

# 基于改进最大期望聚类的遥感影像道路提取算法

张宗军, 杨风暴\*

中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

**摘要** 针对目前高分辨率遥感影像道路提取准确性不高的问题, 提出一种基于改进最大期望(EM)聚类的遥感影像道路提取算法。首先通过形态学预处理来去除道路上的干扰信息, 在此基础上通过改进 EM 聚类自动确定分割区域数目, 完成影像分割, 最后结合轮廓检测和灰度直方图阈值化完成遥感影像道路的提取。实验结果表明, 所提算法能有效屏蔽道路上的噪声, 提取出主干道路信息, 该方法的准确率达到 90% 以上, 冗余度较低。

**关键词** 图像处理; 道路提取; 数学形态学; 最大期望聚类; 图像分割

中图分类号 TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.061005

## Road Extraction Algorithm for Remote Sensing Images Based on Improved Expectation-Maximization Clustering

Zhang Zongjun, Yang Fengbao\*

College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** The accuracy of current road extraction algorithms for high resolution remote sensing images is low. Aiming at this problem, a road extraction algorithm for remote sensing images based on the improved expectation-maximization (EM) clustering is proposed. First, the morphological preprocessing is carried out to remove the interference information from the road. Then, the improved EM clustering is applied to determine the number of segmentation regions and segment the images automatically. And the extraction of roads from remote sensing images is finally completed through the contour detection and gray histogram thresholding. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively screen the noise on the road and extract the main road information, with high accuracy of over 90% and low redundancy.

**Key words** image processing; road extraction; mathematical morphology; expectation-maximization clustering; image segmentation

**OCIS codes** 100.2000; 100.2960; 100.3008

## 1 引言

遥感技术的迅速发展带来了大量的遥感数据, 道路作为重要的地理景观, 是交通体系的主体, 也是地图、出行导航的重要组成部分。对遥感影像中道路关键信息的准确提取能够为城市交通管理和交通事故管理提供可靠的信息和依据, 对促进城市发展具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

针对道路特征的提取, 研究人员根据不同影像类型(航空影像或遥感影像)、不同比例尺、不同区域(城区或乡村)、不同道路类型(高速公路、等级

公路、街道或乡村道路)提出了不同的提取方法, 目前道路提取算法主要为半自动道路特征提取算法。半自动道路特征提取是在人机交互的基础上完成的, 需要人工提供初始点(种子点)或者道路的初始方向, 然后使计算机按照预先设定好的规则进行提取, 中间过程可能仍需要人为干预才能完成, 以保证识别的准确性。该类方法包括动态规划法、模板匹配法、Hough 变换法、面向对象的方法、数学形态学方法、基于知识的方法、图像分割方法等<sup>[3-4]</sup>。基于深度学习的方法目前还处于发展阶段, 不够成熟<sup>[5]</sup>。文献[6]提出基于 Hough 变换法和数学形态

收稿日期: 2019-06-22; 修回日期: 2019-08-02; 录用日期: 2019-08-28

\* E-mail: yangfb@nuc.edu.cn

学方法的道路提取,该方法在直线道路检测方面有很好的效果;李建飞等<sup>[7]</sup>使用基于区域生长的道路提取算法,该算法需要人工分配种子点信息,限制了算法的效率。周家香<sup>[8]</sup>提出基于均值漂移的遥感图像分割法,该方法需要人工设置分割区域数目以实现道路提取;Valero等<sup>[9]</sup>提出基于分水岭分割结合形状特征的遥感影像道路提取方法,该方法对地物比较简单、干扰较少的影像提取效果很好。分析已有方法发现,现有提取方法存在着提取精度低的问题,影响提取精度的关键因素为道路特征的选择,选择的特征应准确区分道路与其他地物,高分辨率遥感影像中的道路特征存在于景物的物理和几何特性使影像中局部地区的灰度发生明显变化的区域。因此在遥感影像中,道路特征存在的区域的信息量较大,而没有特征存在的局部区域的信息量较小。高分辨率影像中道路的光谱信息和纹理信息更加明显,细节的表现更加丰富,因此影像中的道路不是简单的线状地物,而是表现出丰富的信息,如行道树、斑马线和车辆等。本文选择道路光谱特征和纹理特征,充分考虑道路信息,以达到区分地物的效果。

针对上述问题,本文结合数学形态学和图像聚类的方法,首先利用数学形态学方法剔除道路上的噪声,结合高分辨率遥感影像中的道路光谱特征和纹理特征,对最大期望(EM)算法进行改进,利用改进EM聚类对影像中的道路目标进行分割,最后通过轮廓检测结合灰度直方图统计阈值化的方法剔除道路以外的目标,实现道路信息的提取。通过对评价指标进行定量对比,提高了道路提取的准确率。

## 2 基本原理

### 2.1 数学形态学图像运算

数学形态学通过集合论方法定量表述几何结构,其核心是利用各种形状的结构核来提取图像的几何表面特征,从而对图像进行分析和处理。基本运算包括腐蚀、膨胀、开运算、闭运算<sup>[10]</sup>。

腐蚀与膨胀是一组对称运算。 $A \ominus B$ 表示用结构元素 $B$ 腐蚀图像 $A$ 。膨胀运算使用结构元素对图像进行填充,膨胀可以填充图像中小于结构元素的孔洞,包括边缘处的凹陷。 $A \oplus B$ 表示结构元素 $B$ 膨胀图像 $A$ 。开运算与闭运算是腐蚀与膨胀的混合运算,开运算为先腐蚀后膨胀,记作 $A \circ B$ 。闭运算为先膨胀后腐蚀,记作 $A \cdot B$ <sup>[11]</sup>。腐蚀、膨胀、开运算、闭运算可分别表示为

$$A \ominus B = \{X : B + X \subset A\}, \quad (1)$$

$$A \oplus B = \{A^c \ominus (-B)\}^c, \quad (2)$$

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B, \quad (3)$$

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B, \quad (4)$$

式中: $A^c$ 表示 $A$ 的补集; $-B$ 表示将结构元素 $B$ 相对原点旋转 $180^\circ$ 。

开运算中先进行腐蚀,可以去除图像中细小的亮细节,同时削弱图像亮度,后进行膨胀以增强图像亮度,但不引入已经去除的细节。闭运算先进行膨胀,过滤了细小的亮细节,同时增强图像亮度,后进行腐蚀以减弱图像亮度,也不引入已经去除的细节。因此,通过开闭混合运算可以在去除道路上的车辆等干扰信息的同时增强道路信息,为后续道路提取提供便利。

### 2.2 基于EM聚类的图像分割

在统计计算中,利用EM聚类算法在概率模型中寻找参数最大似然估计或者最大后验估计<sup>[12]</sup>。在图像分割中,该算法利用高斯混合模型对图像进行建模。图像中的每个像素是通过 $m$ 个分割区域中的某一密度函数计算得到的。假设第 $i$ 个分割区域的概率为 $p(x)$ ,此时生成像素 $x$ 的概率为

$$p(x) = \sum_{i=1}^m w_i p(x | \theta_i), \quad (5)$$

式中: $w_i$ 为第 $i$ 个区域数据所占的比重; $p(x | \theta_i)$ 为分割区域的密度函数,可表示为

$$p(x | \theta_i) = N(x | \mu, \Sigma), \quad (6)$$

式中: $N$ 为正态分布; $\Sigma$ 为方差; $\theta_i$ 为第 $i$ 个分割区域; $\mu$ 为均值期望。对于整幅图像 $X$ (包含 $s$ 个像素),其生成概率 $p$ 为

$$p = \frac{1}{(2\pi)^{D/2}} \frac{1}{(\Sigma)^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma^{-1}(x - \mu)\right], \quad (7)$$

式中: $D$ 表示数据维度; $\gamma$ 为迭代周期。此时,问题的求解变为参数 $\theta = (w_1, w_2, \dots, w_m, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m, \Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_m)$ 的最大似然估计问题。

## 3 算法实现

为提高道路提取的准确度,首先对遥感影像进行预处理,以去除图像上的噪声,然后对预处理的图像进行聚类,对聚类后的图像进行轮廓检测,再进行直方图统计阈值分割处理后得到道路信息。以图1遥感影像(图像大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ )为例,算法流程如下:

1) 用基于灰度分布直方图的对比度拉伸方法

对原遥感影像进行图像增强处理。

2) 利用数学形态学开闭搭配运算过滤图像道路目标上的小噪声,如车辆、道路两旁树木阴影。同时增强图像上的道路信息,结果如图 2(a)所示。

3) 结合道路特征并利用改进 EM 聚类完成遥感影像道路分割。

虽然遥感影像中包含的地物较多且复杂,但影像中的道路目标仍存在可以区别于其他目标的特征:

1) 光谱特征。道路表面分布相对均匀,灰度方差小,道路与背景区域差异较大,没有干扰的道路在图像上表现为相近的光谱。

2) 纹理特征。纹理特征描述图像的表面性质,遥感图像中道路目标具有特定的变化趋势,纹理可以通过对统一区域内的像素进行计算得到,对噪声有较强的鲁棒性。因此,利用道路光谱和纹理特征,结合 EM 聚类算法可完成遥感影像中道路信息的分割。



图 1 高分辨率遥感影像

Fig. 1 High-resolution remote sensing image

原始 EM 聚类算法依赖于聚类个数  $K$  值的选择, $K$  值选择过多容易造成过分割(分割过细),过少会造成欠分割(部分区域没有分割出来)。多数情况下需要得到图像的先验知识以确定聚类的  $K$  值个数,这大大限制了算法的自适应能力。本文对

EM 聚类进行改进,实现聚类个数的自动确定,算法改进如下。

图像的直方图可以很好地反映图像的信息,根据图像的直方图中波峰的个数可以判断出这些信息大致的分布。因此可以通过直方图波峰的数目来确定图像聚类的个数。具体过程如下。

计算图像的灰度直方图,利用均值滤波使直方图更加平滑,首先求一个滑动窗口内统计信息的平均值,平滑后的统计信息可表示为

$$H[h(x)] = [H(x-1) + H(x) + H(x+1)]/3, \quad (8)$$

式中: $x$  表示当前灰度值; $H(x)$  表示  $x$  对应的统计信息; $H(x-1)$  和  $H(x+1)$  分别表示  $x-1$  和  $x+1$  对应的统计信息; $H[h(x)]$  表示平滑后  $x$  对应的统计信息。重复噪声去除的过程,对平滑操作的后直方图进行求导,导数从正变负的过零点为一个极值。遍历直方图完成整个过程,设计计数器变量  $K$ ,将其初始化为 0,发现极值点则将  $K$  值加 1,遍历结束后,聚类的数目就是计数器变量  $K$  的值。得到聚类数目后,根据道路光谱特征和纹理特征,通过 EM 聚类完成道路分割,结果如图 2(b)所示。

4) 基于分割后的结果图像进行平滑滤波,采用直方图均衡化处理来区分地物目标信息,对处理结果进行轮廓检测,设计掩模,将其与绘制轮廓的结果进行“与”操作,得到道路信息,如图 2(c)所示。

5) 基于灰度分布直方图阈值分割完成遥感图像道路提取,如图 2(d)所示。

从图 2 中可以看出,对图像进行数学形态学处理可以滤除道路上的车辆信息,再对处理结果进行 EM 聚类,可以更加准确地进行图像地物分类。利用分割的结果进行轮廓提取,有利于后续道路信息的提取。对于图像中与道路不相关的目标,可利用图像区域面积、长宽比进行去除。在闭运算后,对于

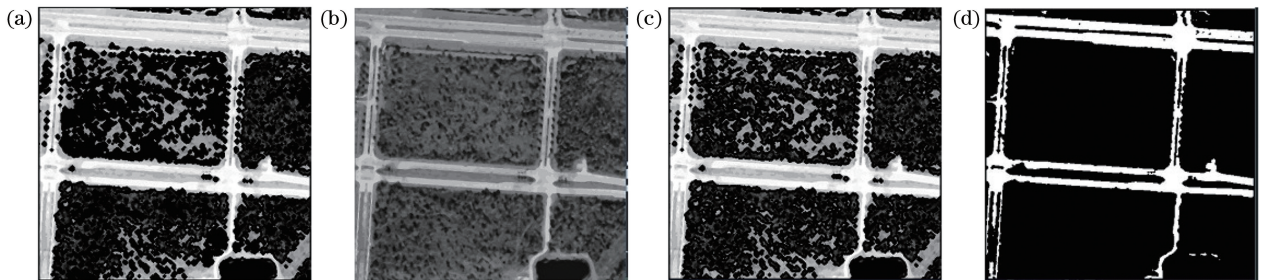


图 2 道路提取过程。(a)图像数学形态学处理结果;(b)图像 EM 聚类结果;(c)图像轮廓检测结果;(d)道路提取结果  
Fig. 2 Road extraction process. (a) Image mathematical morphology processing result; (b) image EM clustering result; (c) image contour detection result; (d) road extraction result



道路出现中断的情况,可结合同方向线性结构元素对图像进行膨胀。最终得到道路提取结果。

## 4 实验结果及分析

实验样本选取了两组城区道路的高分辨率遥感影像,图像中包含房屋、草地、建筑物以及道路等场景,以验证本文所提算法在不同条件下的鲁棒性。实验区域大小为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ,分别选择两张图片,采用基于数学形态学和图像聚类的方法对其进行道路提取实验。

### 4.1 实验数据 1

图 3 的遥感图像中,道路包含直线道路和弯曲

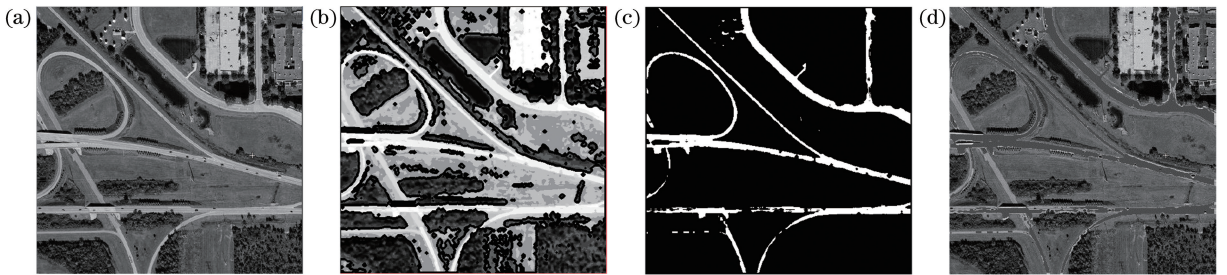


图 3 实验数据 1 处理结果。(a)原始图片;(b)图像轮廓检测结果;(c)道路提取结果;(d)提取结果与原图叠加

Fig. 3 Processing results of experimental data 1. (a) Original picture; (b) image contour detection result; (c) road extraction result; (d) extraction results are superimposed on original image

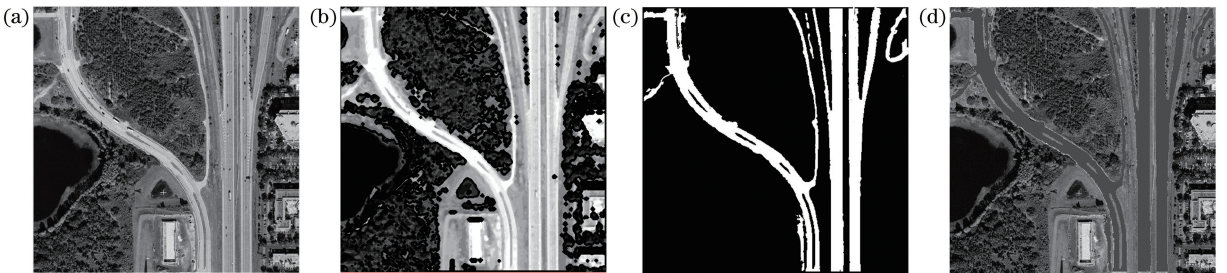


图 4 实验数据 2 处理结果。(a)原始图片;(b)图像轮廓检测结果;(c)道路提取结果;(d)提取结果与原图叠加

Fig. 4 Processing results of experimental data 2. (a) Original picture; (b) image contour detection result; (c) road extraction result; (d) extraction results are superimposed on original image

### 4.3 对所提方法的评价

为证明本文算法的有效性,本节对数据 1 和数据 2 分别采用传统的 Hough 变换<sup>[13]</sup>和分水岭阈值分割结合形状特征<sup>[14]</sup>的方法进行道路提取,提取结果如图 5 所示。

#### 1) 定性评价

定性评价是道路提取效果最直观的评价方法,其本质就是视觉分析。通过对比分析后发现:基于 Hough 变换的方法在提取直线道路方面效果较好,但无法提取出弯曲的、交叉的道路,道路提取结果容易出现漏提取和断层的现象,而本文算法对直线道路以及弯曲道路提取效果较好,提取结果中道路断

道路,道路提取的主要干扰为小道路的干扰,从图 3(c)中结果可知,所提算法可以滤除道路上的车辆干扰,同时也可以将与道路信息相近的房屋以及与道路连通的区域屏蔽,图像中的大部分道路被提取出来且较好地提取了弯曲道路,提取的道路较光滑。

### 4.2 实验数据 2

图 4 的遥感图像中,道路边缘存在窄小的道路以及道路灰度相近的建筑物,导致轮廓检测的结果存在干扰,边缘不光滑,利用道路特有的聚类特征最终滤除了大部分干扰影响。图 4(c)的结果显示大部分道路被提取出来,可见本文方法可以实现对主干道路

层较少;对图像使用分水岭阈值分割结合形状特征的方法进行道路提取时效果优于基于 Hough 变换的方法,可以提取出交叉弯曲道路,提取出的道路也较完整,但是容易提取出非道路信息,冗余度较高。本文算法提取出主干道路的同时只出现极少的误提取现象,由此可见本文算法效果优于以上两种方法。

#### 2) 定量分析

谢明鸿等<sup>[15]</sup>提出了用 6 个指标来对道路提取的结果进行定量分析,为对本文提出的方法进行准确、客观的评价,本文选择其中三个指标  $P$  (正确率)、 $R$  (冗余度)、 $D$  (遗漏度)来对本文算法进行定量评价。三个指标可分别表示为



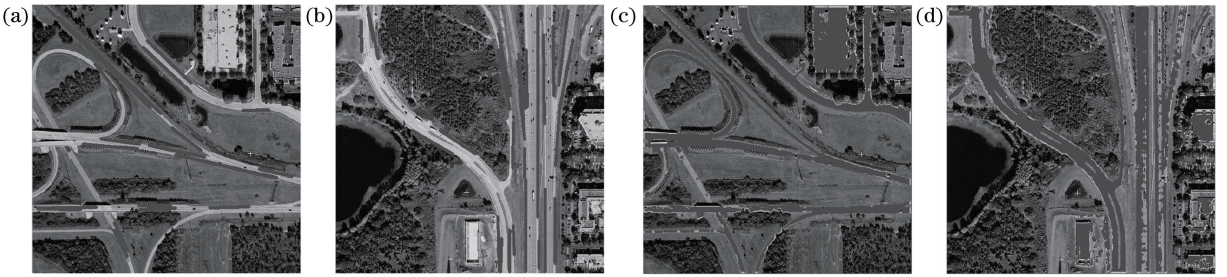


图5 传统方法提取效果。基于 Hough 变换的方法对(a)数据 1 和(b)数据 2 的提取结果;分水岭阈值分割结合形状特征的方法对(c)数据 1 和(d)数据 2 的提取结果

Fig. 5 Extraction effects of traditional method. Extraction results of (a) data 1 and (b) data 2 obtained by Hough transformation based method; extraction results of (c) data 1 and (d) data 2 obtained by watershed threshold segmentation combined with shape features

$$P = \frac{L_c}{L_n} \times 100\%, \quad (9)$$

$$R = \frac{L_m}{L_n} \times 100\%, \quad (10)$$

$$D = \frac{L_d}{L_n} \times 100\%, \quad (11)$$

式中: $L_n$  表示线性目标的总长; $L_c$  表示正确提取的线性目标的长度; $L_m$  表示多提取的线性目标的长度; $L_d$  表示漏提取的线性目标的长度。

将计算所得的目标长度代入(9)~(11)式进行计算,得到的具体结果如表 1 和表 2 所示。

由表 1、2 可知,基于 Hough 变换的提取方法正确率不高,容易遗漏弯曲道路;基于分水岭阈值分割结合形状特征的方法能提取出大部分道路信息,也容易提取出非道路信息,冗余度较高;本文方法的正

表 1 数据 1 评价结果

Table 1 Evaluation results for data 1

Method	$P / \%$	$R / \%$	$D / \%$
Hough transform	57.6	<b>0.84</b>	42.4
Watershed threshold segmentation	90.4	20.60	9.6
Proposed method	<b>92.6</b>	3.60	<b>7.4</b>

表 2 数据 2 评价结果

Table 2 Evaluation results for data 2

Method	$P / \%$	$R / \%$	$D / \%$
Hough transform	62.4	<b>0.92</b>	37.6
Watershed threshold segmentation	91.8	15.20	8.2
Method of this paper	<b>92.5</b>	4.30	<b>7.5</b>

确率有一定的提高,增加的冗余度在可接受的范围内,所得结果验证了本文方法的有效性。在测试集上对算法进行定量评价,测试集部分数据及本文算法提取效果如图 6 所示。对测试集进行道路提取,

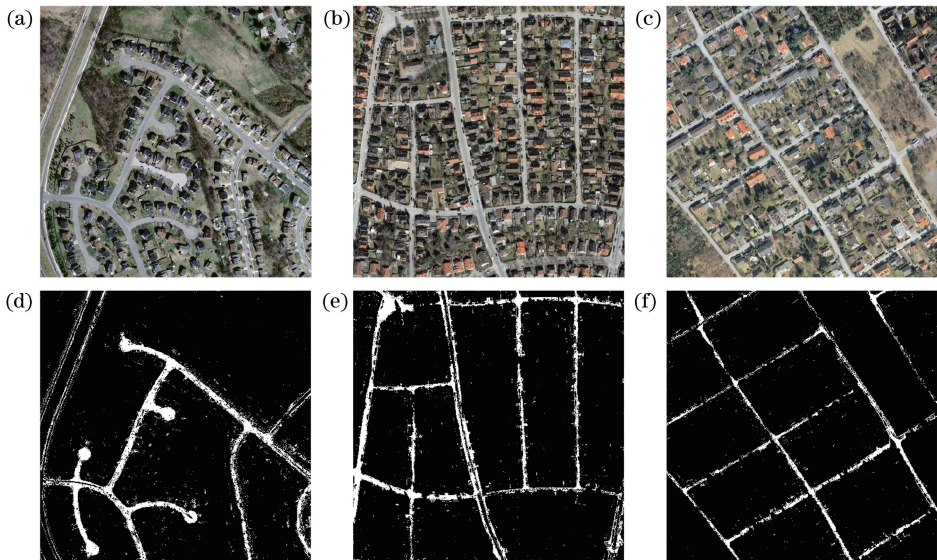


图 6 测试集数据及提取结果。(a)测试集数据 1;(b)测试集数据 2;(c)测试集数据 3;(d)测试集数据 1 提取结果;(e)测试集数据 2 提取结果;(f)测试集数据 3 提取结果

Fig. 6 Test set data and extraction results. (a) Test set data 1; (b) test set data 2; (c) test set data 3; (d) extraction result of test set data 1; (e) extraction result of test set data 2; (f) extraction result of test set data 3

对 5 组数据进行统计平均,得到本文算法的正确率为 91.6%。

## 5 结 论

针对高分辨遥感影像中的道路提取,通过改进 EM 聚类算法,利用形态学预处理去除道路中的噪声,通过 EM 聚类完成道路信息的分割,最后通过轮廓检测结合直方图阈值分割成功地从影像中提取了道路信息。在复杂的道路环境中,该算法在有效提取出直线道路和弯曲道路的同时去除了各种非道路信息,提高了提取的准确率,具有较大的应用价值。但从实验结果中发现,本文方法对道路边缘的处理还不够完善,还存在少量的漏提取和误提取现象,还需进一步完善。

## 参 考 文 献

- [1] Wang J Q, Li J S, Zhou X W, *et al.* Improved SSD algorithm and its performance analysis of small target detection in remote sensing images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0628005.

王俊强,李建胜,周学文,等.改进的 SSD 算法及其对遥感影像小目标检测性能的分析[J].*光学学报*, 2019, 39(6): 0628005.

- [2] Lu P P, Dai J G, Shi X Z. Analysis of spectral characteristics of four typical roads based on hyperspectral remote sensing[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(5): 141-144.

陆频频,戴激光,施先忠.基于高光谱遥感的四种典型道路光谱特征分析[J].*测绘与空间地理信息*, 2019, 42(5): 141-144.

- [3] Peng Y F, Song X N, Zi L L, *et al.* Remote sensing image retrieval based on convolutional neural network and modified fuzzy C-means [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091008.

彭晏飞,宋晓男,訾玲玲,等.基于卷积神经网络和改进模糊 C 均值的遥感图像检索[J].*激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091008.

- [4] Xiang H D. Review and prospect of road feature extraction from high resolution remote sensing images [J]. *Geomatics & Spatical Information Technology*, 2013, 36(8): 202-206.

项皓东.从高分辨率遥感影像中提取道路信息的方法综述及展望[J].*测绘与空间地理信息*, 2013, 36(8): 202-206.

- [5] Wu Z H, Gao Y M, Li L, *et al.* Fully convolutional network method of semantic segmentation of class imbalance remote sensing images [J]. *Acta Optica*

*Sinica*, 2019, 39(4): 0428004.

吴止锺,高永明,李磊,等.类别非均衡遥感图像语义分割的全卷积网络方法[J].*光学学报*, 2019, 39(4): 0428004.

- [6] Wang H J, Shao B W, Wang H Y, *et al.* Road extraction using high resolution remote sensing image based on mathematical morphology [J]. *Geomatics World*, 2018, 25(2): 108-112.

王海军,邵宝武,王海燕,等.基于数学形态学和 Hough 变换的高分辨率遥感影像道路提取[J].*地理信息世界*, 2018, 25(2): 108-112.

- [7] Li J F, Wen Z Q, Lu Y L, *et al.* A road extraction method for high resolution remote sensing image based on region growth [J]. *Software Guide*, 2015, 14(1): 27-29.

李建飞,文志强,卢永乐,等.一种基于区域生长的高分辨率遥感影像道路提取方法[J].*软件导刊*, 2015, 14(1): 27-29.

- [8] Zhou J X. Study on Mean Shift segmentation and application of remotely sensed image [D]. *Changsha: Central South University*, 2012.

周家香. Mean Shift 遥感图像分割方法与应用研究 [D]. 长沙:中南大学, 2012.

- [9] Valero S, Chanussot J, Benediktsson J A, *et al.* Advanced directional mathematical morphology for the detection of the road network in very high resolution remote sensing images [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(10): 1120-1127.

- [10] Liang F, Liu L R, Wang B Q, *et al.* Binary algorithms of grayscale mathematical morphology and its optical implementation [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(8): 1072-1076.

梁丰,刘立人,王斌泉,等.灰值数学形态学的二值算法及其光学实现[J].*光学学报*, 1995, 15(8): 1072-1076.

- [11] Luo Q T. Image processing algorithm based on mathematical morphology [J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2016(6): 80-81.

罗秋棠.基于数学形态学的图像处理算法[J].*电子技术与软件工程*, 2016(6): 80-81.

- [12] He Q, Yi N, Wang X Y, *et al.* Research on maximum expected clustering algorithm based on Gaussian mixture model [J]. *Microcomputer Applications*, 2018, 34(5): 50-52, 75.

何庆,易娜,汪新勇,等.基于高斯混合模型的最大期望聚类算法研究[J].*微型电脑应用*, 2018, 34(5): 50-52, 75.

- [13] Lü J G, Wei C T. Urban straight road extraction

- from high-resolution remote sensing image based on Hough Transform[J]. Remote Sensing Information, 2009(3): 15-18, 91.
- 吕健刚, 韦春桃. 基于 Hough 变换的高分辨率遥感影像城市直线道路提取[J]. 遥感信息, 2009(3): 15-18, 91.
- [14] Cai H Y, Yao G Q. Optimized method for road extraction from high resolution remote sensing image based on watershed algorithm [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(3): 25-29.
- 蔡红玥, 姚国清. 基于分水岭算法的高分遥感图像道路提取优化方法 [J]. 国土资源遥感, 2013, 25(3): 25-29.
- [15] Xie M H, Song N. A method for road extraction from high-resolution remote sensing image [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2017, 54(1): 81-88.
- 谢明鸿, 宋纳. 一种高分辨率遥感影像道路提取方法 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2017, 54(1): 81-88.