

文章编号: 2095-2163(2023)09-0116-07

中图分类号: TP391

文献标志码: A

# 改进 Canny 的无人机影像边缘检测算法研究

王 辉, 王晓红, 周润民, 苏 靖

(贵州大学 矿业学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 针对经典 Canny 算法在边缘检测中存在的无法去除椒盐噪声、边缘误判以及无法形成闭合区域的问题, 本文构建一种基于各向异性扩散的自适应 Canny 无人机影像边缘检测算法。首先, 将自适应中值滤波和各向异性扩散相结合, 在去噪的同时有效地保留了边界信息; 其次, 运用 4 方向的 Sobel 模板, 计算梯度幅值和梯度方向; 最后, 为了避免阈值选取不当, 采用逻辑与运算自适应获取阈值并得到边缘图像。选取两幅无人机影像进行试验, 并将本文算法和几种常用算法进行对比分析, 试验结果表明本文算法在有效去除椒盐噪声的同时, 提高了边缘检测的完整性和连续性, 进一步实现了影像的自动化处理, 对无人机影像边缘检测结果的定性和定量评价也验证了本文算法的可行性。

**关键词:** Canny 算法; 自适应中值滤波; 各向异性扩散; 无人机影像; 边缘检测

## Research on improvement of Canny edge detection algorithm in UAV image

WANG Hui, WANG Xiaohong, ZHOU Runmin, SU Jing

(College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** Aiming at the problems of classical Canny algorithm in edge detection, which cannot remove pretzel noise, edge misjudgment and cannot form a closed region, this paper constructs an adaptive Canny UAV image edge detection algorithm based on anisotropic diffusion. Firstly, adaptive median filtering and anisotropic diffusion are combined to effectively retain the boundary information while denoising; secondly, a 4-directional Sobel template is applied to calculate the gradient amplitude and gradient direction; finally, to avoid improper threshold selection, logic and operation are used to adaptively obtain the threshold and get the edge image. Two UAV images are selected for experiments, and the algorithm of this paper is compared and analyzed with several commonly used algorithms. The experimental results show that the algorithm of this paper improves the integrity and continuity of edge detection while effectively removing the pepper noise, further realizing the automated processing of images, and the qualitative and quantitative evaluation of the edge detection results of UAV images also verifies the feasibility of the algorithm of this paper.

**[Key words]** Canny algorithm; adaptive median filter; anisotropic diffusion; UAV image; edge detection

## 0 引言

近年来,随着测绘装备的更新和发展,地理数据的获取方式越来越多样化。由于无人机采集数据灵活、高效、安全且成本低,无人机影像成为地理数据获取的一种主要方式<sup>[1-2]</sup>。影像中富含丰富的场景信息,对无人机影像中的目标区域进行边缘检测和提取,是无人机数据应用与信息挖掘中的一项重要工作<sup>[3]</sup>。目前常用的边缘检测算法主要分为两类:差分法和深度学习法<sup>[4]</sup>。差分法是通过计算梯度

来检测边缘信息,常见的梯度算子包括一阶差分算子如 Sobel、Prewitt 和 Roberts 等,二阶差分算子如 Laplace、LOG 以及 Canny,这些算子原理简单、容易实现,但抗干扰性能差、提取边缘不够精确。尽管如此,Canny 算子凭借其较好的信噪比和检测精度被广泛应用<sup>[5]</sup>。基于深度学习的边缘检测算法利用神经网络的分层特征来提高检测精度,Hu 等<sup>[6]</sup>使用距离场卷积神经网络(DF-CNN)预测非边缘点到边缘点的欧式距离,实现了端到端的目标边缘检测;黄胜等<sup>[7]</sup>通过图像分割子网络将学习到的图像语

**基金项目:** 国家自然科学基金(41901225);贵州省省级科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般 204);教育部规划基金项目(22YJAZH083)。

**作者简介:** 王 辉(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:遥感图像处理;王晓红(1970-),男,博士,副教授,主要研究方向:3S 技术与遥感图像处理。

**通讯作者:** 王晓红 Email: xhwang@gzu.edu.cn

**收稿日期:** 2022-10-23

义信息传递给边缘检测子网络,提出一种语义信息指导的精细化边缘检测方法。但此类方法需要大量的训练样本,且模型复杂,对硬件设备要求高;而差分算法无需训练,可在低成本的移动设备上实时运行。为此,本文保留经典 Canny 算法的高定位性能和单边缘响应准则的基础上,针对经典算法无法去除椒盐噪声和阈值设置不灵敏的缺陷,构建一种自适应的无人机影像地物边缘检测算法。

## 1 Canny 边缘检测算法及其原理

Canny 边缘检测算法的基本思想是利用二维高斯函数与灰度图像进行卷积,找出滤波后图像的局部最大梯度值,选取合适的阈值得到图像的边缘<sup>[8]</sup>。经典 Canny 算法在平滑图像的过程中选取的二维高斯函数,式(1):

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中,参数  $\sigma$  需要根据经验人为设定。

如果参数值过小,则不能有效滤除噪声,导致滤波效果不佳;反之则会对图像造成过度平滑,导致部分边缘信息丢失。且通过计算水平和竖直两个方向的偏导数来获取梯度值时,由于导数计算对噪声非常敏感,只从两个方向获取边缘容易出现伪边缘和边缘漏检的现象。算法的高低阈值需要人为设置,在处理不同的图像时,固定的阈值并不能使每一幅图像都达到最佳效果,算法的自适应能力差。因此,许多研究者基于 Canny 算子提出一系列改进算法,刘丽霞等<sup>[9]</sup>针对经典 Canny 中高斯滤波在平滑图像时边缘模糊这一问题,用引导滤波去噪,并改用大津法自适应选取双阈值,提高了 Canny 算法的定位精度和鲁棒性;陈顺等<sup>[10]</sup>针对遥感影像含有大量混合噪声,利用非下采样轮廓波变换将影像分解,采用高斯滤波对各分量去噪,对重构后的影像结合顶帽变换和改进的 Canny 算子进行边缘检测,可以最大程度的保留遥感影像的真实边缘;马为駟等<sup>[11]</sup>构建了一种混合滤波器对含噪的遥感影像进行滤波,针对去噪后的影像,利用 Canny 算子进行边缘检测,提升了影像配准和识别的精度。尽管大量研究者提出了不同的改进算法,但仍然没有在去噪和保边上两者兼顾,且由于阈值设置不当,导致检测封闭地物时精度不高。

## 2 改进的 Canny 边缘检测算法

本文引进自适应各向异性扩散滤波来代替高斯

滤波对无人机影像进行平滑去噪,为了检测到更多的边缘细节,利用 Sobel 模板从 4 个方向求一阶偏导数,并根据影像本身信息自适应获取双阈值来提高边缘检测精度。本文算法流程如图 1 所示。

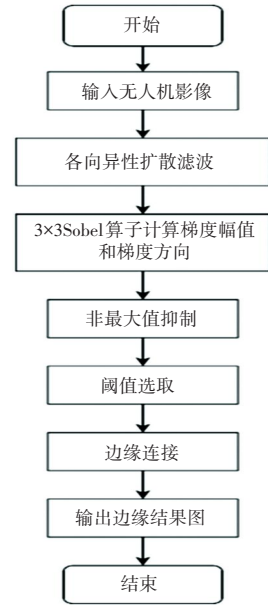


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart of this paper

### 2.1 各向异性扩散滤波

各向异性扩散,也称 PM 扩散,同高斯滤波、中值滤波一样,是一种以热扩散方程为基础的滤波算法。该算法在去噪的同时提高了保留边缘细节的能力,已被应用于图像处理领域。设  $I = \{I_{i,j}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n\}$  为原始无人机影像,其中  $(i, j)$  表示像素位置; $m$  和  $n$  分别为影像的行列数。根据影像中当前位置的像元和相邻 4 个像元之间的关系,按照式(2)向水平和垂直两个方向扩散。

$$I_{i,j}^{t+1} = I_{i,j}^t + \lambda [c_{i+1,j}^t (I_{i+1,j}^t - I_{i,j}^t) + c_{i-1,j}^t (I_{i-1,j}^t - I_{i,j}^t) + c_{i,j+1}^t (I_{i,j+1}^t - I_{i,j}^t) + c_{i,j-1}^t (I_{i,j-1}^t - I_{i,j}^t)] \quad (2)$$

其中,  $\lambda$  是常数,用于衡量扩散速度; $t$  表示迭代次数; $c$  是一个关于梯度图像单调递减的扩散系数,需要人为设定,主要用来判断是否对阈值内的图像进行扩散。

原始影像在 PM 扩散时,影像边缘区域的梯度值较大,因此相应的扩散强度较小,从而达到保护边缘信息的目的;非边缘区域梯度值较小,因此其扩散强度相对较大,具有较好的抗噪性。但是当影像在强噪声的干扰下,利用差分法计算梯度无法排除强噪声的干扰,导致强噪声处的梯度值甚至可以超过

边缘处的梯度值,此时该方法不能有效的区分噪声和边界信息,而且扩散系数和迭代次数需要人为设置,算法的自适应性差。

目前,很多学者针对传统 PM 算法的缺点进行改进,如 Catte-PM 算法在使用各项异性扩散之前对影像进行高斯滤波,防止噪声的干扰<sup>[12]</sup>。但是在计算梯度模之前使用高斯滤波,虽然抑制了噪声,同时也会弱化边缘信息,加大了边缘提取的难度。因此,本文采用自适应中值滤波(Adaptive Median Filter, AMF)算法平滑后的梯度模代替原始梯度模,在去除椒盐噪声的同时最大程度地保留了影像的细节信息,使边缘信息更完整,具有较好的影像复原效果。对于扩散系数  $c$ , 本文根据影像的梯度信息和局部标准差进行自动计算。以影像的任一像素点为中心,其  $3 \times 3$  大小的正方形区域内的灰度均值为  $M(x, y)$ , 用式(3)表示:

$$M(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{i=x-1}^{x+1} \sum_{j=y-1}^{y+1} f(i, j) \quad (3)$$

进而可以求出局部标准差  $\sigma(x, y)$ , 式(4):

$$\sigma(x, y) = \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{i=x-1}^{x+1} \sum_{j=y-1}^{y+1} [f(i, j) - M(x, y)]^2} \quad (4)$$

影像的边界区域内各像素点的平均值与像素灰度值相差较大,因而局部标准差也会很大;而非边界区域各像素点的平均值与像素灰度值很接近,因而局部标准差变化不大。通过标准差和梯度信息相结合就可以获得自适应的扩散系数,式(5):

$$c = \exp[-\sigma(x, y) |\nabla f(x, y)|] \quad (5)$$

在 PM 扩散中引入原始影像和滤波影像之间的

边缘相似性  $\beta$  来控制其迭代过程,其定义为式(6):

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta I_f - \overline{\Delta I_f}) (\Delta I_g - \overline{\Delta I_g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta I_f - \overline{\Delta I_f})^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta I_g - \overline{\Delta I_g})^2}} \quad (6)$$

其中,  $\Delta I_f$  和  $\Delta I_g$  分别表示原始影像和滤波影像的边缘图像,  $\overline{\Delta I_f}$  和  $\overline{\Delta I_g}$  分别为  $\Delta I_f$  和  $\Delta I_g$  的均值。

当迭代满足式(7)时,迭代终止,获得相应的滤波影像。

$$\frac{|\beta^{(t)} - \beta^{(1)}|}{\beta^{(1)}} \leq \varepsilon \quad (7)$$

式中  $\varepsilon$  越小,影像越平滑,相应的边缘信息损失越多,本文取  $\varepsilon = 0.2$  时可得到较好的滤波效果。

无人机影像获取过程中,光照、阴影等外界因素会使影像产生噪声<sup>[13]</sup>。改进后的 PM 算法不仅降低了椒盐噪声的影响,且能确保边界信息的完整性,同时使得算法减少了人为干预,更进一步实现了影像的自动化处理,有利于后续的边缘检测。

## 2.2 $3 \times 3$ Sobel 模板计算梯度幅值及方向

经典 Canny 算法中利用  $2 \times 2$  邻域大小的 Sobel 算子计算梯度幅值,边缘检测准确性低,且抗干扰能力较差<sup>[14]</sup>。为了获取更多的边缘信息,本文利用  $3 \times 3$  邻域大小的 Sobel 梯度模板,从  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  以及  $135^\circ$  4 个方向分别计算一阶偏导数,并对各个方向的权值进行归一化处理。Sobel 梯度模板如图 2 所示。

-1	-2	-1	-2	-1	0	-1	0	1	0	1	2
0	0	0	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1
1	2	1	0	1	2	-1	0	1	-2	-1	0
0°方向			45°方向			90°方向			135°方向		

图 2 Sobel 算子梯度模板

Fig. 2 Sobel operator gradient template

将滤波后影像和上述模板进行卷积操作得到 4 个方向的梯度值。为了保证其抗干扰性,将 4 个方向的梯度值按式(8)投影到水平和垂直方向:

$$\begin{cases} F_x(i, j) = F_{0^\circ}(i, j) + \frac{\sqrt{2}}{2} F_{45^\circ}(i, j) + \frac{\sqrt{2}}{2} F_{135^\circ}(i, j) \\ F_y(i, j) = F_{90^\circ}(i, j) + \frac{\sqrt{2}}{2} F_{45^\circ}(i, j) + \frac{\sqrt{2}}{2} F_{135^\circ}(i, j) \end{cases} \quad (8)$$

进而得到当前像素的梯度幅值和梯度方向,式(9)和式(10):

$$F(i, j) = \sqrt{F_x(i, j)^2 + F_y(i, j)^2} \quad (9)$$

$$\theta(i, j) = \arctan\left(\frac{F_y(i, j)}{F_x(i, j)}\right) \quad (10)$$

计算梯度幅值和方向时综合考虑当前像素点八邻域内 4 个方向的梯度值,使影像边缘定位更加准确,也极大地减少边缘漏检的现象。

### 2.3 基于迭代法和最大熵法自适应获取阈值

经过非最大值抑制后得到的影像边缘较粗略,需要根据高、低阈值来进一步判断粗略边缘上的点是否为边缘点。高、低阈值的设置直接关系到边缘检测的精度,是边缘提取的关键<sup>[15]</sup>。经典Canny边缘检测算法需要人为设置双阈值,若阈值设置过高,可能导致边缘线断裂甚至缺失;若阈值设置过低,则容易造成边界误判。合适的阈值不仅能抑制噪声,还能减少伪边缘的产生。为了尽可能保留边缘细节以及有效抑制伪边缘,本文采用迭代法和最大熵法(MEN)自适应获取高、低阈值。迭代法的基本思想是按图像的灰度性质选择一个阈值 $T_1$ 作为初始阈值,给定规则更新阈值直到达到最优效果为止;MEN基于信息熵的定义,求解阈值 $T_2$ ,使目标和背景的分布均匀程度最佳,即两类的信息熵之和最大,其基本思想是遍历图像的灰度级找到一个阈值 $T_2$ ,按图像的信息熵分为目标 $H_1$ 和背景 $H_2$ 两部分,当这两部分的信息熵之和最大时,说明图像目标与背景的像素分布最均匀,此时 $T_2$ 为最佳分割阈值。具体步骤如下:

#### (1) 迭代法自适应获取双阈值

取非最大值抑制后影像的平均灰度值为初始阈值 $T_1$ ,分别计算阈值 $T_1$ 分割出两部分的平均灰度值,并将两部分的平均值作为新的阈值,比较新阈值和 $T_1$ 之间的大小,若两差值的绝对值小于某个特定值,则将新阈值作为最优阈值 $T_1$ 输出,否则将新阈值赋给 $T_1$ 重新计算,直到满足条件得到最优阈值 $T_1$ 。

#### (2) MEN法自适应获取双阈值

在0~255之间取 $T_2$ ,分别计算目标类和背景类的信息熵,如式(11)和式(12):

$$H_1 = - \sum_{i=1}^{T_2} \frac{p_i}{p_i} \ln \frac{p_i}{p_i} \quad (11)$$

$$H_2 = - \sum_{i=T_2+1}^L \frac{p_i}{1-p_i} \ln \frac{p_i}{1-p_i} \quad (12)$$

$$\text{其中, } p_i = \sum_{i=1}^{T_2} p_i.$$

求解使得两个区域的信息熵之和最大时的 $T_2$ 作为MEN阈值。

针对非最大值抑制后的影像,分别利用迭代法和MEN法获取最佳阈值 $T_1$ 和 $T_2$ 作为边缘提取的高阈值,低阈值取高阈值的二分之一。

### 2.4 边缘连接

迭代法和MEN法确定高、低阈值后,像素值高于高阈值的点被判定为边缘点,低于低阈值的点被判定为非边缘点,对于介于高低阈值之间的像素点

分析其八邻域像素,有一个点满足边缘点的条件就将其判定为边缘点,并将边缘点连接<sup>[16]</sup>。基于迭代法自适应获取阈值后得到的边缘图像为 $F_1$ ,基于MEN法自适应获取阈值后得到的边缘图像为 $F_2$ ,根据图像的逻辑运算,将二值图像 $F_1$ 和 $F_2$ 同一点的像素灰度值设为 $h_1(i,j)$ 和 $h_2(i,j)$ , $h(i,j) \in [0, 1]$ ,并将两者进行逻辑与运算,对应图的灰度值全为1时,输出为1;否则输出为0,得到融合后的边缘图像。对最终的边缘图像进行形态学闭运算,改善边缘轮廓的完整性和连续性。

## 3 实验结果和对比分析

本文基于Windows10系统环境下Matlab R2018a平台进行两组实验。实验数据均选取由大疆经纬M300搭载P1镜头拍摄的无人机影像,影像一主要地物为道路,影像二主要为建筑物。通过定量和定性分析,验证本文构建的改进Canny边缘检测算法的可行性。

### 3.1 滤波结果及分析

为验证本文改进滤波算法的有效性,将本文算法和高斯滤波、中值滤波、PM扩散滤波比较。PM算法中的参数 $\lambda$ 取经验值0.125。在影像中加入混合噪声,无人机影像滤波结果如图3所示。

由图3可知,当在原图中加入0.1的椒盐噪声和标准差为0.01的高斯噪声时,不难看出高斯滤波和中值滤波无法去除混合噪声,且高斯滤波使影像边缘变得模糊,视觉效果较差;PM滤波在平滑过程中更好地保留了图像的边缘信息,但在平滑处出现去噪不彻底的问题;本文改进的滤波算法有效克服了上述缺点,在平滑图像和保留边缘细节方面都有较好的表现。

为了进一步客观的比较各算法的性能,本文选用峰值信噪比(PSNR)和边缘保持指数(EPI)评价算法的去噪效果和边缘保持能力。PSNR值越大表示去噪效果越好;EPI值越大代表边缘保持能力越好,PSNR和EPI的计算公式为式(13)和式(14):

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [g(i,j) - f(i,j)]^2} \quad (13)$$

$$EPI = \frac{\sum (|f(i,j) - f(i+1,j)| + |f(i,j) - f(i,j+1)|)}{\sum (|g(i,j) - g(i+1,j)| + |g(i,j) - g(i,j+1)|)} \quad (14)$$

其中, $g(i,j)$ 为滤波后影像; $f(i,j)$ 为原始影像; $m,n$ 分别代表影像的行列数。

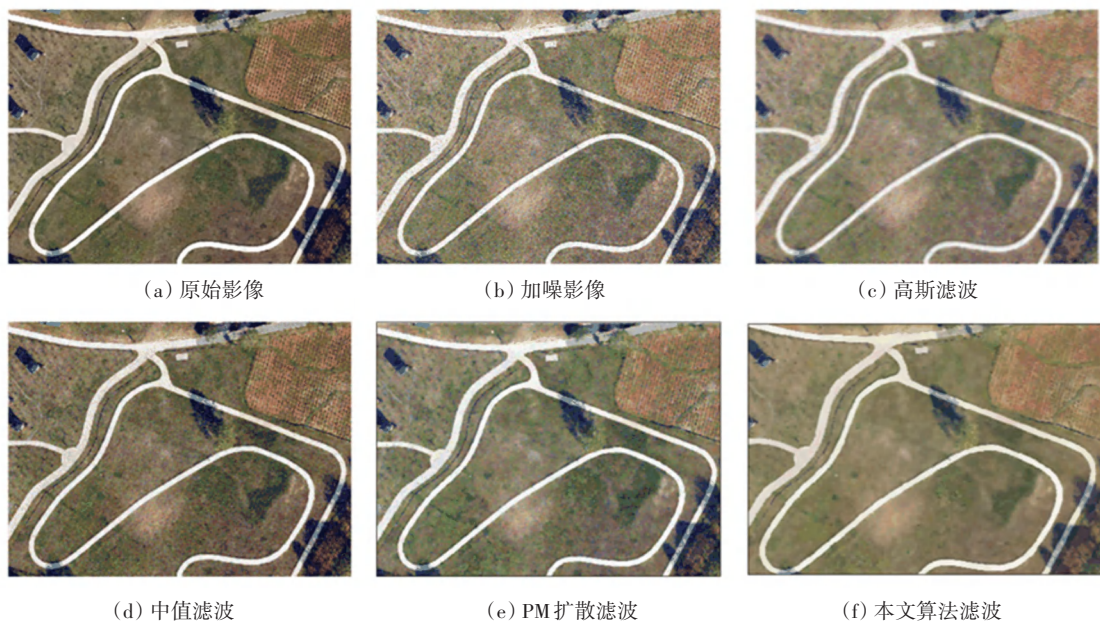


图3 无人机影像滤波结果

Fig. 3 Filtering results of UAV images

4种滤波算法的性能对比结果见表1。前两种方法在去噪和边缘保持两方面不能兼顾,本文算法的峰值信噪比和边缘保持能力均高于其他方法。

表1 4种滤波算法的性能比较

Tab. 1 Performance comparison of four filtering algorithms

滤波方法	PSNR/ db	EPI
高斯滤波	31.962 4	0.537 2
中值滤波	30.413 3	0.587 7
PM滤波	34.170 1	0.628 5
本文改进的滤波算法	37.989 6	0.719 8

### 3.2 边缘检测结果及分析

由于地物光谱特征的差异,无人机影像中每个波段所突出的重点不一样。为了充分利用影像的多光谱信息,本文将无人机影像分解为R、G、B 3个波段,逐波段检测影像的边缘信息,最后通过波段叠加把多个波段的边缘信息集中在一幅影像,提高边缘检测的精度。采用传统 Sobel 算子、Canny 算法、

Otsu+改进canny 算法以及本文改进算法分别对两幅影像进行边缘检测,通过人眼观察和定量分析验证本文算法的可行性。原始影像边缘检测结果如图4和图5所示。由图4和图5可知,使用Sobel算子和经典Canny边缘检测算法能大致检测出道路的边缘,但影像边缘定位能力较差,对于地物相对复杂的影像二没完全检测出建筑物边缘,边缘漏检现象严重;Otsu+改进canny边缘检测算法相对前两种方法检测结果较好,但是由于影像经过非最大值抑制后,梯度值相对集中,阈值选取不当,导致影像边缘存在断裂和缺失的现象,尤其是两排建筑物中间的道路;而本文算法能检测出完整的边缘,建筑物呈封闭状态且定位精度较高。

为在原始影像中添加5%椒盐噪声的边缘检测结果如图6和图7所示。从图6和图7可以明显看出,前两种方法受噪声干扰影响较大,几乎检测不到边缘信息;Otsu+改进canny算法和本文算法受噪声干扰小,但是本文算法边缘判断更准确,连续性较好。

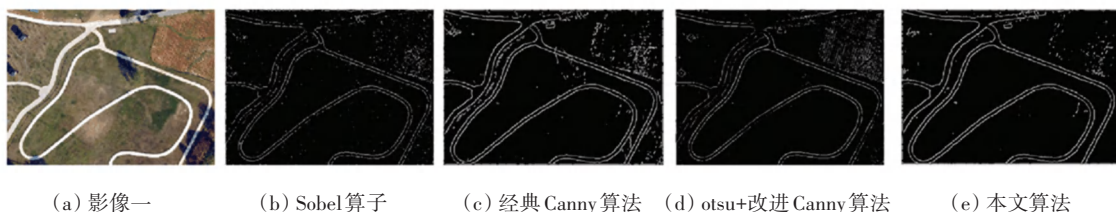


图4 原始影像一边缘检测结果

Fig. 4 Edge detection result of original image I

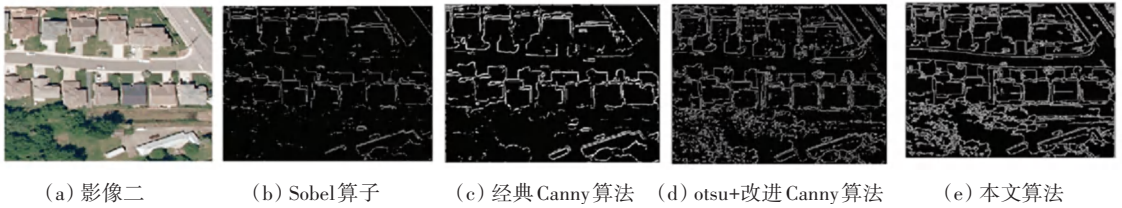


图 5 原始影像二边缘检测结果

Fig. 5 Edge detection result of original Image II

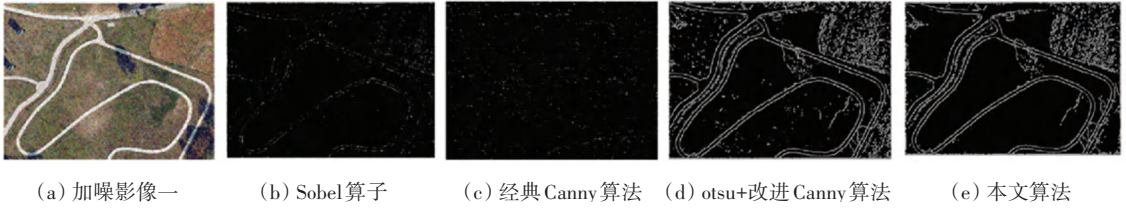


图 6 加噪影像一边缘检测结果

Fig. 6 Edge detection result of noise image I

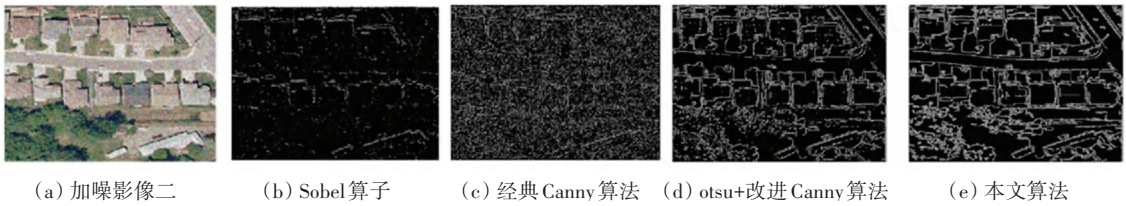


图 7 加噪影像二边缘检测结果

Fig. 7 Edge detection result of noise image II

为了验证算法的通用性和定性分析的可靠性,对影像一和影像二在无噪声和有噪声干扰下,采用 *PSNR* 评价边缘检测效果, *PSNR* 值越大表示图像失真越少,边缘检测能力越好。评价结果对比见表 2。由表 2 可知,本文算法利用自适应中值滤波改进各向异性扩散进行去噪,结合迭代法和 MEN 法自适应获取双阈值,减少了影像边缘误判和漏检现象, *PSNR* 值均高于文中所提的其他算法。

表 2 边缘检测算法 *PSNR* 值结果表

Tab. 2 *PSNR* value result table of edge detection algorithm

图名	Sobel	Canny 算法	Otsu+改进 canny 算法	本文算法
影像一	21.096 0	22.196 4	26.638 9	29.099 9
加噪影像一	19.708 6	19.387 0	22.352 3	27.757 2
影像二	20.092 1	21.397 5	25.607 4	29.068 3
加噪影像二	17.013 2	16.625 0	24.068 7	26.072 8

### 4 结束语

本文从无人机影像的本身特征出发,充分利用了影像的多光谱信息,在经典 Canny 边缘检测的基础上组合多种算法来增强鲁棒性。针对经典 Canny 边缘检测算法无法去除椒盐噪声的问题,利用基于自适应中值滤波的各向异性扩散来对影像进行降噪处理,实验结果表明该方法能有效抑制椒盐噪声。

为了准确、客观地选取阈值来判断边缘点,本文结合迭代法和最大熵法自适应获取阈值,并将两种方法获取的边缘信息利用逻辑与运算融合,改善了经典 Canny 算法根据经验设置阈值的缺陷,减少了无人机影像中丰富地物造成的边缘误判和漏检现象,提高了算法的自适应性。但本文算法将部分阴影检测为地物边缘,因此后续研究可考虑结合纹理信息剔除此部分边缘,为无人机影像的目标提取与分割等操作提供更加准确的边缘轮廓信息。

### 参考文献

- [1] 王晓红,邓仕雄,何志伟,等. 结合 SURF 算法和单应性矩阵的无人机影像匹配[J]. 测绘通报, 2018, 496(7): 38-42.
- [2] 贾煜,汪泓,蔡宏,等. 结合地形因子与分层策略的喀斯特地区无人机影像分类[J]. 测绘通报, 2022, 539(2): 121-127.
- [3] 陈竹安,邹梓龙,徐志芳,等. 复杂背景下航拍图像的电力线自动提取算法[J]. 测绘通报, 2022, 541(4): 37-43.
- [4] 郑恩壮,钟宝江. 各向异性的多尺度边缘检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 26(5): 66-70.
- [5] 杨蕴,李玉,赵泉华. 斑点抑制与多分辨率拓扑分析相结合的 SAR 图像河流水体提取[J]. 测绘学报, 2022, 51(1): 145-158.
- [6] HU Dadan, YANG Hongbo, HOU Xia, et al. Distance field-based convolutional neural network for edge detection [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 1712258. (下转第 128 页)