

一种结合显著性分析的高分辨率 遥感图像道路提取算法

王士一 王双 张立保

北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875

摘要 高分辨率遥感影像中包含大量复杂的地物信息,直接通过分割提取道路的准确度往往较低,而且无法有效排除居民区等的干扰。提出一种结合视觉显著性分析的高分辨率遥感影像道路提取算法。该算法通过自适应阈值分割得到包含居民区和道路的特征图,利用人类视觉系统进行显著性分析,得到居民区的显著图,通过对显著图的分割得到只包含居民区的特征图,对两张特征图进行异或运算,即可提取出道路。实验结果表明,所提出的算法能较为有效地除去居民区的干扰,完整地提取出道路,对今后遥感图像道路提取有一定理论与实践意义。

关键词 遥感;影像处理;道路提取;显著性分析;图像分割

中图分类号 TN919.8 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s210001

A Road Extraction Algorithm with Saliency Analysis in High-Resolution Remote Sensing Images

Wang Shiyi Wang Shuang Zhang Libao

School of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875 China

Abstract There is plenty of complex ground information in high-resolution remote sensing images. The direct road segmentation in the images causes low accuracy and cannot rule out inferences such as residential areas. A road extraction method based on saliency analysis for high-resolution remote sensing images is proposed. The feature map of residential areas and roads is obtained by automatic segmentation. A saliency map of residential areas is obtained using the human visual system. The feature map of residential areas is generated by segmenting the saliency map. Finally, the roads are extracted by the logical exclusion OR operation of the two feature maps. Experimental results show that the proposed method can remove the inference residential areas effectively and extract roads perfectly. It has both theoretical and practical significance for road extraction in remote sensing images in the future.

Key words remote sensing; image processing; road extraction; saliency analysis; image segmentation

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 280.0280

1 引 言

道路提取是遥感影像分析中一个重要的组成部分,在城乡规划、土地合理利用、应急处理以及车辆导航等方面都有广泛的应用^[1-2]。但随着遥感影像分辨率的不断提高,图像中包含的信息更为丰富的同时,其中容易对道路提取造成干扰的因素也相应增多,这使得从遥感影像中高效准确地提取道路信息变得越来越困难。

在遥感影像中,基于数学形态学并利用阈值分割提取道路的方法同霍夫变换、脊骨线提取、模板匹配等方法相比,具有简化图像数据、除去不相干结构、以及运算简单灵活和运算速度快等特点,是当前应用广泛的遥感图像道路提取方法。基于阈值分割,Jeon 等^[3]提出一种利用遗传算法(GA)求解全局最优优化阈值,从而

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(61071103)、中央高校基本科研业务费专项资金(2012LYB50)

作者简介: 王士一(1994—),女,本科生,主要从事遥感影像压缩与目标识别方面的研究。E-mail: Oliviabnu18@163.com

导师简介: 张立保(1977—),男,博士,副教授,主要从事遥感影像压缩与目标识别方面的研究。E-mail: libaozhang@

163.com(通信联系人)

对图像进行分割和聚类以检测道路的方法;Shi 等^[4]利用图像特征、道路网络的先验知识和相关数学模型,给出一种基于线段匹配的遥感图像道路检测模型;Mena 等^[5]提出了一种纹理渐进分析模型(TPA)来分割图像,然后通过形态学方法和骨架抽取方法获得道路;Predoehl 等^[6]为检测休闲步道建立了统计模型,利用图像纹理基元的似然函数结合道路长度和平滑度的先验模型,并根据改进的 Dijkstra 算法确定道路的后验分布。

目前,随着遥感影像分辨率的不断提高,图像中所包含干扰信息也越来越多^[7],而大部分结合阈值分割提取道路的方法只有在干扰因素较小的情况下才能较好地提取出道路,当图像中存在与道路光谱信息相似的干扰因素,如居民区等信息时,很难消除干扰准确提取道路信息;此外,文献[3]与文献[6]中还引入了分类器和统计学的方法,当处理高分辨率遥感影像时,分析难度和计算复杂度会加重。

针对上述问题,提出了一种结合视觉显著性分析的高分辨率遥感影像道路提取方法。通过阈值分割获得居民区和道路,然后利用人类视觉系统进行显著性分析,排除分割后图像中的居民区干扰,有效提取出道路的信息。

2 结合视觉显著性分析的遥感影像道路提取

算法的基本框架如图 1 所示。根据遥感影像中各部分间亮度的差异,通过阈值分割得到一幅只含有居民区和道路信息的二值化特征图;然后经过视觉显著性分析获得一幅只包含居民区的二值化特征图。最后,对两张特征图进行异或运算,即可提取出道路。

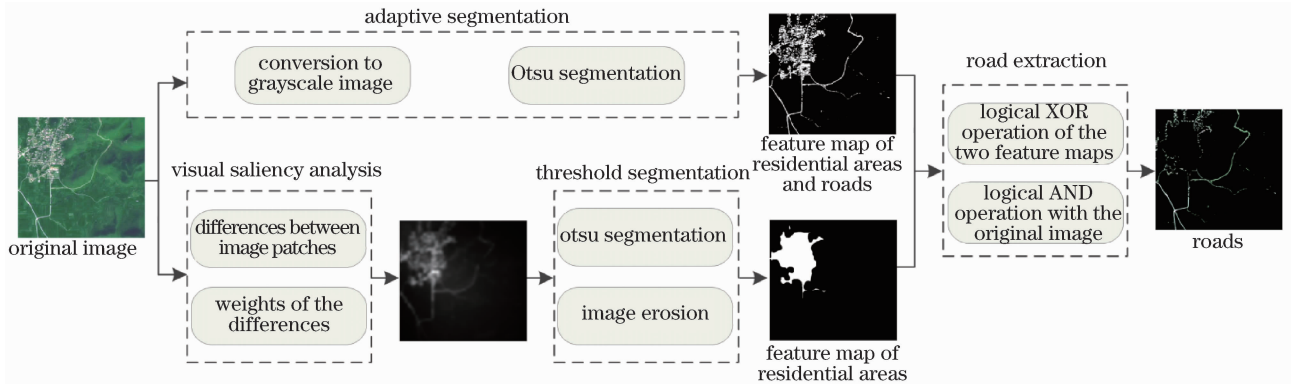


图 1 本文算法框架图

Fig. 1 Framework of proposed algorithm

2.1 图像自适应分割

遥感图像中,前景(居民区与道路)和背景部分的亮度信息存在明显差异,因而可以采用阈值分割的方法将前景和背景分离。可以采用 Otsu 分割方法^[8]。原始图像和经过 Otsu 分割后的二值化特征图如图 2 所示。

输入图像共有 L 个灰度级,假设在第 k 个灰度级将图像分为 C_0 和 C_1 两类,每一类间的方差为

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^k p_i, \quad (1)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=k+1}^L p_i, \quad (2)$$

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 \Pr(i | C_0) = \sum_{i=1}^k i p_i / \omega_0, \quad (3)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 \Pr(i | C_1) = \sum_{i=k+1}^L i p_i / \omega_1. \quad (4)$$

式中 p_i 是第 i 个灰度级出现的概率, μ 是每一类中灰度级的均值, $\Pr(i | C)$ 是每一类出现的概率。定义两类间的方差为 σ_B^2 , 而最佳阈值 k^* 为使 σ_B^2 取得最大值时的 k :

$$\sigma_B^2(k) = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2. \quad (5)$$

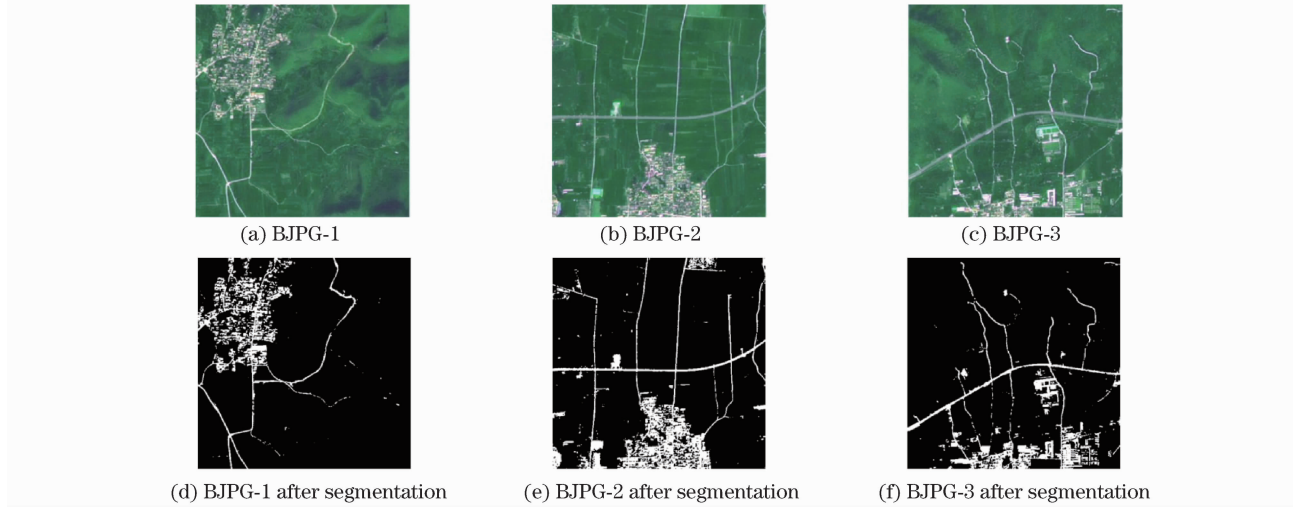


图 2 原始图像和自适应分割后图像

Fig. 2 Original images and images after the otsu segmentation

2.2 视觉显著性分析

1) 图像块大小

视网膜离心率表示了视角中的一个给定点和视网膜中央凹的远近,通常以角度为单位。假设每个图像块大小为 $m\text{pixel} \times m\text{pixel}$,观测距离为 d ,则视网膜离心率 e 可表示为

$$e = \tan^{-1}\left(\frac{m}{2d}\right). \quad (6)$$

研究发现,视网膜离心率为 $1^\circ \sim 2^\circ$ 的区域是视觉最敏感的区域^[9]。 e_0 用于表示最敏感点的视网膜离心率,则 e 可以被表示为

$$e = \epsilon e_0. \quad (7)$$

令 $e_0 = 1^\circ$ 且 $\epsilon < 1$ 以保证该区域有较高的视觉敏感度^[10], d 为图像高度的 3 倍, $\epsilon = 0.15$ 。当输入图像大小为 $512\text{ pixel} \times 512\text{ pixel}$,图像块应为 $8\text{ pixel} \times 8\text{ pixel}$ 。

2) 图像块间差异

对于一个图像块 $f(p, q)$,其傅里叶变换在极坐标下可表示为

$$F(u, v) = A \exp[\mu \Phi(u, v)], \quad (8)$$

式中 $u = 0, 1, \dots, 7$, $v = 0, 1, \dots, 7$, A 是幅度。这样就可以计算每个图像块的幅度谱信息。sum 表示一个图像块中任一像素的下标,则图像块 i, j 间的差异为

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{\text{sum}} (A_{\text{sum}}^i - A_{\text{sum}}^j)^2}. \quad (9)$$

3) 差异的权重

图像块间的距离越大,它们之间的差异对显著度的贡献就越小。Geisler^[11]提出了计算人类差别敏感度的公式,视网膜离心率作为其中的一个参数,公式为

$$C_s(f, e) = \frac{1}{C_i(f, e)}, \quad (10)$$

$$C_i(f, e) = C_{t_0} \exp\left(\alpha f \frac{e + e_2}{e_2}\right), \quad (11)$$

式中 f 是空间频率, C_{t_0} 是最小差异的阈值, e 是视网膜离心率, α 是频率衰减常数, e_2 是半分辨率的离心率。Geisler 给出了参数: $C_{t_0} = \frac{1}{64}$, $\alpha = 0.106$, $e = 2.3$ 。

设 (x_1, y_1) 是一个图像块的中心点, (x_2, y_2) 是另一个图像块的中心点, d_E 是 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 的欧式距离,观测距离 d 是图像高度的 3 倍。则视网膜离心率 e 可以表示为

$$e = \tan^{-1} \left(\frac{d_E}{d} \right). \quad (12)$$

最终得到计算图像间差异权重 χ_{ij} 的公式为

$$\chi_{ij} = \frac{1}{C_{t_0} \exp \left(\alpha f \frac{e + e_2}{e_2} \right)}. \quad (13)$$

4) 图像块的显著值

图像块 i 的显著值 S_i 由和其和其余全部图像块间的差异 D_{ij} 及相应权重 χ_{ij} 决定,

$$S_i = \sum_{i \neq j} D_{ij} \chi_{ij}. \quad (14)$$

使用方差为 3.5, 模板大小为 10×10 的高斯低通滤波器消除边缘效应以获得更为平滑的边缘, 得到图像 $G(n, m)$, 然后利用伽马变换消除背景中阴影等干扰的影响。最终得到的视觉显著图如图 3 所示。

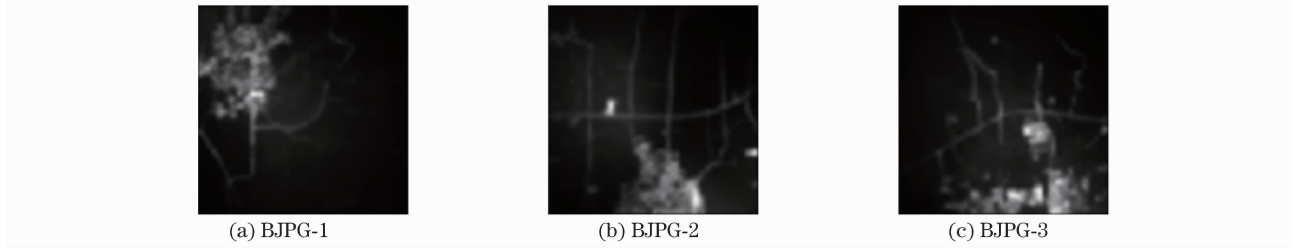


图 3 显著图

Fig. 3 Saliency maps

$$S_l = c G(n, m)^\gamma, \quad (15)$$

$$\gamma = \left\lfloor \frac{1}{\left\{ \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [G(n, m)]^2}{(N \times M)} \right\}} + 0.5 \right\rfloor, \quad (16)$$

式中 $c = 1$, $N \times M$ 是图像大小。

2.3 显著图的阈值分割

通过上述步骤得到视觉显著图后, 利用 Otsu 分割可以得到一张包含居民区的二值化图像 B_{ra} 。然而, B_{ra} 中居民区的边缘比实际居民区的边缘更向外扩展, 导致了一部分道路被误当做居民区。使用腐蚀操作让居民区的边缘向内部收缩, 以确保道路的完整性,

$$I_{ra} = B_{ra} \otimes T_{se}, \quad (17)$$

式中 T_{se} 是直径为 6 的圆形结构元素。腐蚀后检测到的居民区如图 4 所示。

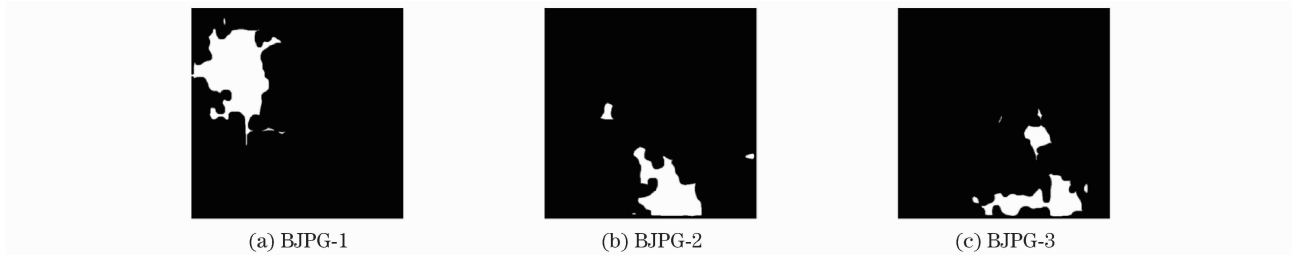


图 4 腐蚀后检测到的居民区

Fig. 4 Detected residential areas after erosion

2.4 道路信息的提取

通过步骤 2.1 可以得到一张包含居民区和道路的二值化图像 I_{otsu} , 通过步骤 2.3 得到一张只包含居民区的二值化图像 I_{ra} 。对这两张图像进行异或运算, 就能得到一张只包含道路信息的二值化图像:

$$I_{road} = I_{ra} \oplus I_{otsu}. \quad (18)$$

最后,通过 I_{road} 和原图像 $I_{original}$ 的与操作,就能提取出原图像中的道路:

$$R = I_{road} \cap I_{original}. \quad (19)$$

3 实验与分析

使用分辨率为 2.5m 的 Spot5 卫星遥感图像。将本文算法与文献[3]中提出的遗传算法(GA)和文献[8]中提出的 Otsu 算法的提取结果进行了对比,结果如图 5 所示。

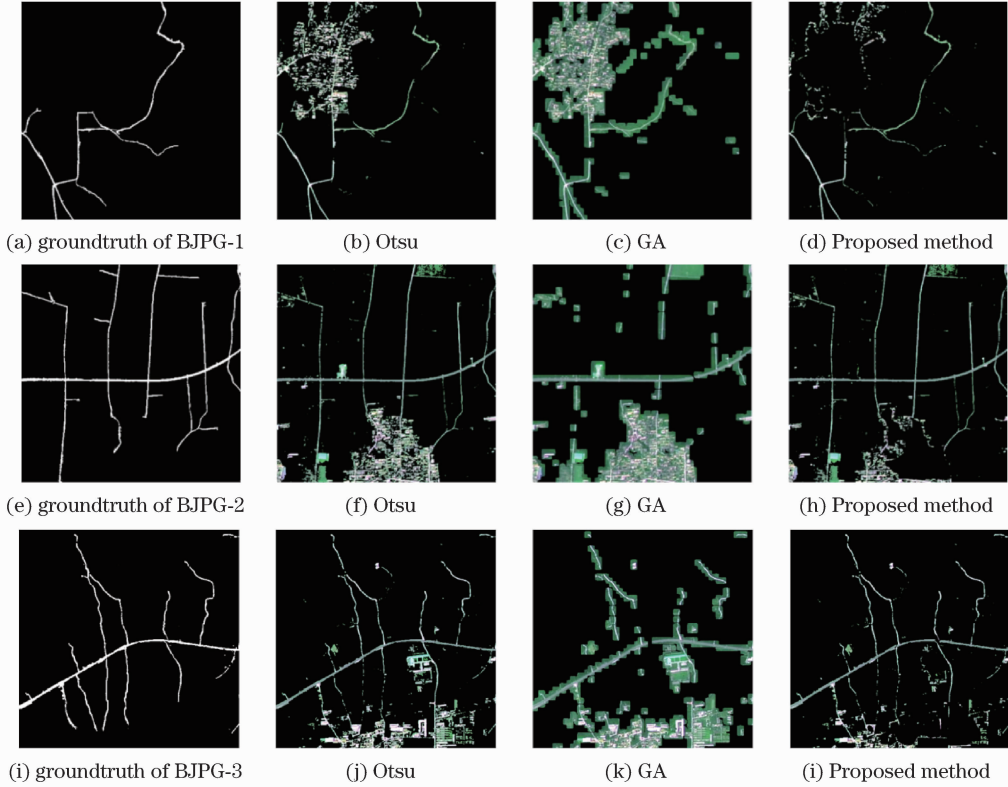


图 5 三种方法检测出的道路

Fig. 5 Roads detected by three methods

使用完整率和正确率量化比较三种方法。计算公式如(20)、(21)式,

$$f_{completeness} = \frac{GT \cap R}{GT}, \quad (20)$$

$$f_{correctness} = \frac{GT \cap R}{R}, \quad (21)$$

式中 GT 是人工标定的道路, R 是检测出的道路,具体数据如表 1 所示。

表 1 三种方法检测结果的量化比较

Table 1 Comparison of detection results by three methods

	Completeness			Correctness		
	Proposed method	GA	Otsu	Proposed method	GA	Otsu
BJPG-1	85.12%	84.35%	89.34%	50.90%	6.11%	20.53%
BJPG-2	91.85%	65.40%	92.03%	45.01%	10.46%	29.40%
BJPG-3	86.35%	77.82%	86.94%	53.65%	11.15%	33.60%

从图 5 和表 1 的对比中可以看出,文献[3]中基于遗传算法求解全局最优分割阈值的提取方法不仅无法排除居民区的影响,而且容易忽略一部分道路,完整率和准确率都不高;文献[8]中 Otsu 算法得到的提取结果虽然可以保证道路的相对完整性,但也没有消除居民区的干扰,准确率比较低;而提出的算法则能够在获得尽可能完整道路的基础上,消除居民区等外界因素的干扰,得到较好地提取效果,虽然在完整率上略低于

Otsu 算法,但这是因为本文算法是以 Otsu 分割为基础,从分割后的结果中进一步排除居民区等干扰。在准确率上,本文方法与 Otsu 和 GA 方法相比具有明显优势。

4 结 论

直接通过分割提取高分辨率遥感影像中的道路,往往会导致较低的精准度。因此提出了一种结合视觉显著性分析的高分辨率遥感影像的道路提取方法。该算法通过阈值分割除去背景信息,利用视觉显著性分析排除居民区的干扰,可以较完整地提取出道路,对今后遥感图像道路提取有一定理论与实践意义。

参 考 文 献

- 1 Luo Zhaotuo, Analysis and Research of Road Extraction from High-Resolution Remote Sensing Images [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
罗昭拓. 高分辨率遥感图像中道路提取的分析与研究 [D]. 上海:上海交通大学,2008.
- 2 Hu X, Li Y, Shan J, *et al.*. Road centerline extraction in complex urban scenes from LiDAR data based on multiple features [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2014, 52(11):7448-7456.
- 3 Jeon B K, Jang J H, Hong K S. Road detection in spaceborne SAR images using a genetic algorithm [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2002, 40(1): 22-29.
- 4 Shi W, Zhu C. The line segment match method for extracting road network from high-resolution satellite images [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2002, 19(1): 511-514.
- 5 Mena J B, Malpica J A. An automatic method for road extraction in rural and semi-urban areas starting from high resolution satellite imagery [J]. Pattern Recognition Letters, 2005,26(9): 1201-1220.
- 6 Predoehl A, Morris S, Barnard K. A statistical model for recreational trails in aerial images [C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2013 IEEE Conference on. IEEE, 2013: 337-344.
- 7 Zhang Libao, Zhang Jue. A new adaptive fusion method based on saliency analysis for remote sensing images [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0114001.
张立保,章 珏. 基于显著性分析的自适应遥感图像融合 [J]. 中国激光,2015, 42(1): 0114001.
- 8 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. Automatica, 1975, 11(285-296): 23-27.
- 9 Just M A, Carpenter P A. The Psychology of Reading and Language Comprehension[M]. Boston: Allyn & Bacon, 1987.
- 10 Fang Y, Lin W, Lee B, *et al.*. Bottom-up saliency detection model based on human visual sensitivity and amplitude spectrum [J]. Multimedia, IEEE Transactions on, 2012, 14(1):187-198.
- 11 Geisler W S, Perry J S. Real-time foveated multiresolution system for low-bandwidth video communication [C]. Photonics West'98 Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics, 1998: 294-305.

栏目编辑: 苏 岑