

引用格式: 王俪颖, 遑鹏, 喻崇湖, 等. 顾及形变控制的小屏幕变比例尺交通路线图生成方法[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(9): 1245-1252.
[Wang L Y, Ti P, Yu C H, et al. 2017. Generation of variable-scale route maps with consideration of distortion reduction for small display sizes. Journal of Geo-information Science, 19(9): 1245-1252.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.01245

顾及形变控制的小屏幕变比例尺交通路线图生成方法

王俪颖, 遑 鹏*, 喻崇湖, 赵东旭, 侯晓彤

西南交通大学地球科学与环境工程学院, 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 西南交通大学, 成都 611756

Generation of Variable-Scale Route Maps with Consideration of Distortion Reduction for Small Display Sizes

WANG Liying, TI Peng*, YU Chonghu, ZHAO Dongxu and HOU Xiaotong

Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, State-province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: Currently route maps are often displayed on mobile devices for the route selection. However, for such devices, a major problem is their small display sizes. In this study, a new method on adaptive generation of variable scale maps for small display sizes was proposed and aimed to improve the clarity of the whole map. This method consists of two steps, i.e. estimating the density of global distribution on maps and conducting variable scale transformation based on the estimated density values. Compared with current variable scale methods, this method considered the space for representation of the landmarks and text symbols, and the reduction of overall distortions arising from map deformation. The experimental results indicated that the new method is able to adaptively generate the variable scale maps for different small display sizes and provide a map overview with an improved clarity as well as well-preserved map recognition compared with original shapes.

Key words: route maps; small display; distortion reduction; variable scale representation; mapping algorithm

***Corresponding author:** TI Peng, E-mail: pti@home.swjtu.edu.cn

摘要: 用户在旅游或者室外运动中经常将路线图显示于移动设备上以方便规划路线。然而移动设备显示屏幕通常较小,若较大范围的地图通过等比例尺缩小在小屏幕显示,可能会导致清晰度和辨识度的降低,尤其对于地图中地物较为密集的区域。本文提出一种自动化生成变比例尺地图的方法,通过更加均匀化地图显示内容密度分布以改善地图概览清晰度。在该方法中,首先对密度分布进行估计,密度估计主要考虑地图上路线空间分布以及地标与注记显示空间,然后根据所得到的密度分布进行变比例尺转换,最终生成的变比例尺结果图,其大小取决于给定显示尺寸。相较于现有变比例尺转换方法,本文提出的方法可以考虑了地标与注记显示空间,同时又能有效控制地图变形以提高地图识别。实验结果表明,通过本方法生成变比例尺结果图对地图概览的清晰度有着显著提高,并且能够保持良好的地图识别度。

关键词: 路线图;小屏幕;变形控制;变尺度表达;映射算法

收稿日期 2017-05-12;修回日期:2017-07-15.

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0502303);国家自然科学基金项目(41201475、41471383);军事测绘导航工程军队重点实验室开放基金资助课题“城市道路运行状况知识可视化表达方法”。

作者简介:王俪颖(1993-),女,硕士生,研究方向为地图学与地图可视化。E-mail: wang_liying0410@163.com

*通讯作者:遑 鹏(1977-),男,博士,副教授,研究方向为地图学与地图可视化。E-mail: pti@home.swjtu.edu.cn

1 引言

周成虎在2015年提出了全空间信息系统的概念,指出建立多元、多尺度、多语义、多模态等特征的大数据表达模型,形成数据的空间协同表达^[1]。而作为空间信息主要的表达工具之一的地图目前已被广泛应用于各类移动设备以方便人们日常活动,例如规划户外运动和景区旅游路线^[2]。然而移动设备的主要问题是显示屏幕较小,当展现较大范围且较丰富的地图信息时地图清晰度将会被降低。现有提出的改善地图清晰度方法主要可以分为两类。①保持地图比例尺不变,主要的技术手段包括:多比例尺表达,即对同一区域使用不同比例尺地图进行切换或者采用不同窗口显示不同比例尺地图^[3];制图综合算法^[4-5];订制表达^[6](personalization),即仅显示与任务相关的地图内容。②主要通过采用变比例尺转换提高显示的清晰度,即相对增大兴趣区域。相对于第一类方法,变比例尺转换由于对地图不同区域采用了连续式的比例尺变化,克服了多尺度表达中不同比例尺地图关联时产生的匹配对应困难,并尽可能多的清楚显示关注的细节信息,从而更好地利用了小屏幕有限的显示空间^[7]。

华一新指出研究多粒度时空对象的符号化机制与自适应表达方法是全空间信息系统的核心问题^[8]。面向规划旅游路线时,小屏幕地图中较大范围内的群集地标符号和注记符号的表达需研究关系和群集实体符号化机制,实现群集地标符号的注记符号认知无损的变尺度表达,本文研究的变尺度表达主要是采用连续的变比例尺表达。变比例尺地图是通过增加用户在地图上关注对象的清晰度,从而提高对所需地图信息的识别能力和效率,而忽略精确的空间位置和路线长度。事实上对于很多地图应用,例如路线规划、地图导航等,精确的几何信息对于地图用户并不是非常重要^[9]。基于不同的关注对象,现有的变比例尺转换方法可以分为局部关注和全局关注两类。在局部关注中^[10-14],对于指定的关注区域将被放大以改善该区域的清晰度,对于其他非指定区域的地图清晰度或者被忽略或者通过减少地图显示内容的方法进行改善。还有一些方法以选择的路线为关注对象^[15-16],通过放大已选择的路线及相关地图信息(例如道路名、地标等)达到在较小的屏幕上清晰显示整个路线的目的,这

类方法常用于路线导航。在第二类方法中,考虑到空间密度分布通常是高度不均匀的^[17],当较大地图区域显示在较小屏幕上时,可以通过尽可能缩小地图中空白或者稀疏区域的方式,使地图要素密度分布更加均匀化,以改善地图整体清晰度。该类型的变比例尺地图可服务于用户决策的制定,例如在移动设备上显示旅游景区较详细和清晰的概览地图,从而有助于游客更好和更快的规划游览路线,本文主要关注于第二类方法。然而现有该类针对网状地图的方法^[18-19]存在的问题是,未考虑地图中地标与注记符号的显示空间,并且缺乏对地图变形的控制。事实上过度的变形容易导致地图识别能力的降低^[20],针对这2方面的问题,本文提出顾及地标与注记符号显示空间和降低地图变形的变比例尺转换方法。此外,由于当前使用的移动设备显示屏幕尺寸样式繁多,本文研究中也考虑了根据给定显示尺寸生成变比例尺地图。

2 变比例尺路线图生成方法

对于全局关注的变比例尺转换是当地图显示在较小屏幕上时,采用使密度分布尽可能均匀的方式从而提高地图整体清晰度,因此首先需要估计地图的密度分布。需要注意的是当地图缩小时使用全局关注的变比例尺转换主要依靠压缩稀疏和空白区域以改善清晰度,然而密集区域中的空白部分若被过度压缩将导致清晰度降低,因此本文中的密度分布估计中,对于某一个区域的密度估计也应考虑其周围区域的密度情况。此外密度估计也应考虑注记符号,方便基于密度值的变比例尺转换方法的设计。基于地图不同区域的密度值进行变尺度转换是一个不适宜问题,并没有唯一解,因此本文将变尺度转换问题通过数学优化法建立数学模型解决,通过给定的约束条件和目标方程得出最优解。此外在变比例尺转换中还应尽可能控制地图变形以提高地图识别能力。基于以上思想,本方法主要包含2个步骤:①密度分布估计;②基于密度分布的变比例尺变换。

2.1 顾及注记符号的密度分布估计

估计网状地图密度分布的常见方法有2种:①基于网状地图中的节点和内点进行密度估计,例如中心度^[18],然而该方法无法正确估计包含密集线而

较少点区域的密度^[21]。②将地图通过均匀格网进行划分,基于每个格网单元估计密度^[19,22-23]。此方法克服了2种方法的缺陷,同时均匀格网也便于使用^[24],因此本研究采用均匀网格估计地图密度,其表达式如下:

$$D = \frac{N}{A} \quad (1)$$

式中: A 表示一个格网单元的面积; N 表示在格网单元 A 中统计单元的数量; D 表示格网单元 A 的密度值。

对于网状地图,密度估计通常使用线密度进行, N 表示在格网单元 A 中总线长。然而由于本研究需要顾及地标与注记符号的显示空间,因此在密度估计中不应将地标与注记符号在地图中所占空间视为空白区域,对于这个问题可以通过2种方法来解决:①仍然是基于格网进行线密度估计,如果格网单元内包含地标与注记符号,可以人工增加该格网单元的密度值。②与点密度估计思想一致,需要基于栅格形式的电子地图进行密度估计,统计单元为非空白像元,即式(1)中 N 表示在格网单元 A 中非空白像元的数量。相对于第①种方法,该方法需要统计非空白像元的个数,需要时间较长,但是自动化程度高,不需要人工干预,因此被本文采纳。

需要注意的是,基于格网进行密度估计所得到的只是区域密度值,并且估计结果依赖于格网划分大小。而对于本研究中所提到的密度分布应反映整幅图宏观的密度变化,判断某一个格网单元是否为密集区域不仅应参考其本身的密度值,还应顾及周围区域的密度情况,这样才能避免2个密集区域间的空白区域被过度压缩而导致清晰度降低。因此需要在估计某一单元的密度同时,综合考虑其本身及周围单元的密度,常见可用方法有核密度估计^[25]和平滑滤波。由于核密度估计是以点为核心进行的,而平滑滤波通常适用于栅格影像,本文使用均匀格网进行密度统计,因此选择平滑滤波方法。

2.2 基于密度分布的变比例尺变换

将根据2.1节所得到的密度估计结果,基于数学优化思想建立数学模型进行格网变形,此外需要在格网变形中增加对变形的控制,尽可能减少变形对地图识别的影响,之后基于变形格网通过内插方法得到变比例尺路线结果图。

在格网变形中,格网单元的质心将被作为控制

点,同时格网单元的密度值将被赋予所对应的格网质心。每个控制点 $\{(X_i, Y_i) \in \mathcal{R}, i \in C\}$ 有3个变量,即变换后坐标 $\{x_i, y_i\} \in \mathcal{R}$ 和未知的比例尺因子 $S_i \in \mathcal{R}^+$,其中 C 是控制点编号的集合, \mathcal{R} 是实数, \mathcal{R}^+ 是正实数。

由于结果图与显示尺寸大小 $\{(u_{\min}, v_{\min}), (u_{\max}, v_{\max})\}$ 要求保持一致,因此每个控制点对应的约束条件如下:

$$\begin{cases} u_{\min} \leq x_i \leq u_{\max} \\ v_{\min} \leq y_i \leq v_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

第二个约束条件目的是赋予密集区域较大的比例尺因子从而实现该区域面积的增大。此外考虑到不同方向上的变形可能不同,比例尺因子将分别在 x 和 y 方向上定义:

$$\begin{cases} S_{ix} \geq u_x \cdot D_i \\ S_{iy} \geq u_y \cdot D_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: D_i 是对应于控制点 i 的密度值; u_x 和 u_y 是常数用于控制变形效果。随着 u_x 和 u_y 的增大,密集区域面积增大的幅度将增加, S_{ix} 是在 x 方向的比例尺因子, S_{iy} 是在 y 方向的比例尺因子。

由于不同的控制点所对应的密度值是有差异的,对于两个相连的控制点不可能完全按照各自的密度值进行坐标变换,除非密度值相同。因此在这种情况下,允许存在小的偏差 dx_{ij} 和 dy_{ij} :

$$\begin{cases} dx_{ij} = S_{ix} \cdot (X_i - X_j) - (x_i - x_j) \\ dy_{ij} = S_{iy} \cdot (Y_i - Y_j) - (y_i - y_j) \end{cases} \quad (4)$$

偏差的平方和 e_1 :

$$e_1 = \sum_{i \in C} \left(\sum_{j \in Adj(i)} (dx_{ij}^2 + dy_{ij}^2) \right) \quad (5)$$

式中: $Adj(i)$ 是与控制点 i 的相连的控制点。

为了降低格网过度变形对地图识别的影响,应尽可能控制相同行和列的相邻控制点在 x 和 y 方向上变化:

$$e_2 = \sum_{i \in C} \left(\sum_{k_1} (dx_{ik_1}^2) + \sum_{k_2} (dy_{ik_2}^2) \right) \quad (6)$$

式中: k_1 是与控制点 i 有相同 X 初始值的连接点; k_2 是与控制点 i 有相同 Y 初始值的连接点。

最终的目标方程为:

$$\text{Minimize } (e_1 + w e_2) \quad (7)$$

上述约束条件与目标方程在形式上符合数学优化法中常见的凸二次规划,因此可以获得有效解^[26]。目标方程中 w 为权值,可以进行形变控制,

即 w 值越大表示最终结果中地图变形越小,但同时也减少了感兴趣区域放大幅度。

基于密度分布的格网变形后,下一步是基于该变形格网进行地图重构从而实现地图的变比例尺转换,散点内插技术(scattered data interpolation)经常被使用达到该目的^[19,27]。Franke^[28]比较了29种典型的内插方法,其中Hardy^[29]提出的多元二次曲面内插(Multiquadric Interpolation)在平滑性、算法复杂度、结果的美观性和易用性方面均优于其他方法,因此本文使用该方法实现网状地图重构。具体实现步骤为:①首先根据格网控制点在原始位置和变形转换后位置之间的差值计算出多元二次曲面内插的参数值;②根据得到的参数值计算网状地图中节点和内点的位移量从而得到它们新的位置坐标。

3 实验分析

本文采用峨眉旅游路线图(图1)为实验数据以验证本文中提出的变比例尺转换方法的有效性。其相其相应的格网变形结果如图2(a)、(b)所示,分别生成的两种不同尺寸的变比例尺地图如图3(a)和图3(b)所示。目标方程中 ω 值为1,表示感兴趣区域放大幅度和变形控制程度同等重要。实验计算机的中央处理器为3.2 GHz和内存为24 G,对于图1道路网络数据(358个点和30条弧段)生成时间4.3 s,其中密度估计需要3 s,基于估计的密度值进行变比例尺转换需要1.3 s,说明本文所提方法有较

高的运算效率。对方法的评估主要考察变比例尺结果图的认知度和清晰度。变比例尺结果的认知度评估是从整体图形对比识别和单根路径识别效率2个方面进行,并不考虑可以辅助认知的地标和注记符号。而由于本文方法在改善概览清晰度中考虑了为注记符号提供显示空间,因此在清晰度评估中使用了增加注记符号后的路线图。

对于整体图形认知评估采取了问卷方式,邀请20名不同教育背景的志愿者(9名男性和11名女性)通过视觉对比变比例尺结果图与原形地图(图1),根据识别的难易程度划分5个等级,对应分数分别为1、2、3、4、5分,其中,1分为非常难识别,2分为难识别,3分为可以识别,4分为易识别,5分为极易识别。



图1 峨眉山旅游路线图
Fig. 1 E'Mei Mountain tourist map

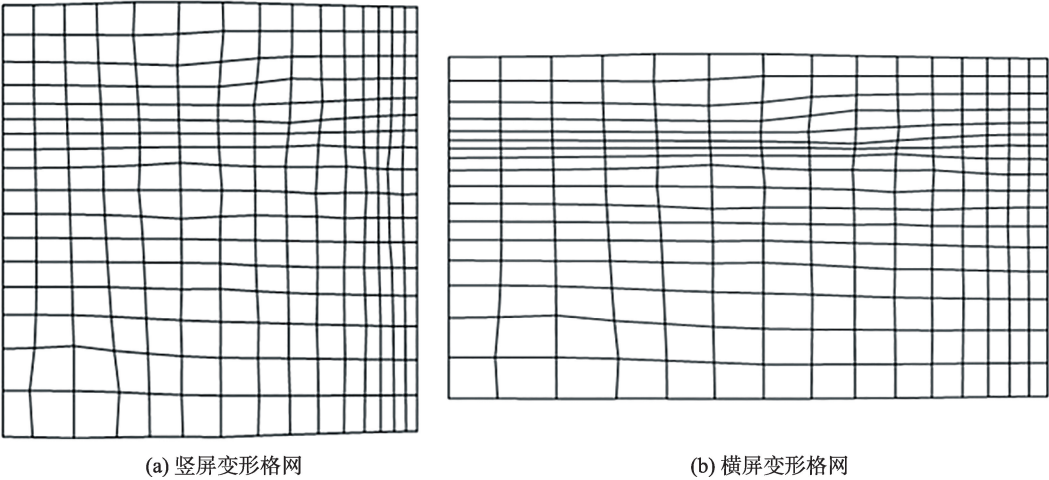


图2 峨眉山旅游路线图变比例尺缩小格网图
Fig. 2 Distorted grid of variable scale results of E'Mei Mountain tourist map

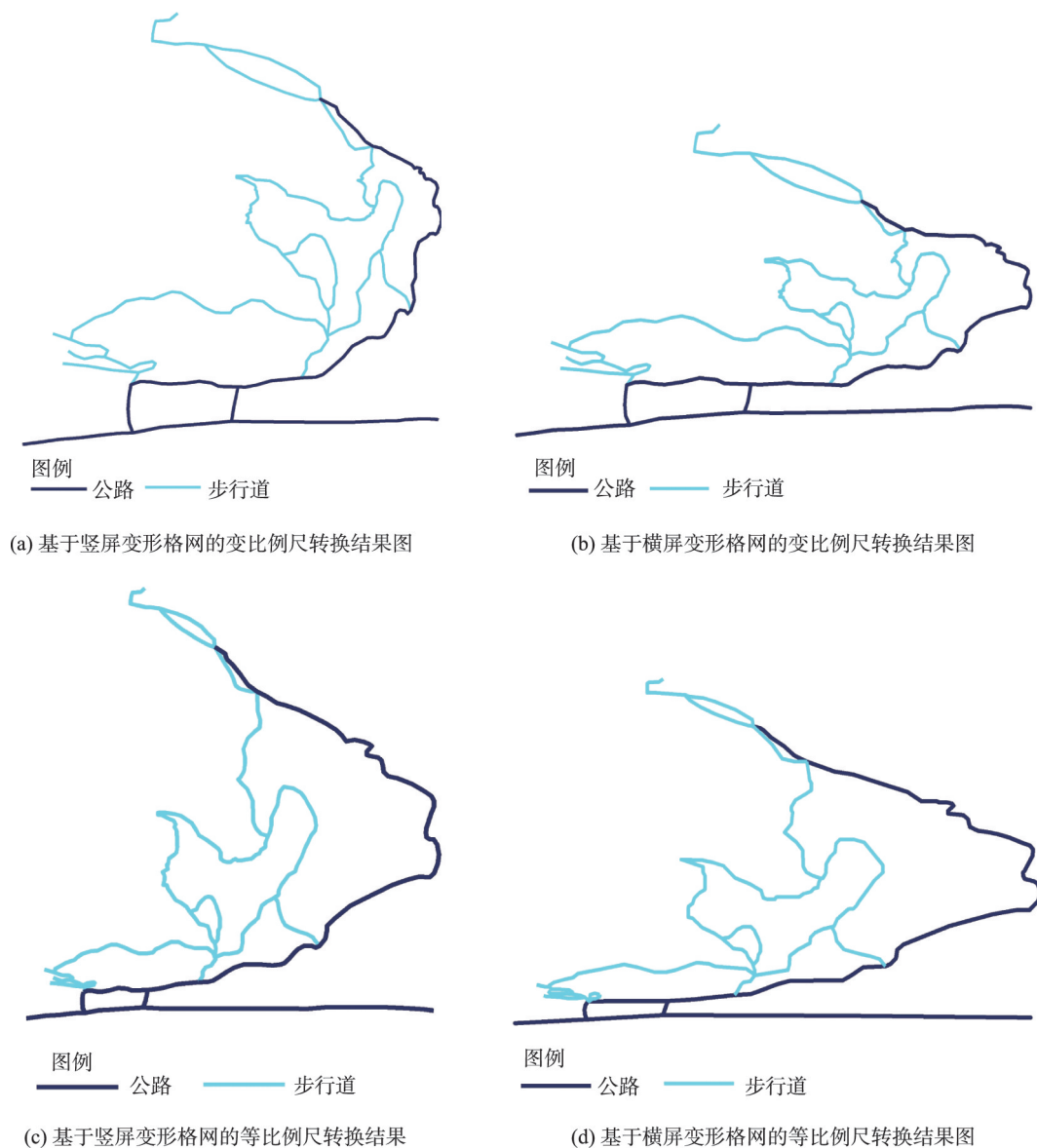


图3 峨眉山旅游路线图变比例尺缩小与等比例尺转换结果

Fig. 3 Variable scale and uniformly scaling results of E'Mei Mountain tourist map

别。在问卷中地图以高清打印版本提供给志愿者。对于整体图形认知度问卷结果的平均分数分别为4.7和4.5(图3(a)、(b))。对于单条路径识别效率评估,首先在原形地图上选择较长的路径(见图1中粗线),然后志愿者在两幅变比例尺结果图(图3(a)、(b))以及相同尺寸的两幅等比例尺缩小结果图(图3(c)、(d))上画出相应路径,最终结果分别为10.3 s和12.4 s(图3(a)、(b)),9.9 s和12.8 s(图3(c)、(d)),实验结果表明本文所提出的方法生成的变比例尺结果图基本不影响地图识别。

在概览清晰度改善的评估中,注记符号被分别加入变比例尺缩小和等比例尺转换结果图

中(图4(a)、(b),图5(a)、(b)),由于本文并不探讨地标与注记符号的配置,四幅结果图中的地标与注记符号均为半自动化配置,即首先根据对应点位自动放置,然后人工调节其位置尽可能避免重叠。通过对比图4和图5中变比例尺和等比例尺转换结果,可以看出变比例尺结果图能为地标和注记符号提供了较为充足的显示空间;而等比例尺缩小的结果表明在地图密集区域注记符号的显示空间明显不足,过于拥挤甚至互相压叠,从而验证了本文所提方法对于较小显示空间能够有效改善地图清晰度的优点。

本文又采用了道路网数据进行方法验证,图6(a)为地图原始形状,图6(b)和(c)分别为等比例尺

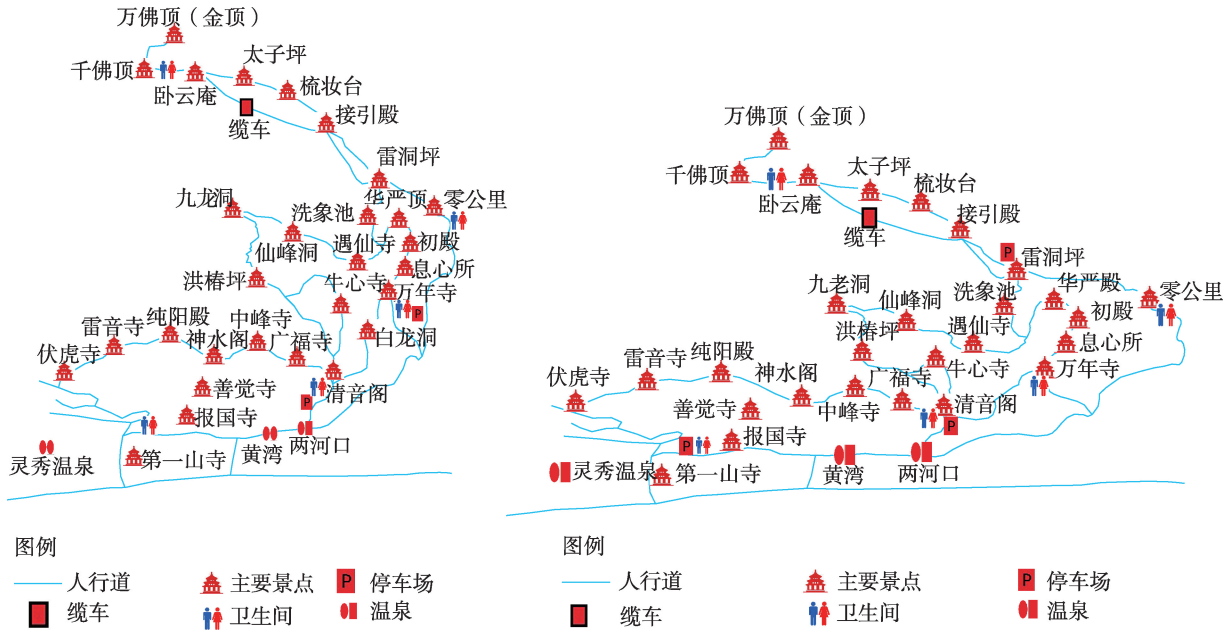


图4 增加注记的峨眉山旅游路线图变比例尺缩小结果

Fig. 4 The results of variable scaling of E'Mei Mountain tourist map with labels

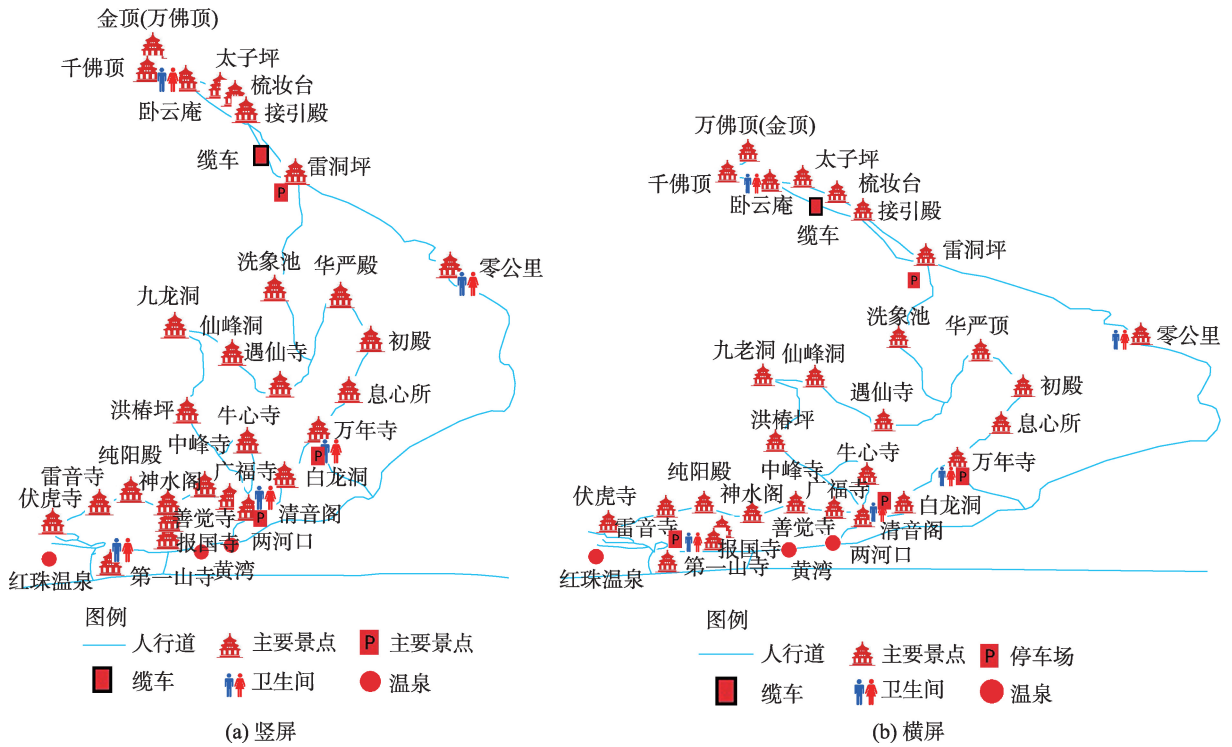


图5 增加注记的峨眉山旅游路线图等比例尺缩小结果

Fig. 5 The results of uniformly scaling of E'Mei Mountain tourist map with labels

缩小结果图和使用本文方法生成的变比例尺结果图,并按照5寸屏幕显示大小,其中粗线为一条行驶路径。目标方程中 w 值为1,图6(c)生成时间2.1 s,图6(b)的生成的等比例尺缩小结果图只是图形的

等比例尺缩小,是直接拖动改变图形大小的,所以在此不考虑其生成时间。此外为了提高地图认知效率,每个路口配置两个地标符号及相应注记。可以看出,图6(b)在等比例尺缩小后,基本无法支持

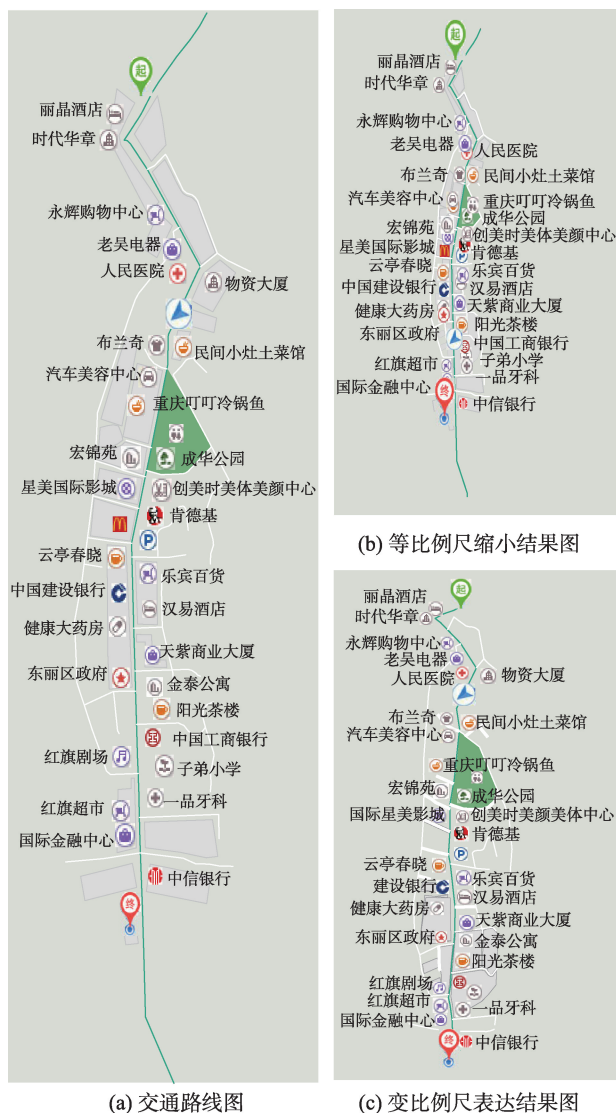


图6 交通路线图、等比例尺缩小及变比例尺表达

Fig. 6 The original route map, uniformly down-scaling map and variable scale map

地图的清晰识别。本文所提方法生成的变比例尺结果图6(c)可以极大改善移动设备小屏幕显示的清晰度,充分利用小屏幕显示空间,并且在路径导航过程中始终为地图用户提供概览,从而增强了路径识别的空间感和认知度。该类变比例尺地图也可为乘坐公交车的用户提供路线认知,因为公交车上通常只提供下一站的站名信息,并且在没有上下车乘客的情况下,很可能不停站。而乘坐不熟悉路线的乘客经常担心是否到站或者还有多久到站,特别在晚上无法看清周围环境信息,例如路牌、站牌,因此在地图上始终看到起始点和周围地标能够帮助乘客不断地确认自己的空间位置,从而提高了地图服务能力。

4 总结

本文提出了面向较小显示空间的路线图变比例尺转换方法。首先基于格网对地图密度分布进行估计,然后基于密度通过优化建模进行格网变形,最终使用散点内插方法进行网状地图重构从而实现地图变比例尺转换。该方法顾及地标和注记符号的显示空间并且对地图变形进行控制。实验结果表明,相对于等比例尺变换结果图,该方法所生成的变比例尺结果图清晰度得到明显改善,从而较为充分的利用小屏幕显示空间,同时也较好保持了良好的地图识别,另外方法的运算效率也较高。

本文方法可以在一定程度上克服小屏幕显示空间不足的问题,从而提高了识别能力和效率,希望能够推动移动地图制图方法的发展。对于道路地图的变比例尺表达,由于道路表达长度与其实际长度会产生偏差,通常人们规划路线是以道路实际长度为基础,认为实际长度与通行时间长短相一致,因此可能会产生认知误导。今后,研究将在变尺度道路地图上深入研究交通运行时间信息可视化表达,如通过设定道路本身的色彩、形状或者宽窄来表达交通通行时间或通达度^[30-31],以及通过附加blod单位时间元^[31]、通行时间等值线^[30]等方法。事实上,道路实际长度也并不一定与真实通行时间长短成比例,还要考虑交通拥挤、道路宽度等因素,因此,在继承变比例尺地图优点的基础上,如何通过适宜的可视化表达方法高效准确地反映通行时间是将来研究的重点。

参考文献(References):

- [1] 周成虎.全空间地理信息系统展望[J].地理科学进展, 2015,34(2):129-131. [Zhou C H. Prospects on pan-spatial mapping and geographic information science and technology[J]. Process in Geography, 2015,34(2):129-131.]
- [2] Cotcoran P, Mooney P, Bertolotto M. Interactive cartographic route descriptions[J]. Geoinformatica, 2014,18:1-26.
- [3] Karnick P, Cline D, Jeschke S, et al. Route visualization using detail lenses[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010,16(2):235-247.
- [4] Li Z L. Algorithmic foundation of multi-scale spatial representation [M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [5] 徐柱,刘彩凤,张红,等.基于路划网络功能评价的道路选取方法[J].测绘学报,2012,41(5):769-776. [Xu Z, Liu C F, Zhang H, et al. Road selection based on evaluation of stroke network functionality[J]. ActaGeodaetica et Carto-

- graphica Sinica, 2012,41(5):769-776.]
- [6] Wilson D, Bertolotto M, Weakliam J. Personalizing map content to improve task completion efficiency[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(5):741-760.
- [7] Reichenbacher T. Mobile cartography: Adaptive visualisation of geographic information on mobile devices[D]. Germany: Technische Universität München, 2004.
- [8] 华一新.全空间信息系统的核心问题和关键技术[J].测绘科学技术学,2016,33(4):331-335. [Hua Y X. The key issues and technologies of pan-spatial information system [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2016, 33(4):331-335.]
- [9] Barkowsky T, Freksa C. Cognitive requirements on making and interpreting maps. Spatial information theory: A theoretical basis for GIS, 347-361, Berlin: Springer, 1997.
- [10] 艾廷华,梁蕊.导航电子地图的变比例尺可视化[J].武汉大学学报·信息科学版,2007,32(2):127-130. [Ai T H, Liang R. Variable-scale visualization in navigation electronic map[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007,32(2):127-130.]
- [11] Harrie L, Sarjakoski L T, Lehto L. A variable-scale map for small- display cartography[C]. Proceedings of the Joint International Symposium on Geo- Spatial Theory, Ottawa: Processing and Applications, Canada, 2002.
- [12] Haunert J, Sering L. Drawing road networks with focus regions[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011,17(12):2555-2562.
- [13] Kadmon N, Shlomi E. A poly-focal projection for statistical surface[J]. The Cartographic Journal, 1978,15(1):36-41.
- [14] Li Q Q. Variable-scale representation of road networks on small mobile devices[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(11):2185-2190.
- [15] Kopf J, Agrawala M, Barger D, et al. Automatic generation of destination maps[J]. ACM Transactions on Graphics, 2010,29(6):1581-1582.
- [16] Agrawala M, Stolte C. Rendering effective route maps: Improving usability through generalization[C]. Proceedings of the 28th annual conference on computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH' 01), Los Angeles, CA. New York: ACM, 2001,241-249.
- [17] Bak P, Schaefer M, Stoffel A, et al. Density equalizing distortion of large geographic point sets[J]. Cartography and Geographic Information Science, 2009,36(3):237-250.
- [18] Merrick D, Gudmundsson J. Increasing the readability of graph drawings with centrality-based scaling[C]. Tokyo: Proceeding of Asia-Pacific Symposium Information Visualization, 2006:67-76.
- [19] Li Z L, Ti P. Adaptive generation of variable-scale network maps for small displays based on line density distribution[J]. Geo-Informatica, 2015,19(2),277-295.
- [20] Lin S S, Lin C H, Hu Y J, et al. Drawing road networks with mental maps[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014,20(9):1241-1252.
- [21] Frishman Y, Tal, A. Uncluttering graph layouts using anisotropic diffusion and mass transport[J]. IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, 2009,15 (5):777-788.
- [22] Borchert J R. The twin cities unbanded areas: Past, Present, and Future[J]. Geographical Review, 1961,51:47-70.
- [23] Matti W. Gridsquare network as a reference system for the analysis of small area data[J]. Acta Geographica Lovaniensia, 1972,10:63-147.
- [24] Jansen M, Van Kreveld M. Evaluating the consistency of cartographic generalization[C]. Proceeding of 8th International Symposium on Spatial Data Handling, Vancouver, Canada, 1998: 668-678.
- [25] Gatrell A, Baley T, Diggle P, et al. Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology [J]. Transaction s of the Institute of British Geographers, 1996,21:74-256.
- [26] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [27] Ti P, Li Z L. Generation of schematic network maps with automated detection and enlargement of congested areas [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014,28(3):521-540.
- [28] Franke R. Scattered data interpolation: test of some methods[J]. Mathematics of Computation, 1982,38:181-200.
- [29] Hardy R L. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces[J]. Journal of Geophysical Research, 1971,176:1905-1915.
- [30] Haverkort H. Embedding cues about travel time in schematic maps[C]//Schematic Mapping Workshop, 2014.
- [31] J.Stevens and K.Goldsberry. Fixed-interval segmentation for travel time estimations in traffic maps. Presentation at Ann. Meeting Assoc. of American Geographers(AAG) ,2012.