

扫描蛇：一种从高分辨率遥感图像上 提取道路的新方法

汪 闽¹⁾ 杨晓梅²⁾ 闫国年¹⁾

¹⁾ (南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

²⁾ (中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要 为了能对高分辨率遥感图像上各种复杂情况下的道路进行有效提取, 提出了一种称之为“扫描蛇”的半自动新方法。该方法的基本过程是: 首先根据用户确定的起始点确定道路的基本走向、路宽、灰度分布等剖面特征; 然后在起始剖面两侧进行深度搜索, 寻找满足符合条件的道路边缘(梯度极值)点对; 最后进行点对连接形成双线道路。在“北京一号”小卫星图像上的实验证明在道路方向、灰度特征分布发生显著改变, 道路间断、相互交叉等一系列复杂条件下, 该方法均能有效地提取主干道路, 体现出较强的鲁棒性和实用价值。

关键词 高分辨率遥感 道路 信息提取

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)07-1322-07

A Semi-automatic Road Extracting Method for High Spatial Resolution Remotely Sensed Imagery

WANG Min¹⁾, YANG Xiao-mei²⁾, LV Guo-nian¹⁾

¹⁾ (Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210046)

²⁾ (State Key Laboratory of Resource & Environmental Information System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract It is one of the important work to extract linear features, e. g., roads, from remotely sensed imagery in the field of remote sensing information extraction. A semi-automatic method to extract roads from high spatial resolution remotely sensed imagery is proposed. The main steps include: 1) some basic profile features, e. g., the starting road direction, width, and radiometry distribution are obtained with the user-specified starting road seed couple; 2) a searching fan is then created, within which several ‘scan snakes’ on several directions are dispatched, which contains themselves’ several snake joints, i. e., the scan profiles. Within each scan joint of each snake, a pair of edge points (gradient extremes of the pixel values along each side of the road) which satisfy the road profile model will be searched. For every finding within every joint of a snake, its votes will be added. The best snake is the one which carries the most votes, which then denotes the next searching direction. The searching is carried out from the starting position until reaching some finishing conditions, e. g., the boundary of an image; 3) these edge points are then connected to form a double-side road. The main road network can be extracted under a lot of complex conditions, such as distinguishing changes of road directions and radiometry distributions, road broken and intersections. Several experiments on Beijing-1 panchromatic imagery (with spatial resolution 4m) are given, which validate the adaptive ability and practicability of our method.

Keywords high spatial resolution remote sensing, road, information extraction

基金项目: 国家自然科学基金项目(40401039); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA12Z224, 2006AA12Z146)

收稿日期: 2006-10-30; 改回日期: 2007-01-11

第一作者简介: 汪 闽(1975 ~), 男。南京师范大学副教授, 2003年6月毕业于中国科学院地理科学与资源研究所获博士学位。主要研究方向为遥感信息提取、空间数据挖掘。E-mail: sysj0918@126.com

1 引言

从遥感图像上提取线性特征,比如道路网一直是遥感信息提取的重要研究课题,且被认为具有相当的难度^[1]。遥感工作者们对此问题进行了大量研究,如 Barzohar 等人提出的结合几何特征与统计模型的道路网检测方法^[2];Tupin 等人的结合线性形状特征与马尔可夫随机场纹理模型的 SAR 图像上的道路网提取方法^[3];文贡坚等人采用结合统计模型的直线抽取方式进行的道路提取^[4];Shackelford 等人利用形状与光谱特征进行的城市道路网检测^[5];朱长青等人利用形态分割的方法进行的高分辨率遥感图像的道路提取^[6];张荣等人通过定义一组方向可调滤波器对图像各个方向上的边缘进行滤波,以提取道路目标^[7];肖志强等人通过融合 SAR 及 TM 图像进行的道路网络更新等等^[8]。尽管相关研究非常之多,但由于问题的复杂性,致使足够可靠、可应用于生产的软件系统至今似未出现。此外,近年来随着高分辨率遥感数据源的大量涌现,由于更为丰富的地物细节带来了更为突出的光谱混淆现象,这更进一步为道路网络的提取带来了新的问题和更大困难。

道路提取按实现方式可分为自动与半自动提取两大类。以上两种道路提取方式的实现步骤一般包括^[9]:(1)道路特征的增强;(2)道路“种子点”,即可能的道路点的确定,对此,人们提出了各种道路检测算子,其中包括基于像素分类、边缘检测和模板匹配等的方法;(3)将“种子点”扩展成段,对此有基于规则的边缘点自动连接、动态规划等等;(4)道路段的确认、自动连接,并形成道路网络,这一步骤将涉及到自动编组算法、顾及上下文知识的连接假设生成和假设验证、地物语义关系表达、多源数据融合等高层次自动图像解译方法。限于篇幅,有关道路提取方法的系统分类和评论可参见文献^{[9]~[12]}。

从目前的研究进展看,要实现完全自动的道路提取还存在很大困难,其主要原因是道路提取中的“识别”步骤,对计算机而言十分困难,而这对于人则相对简单^[11]。为此,半自动提取目前具有更大的现实性,而且相应的算法往往也更具实用性。本文提出了一种半自动的道路提取方法,该方法的基本过程和上述步骤一致,而在步骤3上则具有独创性。

本文以“北京一号”小卫星全色高分辨率图像(空间分辨率4m)为主要实验数据源进行了算法测试,结果表明,该方法是有有效与实用的。

2 道路剖面建模

文献^[2]对遥感图像上的道路特征进行了总结(道路建模的假设前提),认为道路提取主要需要包括以下条件:①道路宽度变化不大,且变化缓慢;②道路方向的改变可能较慢;③道路局部的平均灰度变化较慢;④道路和周边景物的灰度变化可能较大;⑤道路不太可能很短。通过实例分析,笔者认为,对于高分辨率的遥感图像来说,上述①、②、⑤条件基本成立,条件③、④由于道路细节或其他遮盖地物的影响,致使有时未必成立。那么,什么才是道路提取中应该抓住的最主要特征呢?下面用某道路的剖面分析来进行说明。如图1(a)所示,在垂直于道路走向的某个位置,绘制一个道路灰度分布剖面图(图1(b))。通过分析可知,尽管道路内部像元灰度分布规律可能并不稳定,但就一般情况而言,道路的两侧边缘和周边景物交界处的灰度分布极可能变化较大,即存在一对灰度梯度变化的局部极值(图中 p_1, p_2 处),而这对极值就指示了道路的基本宽度 w 。如果能首先让用户指示出某个点对(p_1, p_2)的位置,那么就可以获得这条道路的相当丰富的信息:如道路的基本宽度、走向、大致灰度分布等等。如果沿道路走向移动该剖面连线到某个相邻位置来寻找这对极值,则由于可能受道路内部细节、其他地物遮盖、其他地物相近灰度分布的干扰,致使该位置满足距离接近 w 的极值对可能并不存在;但是,在满足条件①、②、⑤的前提下,在道路的可能改变的行进方向上,出现两点距离为 w 的极值对的概率显然很可能比其他非道路行进方向要大。这就提示了在确定了道路开始追踪种子点对的前提下,搜索下一个道路剖面位置的基本方法(如图2所示):首先在道路起始剖面的两端分别确定一个扫描扇区,同时做若干个追踪方向的若干个剖面,并选择以最大概率出现上述极值对的某个追踪方向上的下一个剖面位置作为下次追踪的起始剖面,并登记相关特征信息;然后在起始剖面的两边分别重复以上深度搜索过程,直到满足算法的终止条件或到达图像边界。本文形象地把上述操作过

程称为“扫描蛇”方法。这是由于在某个扫描扇区内, n 个追踪方向相当于“派遣”了 n 条扫描蛇, 每条蛇都拥有自己的 m 个蛇节(待考察的扫描剖面连线); 接着在每条蛇的每个蛇节上进行像元灰度、梯度等特征的扫描, 同时寻找满足条件的梯度极值点对, 当满足 k 个, 则为该蛇投上 k 票; 最后选

择其中 k 值最大的一条蛇的方向和符合条件的蛇节作为下次搜索的方向和起始位置, 并重复上述“派遣”过程, 直到某条道路追踪结束。需要指出, 为方便计算, 可对横向道路选择垂直剖面连线, 而对纵向道路则选择横向连线(45°角为分界)作为扫描剖面(如图 2 所示)。

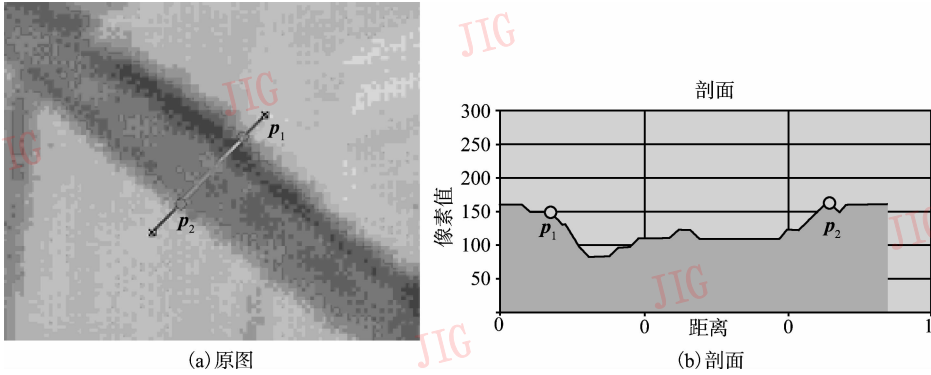


图 1 某条道路的剖面分析
Fig. 1 Profile analysis of a road

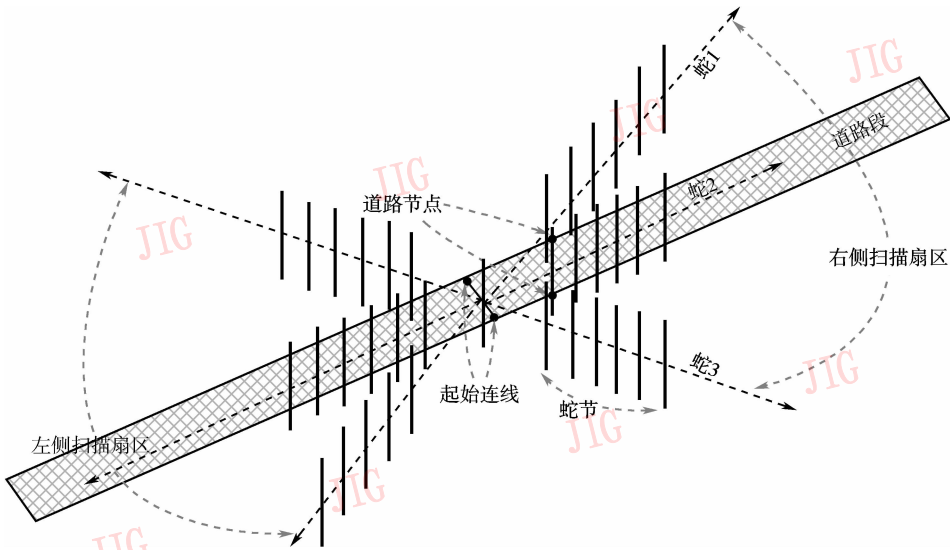


图 2 道路追踪示意图
Fig. 2 Detection of a road

通过对大量“北京一号”小卫星全色图像的判读分析发现, 在以上条件的基础上, 主要道路相对周围景物往往呈现出更暗的色调(排除城市复杂区域及其他地物阴影的干扰)。这个规律对其他高空间分辨率图像也基本适用。为此, 本文建立了以下道路剖面模型:

设某个道路检测连线坐标区间为: $X = [0, k]$, 则连线下的像元灰度值是 1 维坐标 x 的函数, 即

$$g_x = g(x) \quad x \in X \quad (1)$$

连线内任意坐标的灰度梯度定义为

$$\nabla x = g_{x+1} - g_x \quad (2)$$

灰度梯度局部极大的坐标位置集合定义为

$$G^+ = \{x | \nabla x > \nabla(x-1) \text{ 且 } \nabla x \geq \nabla(x+1) \text{ 或 } \nabla x \geq \nabla(x-1) \text{ 且 } \nabla x > \nabla(x+1)\} \quad (3)$$

梯度局部极小的坐标位置集合定义为

$$G^- = \{x | \nabla x \leq \nabla(x-1) \text{ 且 } \nabla x < \nabla(x+1) \text{ 或 } \nabla x < \nabla(x-1) \text{ 且 } \nabla x \leq \nabla(x+1)\} \quad (4)$$

而可能的道路剖面 r 则是由一对梯度极小、极大位

置约束的、 X 上的某个子区间,其将构成以下可能的道路剖面集合:

$$\mathbf{R} = \{ \mathbf{r} = [u, v] \mid u \in \mathbf{G}^-, v \in \mathbf{G}^+, u < v \} \quad (5)$$

$\forall \mathbf{r} \in \mathbf{R}, \mathbf{x} \in \mathbf{r}$, 道路剖面 \mathbf{r} 宽度为

$$w_r = \| v_r - u_r \| \quad (6)$$

道路剖面 \mathbf{r} 灰度最大值为

$$g_r^{\max} = \max(g_x) \quad (7)$$

道路剖面 \mathbf{r} 灰度最小值为

$$g_r^{\min} = \min(g_x) \quad (8)$$

道路剖面 \mathbf{r} 灰度均值为

$$\bar{g}_r = \frac{\sum g_x}{w_r + 1} \quad (9)$$

道路剖面 \mathbf{r} 外周边环境的灰度均值为

$$\bar{g}_{\text{out}} = \frac{\sum_{i=0}^{u_r-1} g_i + \sum_{i=v_r+1}^k g_i}{k - v_r + u_r} \quad (10)$$

道路剖面 \mathbf{r} 内像元灰度差为

$$d_r = g_r^{\max} - g_r^{\min} \quad (11)$$

道路剖面 \mathbf{r} 和周围地物的灰度差为

$$d_{\text{out}} = \bar{g}_r - \bar{g}_{\text{out}} \quad (12)$$

则合适的道路剖面集合满足如下条件:

$$\mathbf{R}^* = \{ \mathbf{r} \mid w_r/w_0 \in [T_{\min}, T_{\max}], d_r < D_{\text{in}}, d_{\text{out}} > D_{\text{out}} \} \quad (13)$$

w_0 是初始道路宽度, T_{\min} , T_{\max} , D_{in} , D_{out} 是预先设置的阈值。其中, T_{\min} , T_{\max} 是当前道路宽度和初始宽度比值的上下限, D_{in} 是道路内部灰度差的上限, D_{out} 是道路内部和周围环境灰度差的下限。设置以上参数的依据是道路建模的假设条件。如果同时有多个合适剖面存在,那么就挑选宽度最接近的初始宽度中的一个。

3 算法流程

本文以一条道路的追踪为例来阐述以下算法的流程:

(1) 设置道路追踪的起始连线

用户在垂直于某个道路延展方向的道路剖面上作一连线(该连线端点应该尽量落在道路边缘上),由此即可获知以下道路特征:道路起始位置的灰度分布特征、大致走向、起始路宽等等。

(2) 通过起始连线两侧的剖面分析、追踪来得到道路边界,对于起始连线的左右两侧,进行以下步

骤,直到追踪出一条完整的道路:

①从起始连线开始,根据道路走向 45° 方位角为界,区分横向道路与纵向道路,其中横向道路选择纵向扫描线,纵向道路选择横向扫描线;

②以约 1.2 倍的起始路宽(可调节),在某个扫描扇面的角度范围内,做若干个追踪方向上的剖面检测连线,即派遣若干条“扫描蛇”,根据剖面的灰度分布、梯度极值、宽度等特征信息来搜索每个蛇节上的合适剖面,并进行投票登记;

③选择票数最多的一条蛇,将其尾部的合适剖面作为下一个开始追踪的剖面位置,并登记道路的端点信息;

④重复子步骤①②③,直到本次追踪结束;

(3) 结果的矢量化表达

将同侧的道路端点相连接,并进行矢量化表示,则得到双线表示的完整道路。

4 实验

为检验本文算法的道路提取效果,使用由“北京一号”小卫星系统采集的数据进行了实验。“北京一号”搭载双传感器可获取 32m 多光谱和 4m 分辨率的全色图像。本文实验选择北京延庆某区(图像大小 $6\,056 \times 6\,900$ pixels, 约 41MB)和四、五环城区的全色图像(图像大小 $3\,467 \times 5\,525$ pixels, 约 19MB)的实验结果进行算法分析。受篇幅限制,这里仅介绍几个有代表性的例子。为真实展现算法特点,本文实验没有对提取的道路进行宽度整饰,为此部分道路段有“锯齿”现象。

以下实验所需的算法参数均为:道路和周边平均灰度差大于 7, 内部灰度差小于 30, 宽度和初始宽度比区间为 $[0.8 \sim 1.2]$, 扫描线扩展倍数 1.2, 蛇节跨度为 3 pixels, 蛇节数为 15, 搜索扇区张角为 60° 。

4.1 例 1: 延庆某公路提取

图 3、图 4 是延庆某区道路提取的结果全图及局部放大效果图。由该两图可以发现,尽管该道路无论在走向、宽度、灰度分布等一系列特征上均发生了显著改变,但本文算法仍能够有效地提取。图 3(a) 中的圆点 A 是起始种子点对。算法在道路和周围景物平均灰度差别小于 7 时中断,共搜索出 522 条有效道路剖面,长度可观。

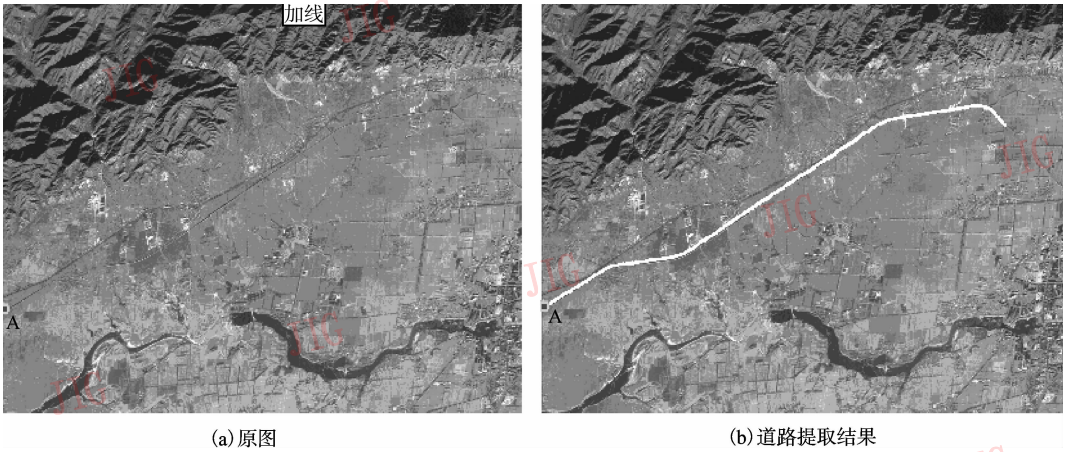


图 3 延庆某区：某道路提取结果
Fig. 3 A road extracted in Yanqing, Beijing

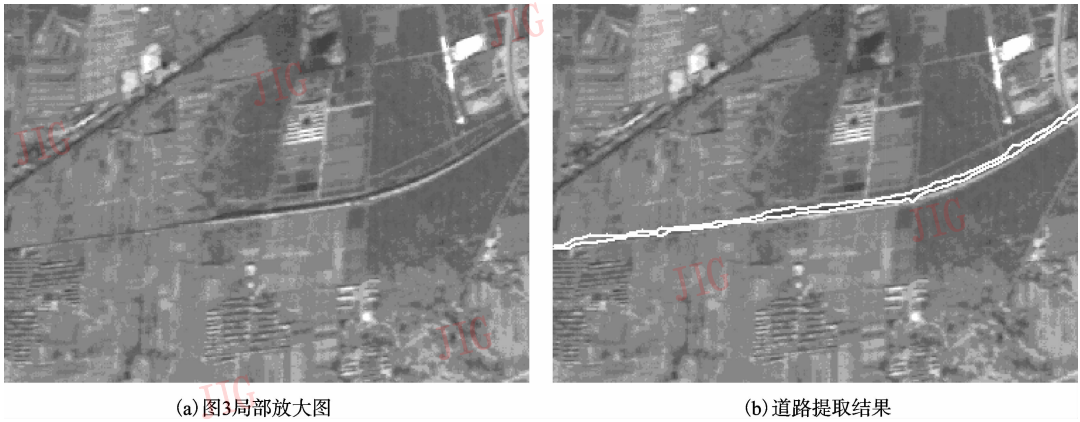


图 4 图 3 中放大的局部
Fig. 4 Zooming in Fig. 3

4.2 例 2:延庆某间断道路提取

图 5(a)是延庆某条可能受成像质量、图像噪声等多方面干扰因素影响而呈现间断分布的道路,而图 5(b)则是提取结果。由图 5 可以发现,由于算法

相当于对道路剖面的局部特征分析进行了道路延展方向上的全局扩展,因此算法因具有“跨接”功能而能够提取间断的道路。

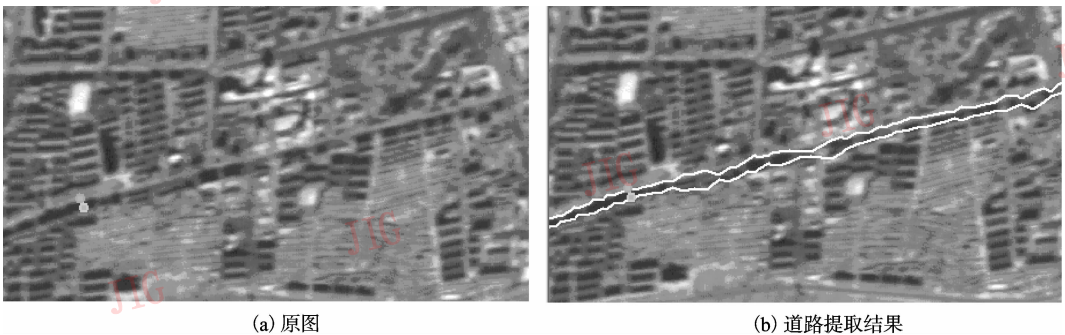


图 5 延庆某区某间断道路的提取结果
Fig. 5 An experimental area in Yanqing: extraction of a broken road

4.3 例3:北京城区交叉道路提取

图6是北京某城区图像,本文用其来考察道路在交叉情况下的提取结果。类似于例2的分析,可



图6 北京某城区交叉道路提取

Fig. 6 A Beijing city zone, extraction of roads with intersections

4.4 例4:quickbird 实验图像

为检验方法的普适性,还选取了某 quickbird 全色图像(空间分辨率 0.7m,大小为 $5\ 185 \times 6\ 001$ pixels,约 30MB)再次进行了道路提取实验。通过分析图7的实验结果可知,主要道路虽能够提取出来,但道路的宽度畸变现象似更明显。分析其

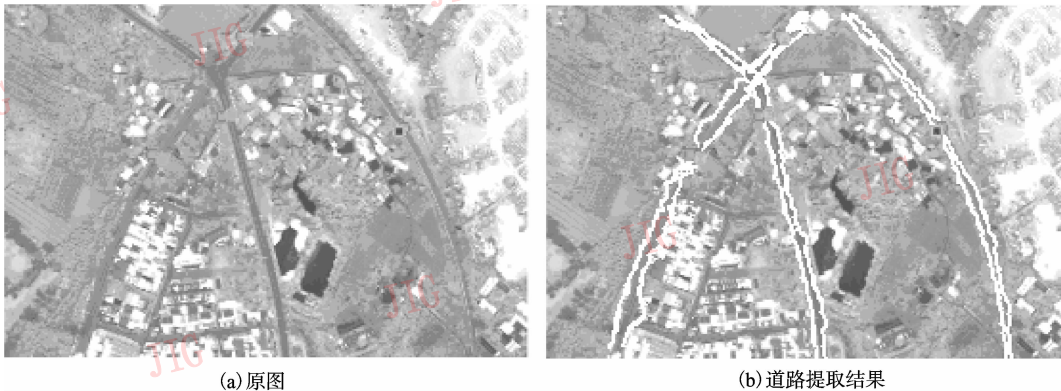


图7 Quickbrid 图像道路提取

Fig. 7 Roads extracted from a Quickbird image

5 结 论

本文提出了一种从高空间分辨率遥感图像上提取道路的半自动方法,并以“北京一号”小卫星高分辨率图像为主要实验数据源进行了算法测试。实验结果验证了方法的有效性和实用性。扫描蛇算法的特点在于所需参数很少且原理直观、设置简易;而且

以预见算法能够跨越交叉路口。注意图6中的纵向道路被立交桥横跨,且存在交通环岛的情况下,算法都能鲁棒地“跨越”。

原因,可能是随着图像分辨率的进一步提高,使道路内部、周边地物细节更为突出,这显然会对筛选合适梯度极值对带来更大困难。这种影响应可通过对图像进行适度的平滑滤波来消除或减轻。对此问题还将进一步深入研究。

在道路宽度、辐射特征、走向发生显著改变以及道路交叉、间断等一系列复杂情况下,算法均能够提取主干道路,体现出很强的适应能力。有待改进之处包括:城市区域及复杂地物分布环境下算法的适应能力、鲁棒性的进一步提高;算法向其他高分辨率数据源的深入应用、改进与扩充,以及向全自动道路提取方向的发展。

参考文献 (References)

- 1 Cai Tao, Wang Run-sheng. An algorithm for extracting road network from multi-band remote sensing images [J]. Journal of Software, 2001, **12**(6):943 ~ 948. [蔡涛,王润生. 一个从多波段遥感图象提取道路网的算法[J]. 软件学报,2001,**12**(6):943 ~ 948.]
- 2 Barzohar M, Cooper D B. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, **18**(7):707 ~ 721.
- 3 Tupin F, Maitre H, Mangin J F, *et al.* Detection of linear features in SAR images: application to road network extraction [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1998, **36**(2):434 ~ 453.
- 4 Wen Gong-jian, Wang Run-sheng, Automatic extraction of main roads from aerial remote sensing images [J]. Journal of Software, 2000, **11**(7):957 ~ 964. [文贡坚,王润生. 从航空遥感图象中自动提取主要道路[J]. 软件学报,2000,**11**(7):957 ~ 964.]
- 5 Shackelford A K, Davis C H. Fully automated road network extraction from high-resolution Satellite multispectral imagery [A]. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Toulouse, France, 2003: 7.
- 6 Zhu Chang-qing, Wang Yao-ge, Ma Qiu-he, *et al.* Road extraction from high-resolution remotely sensed image based on morphological segmentation [J]. Acta Geodaetica Cartographica Sinica, 2004, **33**(4):347 ~ 351. [朱长青,王耀革,马秋禾等. 基于形态分割的高分辨率遥感影像道路提取[J]. 测绘学报,2004,**33**(4):347 ~ 351.]
- 7 Zhang Rong, Wang Yong, Yang Rong. Researches on road recognition in Landsat TM Images [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, **9**(2):220 ~ 224. [张荣,王勇,杨榕. TM 图像中道路目标识别方法的研究[J]. 遥感学报,2005,**9**(2):220 ~ 224.]
- 8 Xiao Zhi-qiang, Bao Guang-shu, Huang Ji-xian. Update of road network in GIS by fusing SAR and TM imagery [J]. Acta Geodaetica Cartographica Sinica, 2006, **35**(1):46 ~ 51. [肖志强,鲍光淑,黄继先. 融合 SAR 和 TM 图像更新 GIS 道路网络数据[J]. 测绘学报,2006,**35**(1):46 ~ 51.]
- 9 Hu Xiang-yun. Automatic Extraction of Linear Features and Buildings from Airborne Imagery [D]. Doctoral Dissertatifton of Wuhan University, 2001, 11. [胡翔云. 航空遥感影像线状地物与房屋的自动提取[D]. 武汉大学博士学位论文,2001,11.]
- 10 Fortier A, Ziou D, Armenalds C, *et al.* Survey of work on road extraction in aerial and satellite images, Technical Report[EB/OL]. URL:http://citeseer.nj.nec.com/fortier99survey.html,2004.
- 11 Shi Wen-zhong, Zhu Chang-qin, Wang Yu. Road feature extraction from remotely sensed image: review and prospects [J]. Acta Geodaetica Cartographica Sinica,2001,**30**(3):257 ~ 262. [史文中,朱长青,王昱. 从遥感影像提取道路特征的方法综述与展望[J]. 测绘学报,2001,**30**(3):257 ~ 262.]
- 12 Lin Zong-jian, Liu Zheng-rong. Methods and prospects of road and linear structure extraction from remote sensing image [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, **28**(1):90 ~ 93. [林宗坚,刘政荣. 从遥感影像提取道路信息的方法评述[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2003,**28**(1):90 ~ 93.]