstract).
- Kolesnikov, A., Akimov, A., 2007. Distortion-constrained compression of vector maps. Proceedings of the 2007 ACM symposium on applied computing, Seoul: 8—12. doi: >10. 1145/1244002. 1244005

- Li, Q., Yang, C. W., Chen, A. J., 2000. Research on geographical database model in WebGIS. *Journal of Image and Graphics*, 5(2): 119—123 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. S., Min, X. Y., 2004. A mobile-client oriented compression algorithm for spatial vector data. *Control Theory and Applications*, 23(12): 20—22 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L. X., Shi, W. Z., 2003. Theory and algorithm of geographic information system. Science Press, Beijing, 10 (in Chinese).
- Yang, J. Y., Yang, C. J., Ming, D. P., et al., 2004. Review on vector data compression and simplification of WebGIS. *Computer Engineering and Applications*, 40(32): 36—38 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, S. P., Gao, Q. S., 2004. An efficient lossless compression algorithm for a kind of two-dimension vector maps. *Journal of System Simulation*, 10(16): 2189—2194 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁绪星, 2004. 基于整数小波变换的图像编码研究与实现(博士学位论文). 南京: 南京理工大学.
- 黄培之, 1995. 具有预测功能的曲线矢量数据方法. *测绘学报*, 24(4): 316—320, 249.
- 李琦, 杨超伟, 陈爱军, 2000. WebGIS 中的地理关系数据库模型研究. *中国图象图形学报*, 5(2): 119—123.
- 王立胜, 闵晓瑜, 2004. 一种面向移动用户的空间矢量数据压缩算法. *自动化技术与应用*, 23(12): 20—22.
- 吴立新, 史文中, 2003. 地理信息系统原理与算法. 北京: 科学出版社, 10.
- 杨建宇, 杨崇俊, 明冬萍, 等, 2004. WebGIS 系统中矢量数据的压缩与化简方法综述. *计算机工程与应用*, 40(32): 36—38.
- 钟尚平, 高庆狮, 2004. 一类矢量地图的无损压缩算法. *系统仿真学报*, 10(16): 2189—2194.