引文格式：刘西宁,董志鹏,冯义楷,等. 融合超像素与Canny算子的遥感影像边缘检测方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):122-127. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.08.026

融合超像素与Canny算子的遥感影像边缘检测方法

刘西宁[1]，董志鹏[2*]，冯义楷[2]，丁　一[3]，陈　炜[1]
（1. 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所，海南 三亚 572024；2. 自然资源部第一海洋研究所，山东 青岛 266061；
3. 自然资源部北海预报减灾中心，山东 青岛 266061）

摘　要：影像边缘是影像最基本的特征之一，影像边缘线的检测与提取是影像分析与解译的必要环节。针对目前影像边缘线检测算法易受影像噪声及“同物异谱、异物同谱”现象影响，难以准确提取影像边缘线的问题，提出一种融合超像素与Canny算子的高分辨率遥感影像边缘线检测方法。该方法首先采用简单线性迭代聚类算法对影像分割生成超像素，基于超像素对影像进行平滑处理，消除影像噪声及“同物异谱、异物同谱”现象对影像边缘线检测的影响。其次用Canny算子提取影像边缘线，对提取边缘线进行光滑处理，得到光滑且连通性良好的影像边缘线。最后对光滑处理的影像边缘线提取其骨架线，获得最终的影像边缘线。经过多组实验对比分析验证，该方法可以消除影像噪声对影像边缘线提取的影响，进而减少影像中伪边缘线的提取，获得良好的影像边缘线提取结果。

关键词：高分辨率遥感影像；影像边缘检测；超像素对象；Canny算子
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0122-06

Edge Detection Method for Remote Sensing Image by Combining Superpixel and Canny Operator

LIU Xining[1], DONG Zhipeng[2], FENG Yikai[2], DING Yi[3], CHEN Wei[1]
(1. Sanya Institute of South China Sea Geology, Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Sanya 572024, China;
2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;
3. North Sea Forecast and Disaster Reduction Center, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: Image edge is one of the most basic features of image, and the detection and extraction of image edge are necessary for image analysis and interpretation. Current image edge detection methods are sensitive to image noise and the phenomenon of the same class objects reflecting different spectrum, and are difficult to accurately extract the edge. For solving these problems, we proposed an edge detection method for high resolution remote sensing image by combining superpixel and Canny operator. Firstly, we used simple linear iterative clustering algorithm to segment image to generate superpixel, and smoothed the image based on superpixel to eliminate the influence of image noise and the phenomenon of the same class objects reflecting different spectrum on the image edge detection. Then, we used Canny algorithm to extract image edge. Finally, we optimized image edge, and extracted the skeleton of optimized image edge to obtain final image edge. The experimental result shows that the proposed method can obtain good image edge detection results.

Key words: high-resolution remote sensing image, image edge extraction, superpixel, Canny operator

近年来对地观测卫星技术高速发展，其获取的高分辨率遥感影像已被广泛应用于地物分类、城市管理和应急监测的等方面[1-3]。影像边缘线作为高分辨率遥感影像最基本的特征之一，其准确的检测与提取对分析与理解影像信息具有重要影响[4]。因此，高分辨率遥感影像边缘线的检测与提取已成为遥感领域研究的热点与难点[5]。相对于中低分辨率遥感影像，由于高分辨率影像空间分辨率更高，则影像中地物有更清晰的轮廓和更明显的纹理，比中低分辨率遥感影像具有更丰富的地物信息，但也增加了影像中“椒盐”噪声等对边缘线检测的影响[6-7]。传统的遥感影像边缘检测包括Sobel[8]、Robel、Krish、Prewitt等一阶微分算子，和Laplacian[9]、Marr-heidret等二阶微分算子，这些算子利用卷积模板与影像进行卷积运算实现边缘检测与提取，该类算法具有简单高效、且容易实现的特点，但易受到影像噪声影响，会产出大量的伪边缘，精度

项目来源：海南省国际科技合作研发项目（GHYF2024002）；三亚崖州湾科技城科技专项资助项目（SKJC-2022-010-03）；山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金资助项目（202304）。
第一作者简介：刘西宁（1977—），本科，高级工程师，研究方向为测绘科学与技术研究与应用，E-mail：liuxining@mail.CGS.gov.cn。
通信作者：董志鹏（1991—），博士，助理研究员，研究方向为主被动卫星遥感数据处理及信息提取，E-mail：zhipengdong@foxmail.com。

较差。

相对于上述传统的影像边缘检测算法易受影像噪声影响的问题，Canny边缘检测算法通过最大化信噪比、高边缘定位等处理，可良好的消除影像噪声对边缘线提取的影响[11-14]，但由于高分辨率遥感影像存在“同物异谱、异物同谱”等复杂特点，用Canny算法对其进行边缘检测与提取时，易受影像“同物异谱、异物同谱”现象的影响，产生大量的伪边缘检测结果。

针对目前影像边缘检测算法易受影像噪声及“同物异谱、异物同谱”现象影响，产生大量伪边缘检测结果的问题，本文提出一种融合超像素与Canny算子的高分辨率遥感影像边缘线检测方法。

1　研究方法

本文方法主要分为4个步骤：①SLIC算法对图像进行光滑处理；②基于Canny算法对光滑处理后影像边缘检测；③对初始边缘检测结果光滑处理；④对光滑处理后的边缘检测结果提取其骨架线。

1.1　影像光滑处理

SLIC算法具有简单、高效和良好的影像抗噪性等特点，基于SLIC算法生成的超像素具有规则紧凑的形状、且可良好的依附影像中地物边界[15]。SLIC算法的具体步骤为：

1）初始种子点设置。为了使种子点可以均匀分布并覆盖整幅图像，如果影像有 N 个像素，初始设定生成 K 个超像素，则每个超像素的面积为 N/K，每个超像素的种子点间距约为 N/K 的开根号。此外，为了防止初始设定的种子点落在影像的边缘上，影响后续的聚类过程，对初始设定的种子点进行位置调整，通常在以它为中心的3×3窗口内将其移动到梯度最小的位置，并为每个初始种子点分配一个标签。

2）相似度计算。对于影像中的其他像素，计算初始种子点与其之间的相似度，将与其最相似的种子点的标签赋予该像素。通过不断迭代该过程，直到收敛，则相似度的衡量关系如下：

$$d_{lab}=\sqrt{\left(l_k-l_i\right)^2+\left(a_k-a_i\right)^2+\left(b_k-b_j\right)^2} \tag{1}$$

$$d_{xy}=\sqrt{\left(x_k-x_i\right)^2+\left(y_k-y_i\right)^2} \tag{2}$$

$$D=\sqrt{{d_{lab}}^2+\left(\frac{d_{xy}}{S}\right)^2 m^2} \tag{3}$$

式中，(l_k,a_k,b_k,x_k,y_k) 为种子点的五维特征向量；(l_i,a_i,b_i,x_i,y_i) 为待判断像素点的五维特征向量；d_{lab} 为像素点间的颜色差异；d_{xy} 为像素点间的空间距离；D 为2像素的相似度；S 为种子点的间距；m 为平衡参数，用来控制颜色属性与空间属性在相似度计算中的比重。D 取值越小，说明2像素越相似。

为了提高计算效率和超像素的聚类精度，通常只在以种子点为中心的 $2S\times2S$ 的范围内对影像像素进行相似度判断。

3）后续处理。SLIC算法有时会使属于同一标签的超像素内的像素不连通，会产生一些孤立的像素。对于孤立的像素，通常将其分配到与其空间距离最近的种子点所在的超像素内，消除孤立的像素。

基于SLIC生成超像素后，计算每个超像素内包含的像素光谱属性均值，进而将光谱属性均值赋值于该超像素所包含的每个像素，实现对影像的光滑处理。本文的实验数据为经融合后的包含3波段的遥感影像，3波段分别作为 R、G、B 波段，则对影像光滑处理的计算公式如下。

$$R_s=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}R_k\ G_s=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}G_k\ B_s=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}B_k \tag{4}$$

$$R_k=R_s\ G_k=G_s\ \ B_k=B_s\ （k=0、1、2\ .....\ n） \tag{5}$$

式中，R_s、G_s、B_s 为超像素的光谱属性值；R_k、G_k、B_k 为超像素包含像素的光谱属性值；n 为超像素包含像素的个数。

1.2　影像边缘检测

1986年Canny提出优良的边缘检测算法[11-12]该算法的具体步骤如下：

1）图像平滑处理。基于二维高斯函数对图像进行平滑，二维高斯函数计算如下：

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\delta^2}\exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}\right] \tag{6}$$

式中，δ 为高斯滤波器变量，用于控制图像的平滑程度。当 δ 越小时，滤波器的边缘定位精度越高，但结果的信噪比越低，反之依然。因此，通常需要根据不同图像状态，选择不同的高斯滤波器变量值。

2）图像梯度幅值和方向计算。对于高斯平滑后的图像，基于一阶微分算子计算各点的梯度幅值和方向，进而获得梯度幅值图像 G 和梯度方向图像 θ。其中图像中点 $I(i,j)$ 处两方向的偏导数 $G_x(i,j)$ 和 $G_y(i,j)$ 计算如下。

$$G_x(i,j)=(I(i,j+1)-I(i,j)+I(i+1,j+1)-I(i+1,j))/2 \tag{7}$$

$$G_y(i,j)=(I(i,j)-I(i+1,j)+I(i,j+1)-I(i+1,j+1))/2 \quad (8)$$

则点 $I(x,y)$ 处梯度幅值和方向分别为：

$$G(i,j)=\sqrt{G_x^2(i,j)+G_y^2(i,j)} \quad (9)$$

$$\theta(i,j)=\arctan\left[\frac{G_x(i,j)}{G_y(i,j)}\right] \quad (10)$$

3）图像进行非极大值抑制。通过非极大值抑制算法对梯度幅值图像进行细化处理，只保留幅值图像中的局部极大值，实现精确的图像边缘定位。具体处理过程为：以梯度幅值图像的点 $I(i,j)$ 为中心的3×3邻域内沿梯度方向进行计算，若其梯度幅值大于沿梯度方向上相邻的2个点的梯度幅值，则认为该点是后续边缘点，反之为非边缘点，则获得候选边缘图像。

4）检测和连接边缘。基于双阈值算法对候选边缘图像进行边缘检测，其中需要设定高阈值 Th 和低阈值 Tl。在候选边缘图像中，如果像素的梯度幅值大于高阈值，则该点一定为边缘点；如果像素的梯度幅值小于低阈值，则该点一定为非边缘点；对于处于两者之间的像素点，如果其与边缘点相邻，则该点也认为是边缘点，否则为非边缘点；进而获得最终的图像边缘检测结果。

由于高分辨率遥感影像中噪声及“同物异谱、异物同谱”现象造成影像中伪梯度变化现象对影像边缘检测的影响，传统的基于高斯平滑后对影像进行边缘检测难以得到理想的边缘检测结果，则本文在上述用SLIC算法对影像光滑处理的基础上，从Canny边缘检测算法中的第二步开始进行影像的边缘检测与提取。该处理可以有效地消除影像中噪声及“同物异谱、异物同谱”现象造成影像中伪梯度变化现象对影像边缘检测的影响。

1.3 影像边缘检测结果光滑处理

经Canny边缘检测算法检测和提取出的边缘线存在不光滑、断裂等现象，基于此问题对提取出的边缘线进行光滑处理。$P(i,j)$ 为Canny边缘检测算法提取出的边缘线中边缘点，将点 $P(i,j)$ 八邻域内的点都作为边缘点，循环处理完Canny边缘检测算法提取出的所有边缘点，消除边缘线中的不光滑、断裂等现象，进而获得光滑且连通性良好的图像边缘线。

1.4 边缘线中骨架线提取

经光滑处理后的边缘线光滑且连通性良好，但边缘线存在冗余现象。影像边缘检测的目的是得到光滑、连通、细化且定位准确的边缘线，需要对光滑处理后的边缘线进行细化处理提取其中心骨架线。该算法基本思想为：将图像中边缘线上的像素点 P 值设为1，非边缘上的像素点 P 值设为0。在边缘线像素的3×3区域内。如果该像素同时满足相关条件，则从边缘线中剔除该像素，将其变为非边缘点，同时将该像素 P 值变为0。

对边缘线中每个像素重复这一过程，直到所有的点不可剔除为止，则得到边缘线的骨架线。

2 实验数据及评价准则

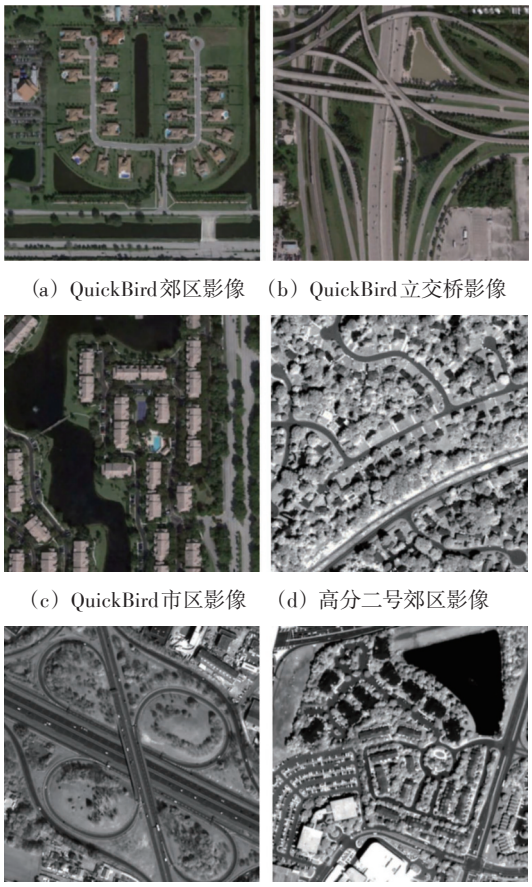
2.1 实验数据

本文中采用QuickBird和高分二号2种不同类型的遥感卫星影像对本文方法进行测试验证。其中3幅QuickBird多光谱影像为全色及红、绿、蓝多波段经PANSHARPEN融合后获得的，影像大小为512像素×512像素，各波段分辨率为0.61，如图1（a）、（b）、（c）。图1（a）为西棕榈滩市郊区影像，该影像中主要包括房屋、道路、湖泊、河流、树木和草地等地物。图1（b）为西棕榈滩市立交桥影像，该影像中主要包括交叉道路、树木、湖泊、和草地等地物。图1（c）为西棕榈滩市市区影像，该影像中主要包括房屋、道路、湖泊、树木和草地等地物。

三幅高分二号全色波段影像大小为512像素×512像素，影像分辨率为0.8 m，如图4（d）、（e）、（f）所示。图1（d）为高分二号郊区影像，该影像中主要包括道路、房屋、树木和草地等地物。图1（e）为高分二号立交桥影像，该影像中主要包括交叉道路、树木、房屋、和草地等地物。图1（f）为高分二号市区影像，该影像中主要包括房屋、道路、湖泊、树木和草地等地物。

2.2 评价准则

目前，遥感影像的边缘检测评价基本上以目视判别，与定量评价相结合的方法进行定性与定量评价。在本文中首先采用目视判别方法对本文方法边缘线提取结果进行定性评价。在定性评价的基础上，采用4–连通成分数 B、8–连通成分数 C 及 C/B 的比值，对本文方法的边缘连接程度进行定量评价。4–连通成分是指在边缘点的4–邻域内是否与它连通的像素，如果有把他们称为一个4–连通成分，同理8–连通成分指在边缘点的8–邻域内，如图2（a）、（b）所示。用数学归纳法证明得到 C/B 的值越小，边缘线的连接度越好，提取的边缘效果越好[13]。

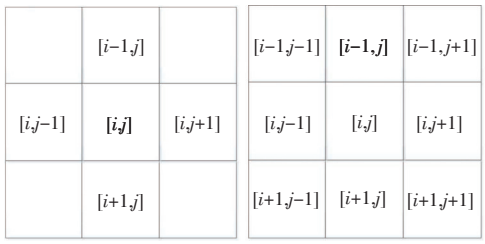


（a）QuickBird郊区影像　（b）QuickBird立交桥影像

（c）QuickBird市区影像　（d）高分二号郊区影像

（e）高分二号立交桥影像　（f）高分二号市区影像

图1　实验数据



（a）4−邻域内　（b）8−邻域内

图2　邻域范围

3　实验结果与分析

为了充分验证本文方法的有效性，使用QuickBird多光谱影像和高分二号全色影像对本文方法与经典的Sobel边缘检测算法、Canny边缘检测算法进行定性与定量对比评价。

3.1　QuickBird影像边缘检测

Sobel边缘检测算法、Canny边缘检测算法调整参数进行多次QuickBird影像边缘检测实验，采用目视判读的方式选择边缘检测效果最佳的实验结果与本文方法进行对比验证。其中，Canny边缘检测算法的低通阈值和高通阈值分别设置为0.5和0.8；本文方法的超像素数设置为900，低通阈值和高通阈值分别设置为0.5和0.52。

图3（a1）、（b1）、（c1）分别为图1（a）、（b）、（c）影像Sobel算法的边缘检测结果；由于高分辨率遥感影像中“椒盐”噪声的影响，Sobel算法的边缘检测产生了大量的伪边界，边缘检测效果较差。图3（a2）、（b2）、（c2）分别为图1（a）、（b）、（c）影像Canny算法的边缘检测结果；由于遥感影像中噪声及“同物异谱、异物同谱”现象造成的影像中伪梯度变化对Canny算法边缘检测的影响，实验结果中产生大量伪边界检测结果。图3（a3）、（b3）、（c3）分别为图1（a）、（b）、（c）影像本文方法的边缘检测结果，通过目视判别本文方法可以有效地消除影像噪声及“同物异谱、异物同谱”现象造成的影像中伪梯度变化对边缘检测的影响，基本上能完全提取影像中地物的真实边界，消除因伪梯度变化而造成的影像中伪边界的提取，获得良好的影像边缘检测结果。

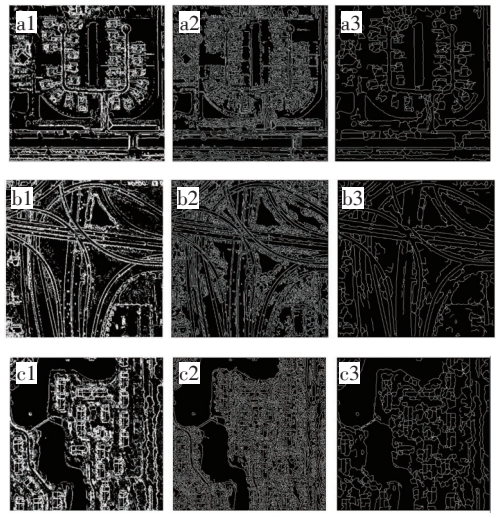


图3　实验结果

表1列出了Sobel算法、Canny算法和本文方法对3幅影像的实验结果的4−连通成分数、8−连通成分数及*C*/*B*的比值，在表1中Sobel算法对3幅影像的边缘检测结果的*C*/*B*值分别为0.555 4、0.600 4和0.552 1，Canny算法的*C*/*B*值分别为0.234 3、0.175 1和0.212 1，本文方法的*C*/*B*值分别为0.01、0.008 8和0.006 5。本文方法对3幅实验数据的边缘线检测结果的*C*/*B*值均小于Sobel算法和Canny算法对应影像的边缘线检测结果的*C*/*B*值，表明本文方法的边缘线检测结果比Sobel算法和Canny算法的边缘线检测结果有更好的连接程度，本文方法的边缘线检测结果优于Sobel算法和Canny算法。

3.2　高分二号全色影像边缘检测

Sobel边缘检测算法、Canny边缘检测算法调整参

表1 4-连通成分数、8-连通成分数及 *C/B* 比值

影像	Sobel算法			Canny算法			本文方法		
	B	*C*	*C/B*	*B*	*C*	*C/B*	*B*	*C*	*C/B*
郊区影像	2 501	1 389	0.555 4	744 9	174 5	0.234 3	280 6	28	0.010 0
立交桥影像	3 191	1 916	0.600 4	776 9	136 0	0.175 1	373 5	33	0.008 8
城镇影像	33 49	1 849	0.552 1	959 4	203 5	0.212 1	293 5	19	0.006 5

数进行多次高分二号全色影像边缘检测实验，采用目视判读的方式选择边缘检测效果最佳的实验结果与本文方法进行对比验证。其中，Canny边缘检测算法的低通阈值和高通阈值分别设置为0.5和0.8；本文方法的超像素数设置为1 500，低通阈值和高通阈值分别设置为0.5和0.52。

图4（a1）、（b1）、（c1）分别为图1（d）、（e）、（f）影像Sobel算法的边缘检测结果；由于影像中“椒盐”噪声的影响，Sobel算法的边缘检测产生了大量的伪边界，边缘检测效果较差。图4（a2）、（b2）、（c2）分别为图1（d）、（e）、（f）影像Canny算法的边缘检测结果；在图4（a2）、（b2）、（c2）的实验结果中，由于遥感影像中噪声及“同物异谱、异物同谱”现象造成的影像中伪梯度变化对Canny算法边缘检测的影响，实验结果中产生大量伪边界检测结果。图4（a3）、（b3）、（c3）分别为图1（d）、（e）、（f）影像本文方法的边缘检测结果；通过目视判别本文方法可以有效的消除影像噪声及“同物异谱、异物同谱”现象造成的影像中伪梯度变化对边缘检测的影响，基本上能完全提取影像中地物的真实边界，消除因伪梯度变化而造成的影像中伪边界的提取，获得良好的影像边缘检测结果。

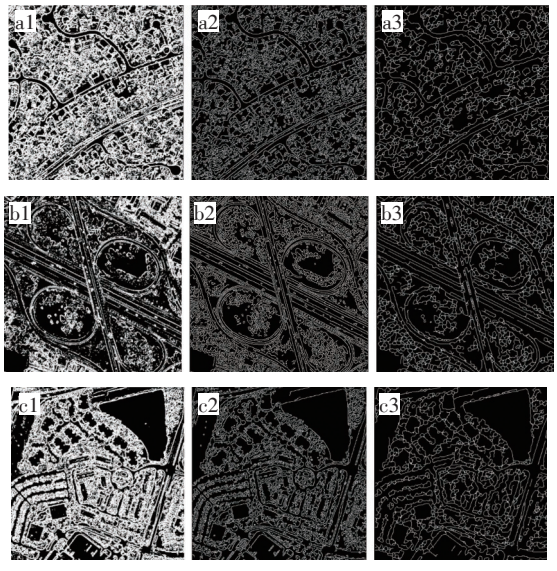


图4 实验结果

表2列出了Sobel算法、Canny算法和本文方法对3幅影像的实验结果的4-连通成分数、8-连通成分数及 *C/B* 的比值，在表2中Sobel算法对3幅影像的边缘检测结果的 *C/B* 值分别为0.43、0.357 2和0.539 3，Canny算法的 *C/B* 值分别为0.135 0、0.143 9和0.133 2，本文方法的 *C/B* 值分别为0.005 5、0.003 5和0.003 9。本文方法对3幅实验数据的边缘线检测结果的 *C/B* 值均小于Sobel算法和Canny算法对应影像的边缘线检测结果的 *C/B* 值，表明本文方法的边缘线检测结果比Sobel算法和Canny算法的边缘线检测结果有更好的连接程度，本文方法的边缘线检测结果优于Sobel算法和Canny算法。

表2 4-连通成分数、8-连通成分数及C/B比值

影像	Sobel算法			Canny算法			本文方法		
	B	*C*	*C/B*	*B*	*C*	*C/B*	*B*	*C*	*C/B*
郊区影像	893	384	0.430 0	611 0	825	0.135 0	440 2	24	0.005 5
立交桥影像	1 534	548	0.357 2	730 4	105 1	0.143 9	570 6	20	0.003 5
城镇影像	3 922	2115	0.539 3	863 2	115 0	0.133 2	615 2	24	0.003 9

3.3 本文方法消融实验

使用图1中3幅QuickBird影像和3幅高分二号全色影像对本文方法进行消融实验，实验结果如表3所示。在表3中，Baseline表示本文方法未进行SLIC超像素光滑处理的边缘线检测结果，SLIC + Baseline表示本文方法基于SLIC超像素光滑后的边缘线检测结果。在表3中，6幅影像Baseline的 *C/B* 值分别为0.034 6、0.028 9、0.029 5、0.019 2、0.029 8和0.022 1，SLIC + Baseline的 *C/B* 值分别为0.010 0、0.008 8、0.006 5、0.005 5、0.003 5和0.003 9。实验结果表明使用SLIC超像素对影像进行光滑处理后，影像的边缘线检测结果有了明显的提升，进而证明SLIC超像素对影像

光滑处理可有效抑制影像噪声和“同物异谱、异物同谱”现象对影像边缘线检测的影响，获得精度更高的影像边缘线检测结果。

表3 本文方法消融实验定量分析

范围	Baseline			SLIC + Baseline		
	B	*C*	*C/B*	*B*	*C*	*C/B*
图2（a1）	2 890	100	0.034 6	2 806	28	0.010 0
图2（a2）	3 396	98	0.028 9	3 735	33	0.008 8
图2（a3）	2 849	84	0.029 5	2 935	19	0.006 5
图3（a1）	4 741	91	0.019 2	4 402	24	0.005 5
图3（a2）	3 895	116	0.029 8	5 706	20	0.003 5
图3（a3）	3 660	81	0.022 1	6 152	24	0.003 9

利用本文方法在SLIC超像素影像光滑前后对比6幅影像的边缘线检测结果，SLIC + Baseline的检测结果优于Baseline，可获得地物边缘依附良好、光滑和单

像素响应的边缘线检测结果。

4 结 语

高分辨率遥感影像边缘线检测与提取作为影像信息提取与分析的关键环节，针对影像边缘线提取时易受影像噪声和影像中“同物异谱、异物同谱”现象的影响，产生大量伪边缘提取线的问题，本文提出一种融合超像素与Canny算子的高分辨率遥感影像边缘检测方法。该方法首先利用SLIC超像素良好依附地物边缘线的特点，用超像素对影像进行光滑处理，消除影像噪声及“同物异谱、异物同谱”现象对边缘提取的影响。其次，通过Canny算法和骨架线提取算法对光滑后的影像进行边缘线检测，获得地物边缘依附良好、光滑和单像素响应的边缘线检测结果。基于多组不同类型影像数据对本文方法与经典的边缘线检测算法进行定性与定量对比评价，实验结果表明本文方法的边缘线检测结果均优于其他算法。下一步将在本文方法的边缘线检测结果应用于影像分割、目标检测等方面开展研究，进一步验证本文方法的有效性。

参考文献

[1] 陆双,杨柳. 利用珞珈一号提取城市建成区的方法对比分析[J]. 地理空间信息,2024,22(3):34-37

[2] Dong Z,Liu Y,Xu W,et al. A Cloud Detection Method for GaoFen-6 Wide Field of View Imagery Based on the Spectrum and Variance of Superpixels[J]. International Journal of Remote Sensing,2021,42(16):6 315-6 332

[3] Jing J,Liu S,Wang G,et al. Recent Advances on Image Edge Detection:A Comprehensive Review[J]. Neurocomputing,2022,503:259-271

[4] Wang J,Yang C,Sun C. A Novel Algorithm for Edge Detection of Remote Sensing Image Based on CNN and PSO[C]// IEEE International Congress on Image and Signal Processing,2009:1-5

[5] 胡欢,苏勤龙,谭春林,等. 遥感影像解译在土地监管项目中的应用[J]. 地理空间信息,2023,21(7):71-73

[6] 董志鹏,王密,李德仁,等. 遥感影像目标的尺度特征卷积神经网络识别法[J]. 测绘学报,2019,48(10):1 285-1 295

[7] Kittler J. On the Accuracy of the Sobel Edge Detector[J]. Image and Vision Computing,1983,1(1):37-42

[8] Tai S C,Yang S M. A Fast Method for Image Noise Estimation Using Laplacian Operator and Adaptive Edge Detection[C]//IEEE International Symposium on Communications,Control and Signal Processing,2008:1 077-1 081

[9] 吕哲,王福利,常玉清. 一种改进的Canny边缘检测算法[J]. 东北大学学报自然科学版,2007,28(12):1 681-1 684

[10] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1986,8(6):679

[11] 刘丽霞,李宝文,王阳萍,等. 改进Canny边缘检测的遥感影像分割[J]. 计算机工程与应用,2019,55(12):54-58

[12] 吴俐民,於雪琴,黄亮. FCM聚类算法协同Canny算子的遥感影像边缘检测方法[J]. 测绘工程,2014,23(12):1-4

[13] 蒋科迪,殷勇,范开桂,等. 基于Canny算子的南通江海岸线研究[J]. 测绘通报,2019(10):83-88

[14] 闫野. 基于边缘约束的高分辨率遥感影像分割算法研究[J]. 测绘与空间地理信息. 2023,46(7):89-92

[15] 何斌. Visual C++数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社,2002

（上接第113页）

1 477

[6] 侯雪,张献志,叶远斌. 基于GDCORS的北斗终端高精度定位算法实现及性能分析[J]. 地理空间信息,2024,22(8):72-75

[7] 许智理,闫倬豪,李星星,等. 面向智能驾驶的高精度多源融合定位综述[J]. 导航定位与授时,2023,10(3):1-20

[8] 来奇峰,袁洪,魏东岩,等. 基于场景检测的城市环境GNSS/INS组合定位方法研究[J]. 导航定位与授时,2021,8(1):151-162

[9] 别秭锟,王鑫宇,刘万科. 城市动态场景GNSS信号特征及其对NLOS自主识别影响分析[J]. 测绘地理信息,2025,50(2):83-88

[10] 邵梦杨,郭磊,王甫红. 城市典型环境下单频导航型GNSS接收机多路径误差特性分析[J]. 测绘通报,2018(9):1-7

[11] Pei X,Zhao Y,Chen L,et al. Robustness of Machine Learning to Color,Size Change,Normalization,and Image Enhancement on Micrograph Datasets with Large Sample Differences[J]. Materials&Design,2023,232:112 086

[12] Zhu F,Luo K,Tao X,et al. Deep Learning Based Vehicle-Mounted Environmental Context Awareness Via GNSS Signal[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,25(2 024):9 498-9 511

[13] Hochreiter S. Long Short-term Memory[J]. Neural Computation MIT-Press,1997,9(8):1 735-1 780

[14] 胡贤贤. 基于智能手机的室内外场景识别系统研究与实现[D]. 徐州:中国矿业大学,2021