

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **1**
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1月 第17卷 第1期(总第189期)

目 次

综述

压缩感知基本理论:回顾与展望 邵文泽, 韦志辉(1)

图像处理和编码

完全质量保持的 AVS 视频可逆信息隐藏算法 郭宝安, 陈彪, 张飏, 于志强, 张卫明(13)

多成分正则化约束的断层图像重建算法 王丽艳, 韦志辉, 李星秀(20)

基于单幅图像景深和大气散射模型的去雾方法 郭珈, 王孝通, 胡程鹏, 徐晓刚(27)

结合 NSS 和小波变换的无参考图像质量评价 金波, 李朝锋, 吴小俊(33)

结合区域分割和双边滤波的图像去噪新算法 杨学志, 徐勇, 方静, 卢洁, 左美霞(40)

种子像素滤波法去除随机脉冲噪声 单建华(49)

基于纹理和亮度感知特性的率失真优化策略 俞力克, 代锋, 张勇东, 林守勋(54)

单通道散焦模糊置换图像的盲分离 王伟, 方勇(62)

侧扫声呐图像的 3 维块匹配降斑方法 范习健, 李庆武, 黄河, 王敏(68)

新适应模型的提出及分类扩散 李彦宝, 姜广峰, 王治强, 刘薇(75)

图像分析和识别

从神经切片图像中识别功能束类型的研究 钟映春, 罗鹏(82)

融合 SPA 遮挡分割的多目标跟踪方法 丁欢, 张文生(90)

目标识别中的稳定图像特征组合发掘 姜永兵, 彭启民(99)

基于结构特征的高分辨率 TerraSAR-X 图像船舶识别方法研究 殷雄, 王超, 张红, 吴樊(106)

图像理解和计算机视觉

机器人的混合特征视觉环境感知方法 杨俊友, 马乐, 白殿春, 东俊光(114)

纹理分布分析的快速图像修复算法 张晴, 林家骏(123)

计算机图形学

圆的整数反走样生成算法 贾银亮, 张焕春, 经亚枝(130)

遥感图像处理

SAR 图像的快速核主成分分析识别方法 于红芸, 姜涛, 关键 (137)

基于图像内容层次表征的遥感图像分割方法 张学良, 肖鹏峰, 冯学智 (142)

地理信息技术

保持几何模式的城市道路路网简化方法 杨必胜, 张云菲, 栾学晨 (150)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 1 期

2012 年 1 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
北京 9718 信箱 邮编 100101
电子信箱: jig@irsa. ac. cn
电话: 010-68407995 010-82614429
网 址: www. cjig. cn

印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail: jig@irsa. ac. cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 1 January 2012

Contents

Review

Advances and perspectives on compressed sensing theory *Shao Wenze, Wei Zhihui*(1)

Image Processing and Coding

Complete video quality-preserving reversible data-hiding based on AVS *Guo Bao'an, Chen Biao, Zhang Biao, Yu Zhiqiang, Zhang Weiming*(13)

Morphological component analysis for tomography reconstruction *Wang Liyan, Wei Zhihui, Li Xingxiu*(20)

Single image dehazing based on scene depth and physical model *Guo Jia, Wang Xiaotong, Hu Chengpeng, Xu Xiaogang*(27)

No-reference image quality assessment based on natural scene statistics and wavelet *Jin Bo, Li Chaofeng, Wu Xiaojun*(33)

New filter based on region segmentation and bilateral filtering *Yang Xuezhi, Xu Yong, Fang Jing, Lu Jie, Zuo Meixia*(40)

Removal of random-valued impulse noise based on seed pixels filter *Shan Jianhua*(49)

Novel rate distortion optimization strategy based on perceptual properties of texture and luminance *Yu Like, Dai Feng, Zhang Yongdong, Lin Shouxun*(54)

Blind separation of single-channel permuted defocus blurred image *Wang Wei, Fang Yong*(62)

Side-scan sonar image despeckling based on block-matching and 3D filtering *Fan Xijian, Li Qingwu, Huang He, Wang Min*(68)

New well-posed model and classified diffusion *Li Yanbao, Jiang Guangfeng, Wang Zhiqiang, Liu Wei*(75)

Image Analysis and Recognition

Type recognition of fascicular groups from nerve slice image *Zhong Yingchun, Luo Peng*(82)

Multi-target tracking approach combined with SPA occlusion segmentation *Ding Huan, Zhang Wensheng*(90)

The mining of stable image feature-compositions in object recognition *Jiang Yongbing, Peng Qimin*(99)

Vessel recognition with high resolution terraSAR-X image based on structure feature *Yin Xiong, Wang Chao, Zhang Hong, Wu Fan*(106)

Image Understanding and Computer Vision

Robot vision environmental perception method based on hybrid features *Yang Junyou, Ma Le, Bai Dianchun, Toshimitsu Higashi*(114)

Fast image inpainting algorithm using color texture distribution analysis *Zhang Qing, Lin Jiajun*(123)

Computer Graphics

Integral algorithm for circle anti-aliasing *Jia Yinliang, Zhang Huanchun, Jing Yazhi*(130)

Remote Sensing Image Processing

SAR images recognition based on kernel principal component analysis *Yu Hongyun, Jiang Tao, Guan Jian*(137)

Remotely sensed imagery segmentation based on the hierarchical representation of image content *Zhang Xueliang, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi*(142)

Geoinformatics

Pattern preserving method for grid simplification in road networks *Yang Bisheng, Zhang Yunfei, Luan Xuechen*(150)

中图法分类号: P208 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)01-0150-07

论文引用格式: 杨必胜, 张云菲, 栾学晨. 保持几何模式的城市道路路网简化方法 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 150-156

保持几何模式的城市道路路网简化方法

杨必胜, 张云菲, 栾学晨

1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;
2. 武汉大学时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心, 武汉 430079

摘要: 提出一种保持路网几何模式的城市路网简化方法。该方法首先在路网自动识别的基础上对路网间的空间关系进行计算, 将存在包含关系的路网合并成更高级别的路网; 然后对路网进行连通划分, 以路网指数、主方向、延展指数作为路网信息分量进行搜索, 删除使路网信息量损失最小的路段, 实现路网的简化; 最后, 以武汉与苏黎世城市路网数据作为实验数据进行路网简化。实验结果表明, 本文方法在简化路网的同时能够较好地保持路网的模式特征, 为小屏幕地图可视化、空间数据多尺度表达和渐进传输等提供较好的数据源。

关键词: 道路模式; 路网简化; 信息损失

Pattern preserving method for grid simplification in road networks

Yang Bisheng, Zhang Yunfei, Luan Xuechen

1. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Engineering Research Center for Spatio-temporal Data Smart Acquisition and Application, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In this paper we propose a grid simplifying method for road networks which preserves the structural patterns. The proposed approach firstly identifies the grid structure, and then merges grids contained by other grids and aggregates these grids into clusters according to their connectivity. The proposed method simplifies grids according to the principle of information minimum loss that is characterized by the grid index, the principal direction, and the elongation index. Two road datasets of Zurich and Wuhan were selected to evaluate the validity of the proposed method. Experimental results show that this method well preserves grid-like pattern. The simplified results provide a good data source for visualizations on small screen devices, multiple representation, and progressive transmission.

Key words: road pattern; grid simplification; information loss

0 引言

道路网数据作为空间基础数据中的一种重要类型, 是空间定位的载体, 是移动位置服务、智能导航、城市规划等领域中不可缺少的空间数据资源, 也是

我国基础地理空间数据库建设的一个重要方面。传统的城市道路网采用多层次、多比例尺的存储管理方式, 在多尺度表达、渐进式传输过程中容易产生“跳动”, 因此需要一种“光滑”的道路简化策略。在地图综合、小屏幕地图可视化中也都需要对原始的道路网数据进行一定的简化。城市道路错综复杂,

收稿日期: 2010-11-17; 修回日期: 2011-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871185); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA12Z241, 2007AA12Z212); 中国科学院地理所资源与环境信息工程国家重点实验室重点基金项目(2010KF0001SA); 精密工程与工业测量国家测绘局重点实验室开放基金项目(PF2009-19)

第一作者简介: 杨必胜(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为空间数据的渐进传输、多尺度表达、3维重建。E-mail: bshyang@whu.edu.cn

但也存在一定内在规律,即各种模式结构。模式结构指地图中重复出现的特征,如形状、方向、颜色、连通性、密度、分布等,能够反映地图高等级的现象,根据随尺度变化不同分为模式可变性(丰富性、精度等)和模式不变性(连接性、层级、相对密度)^[1-2]。Mackness 和 Mackechnie 基于图论提出一种复杂道路交叉口的自动识别和简化方法^[3]。江斌等人将空间句法与 GIS 集成,指出城市空间分为大尺度空间和小尺度空间,轴向线作为一种大尺度空间模式,较好地表达了城市环境^[4]。Heinzle 与 Anders 等人基于几何和拓扑信息提出几种典型道路结构(星形、环形、格网形、stroke)的检测算法,可应用于隐式信息的挖掘和 GIS 数据丰富^[5-6]。Yang 等人考虑方向一致性、形状相似性对道路网中的格网结构进行了自动识别^[7-8]。

格网模式在城市道路网中普遍存在,格网表现为两组(近似)平行直线相交成矩形或平行四边形,这些四边形满足一定边长关系。针对格网简化,Anders 提出一种保持对象分布全局结构的格网典型化(grid typification)方法。该方法把识别出的格网进行规范化纠正,再以采样的方式整行或整列简化纠正后的格网^[9]。该方法能较好地保持简化后的格网模式,但由于未考虑道路网中的连通性约束和采样的方向,因此,不同的采样方向会导致不同的简化结果。Chen 等人提出一种基于网眼密度的格网简化方法^[10]。该方法通过计算道路网眼密度,并根据道路密度阈值与几何、语义、连通性约束设定的舍弃规则选择待合并网眼;剥离密度最大的网眼,删除等级最低的路段并重新组织路段,如此不断循环进行格网的简化。该方法能够保持道路网在拓扑、几何与语义方面的重要特征以及密度差别,但对格网结构存在选择合并网眼时的方向的二义性。

本文在文献[7-8]格网识别的基础上基于几何拓扑信息对格网进行完形归并、邻近合并,并遵循合并过程中信息损失最小和连通性不变原则对格网进行简化,从而有效地保持道路格网形态和模式结构特征。

1 基于格网合并的简化方法

本方法的核心思想是,首先按照文献[7-8]的方法对道路网中的格网进行识别,计算识别出格

网的形态指数并进行大小格网之间的完形归并,从而得到形态完整的道路格网;然后基于连通性进行格网分类;最后根据信息量损失最小的原则合并简化邻近格网。该方法主要包含以下4个关键步骤。

1.1 格网形态指数计算

通过多边形的长和宽、中心点坐标,以及主轴方向描述格网特征。其中,中心点确定格网的位置信息,长和宽描述格网的形状,而主轴方向确定格网的延伸方向。在实际路网中不存在完整的格网,还需要格网指数来表征多边形格网形态的接近程度,格网指数越大表明格网形态相似性越高。该指标已成功用于路网中格网形态的自动识别^[7]。具体计算方法如图1所示。图1中虚线矩形框为多边形的最小外接矩形(MER),MER的长轴方向定义为多边形的主方向 dg_maj ,长边长度定义为主长 dl_maj ,短边长度定义为主宽 dl_min ,多边形与其MER的面积比定义为格网指数 $grid$ 。

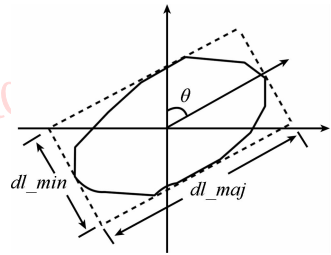


图1 格网形态指数计算

Fig.1 Grid pattern parameter computation

1.2 格网完形归并

多边形(区域)之间的拓扑空间关系包括包含(如岛的情形)、相合、相交、相邻和分离5种^[11]。道路中的格网一般只存在相邻和分离两种关系。而道路中的多个相邻格网可能组成更为完整的格网形态,具有一定的完形特征,并保持了简化后的道路格网形态。如图2所示,A和B为相邻格网,小虚线框为格网A的MER。根据格式塔原则,格网A与格网B具有更高等级的完整格网形态,但是两者形态差异较大,如单纯依靠格网的相似性进行格网简化无法将两者合并。因此本文先计算相邻格网间的完形度,对具有完形特征的格网先进行归并处理。实际应用中,大格网MER有时并不完全包含小格网,需进行缓冲处理。对大格网的MER在X、Y方向上等比例

扩张,直至能够完全包含小格网,大虚线框为 MER 扩充后的结果,记录此时的扩张量 e ,根据式(1)计算相邻格网完形度 $IsContain$ 。

$$IsContain = \begin{cases} 1 - e/5 & 0 \leq e \leq 5 \\ 0 & e > 5 \end{cases} \quad (1)$$

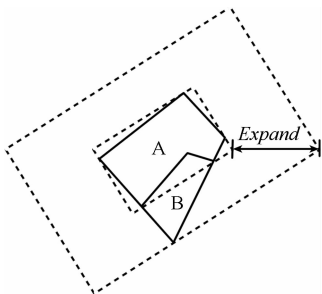


图 2 完形度计算

Fig. 2 Gestalt degree calculation

完形度最大值为 1,即大格网的 MER 无需扩张即可包含小格网;最小值为 0,即扩张 5 个地图单位还未完全包含小格网,则两者无完形关系。

基于完形度的格网归并计算遵循以下规则:

- 1) 相邻格网间的完形度较高;
- 2) 相邻格网公共路段为低等级道路;
- 3) 相邻格网面积差异较大;
- 4) 合并后格网指数增大。

本文采用的迭代方法将能够组成较大完整格网的相邻格网进行归并。从完形度最大的一对相邻格网进行归并,删除格网公共路段。归并后重新计算道路格网的完形度、格网指数等几何拓扑信息,再取完形度最大的归并,迭代归并直至所有满足规则 1)~4) 的格网都被归并。归并的部分结果如图 3 所示,细线为归并删除的公共路段,图 3(a)为一次归并,图 3(b)为经过多次归并得到的完整格网。

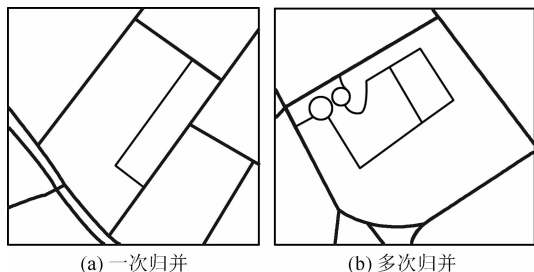


图 3 格网完形归并

Fig. 3 Merging grids contained by a bigger grid

1.3 格网分类

完形归并之后,识别的格网基本只包含完整形态的格网。根据格网间相邻关系,将其进行分类,把具有连通关系的格网划分为一个类。在每个分类内部进行格网邻近合并,不同形态的格网分类之间不进行合并,这样可以保持格网简化后的形态特征。本文用 3 个指数表征格网:

- 1) 格网指数 $grid = area/MER$;
- 2) 主轴方向 dg_maj ;
- 3) 延展指数 $elongation = dl_min/dl_maj$ 。

$area$ 为格网面积, MER 为最小外接矩形 MER 面积, dg_maj 为 MER 长轴方向, dl_min 为 MER 短边长度, dl_maj 为 MER 长边长度。

1.4 基于信息量的格网简化

在每个分类内部的格网邻近合并过程中不可避免地会导致格网信息量的损失。在计算地图信息量方面, Sukhov 将香农信息论中熵的概念引入地图传输^[12], Li 等人基于 Voronoi 图提出一些地图空间信息的量化指标如量测信息、专题信息和空间关系,突破了信息论在地图制图学只是简单的统计的传统模式^[13], 田晶等人将信息损失作为地图综合的优化策略,用于街道的渐进式选取^[14-15]。对于格网而言,本文把格网指数、主轴方向、延展指数 3 个指数的信息损失进行求和,各信息分量的计算方法如式(2)所示。

$$\begin{cases} H(P) = -X \sum_{i=1}^X p_i \log_2 p_i \\ p_i = q_i/L \\ L = \sum_{i=1}^X q_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, X 为某一格网分类所包含的格网个数, i 为格网编号, q_i 表示第 i 个格网的某个格网形态指数(格网指数、主轴方向、延展指数), L 为该类所有格网的对应格网形态指数之和, p_i 表示第 i 个格网形态指数占 L 的比例。格网合并过程中应遵循保持格网信息量损失最少的原则。具体步骤是:

- 1) 计算各类 3 个指标的信息量以及包含的格网个数;
- 2) 循环遍历每个格网分类,从类中面积最小的格网开始合并;
- 3) 遍历其邻近格网,在满足面积、主方向差异、道路等级等条件下选择总的信息损失最小的格网进行合并;

4) 动态更新,重新计算各类的信息量,以及道路、格网数据几何拓扑信息,返回步骤2),直至遍历结束。

根据上述步骤计算出格网合并前后信息量的损失,从而可作为格网合并结果的评价标准。

格网经过合并之后,会产生悬挂边,在处理时将部分长度较小的悬挂道路删除,以达到较好的简化效果^[16]。如图4所示,粗实线为格网合并后的道路,细虚线为由于简化而产生的悬挂道路。从图中可以看出,要产生较好的简化效果,应当删除这些悬挂道路。



图4 悬挂边处理

Fig. 4 Roads stubbles within grid

2 实验与结果分析

2.1 实验数据

利用瑞士苏黎世和中国武汉的城市路网数据,数据中的结点、路段、道路和多边形街区数目如表1所示。利用 Visual studio 2005 + ArcEngine 9.2 实现了上述格网简化算法,其中数据库平台选用 ArcSDE 9.2 + SQL Server 2005, ArcSDE 实现了 RDBMS 管理空间数据库,提供空间和非空间数据高效操作的数据库服务,也便于数据的导入导出。

表1 实验数据统计

Table 1 Statistical description of the experimental datasets

	结点	路段	道路	生成多边形
苏黎世	31 727	35 074	9 576	3 356
武汉	60 924	64 448	11 837	3 525

利用文献[7-8]的方法对两份数据中的格网进行自动识别,同时利用文献[17]的方法对两份数据中的道路进行等级划分。在格网简化时,限定合并前后格网指数变化不超过2%~5%,格网主方向差异不超过20%,面积阈值为识别格网的概率密度分布均值的两倍。图5给出了格网简化的结果。其中灰色路段为删除道路,黑色路段为保留的道路。简化结果表明,其能很好地对识别出的格网进行简化,简化后的格网能够保持较好的视觉效果和原始的形态特征。



(a) 苏黎世路网简化结果



(b) 武汉路网简化结果

图5 道路格网简化结果

Fig. 5 The result of grid simplification

2.2 简化结果定量评价

信息熵已广泛应用于不确定性的度量^[18-19]。分别统计两份数据在简化前后各类的3个信息分量变化(图6)评价简化结果,同时分析各类中每个格网信息量所占比例(图7)。

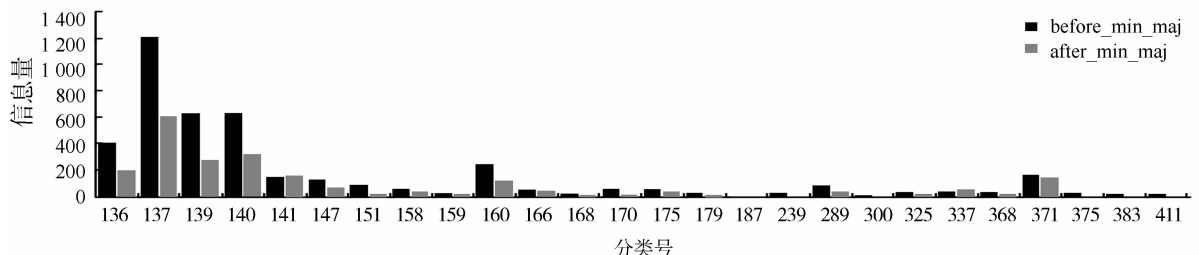
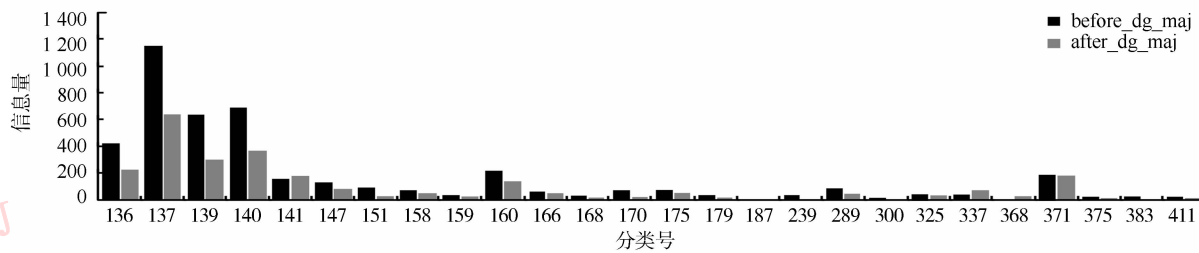
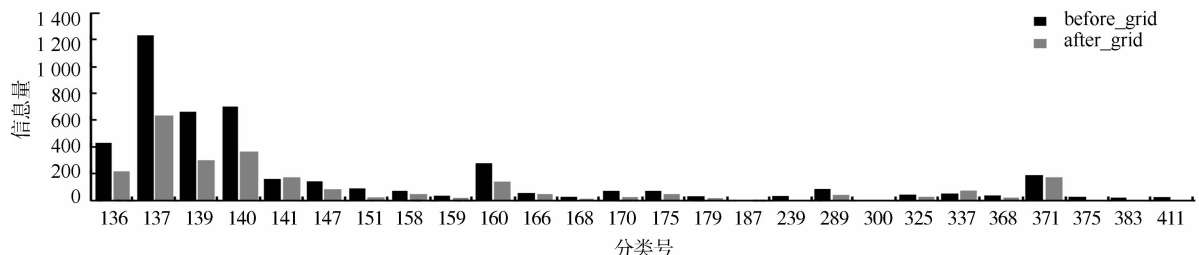
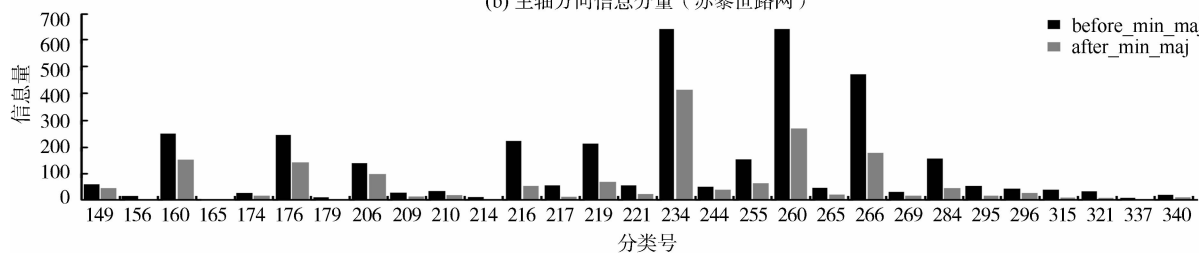
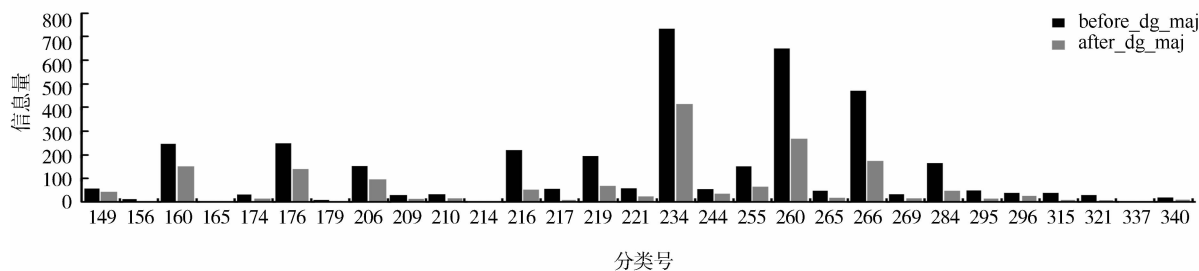
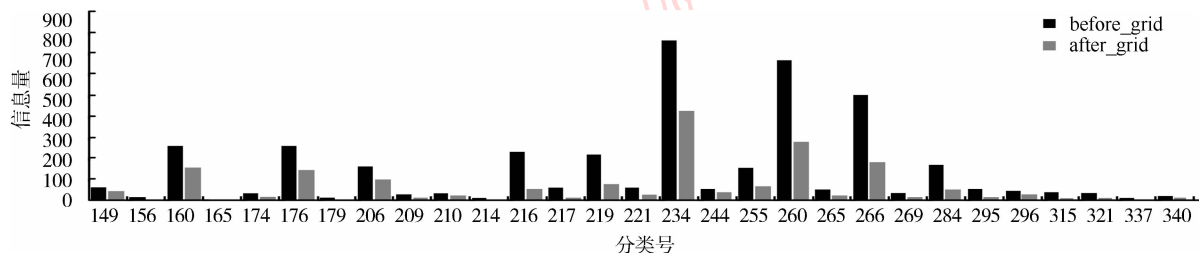


图 6 网格简化前后信息分量对比

Fig. 6 Comparison of three information components before and after simplification

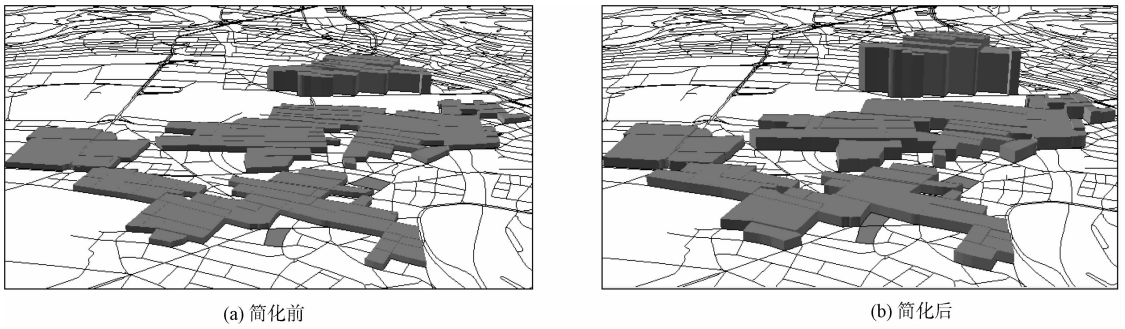


图 7 简化前后格网指数信息量占所属类的比重

Fig. 7 Information proportion of each grid in clusters before and after simplification

如图 6 所示,柱状图中的黑色和灰色分别表示简化前后信息量,对比发现简化后的信息量普遍降低,且格网指数、主轴方向、延展指数 3 个信息分量变化一致。另外,由信息量变化的一致性说明,本文采用的 3 个信息分量具有一定的内在相关性,计算信息总量时应当采用三者加权和,权值可通过三者的相关分析确定。分别对抽样格网简化前后 3 个信息分量的变化进行成对观测值 t 检验,如表 2 所示。结果表明,武汉与苏黎世路网数据的格网简化信息分量均发生显著变化,格网间的相似性显著增强。

表 2 信息量变化 t 检验 ($\alpha = 0.05$)

Table 2 t -test of information variation

	信息分量	t 统计值	$t_{\alpha/2}(n-1)$
武汉 ($n = 26$)	格网指数	2.868 0	
	主轴方向	2.844 7	2.059 5
	延展指数	2.886 5	
苏黎世 ($n = 29$)	格网指数	3.963 9	
	主轴方向	3.935 4	2.048 4
	延展指数	4.066 4	

图 7 中,3 维柱体的高度表示某格网的格网指数信息分量占其所属类中格网指数信息分量之和的比例。由图可见,简化后格网指数信息分量比重增加,其重要性加强,当简化到一定程度时,比重增加到极限,则不能再简化了。上述分析表明,本文算法基于信息损失进行格网简化,能够保持原有格网模式和道路的整体布局,且简化结果唯一,不存在采样方向的二义性。

3 结 论

城市道路网模式是人们认识城市形态特征

的重要标志,对空间数据的多尺度表达、地图综合和网络渐进式传输很重要,格网模式是城市道路网中非常普遍的一种结构。本文在我们开展的格网识别的基础上对识别的格网进行简化。该方法首先对一些存在包含关系的不规则格网进行归并,在保持格网形态和高等级道路前提下使格网指数、主方向和延展指数比 3 个信息分量损失最小,并进行格网简化。本文算法能够较好地解决格网简化中采样方向二义性问题,且顾及了道路等级的影响。本文方法能够取得较好的简化效果,但也存在一些高等级的格网尚不能很好地提取简化的问题,如图 8 所示,细灰色道路为采用本文算法删除的道路,而道路网中存在如黑色粗线表示的高等级道路格网,本文算法尚难以有效提取简化;其次,从完形度最大的格网进行归并不一定是最优的策略;另外,本简化方法未能建立简化参数与简化结果间的关系,从而难以按需控制格网的简化度。本研究将进一步重点解决上述问题。



图 8 高等级格网未能识别简化

Fig. 8 High rank grids not identified and roads not sufficiently generalized

参考文献 (References)

- [1] Mackaness W, Edwards G. The Importance of Modelling Pattern and Structure in Automated Map Generalisation [EB/OL]. [2010-11-02]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.91.1311&rep=rep1&type=pdf>.
- [2] Zhang Q N. Modeling Structure and Patterns in Road Network Generalization [EB/OL]. [2010-11-02]. <http://ica.ign.fr/Leicester/paper/Zhang-v1-ICAWorkshop.pdf>.
- [3] Mackaness W A, Mackechnie G A. Automating the detection and simplification of junctions in road networks [J]. *GeoInformatica*, 1999, 3(2) : 185-200.
- [4] Jiang B, Huang B, Lu F. Spatial Analysis and GeoVisualization in GIS [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 31-58. [江斌, 黄波, 陆锋. GIS 环境下的空间分析和地学可视化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 31-58.]
- [5] Heinze F, Anders K H. Characterising Space via Pattern Recognition Techniques: Identifying Patterns in Road Networks [M] // Mackaness W, Ruas A, Sarjakoski L T. Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications. Amsterdam, Netherland: Elsevier, 2007: 233-253.
- [6] Heinze F, Anders K H, Sester M. Graph Based Approaches for Recognition of Patterns and Implicit Information in Road Networks [EB/OL]. [2010-11-02]. http://icaci.org/documents/ICC_proceedings/ICC2005/htm/pdf/oral/TEMA9/Session%204/FRAUKE%20HEINZLE.pdf.
- [7] Yang B S, Luan X C, Li Q C. An adaptive method for identifying the spatial patterns in road networks [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010, 34(1) : 40-48.
- [8] Yang B S, Luan X C. An automated method for structural pattern recognition of road networks [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(7) : 1251-1255. [杨必胜, 栾学晨. 城市道路网几何结构模式的自动识别方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(7) : 1251-1255.]
- [9] Anders K H. Grid typification [C] // Andreas R, Wolfgang K, Gregory A E. Progress in Spatial Data Handling. Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 2006: 633-642.
- [10] Chen J, Hu Y G, Li Z L, et al. Selective omission of road features based on mesh density for automatic map generalization [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(8) : 1013-1032.
- [11] Zhang C C, Qin K, Lu Y, et al. The Theories and Methods of Spatial Analysis in GIS [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004: 29-30. [张成才, 秦昆, 卢艳, 等. GIS 空间分析理论与方法 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 29-30.]
- [12] Sukhov V I. Information capacity of a map entropy [J]. *Geodesy and Areophotography*, 1967, 10(5) : 212-215.
- [13] Li Z L, Huang P Z. Quantitative measures for spatial information of maps [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(7) : 699-709.
- [14] Tian J, Guo Q S, Feng K, et al. Progressive selection approach of streets based on information loss [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(3) : 362-365. [田晶, 郭庆胜, 冯科, 等. 基于信息损失的街道渐进式选取方法 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(3) : 362-365.]
- [15] Tian J, Ai T H. Communicative model for streets progressive selection [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(4) : 415-418. [田晶, 艾廷华. 街道渐进式选取的信息传输模型 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2010, 35(4) : 415-418.]
- [16] Zhang M, Meng L Q, Qian H Z. A Structure-Oriented Matching Approach for the Integration of Different Road Networks [EB/OL]. [2010-11-02]. http://129.187.175.5/1fkwebsite/fileadmin/user_upload/publications/Zhang/ICC_Moskau_different_road_networks.pdf.
- [17] Luan X C, Yang B S. Generating strokes from city road networks [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(1) : 49-52. [栾学晨, 杨必胜. 城市复杂道路网的 stroke 生成方法 [J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(1) : 49-52.]
- [18] Wu F, Deng H Y, Qian H Z, et al. Quality Evaluation Model for Map automatic Generalization [M]. Beijing: Science Press, 2009. [武芳, 邓红艳, 钱海忠, 等. 地图自动综合质量评估模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [19] Chen N, Lin Z J, Li C M, et al. A comparison of topographic information from different scales DEMs based on information theory [J]. *Remote Sensing Information*, 2004, (3) : 5-9. [陈楠, 林宗坚, 李成名, 等. 基于信息论的不同比例尺 DEM 地形信息比较分析 [J]. *遥感信息*, 2004, (3) : 5-9.]