

引用格式:何惠馨,范俊甫,陈文贺,等.基于亮度补偿的遥感影像阴影遮挡道路提取方法[J].地球信息科学学报,2020,22(2):258-267. [ He H X, Fan J F, Chen W H, et al. Extraction of shaded roads in high-resolution remote sensing imagery based on brightness compensation[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(2):258-267. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190270

## 基于亮度补偿的遥感影像阴影遮挡道路提取方法

何惠馨<sup>1</sup>, 范俊甫<sup>1\*</sup>, 陈文贺<sup>1</sup>, 周玉科<sup>2</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 俞宵<sup>1</sup>

1. 山东理工大学建筑工程学院, 淄博 255000;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟院重点实验室, 北京 100101

### Extraction of Shaded Roads in High-Resolution Remote Sensing Imagery based on Brightness Compensation

HE Huixin<sup>1</sup>, FAN Junfu<sup>1\*</sup>, CHEN Wenhe<sup>1</sup>, ZHOU Yuke<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, YU Xiao<sup>1</sup>

1. School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Ecology Observing Network and Modeling Laboratory, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** While extracting roads from high-resolution remote sensing imagery, shadow shielding is a main factor causing roads missing or defects, which could lead to difficulties for automatic road extraction. Therefore, developing methods for shaded road extraction with strong applicability has a great significance in map data production and research of geographical data. Traditional methods, such as the shadow coefficient amendment method, are difficult to remove the shadows of plants and buildings, and they would undermine the integrity of extracted roads. So, this paper proposed a feasible approach to extracting shaded roads based on brightness compensation and a high-performance segmentation method. First, after image preprocessing, a threshold segmentation method in HSI space was used to obtain the shadow area. Second, a combination of blue components suppression in the RGB space and divided linear strength was applied to enhance the pixel points in spatial domain and recover the information of the shaded areas, which made the difference between shaded roads and surrounding areas more obvious. Shaded roads were extracted by an efficient segmentation algorithm, and unshaded roads were calculated by K-means clustering segmentation. The initial value of clustering was based on color distribution in the HSI space. To ensure the integrity and details of extracted roads, the morphology method and contour repair algorithm were introduced into the extraction process after rough roads mergence. Results show that this method could extract shaded road successfully. For suburban roads, the integrity of extracted shaded roads was 96.84%. For urban roads, the accuracy was also higher than 80%. Compared with traditional methods based on the threshold segmentation in HSI, this method decreases the fragmentation of road

收稿日期:2019-05-29;修回日期:2019-07-23.

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0503500);国家自然科学基金项目(41601478,41501425);山东省高等学校科技计划项目(J16LH03);山东理工大学青年教师发展支持计划项目(4072-115016)。[ **Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503500; National Natural Science Foundation of China, No.41601478, 41501425; Project of Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program, No. J16LH03; Young Teacher Development Support Program of Shandong University of Technology, No.4072-115016. ]

作者简介:何惠馨(1993—),女,浙江舟山人,硕士生,主要从事城市遥感。E-mail: hehx\_sdut@163.com

\*通讯作者:范俊甫(1985—),男,山东聊城人,博士,讲师,主要从事高性能地学计算与城市环境遥感。E-mail: fanjif@sdut.edu.cn

patches while extraction, and keeps the integrity of the roads. This approach could be used for smart manufacturing and mapping of internet map data in high-resolution remote sensing imagery.

**Key words:** shadow shaded; road extraction; brightness compensation; HSI; K-means clustering

**\*Corresponding author:** FANG Junfu, E-mail: fanjf@sdut.edu.cn

**摘要:** 在基于高分辨率遥感影像的道路提取中,阴影遮挡是导致提取的部分或整段道路缺失的重要因素,严重制约了道路提取的自动化过程,因此探索适用性强的阴影情况下道路提取方法对地图数据生产和地理大数据研究具有重要意义。本文针对传统的阴影系数修正方法难以消除植被、建筑上的阴影对道路提取带来的干扰,选用路面颜色不一、地物干扰少的郊区影像与地物丰富、路面地物阴影干扰严重的市区影像开展研究,提出了基于亮度补偿的阴影遮挡道路的提取方法。首先,在图像预处理的基础上,利用HSI阈值分割获取阴影区域;其次,在削弱蓝色分量信息后采用亮度补偿方法实现像素点空间域增强以及阴影区信息的恢复,在增大道路面阴影与周围环境差异的基础上,借助高效的分割算法实现阴影道路提取;最后,通过和由K-means聚类分割获取的非阴影道路进行合并,经细化处理最终实现阴影遮挡道路的完整提取。实验结果表明,此方法提取郊区与市区影像中阴影道路的正确率在80%以上,该方法能有效地提取阴影遮挡道路,消除其他阴影的干扰,降低阴影道路提取时的斑块破碎度,较好的保留道路的主体。

**关键词:** 阴影遮挡;道路提取;亮度补偿;HSI;K-means聚类

## 1 引言

阴影是高分辨率光学遥感影像中广泛存在的现象,指成像光线被完全或者部分遮挡的区域。与地物遮盖区域不同,影像阴影区域内仍有地物信息,但其亮度和颜色与周边的影像不一致<sup>[1]</sup>。基于遥感影像的道路提取过程中,道路面上由树木、建筑物等遮挡而投射的阴影会使提取的道路出现断裂,难以实现道路的完整提取。目前互联网地图道路数据生产大量依赖于自动化遥感影像提取技术,突破道路提取的阴影影响问题,将有利于提高地图质量和更新的频率。

目前已有许多针对阴影检测的算法,Salvador等<sup>[2]</sup>基于亮度信息和彩色不变模型实现了阴影归类,但此方法仅限于区分投射阴影与自投阴影的类型;Tsai<sup>[3]</sup>提出了基于色调和亮度比值归一化的阴影检测方法,但该方法易将蓝、绿色地物错误地检测为阴影;方菊芹等<sup>[4]</sup>提出结合局部分类水平集与颜色特征的遥感影像阴影检测方法,可有效去除候选阴影区中被误检的绿地;葛乐等<sup>[5]</sup>根据主成分变换结果与地物在HSI空间光谱特性的差异,结合阴影概率对水体中的建筑物阴影实现检测。但这些阴影检测方法均属于针对性的专项研究,并不通用于阴影遮挡道路提取的研究。

遥感影像中阴影处理的方法主要有阴影区信息补偿<sup>[6-7]</sup>和基于积分的阴影去除方法<sup>[8-9]</sup>。阴影区信息补偿方法主要利用阴影与其周围非阴影区的像素信息相似的特点,对各个阴影区与其周围非阴

影区域进行匹配,并恢复阴影区域的信息。而基于积分的阴影去除方法,如基于二维积分的阴影去除方法<sup>[10]</sup>,这类方法其实是通过差分图像求解偏微分方程得到无阴影图像,可能存在求解过程计算量大,阴影去除后无法与周围区域实现色彩均衡等问题。在阴影处理方法中,针对道路阴影的研究相对较少,在道路提取的研究中,针对阴影道路的研究也相对较少。段志刚等<sup>[11]</sup>利用正交分解法获取彩色光照不变阴影图像并进行分割,通过投票函数及道路判别准则实现道路提取,但此方法针对的是车辆行驶时车前视野影像。王峰萍等<sup>[12]</sup>结合GVF Snake和显著特征方法实现道路的提取,洪绍轩等<sup>[13]</sup>利用模糊C均值聚类与支持向量机结合起来提取道路,这些方法虽能实现道路的提取,但其主要针对阴影遮挡干扰较少、路面材质单一的郊区道路,并不具有普遍适用性。贺浩等<sup>[14]</sup>提出的基于Encoder-Decoder网络的道路提取方法具有很高的分割精度和较强的适用性,但依赖于大量的同类训练集。传统的阴影遮挡道路的处理方法主要是利用HSV颜色空间对阴影区域进行系数修正<sup>[1,15]</sup>,但难以消除植被、建筑上的阴影对道路提取带来的干扰,其阈值和系数的确定依赖于大量的实验。由于道路面阴影和植被、建筑物上的阴影难以进一步细分,提取出的阴影道路整体性差,并包含了大量破碎干扰斑块。

综上,针对高分辨率影像中阴影遮挡道路提取仍需进行深入研究。本文提出了一种基于亮度补偿方法实现阴影修正的阴影遮挡道路提取方法,通

过亮度补偿方法和高效的分割算法可有效减少传统阴影系数修正方法产生的植被区阴影等斑块的干扰,保留阴影道路较高的完整性。

## 2 研究方法

### 2.1 技术路线

本文遥感影像数据来自法国国家信息与自动化研究所(Inria)的城市遥感图像公开数据集,其空间分辨率为0.3 m<sup>[16-17]</sup>。针对传统的阴影系数修正方法难以消除植被、建筑上的阴影对道路提取带来的干扰,本文利用HSI颜色空间分割获取影像中阴影区域,通过蓝色分量抑制与亮度补偿扩大阴影区中道路面与周围地物的特征差异,借助图像分割算法实现阴影道路的提取。非阴影部分道路的提取主要采用K-means聚类分割,聚类K值的确定主要参考图像在HSI颜色空间下光谱特征分类,图1为本文的方法流程图。

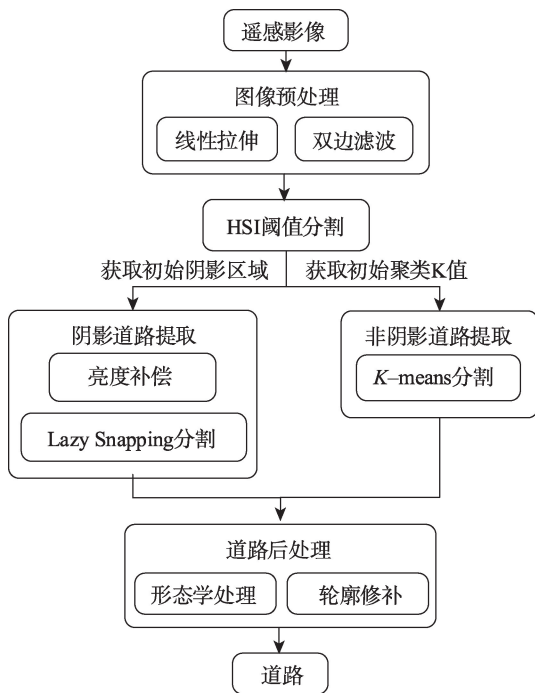


图1 基于亮度补偿方法的阴影道路提取方法流程  
Fig. 1 Flowchart of shaded roads extraction with brightness compensation method

### 2.2 图像预处理

对原始图像的预处理方法包括线性拉伸和双边滤波。由于原始图像整体偏暗,首先采用基于灰度直方图的线性拉伸方法对图像进行对比度增强处理。其次采用双边滤波对图像进行去噪处理。

双边滤波是一种非线性的滤波方法,是结合图像的空间邻近度和像素值相似度的一种折衷处理,同时考虑空间信息和灰度相似性,达到保存边缘和去除噪声的目的,具有简单、非迭代、局部处理的特点<sup>[18-20]</sup>。经上述方法预处理后的图像变得更加清晰,道路和背景的差异得到增强,如图2(b)。

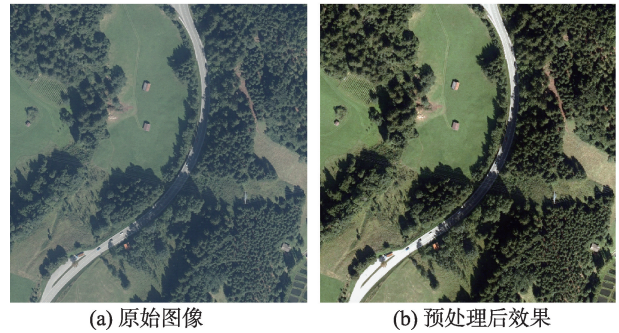


图2 图像线性拉伸和双边滤波预处理  
Fig. 2 Image preprocessing of linear stretch and bilateral filter

### 2.3 HSI 影像分割

影像中的阴影区域一般具有低频率、低亮度、蓝绿光的相关性小且蓝色波段饱和度高等特点<sup>[21]</sup>,而传统的RGB颜色模型并不具备色调、饱和度和亮度特征信息。HSV和HSI(HSL)是2种较为常见的颜色模型,且视觉直观性要优于RGB<sup>[22]</sup>。HSI颜色模型是最接近于人类对于颜色的认知方式的一种颜色空间,包括色调(Hue)、饱和度(Saturation)和亮度(Intensity)3个分量。相比于HSV模型,HSI优点在于它的各分量之间相互独立<sup>[23]</sup>。因此本文从HSI颜色空间入手实现对阴影区域的提取。

虽然低亮度特征是阴影的众多光谱特征中最具有代表性的,但受周围地物的影响单纯借助I分量可能难以对阴影进行有效分割。遥感影像中的地物多为灰色、黄色、绿色等较低色调,所以阴影区域的色调与普通地物有较大差别(图3(a)),可以作为判断阴影区域的标准之一<sup>[15]</sup>。如式(1)所示。

$$\begin{cases} a < I(x, y) < b & a, b \in [0, 255] \\ c < H(x, y) < d & c, d \in [0, 255] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I(x, y)$  和  $H(x, y)$  分别表示  $I$  分量和  $H$  分量下像素点的值,  $a, b, c, d$  为各分量下阴影范围的阈值,通过阈值设定就可实现阴影的分割提取。

对比图2(b),图3(c)在HSI颜色空间下阴影的明显程度要优于RGB颜色空间,由光谱特征可将图像中的地物划分为4类:背景(草坪)、道路(未遮挡区域)、阴影、林地植被。此光谱特征分类亦可作为



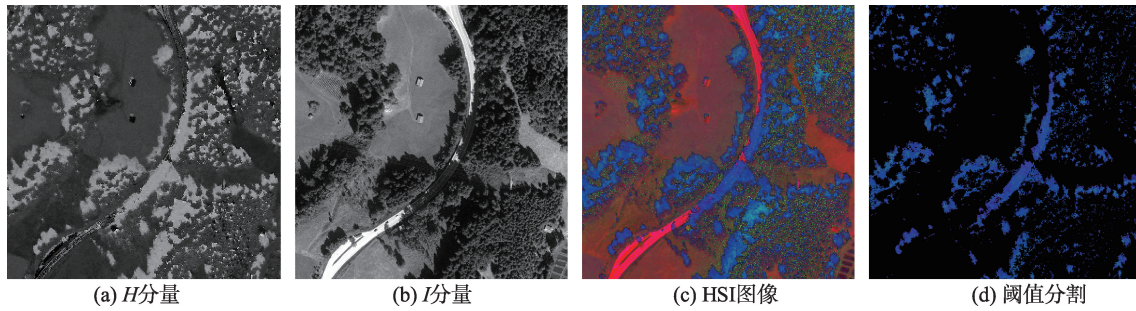


图3 HSI颜色空间下的图像阴影区域阈值分割提取

Fig. 3 Shadow extraction on HSI space with threshold segmentation

K-means 聚类方法初始  $K$  值的参考。利用阴影区域色调值  $H$  较高特点(图3(a)), 结合  $I$  分量, 分离出影像中的阴影区域, 提取出的阴影包括道路面阴影和植被林地区阴影, 结果如图3(d)。

#### 2.4 阴影区域亮度补偿

遥感图像上的像元亮度或色彩都是太阳光照函数和地物反射函数的复合函数。阴影主要是由于遮挡物使得太阳直射光照不足, 引起对应区域像素点亮度小、色彩信息缺乏等问题, 这就相当于对阴影区的地物反射函数经过一个较小函数变换。由于函数的复杂性, 要完全消除图像中的阴影, 恢复阴影区域中地物的本来面目几乎是不可能的<sup>[22]</sup>。但考虑到阴影区的亮度和色彩信息与非阴影区域存在一定关联, 故将阴影区域反射函数乘以相应的补偿函数, 即可实现对阴影区的信息补偿。

阴影区域信息补偿方法能在一定程度上恢复阴影区域的亮度和色彩信息, 对于大范围的阴影图像而言, 尽管经过处理的图像会出现大量细碎的干扰像素点, 如图4(b), 但是在一定程度上还是能削弱阴影的影响。阴影区域信息补偿方法对处理小范围内阴影较有优势, 如图4(d)所示, 小范围的阴影覆盖图像经过补偿方法处理后, 阴影区的小车及道路线变得明亮而清晰。

遥感图像中阴影区域往往表现得较暗, 因为其亮度值主要来源环境的反射光和散射光, 经瑞利散射和米氏散射的作用, 只有蓝紫光得以较多保留<sup>[24]</sup>。为使亮度补偿效果更佳, 一般在进行阴影补偿前, 首先需要对蓝色分量进行抑制, 具体方法如下:

$$B'(x, y) = B(x, y) \times n \quad (2)$$

式中:  $B(x, y)$  是原始影像中的蓝光分量;  $n$  为颜色调整系数。为实现削弱蓝色分量的比重达到抑制的作用, 选取的  $n$  应小于 1。

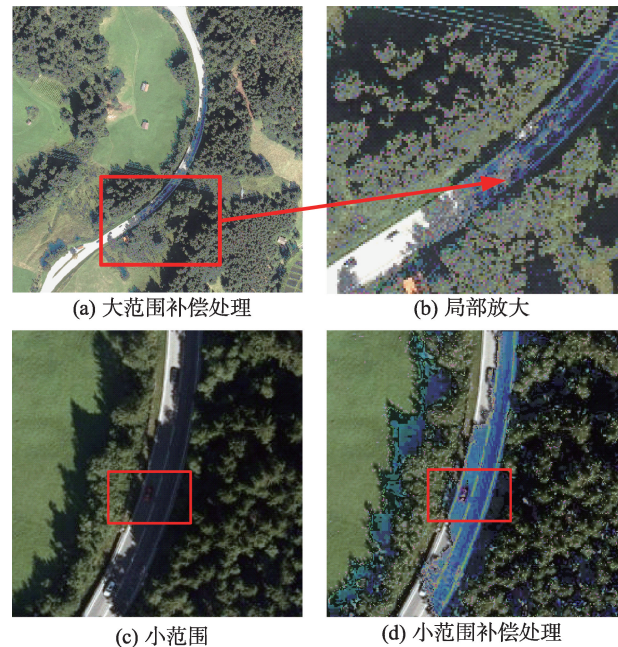


图4 阴影区域信息补偿方法处理效果

Fig. 4 Brightness compensation over shadow areas

在抑制蓝色分量之后, 采用分段线性映射方法对阴影区域的亮度进行补偿(RGB 颜色空间)。此方法的实质是对图像阴影区域的像素点进行空间域增强。遥感影像上的亮度值是局部均匀的, 采用分段线性变换方式对亮度进行补偿的方法如下:

$$g(x, y) = \begin{cases} k_1 \times f(x, y) & (0 \leq f(x, y) \leq a) \\ k_2 \times f(x, y) & (a < f(x, y) \leq b) \\ k_3 \times f(x, y) & (b < f(x, y) \leq M) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f(x, y)$  是原图像素的亮度函数;  $g(x, y)$  为处理后的图像像素点的亮度函数;  $M$  为图像的最大亮度;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为每段直线的斜率, 利用灰度直方图可对图像的亮度值进行分区, 通过对  $a$ 、 $b$  参数的调整可实现对任何亮度区间的扩展和压缩。对图像进行蓝色分量抑制及亮度补偿后, 图像的整体变亮, 其效果如图5(b)所示。



## 2.5 阴影区分割

经过亮度补偿处理后,道路面的阴影和周围植被阴影的光谱特征差异变得显著,但是由于采样统计的不便捷性,简单的阈值分割已经不再适用于阴影道路的提取。Li等<sup>[25]</sup>在基于阴影概率模型的阴影检测方法中,将阴影区域视为前景,其他区域视为背景。引用此概念,本论文将亮度补偿后图像中的道路面阴影视为前景,其余视为背景,结合 Lazy Snapping算法对阴影道路进行提取。

Lazy Snapping算法属于图论分割方法,是基于 Graph Cut算法的改进,采用最大化目标的颜色相似性和沿边界的梯度来优化目标边界<sup>[26]</sup>。图论分割方法把图像分割问题与图的最大流(最小割)问题相关联。分割的最优原则就是使划分后的子图在内部保持相似度最大,而子图之间的相似度保持最小。基于图论的分割方法的本质就是移除特定的边,将图划分为若干子图从而实现分割<sup>[27]</sup>。Boykov等<sup>[28-29]</sup>证明利用 Graph Cut算法求解图的最大流(最小割)等价于求能量函数E(X)的最小值。

$$E(X) = \sum_{i \in v} E_1(x_i) + \lambda \sum_{(i,j) \in \varepsilon} E_2(x_i, x_j) \quad (4)$$

式中: $v$ 表示图像像素点集; $\varepsilon$ 表示四邻域或八邻域的边集合; $E_1(x_i)$ 为相似能量,用来表征节点的颜色相似性,表示当结点 $i$ 的标记为 $x_i$ 时的代价; $E_2(x_i, x_j)$ 为优先能量,表示当相邻结点 $i$ 和 $j$ 的标记为 $x_i$ 和 $x_j$ 的代价。

Li等<sup>[30]</sup>在上述基础上提出 Lazy Snapping算法,利用分水岭算法对图像进行预分割,借助对前景种子点( $F$ )和背景种子点( $B$ )进行 K-means 聚类来计算相似能量  $E_1(x_i)$ 。分水岭算法具有能够较好地定位边缘,保留每个子区域细小差异的特点。通过对图像进行预分割,用分割后的图像构造图,将图像

中相似像素形成的区域作为图的一个点来处理,能大大加快算法的分割效率<sup>[31]</sup>。

计算  $E_1(x_i)$  前,需要使用 K-means 聚类方法将前景和背景种子节点的颜色进行聚类,聚类后前景和背景的均值颜色分别为:  $K_n^F$ 、 $K_m^B$ , K-means 初始化设置 64 个聚类<sup>[32-33]</sup>。对每个节点  $i$  计算其颜色  $C(i)$  到其前景聚类的最小距离:

$$\begin{cases} d_i^F = \min \|C(i) - K_n^F\| \\ d_i^B = \min \|C(i) - K_m^B\| \end{cases} \quad (5)$$

$E_1(x_i)$  由上进行展开:

$$\begin{cases} E_1(x_i=0) = \infty, E_1(x_i=1) = 0, & \text{当 } i \in F \\ E_1(x_i=0) = 0, E_1(x_i=1) = \infty, & \text{当 } i \in B \\ E_1(x_i=0) = \frac{d_i^B}{d_i^F + d_i^B}, E_1(x_i=1) = \frac{d_i^F}{d_i^F + d_i^B}, & \text{不确定区域} \end{cases} \quad (6)$$

优先能量  $E_2(x_i, x_j)$  是相邻像素标记点颜色相似度所需消耗的代价,用来定义节点  $i$  和  $j$  之间的颜色梯度函数:

$$\begin{cases} E_2(x_i, x_j) = |x_i - x_j| \cdot g(C_{ij}) \\ g(\varphi) = \frac{1}{1 + \varphi} \\ C_{ij} = \|C(i) - C(j)\|^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $C_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  的 RGB 颜色色差的 2 范数。由此可得:

$$E_2(x_i, x_j) = \frac{|x_i - x_j|}{1 + C_{ij}} \quad (8)$$

对亮度补偿后的阴影区域进行前景和背景种子点标记,使用 Lazy Snapping 算法实现阴影道路的提取,结果如图 5(c)和图 5(d)所示。

## 2.6 非阴影道路提取

非阴影区域道路无论在 RGB 还是 HSI 颜色空

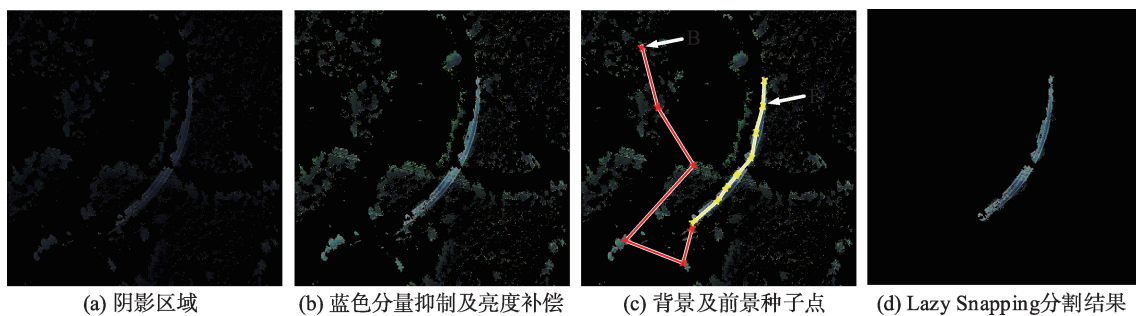


图5 阴影区亮度补偿及阴影道路提取分割

Fig. 5 Brightness compensation over shadow areas for the shaded road extraction

间下都具有非常显著的光谱特征,如在 $I$ 分量上远高于周围地物。若借助HSI阈值来对非阴影区域道路进行分割,则还需依赖于采样统计,因为非阴影区道路并非为单一的 $I$ 分量阈值,而是处于一个值域范围。由此,文本采K-means聚类方法来对非阴影区道路进行提取。

K-means算法是一种常用的聚类算法,它具有好的局部搜索能力,对较规则分布的数据进行聚类时能达到理想的聚类效果,由于高效和简单而被广泛应用。但是K-means算法同时也存在着缺点,如聚类的结果依赖于初始聚类个数 $K$ 的确定,对初始聚类中心敏感和易受孤立点的影响,导致聚类结果容易陷入局部最优解<sup>[34]</sup>。传统的K-means算法最开始随机选取数据集中 $K$ 个点作为聚类中心,而K-means++按照如下的思想选取 $K$ 个聚类中心:假设已经选取了 $n$ 个初始聚类中心( $0 < n < K$ ),则在选取第 $n+1$ 个聚类中心时:距离当前 $n$ 个聚类中心越远的点会有更高的概率被选为第 $n+1$ 个聚类中心;在选取第一个聚类中心( $n=1$ )时同样通过随机的方法<sup>[35]</sup>。显然K-means++算法针对初始化聚类中心问题进行了很好的改进,因此本文采用K-means算法和K-means++进行对比试验。在聚类分割时,只要非阴影道路满足最佳分割即可,如图6所示,结果证明K-means算法在非阴影道路提取时聚类效果更佳。一般要事先确定聚类个数 $K$ 是困难的, $K$ 的选定需要进行多次试验才能找到<sup>[29]</sup>。本论文初始 $K$ 值的选择主要参考HSI颜色空间下影像中地物的光谱特征分类,再经实验测试得以确定。

## 2.7 道路后处理

将阴影道路和非阴影道路合并,道路的主体信息就基本被提取出来,但是由于道路中存在空隙、道路周边存在细小斑块等干扰,还需对道路进行进

一步处理。本文主要利用形态学方法和连通域分析对提取结果进行细化,通过轮廓邻域搜索对凹陷的道路边缘进行修补。

数学形态学是一种应用于图像处理和模式识别领域的新方法,其基本思路是利用具有一定形态的结构元素去量测和提取图像中对应的形状,以达到对图像分析和识别的目的<sup>[36]</sup>。利用数学形态学工具对图像的中断部分进行连接、内部斑点消除、平滑边界处理能产生较好的效果。本文先利用开运算和形态学重建方法对道路周围细小物体进行消除,再利用膨胀对道路中微小空隙进行去除,对于道路中较大的孔洞以及周边较大的干扰物采用连通域分析方法进行修补和消除。

针对道路边缘提取不全出现的凹陷现象,本文采用轮廓修补方法对道路的轮廓端点进行处理<sup>[37]</sup>。对轮廓端点定义为:对于轮廓上的任意一点,若其满足8邻域按顺时针方向像素值变化次数2次,则认为该点为轮廓端点(图7(b))。特别地,当像素值变化次数为0次,且首起邻域像素值不同于中心点时,称该点为孤立点,为特殊的轮廓端点(图7(a))。当任意两端点之间的距离不大于给定阈值时,则用直线连接这2个端点并进行填充。

## 3 试验分析与对比

为检验本文方法的有效性采用完整率(Completeness, COM)、正确率(Correctness, COR)和检测质量(Quality, Q)这3个指标进行评价<sup>[12,38]</sup>。

$$\begin{cases} COM = \frac{TP}{TP + FN} \\ COR = \frac{TP}{TP + FP} \\ Q = \frac{TP}{TP + FN + FP} \end{cases} \quad (9)$$

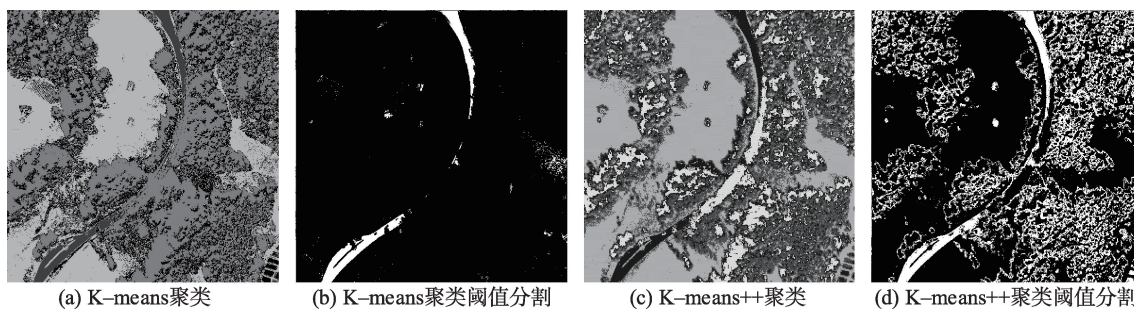


图6 K-means与K-means++算法阈值分割提取非阴影道路对比

Fig. 6 Comparison of the K-means and K-means++ algorithms in extracting unshaded roads with threshold segmentation



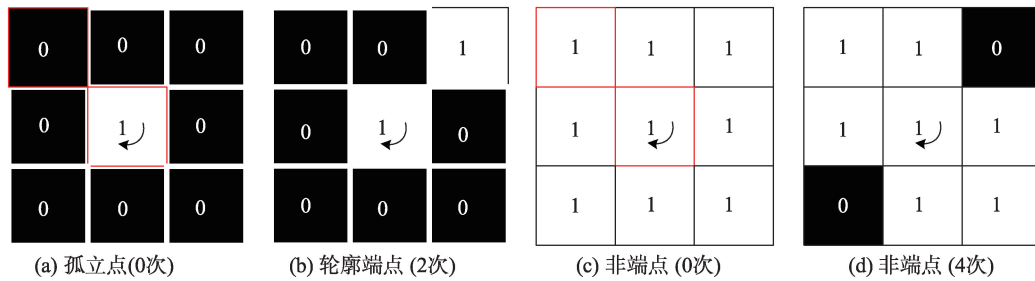


图7 轮廓修补方法的轮廓端点定义

Fig. 7 Definition of shape endpoints in outline repair method

式中:  $TP$ 表示正确提取的道路像素点个数;  $FN$ 表示未被提取出来的道路像素点个数;  $FP$ 为被误判为的道路的像素点个数。

选取700像素×700像素郊区和620像素×620像素的市区影像对本文的方法加以验证。如图8(a)包含多条路面颜色不一、被阴影遮挡的相邻道路;图8(b)影像中地物类型丰富,存在多种干扰因素,道路面有大量建筑物的阴影。

当地物环境复杂,尤其是包含多条路面颜色不一的道路时,K-means聚类难以有最佳效果。为此,可将基于HSI非阴影道路分割结果与K-means聚类

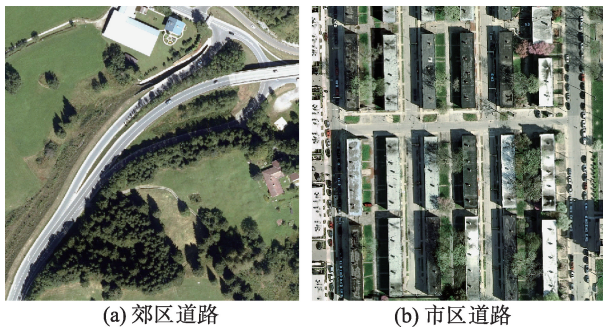


图8 验证本文方法的郊区及市区图像

Fig. 8 Data source for the verification experiment

结果进行求交,交集结果即为非阴影道路,可有效保留非阴影区道路的主体信息,并且去除了大量干扰因素,如图9所示。

本文提出的方法关键在于对提取的阴影区域进行蓝色分量抑制和亮度补偿后,扩大阴影道路与周围植被阴影的差异,再借助Lazy Snapping算法实现阴影区域中阴影道路的提取。如图10所示,由于阴影的深浅程度不一,HSI提取阴影区域的阈值确定较为难统一,导致部分阴影道路会存在一定的过分割和欠分割现象,尤其是阴影遮挡较浅的路段,其提取出的阴影道路图斑的破碎程度较大。可在与非阴影区道路合并前先对阴影道路进行预处理,使阴影道路斑块变得较为完整,避免其在合并后的腐蚀等一系列细化操作中丢失零碎的阴影道路斑块。

由图11实验结果表明,影像中的道路基本被提取出来,阴影道路的走向基本与原道路一致,真实地保留了道路的基本信息。由表1评价指标可知,本文的方法最为适用于郊区阴影道路提取,也可用于市区阴影道路的提取。郊区道路面光谱特征一般与周围地物差异较大,存在清晰的道路边界,提取阴影道路时较为简单;而市区道路部分区域为混凝土材质,与建筑物楼顶材质相似,且道路区域与

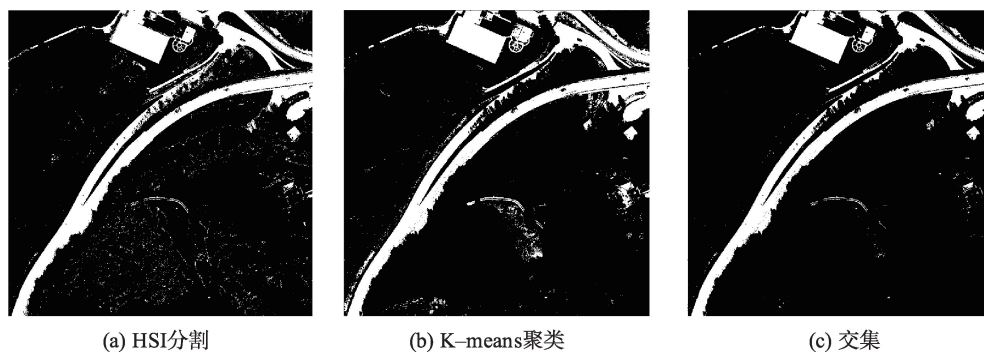


图9 HSI阈值分割及K-means聚类方法的非阴影道路提取结果及求交

Fig. 9 Results of unshaded roads extraction with threshold segmentation in HSI space and K-means algorithm

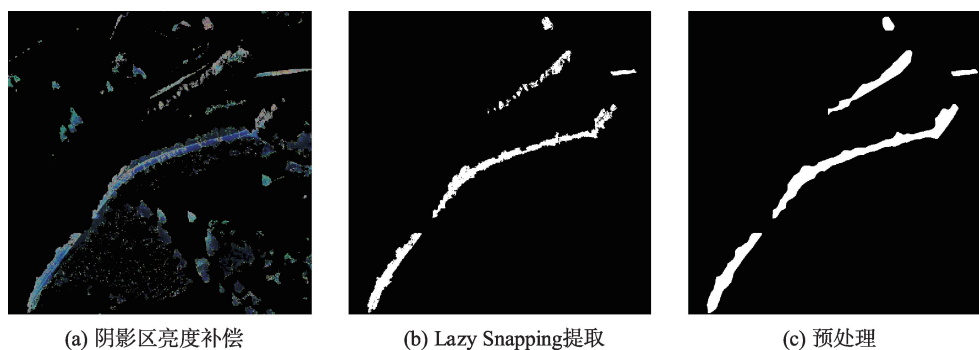


图10 阴影遮挡道路提取及预处理

Fig. 10 Shaded roads extraction and preprocessing

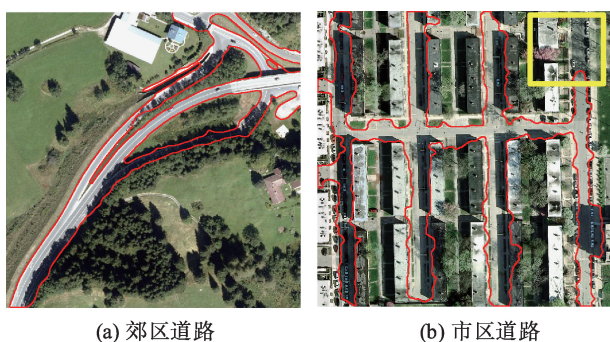


图11 基于亮度补偿的阴影道路提取结果

Fig. 11 Result of shaded roads extraction based on the brightness compensation method

表1 道路提取效果评价指标

Tab. 1 Evaluation of the shaded roads extraction results

	郊区道路		市区道路	
	本文方法	传统方法	本文方法	传统方法
TP/个	60 328	53 145	87 636	73 447
FN/个	1969	6640	23 107	37 296
FP/个	13 631	61 031	19 367	46 683
完整率/%	96.84	88.89	79.13	66.32
正确率/%	81.57	46.55	81.90	61.14
检测质量/%	79.45	43.98	67.36	46.65

非道路区域难以有清晰的边界,这使得在进行市区道路提取时存在一定的难度,提取的道路边缘容易存在一定的形状偏差,加之植被遮盖(非阴影)等干扰(图11(b)黄色标记),导致提取的阴影道路精度有所下降。对比传统的基于HSI阴影系数修正的阴影道路提取方法(图12),本文提出的基于亮度补偿的方法能有效地剔除阴影道路提取时的非道路面阴影,减少植被等阴影对阴影道路提取带来的干扰,降低阴影道路提取时斑块的破碎度,较好的保留道路主体斑块的完整性,减少道路后处理的工作量。

## 4 结论与讨论

针对传统的阴影区系数修正方法难以消除非道路面阴影对道路提取带来的干扰,本文提出了一种基于亮度补偿及高效分割方法的阴影遮挡道路提取方法。利用路面颜色不一、地物干扰少的郊区影像与地物丰富、路面阴影干扰严重的市区影像分别进行验证。研究表明:

(1)本文提出的方法不仅能有效减少非道路面

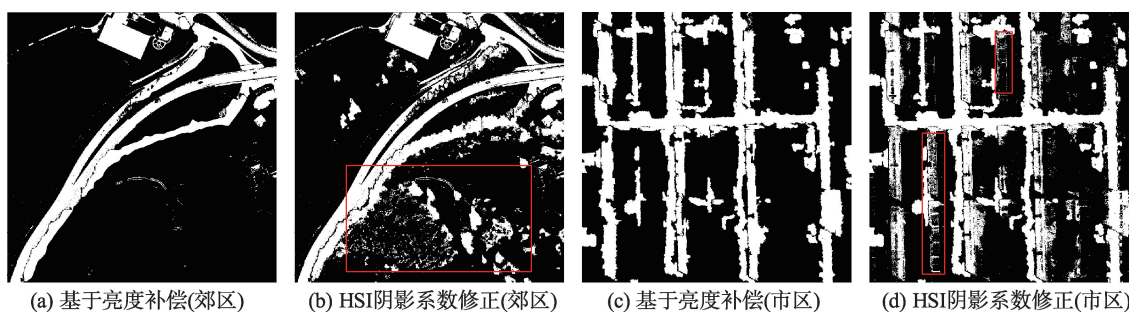


图12 基于亮度补偿的阴影道路粗提取与传统HSI阴影系数修正提取对比

Fig. 12 Comparison of brightness compensation method and traditional shadow coefficient amendment method in rough extraction of shaded roads



阴影的干扰,降低阴影遮挡道路提取时的斑块破碎度,保留道路主体的完整性。

(2)在郊区环境下,此方法的适用性最佳,尽管路面存在颜色不一致的光谱特征影响,但此差异性要远远弱于道路面与周围地物环境的差异,其道路提取的完整度可达96.84%。其完整率、正确率及检测质量这三项指标都要优于传统的HSI阴影系数修正提取的结果,达到了在遥感影像质量较好情况下进行乡村道路提取实际应用的水平。

(3)此方法也可作为市区阴影道路提取的参考方法,虽在市区环境下,受植被遮盖、材质相似及无清晰边界等因素的干扰,此方法提取道路的完整率仅有79.13%,但其正确率还能达81.90%,对比传统的HSI阴影系数修正方法,其各项指标仍要优于传统方法。

本文提出的方法虽然为阴影道路提取来了一种新思路,但此方法依赖于光谱特征,在复杂的市区环境中,如道路面材质与周围地物存在高度相似,则易受地物干扰,导致提取的精度下降。后期开展研究考虑引入其他特征,如纹理体征等,辅助阴影道路的提取,进一步提高其适用性与精度。

#### 参考文献(References):

- [1] 郭杜杜.基于高分辨率卫星影像的城市道路阴影区域车辆信息提取研究[D].北京:北京交通大学,2011. [Guo D D. Research on urban road traffic information extraction of the shaded area from high-resolution satellite images [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. ]
- [2] Salvador E, Cavallaro A, Ebrahimi T, et al. Shadow identification and classification using invariant color models [C]. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001:1545-1548.
- [3] Tsai V J D. A comparative study on shadow compensation of color aerial images in invariant color model[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2006, 44(6):1661-1671.
- [4] 方菊芹.遥感影像阴影检测与去除算法研究[D].成都:西南交通大学,2014. [Fang J Q. Research on shadow detection and removal in remote sensing images[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. ]
- [5] 葛乐,钟兴.基于阴影概率约束的遥感影像建筑物阴影检测[J].激光与光电子学进展,2018,55(4):135-141. [Ge L, Zhong X. Building shadow detection of remote sensing Images based on shadow probability constraint[J]. Laser & Optoelectronics Process. 2018,55(4):135-141. ]
- [6] 杨俊,赵忠明.基于归一化RGB色彩模型的阴影处理方法[J].光电工程,2007(12):92-96. [Yang J, Zhao Z M. Shadow processing method based on normalized RGB color model[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007(12): 92-96. ]
- [7] Li H, Zhang L, Shen H, et al. An adaptive nonlocal regularized shadow removal method for aerial remote sensing images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014,52(1):106-120.
- [8] Finlayson G D, Hordley S D, Drew M S, et al. Removing shadows from images[C]. european conference on computer vision, 2002:823-836.
- [9] Fredembach C, Finlayson G D. Hamiltonian path based shadow removal[C]. british machine vision conference, 2005:502-511.
- [10] Finlayson G D, Hordley S D, Lu C, et al. On the removal of shadows from images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006,28(1):59-68.
- [11] 段志刚,李勇,王恩德,等.基于光照不变图像的阴影图像道路及导航线提取算法[J].光学学报,2016,36(12):206-213. [Duan Z G, Li Y, Wang E, et al. Road and navigation line detection algorithm from shadow image based on the illumination invariant image[J]. Acta Optica Sinica, 2016,36(12):206-213. ]
- [12] 王峰萍,王卫星,薛柏玉,等. GVF Snake与显著特征相结合的高分辨率遥感图像道路提取[J].测绘学报,2017,46(12):1978-1985. [Wang F P, Wang W X, Xue B Y, et al. Road extraction from high-spatial-resolution remote sensing image by combining GVF Snake with salient features [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017,46(12):1978-1985. ]
- [13] 洪绍轩,赵业隆,王伟轩.基于FCM与SVM相结合的高分辨率遥感影像道路提取[J].测绘与空间地理信息,2018, 41(11):147-150. [Hong S X, Zhao Y L, Wang W X. Road extraction of high resolution remote sensing images based on combining FCM and SVM[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018,41(11):147-150. ]
- [14] 贺浩,王仕成,杨东方,等.基于Encoder-Decoder网络的遥感影像道路提取方法[J].测绘学报,2019,48(3):330-338. [He H, Wang S C, Yang D F, et al. A Road extraction method for remote sensing image based on Encoder-Decoder network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019,48(3):330-338. ]
- [15] 汪夕明.遥感影像道路提取方法研究与实现[D].北京:清华大学,2011. [Wang X M. The research and application of road extraction from remote sensing images[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. ]
- [16] Maggiori E, Tarabalka Y, Charpiat G, et al. Can semantic labeling methods generalize to any city? the Inria Aerial

- Image Labeling Benchmark[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2017:3226-3229.
- [17] Inria Aerial Image Labeling Dataset[EB/OL].<https://project.inria.fr/aerialimagelabeling/>, 2018-10-14.
- [18] 毛星云. Opencv3 编程入门[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015. [ Mao X Y. Introduction to Opencv3 and programming[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. ]
- [19] 王玉灵. 基于双边滤波的图像处理算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010. [ Wang Y L. Study of algorithm in image processing based on Bilateral Filter[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. ]
- [20] 高如新, 李雪颖. 双边滤波的改进高光去除[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(1):9-17. [ Gao R X, Li X Y. Specular highlight removal using improved bilateral filtering[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 23(1):9-17. ]
- [21] Jiang Z, Lin Z, Davis L S, et al. Learning a discriminative dictionary for sparse coding via label consistent K-SVD [C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2011: 1697-1704.
- [22] 王蜜蜂. 遥感影像的阴影检测与补偿方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011. [ Wang M F. Research on shadow detection and compensation in remote sensing images [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. ]
- [23] Wikipedia [EB/OL]. [https://en.wikipedia.org/wiki/HSL\\_and\\_HSV](https://en.wikipedia.org/wiki/HSL_and_HSV), 2018-10-14.
- [24] 邓林, 邓明镜, 张力树. 高分辨率遥感影像阴影检测与补偿方法优化[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2):277-284. [ Deng L, Deng M J, Zhang L S. Optimization of shadow detection and compensation method for high-resolution remote sensing images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(2):277-284. ]
- [25] Li P, Ge W. A soft shadow detection method based on MRF for remote sensing images[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(1):1-11.
- [26] 陶中玉. 交互式图像分割的相关算法研究及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2016. [ Tao Z Y. Research of interactive image segmentation algorithm and its application[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. ]
- [27] 李娜娜, 谭靖. 基于图论分割的图像去雾算法[J]. 地理空间信息, 2017, 15(8):80-82, 10. [ Li N N, Tian J. Improved haze removal algorithm based on Graph-cut[J]. Geospatial Information, 2017, 15(8):80-82, 10. ]
- [28] Boykov Y, Jolly M. Interactive organ segmentation using graph cuts[C]. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, 2000:276-286.
- [29] 苏玉雄. 基于 Graph Cut 的图像前景提取[D]. 广州: 华南理工大学, 2009. [ Su Y X. Image foreground extraction based on Graph Cut[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009. ]
- [30] Li Y, Sun J, Tang C, et al. Lazy snapping[J]. Acm Transactions on Graphics, 2004, 23(3):303-308.
- [31] 黄玲玲. 交互式抠图算法的研究及实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. [ Huang L L. Research and implement the interactive matting algorithm[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. ]
- [32] 郭蓉. 基于局部搜索和全局搜索的交互式图像分割方法[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016. [ Guo R. Research of interactive matting segmentation algorithm based on local search and global search[D]. Xian: Shanxi Normal University, 2016. ]
- [33] 曹永春, 蔡正琦, 邵亚斌. 基于 K-means 的改进人工蜂群聚类算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(1):204-207, 217. [ Cao Y C, Cai Z Q, Shao Y B. Improved artificial bee colony clustering algorithm based on K-means[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(1):204-207, 217. ]
- [34] Arthur D, Vassilvitskii S. K-means++: the advantages of careful seeding[C]. Symposium on Discrete Algorithms, 2007:1027-1035.
- [35] 刘莉, 王刚, 翟登辉. K-means 聚类算法在负荷曲线分类中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23):65-68, 73. [ Liu L, Wang G, Zhai D H. Application of K-means clustering algorithm in load curve classification[J]. Power system protection and control, 2011, 39(23):65-68, 73. ]
- [36] 周安发, 周家香. 一种高分辨率遥感影像道路信息提取方法[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1):94-99. [ Zhou A F, Zhou J X. A methodology for road extraction from high resolution remote sensing images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(1):94-99. ]
- [37] 冯彦铭, 谢家龙, 李林升, 等. 基于八邻域跟踪算法的封闭区域几何尺寸测量[J]. 机械工程与自动化, 2013(6):170-171, 173. [ Feng Y M, Xie J L, Li L S, et al. A geometric measurement method of arbitrary enclosed shape by boundary tracking of eight-connected[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013(6):170-171, 173. ]
- [38] Heipke C, Mayer H, Wiedemann C, et al. Evaluation of automatic road extraction[C]. Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Tokyo: ISPRS, 1997:151-160.