

激光主动成像图像边缘检测算法研究

宋睿, 张合新, 吴玉彬, 宫梓丰

中国人民解放军火箭军工程大学控制工程系, 陕西 西安 710025

摘要 针对激光主动成像图像特点, 提出一种分数阶微分与 Sobel 算子相结合的边缘检测算法。构造小波软阈值法与非局部均值滤波相结合的去噪算法对图像进行预处理; 分析传统 Sobel 算子的不足, 并利用分数阶微分对其进行改进, 提出基于分数阶微分和 Sobel 算子的四方向边缘检测模型对图像进行梯度运算; 运用最大类间差分法自适应选取阈值实现二值化完成边缘检测。实验结果表明, 与传统边缘检测算法相比, 该算法能够检测出更多的图像边缘细节, 且具有更好的可匹配性参数。

关键词 图像处理; 激光主动成像; 边缘检测; Sobel 算子; 分数阶微分

中图分类号 TP391.41; TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.081007

Image Edge Detection Algorithm for Laser Active Imaging

Song Rui, Zhang Hexin, Wu Yubin, Gong Zifeng

Department of Control Engineering, PLA Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract According to the features of laser active imaging, a new edge detection algorithm combining fractional differential and Sobel operator is proposed. The image preprocessing is completed by constructing a denoising algorithm based on the combination of wavelet soft threshold denoising and non-local means filtering. The deficiency of traditional Sobel operator is analyzed. Then the Sobel edge detection operator is improved by fractional differential, and a four-direction edge detection model based on the fractional differential and Sobel operator is proposed to complete image gradient operation. The maximum interclass differential method is used to automatically select the threshold, so as to achieve the binarization to complete edge detection. Experimental results show that compared with the traditional edge detection algorithms, the proposed algorithm can detect more image edge details and has better matching parameters.

Key words image processing; laser active imaging; edge detection; Sobel operator; fractional differential

OCIS codes 100.2960; 110.2960; 110.2970

1 引言

激光主动成像能够同时获得目标的距离图像和强度图像等特征信息, 具有抗干扰能力强、成像精度高等优势, 现已逐步应用于弹载末端制导^[1-2]。而边缘是激光主动成像图像的一个重要特征, 对匹配制导和目标识别意义重大, 因此对激光主动成像图像的边缘检测算法研究尤为重要^[3]。

图像的边缘主要表现为图像局部特征的不连续性, 即图像灰度变化较大的地方, 通过边缘检测可以获取图像中大部分的有效信息^[4]。传统的边缘检测算子有 Sobel 算子、Robert 算子、Prewitt 算子以及 Kirsch 算子等, 但在激光主动成像图像的应用中, 由于成像过程受噪声干扰、光照不均等因素限制, 这些算子往往表现一般^[5]。

收稿日期: 2017-03-07; **收到修改稿日期:** 2017-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(61203189)

作者简介: 宋睿(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光主动成像制导方面的研究。E-mail: hfutsongrui@126.com

导师简介: 张合新(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事飞行器制导与控制方面的研究。

E-mail: 18092483240@163.com

近年来,针对激光图像的边缘检测,张合新等^[5]提出改进的 Canny 边缘检测算法采用特定权值的邻域差分运算较好地实现了边缘检测;李晓峰等^[6]提出一种基于小波的非线性增强和多尺度形态学相结合的方法,得到了较清晰的图像边缘;谭凯等^[7]提出了一种双阈值判别的方法对非边缘点和噪声点进行滤波,而后用 Canny 算子进行边缘检测;王伟等^[8]提出一种具有自适应门限的改进 Prewitt 算法,克服了传统 Prewitt 算法需人工设定门限的缺点;谭建平^[9]将像素邻接特性运用到边缘提取中,所得边缘连续性较好。

本文结合激光主动成像图像特点,设计了一种基于小波软阈值法和非局部均值滤波的预处理算法,针对 Sobel 算子易漏检边缘,所检边缘较宽等缺点,提出基于分数阶微分的四方向 Sobel 算子。实验结果表明,本文算法边缘检测效果较好,具有一定的应用价值。

2 小波软阈值法与非局部均值滤波相结合的去噪算法

2.1 小波软阈值法

小波变换具有时频域内良好的信号表征能力和多分辨率特性,被广泛应用于图像去噪,并取得了良好的去噪效果。含噪图像经小波变换后,噪声和信号能够表现出高低频不同的统计特性。小波阈值去噪通过设立阈值函数,将变换后的小波系数与阈值函数进行比较和调整,从而筛选出合适的信号,最后进行小波逆变换即可获得去噪图像。

小波软阈值法是常用的阈值函数设置方法,具有去噪能力强、连续性好等优点。该方法将小于阈值的小波系数全部置零,大于阈值的小波系数与阈值做减法作为新的系数,即

$$\lambda_{\delta} = \begin{cases} \text{sgn}(\lambda)(|\lambda| - \delta), & |\lambda| \geq \delta \\ 0, & |\lambda| < \delta \end{cases} \quad (1)$$

式中 δ 为预先设定的阈值, λ 为含噪信号的小波系数, λ_{δ} 为经小波软阈值法处理后的小波系数, $\text{sgn}(\ast)$ 为符号函数。

2.2 非局部均值滤波算法

2005年, Buades 等^[10]提出基于图像邻域相似性的非局部均值(NLM)滤波算法,取得了良好的去噪效果,并引起广泛的关注。其基本原理为:一幅图像中存在许多灰度和结构相似的部分,通过对相似结构进行加权平均以减少随机噪声,达到去噪的目的。经 NLM 滤波后,图像中每一像素的灰度值表示为图像中其余像素灰度值的加权求和,其中权值由以当前像素为中心的图像块和以图像中其余像素为中心的图像块之间的相似程度来表示。

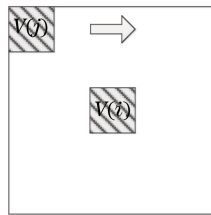


图 1 NLM 滤波算法执行过程

Fig. 1 Implementation process of NLM filtering algorithm

如图 1 所示,算法执行过程中,在图像中设定两个分别以像素 i 、 j 为中心,大小相同的正方形模板 $V(i)$ 和 $V(j)$,令 $V(i)$ 固定在待求像素位置,而使 $V(j)$ 在图像中遍历,从而比较其每一覆盖的图像块与 $V(i)$ 覆盖的图像块之间的相似程度,以此作为像素 i 、 j 之间的相似权值 $q(i, j)$,则滤波后像素 i 处的灰度值 $N_{LM}(i)$ 可表示为

$$N_{LM}(i) = \sum q(i, j) \cdot z(j), \quad (2)$$

式中 $z(j)$ 为像素 j 处的灰度值, $q(i, j)$ 的计算公式为

$$q(i, j) = \frac{1}{C(i)} \exp[-d(i, j)/h^2], \quad (3)$$

式中 $C(i)$ 为归一化函数, 即 $C(i) = \sum \exp[-d(i, j)/h^2]$, 滤波参数 h 控制指数函数的衰减速度, 其取值与图像的噪声水平有关, $d(i, j)$ 为 $V(i)$ 覆盖图像块和 $V(j)$ 覆盖图像块之间的欧氏距离。

2.3 本文去噪算法

在实际激光主动成像的过程中, 激光的干涉易导致图像中出现散斑噪声^[11]。而散斑噪声是一种乘性噪声^[12], 一般与图像附着紧密, 且难以去除, 因此, 在对激光图像进行边缘检测前, 首先需要进行去噪处理, 以避免因噪声干扰产生的虚假边缘。

考虑到小波变换的多分辨率特性和 NLM 滤波良好的去噪效能, 本文针对激光主动成像图像特点, 设计了一种小波软阈值法与 NLM 滤波相结合的去噪算法。该方法首先对含噪图像进行对数变换, 将乘性噪声转化为加性噪声; 而后对图像进行两层小波分解, 由于噪声干扰主要集中在分解后的高频部分, 因此在第一层高频部分运用小波软阈值法进行去噪, 在第二层高频部分运用 NLM 滤波算法, 从而实现两层级联的针对性去噪; 最后经小波逆变换得到去噪图像。算法流程如图 2 所示。

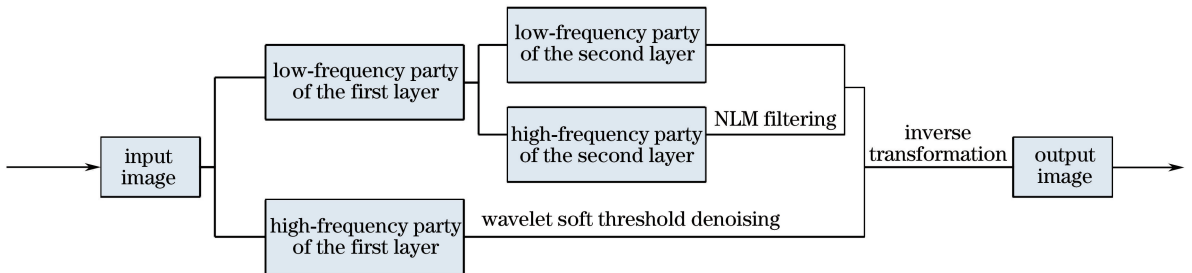


图 2 去噪流程图

Fig. 2 Diagram of denoising process

3 基于分数阶微分的四方向 Sobel 算子

3.1 分数阶微分的 G-L 定义

分数阶微分是将传统整数阶微分阶次向非整数的一种推广, 其更敏锐的信号捕捉能力, 能够解决许多整数阶微分不能解决的问题, 这使得其在信号处理等领域发挥着日益重要的作用。研究表明, 分数阶微分掩模处理能够保持图像纹理, 同时非线性地增强高频边界特征^[13]。

分数阶微分主要有 Grumwald-Letnikov(简称 G-L 定义)、Riemann-Liouville(简称 R-L 定义)和 Caputo 三种定义。由于 G-L 定义和 R-L 定义可转化为卷积运算形式, 因此能够方便地应用于图像处理中, 其中, G-L 定义在计算时较 R-L 定义更为准确^[14]。

G-L 定义从研究连续函数整数阶导数的经典定义出发, 将微分的阶次从整数推衍到分数。对 $\forall a \in \mathbf{R}$, 取其整数部分 $[a]$, 若一元信号 $f(t)$ 在区间 $[a, t]$ 上存在 $r+1$ ($m \in \mathbf{Z}$) 阶连续导数, 则 $f(t)$ 的 α 阶导数的 G-L 定义为

$${}^G D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\alpha} \sum_{r=0}^{n-1} \binom{-\alpha}{r} f(t-rh) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{(t-a/h)^{-\alpha}}{\Gamma(-\alpha)} \sum_{r=0}^{n-1} \frac{\Gamma(-\alpha+r)}{\Gamma(-\alpha+1)} f\left[t - \frac{r(t-a)}{n}\right] \right\}, \quad (4)$$

式中 Γ 为伽马函数, $\binom{-\alpha}{r} = \frac{(-\alpha)(-\alpha+1)\cdots(-\alpha+r+1)}{r!}$ 。

考虑到图像中灰度值发生变化的最短距离为两像素点之间, 因而将(4)式中 h 取为 1, 则一元信号 $f(t)$ 的分数阶微分的差分可表达为

$$\frac{d^\alpha f(t)}{dt^\alpha} = f(t) + (-\alpha)f(t-1) + \frac{(-\alpha)(-\alpha+1)}{2}f(t-2) + \cdots + \frac{\Gamma(-\alpha+1)}{n! \Gamma(-\alpha+n+1)}f(t-n). \quad (5)$$

将(5)式推广到二维信号上, 则二维信号 $f(x, y)$ 在 x 和 y 方向上的分数阶微分的差分可表示为

根据偏导数的定义,(7)、(8)式中各项可分别记作

$$\begin{cases} f(x-1, y+1) - f(x-1, y-1) = 2 \frac{\partial f(x-1, y+1)}{\partial y} \\ f(x, y+1) - f(x, y-1) = 2 \frac{\partial f(x, y+1)}{\partial y} \\ f(x+1, y+1) - f(x+1, y-1) = 2 \frac{\partial f(x+1, y+1)}{\partial y} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} f(x, y+1) - f(x+1, y) = -\frac{\partial f(x+1, y+1)}{\partial x} + \frac{\partial f(x+1, y+1)}{\partial y} \\ f(x-1, y+1) - f(x+1, y-1) = -2 \frac{\partial f(x+1, y+1)}{\partial x} + 2 \frac{\partial f(x+1, y+1)}{\partial y}, \\ f(x-1, y) - f(x, y-1) = -\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{cases}, \quad (10)$$

将(9)、(10)式分别代入(7)、(8)式,得到竖直方向梯度 G_x 和 45° 方向梯度 G_{45° 的微分表达形式为

$$G_x = 2 \frac{\partial f(x-1, y+1)}{\partial y} + 4 \frac{\partial f(x, y+1)}{\partial y} + 2 \frac{\partial f(x+1, y+1)}{\partial y}, \quad (11)$$

$$G_{45^\circ} = -\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} - 5 \frac{\partial f(x+1, y+1)}{\partial x} + 5 \frac{\partial f(x+1, y+1)}{\partial y}, \quad (12)$$

观察(11)式和(12)式可知,等号右边各项均为整数阶微分,将它们推广到分数阶微分,即可得到分数阶微分形式的梯度表达式为

$$G_x^\alpha = 2 \frac{\partial f^\alpha(x-1, y+1)}{\partial y^\alpha} + 4 \frac{\partial f^\alpha(x, y+1)}{\partial y^\alpha} + 2 \frac{\partial f^\alpha(x+1, y+1)}{\partial y^\alpha}, \quad (13)$$

$$G_{45^\circ}^\alpha = -\frac{\partial f^\alpha(x, y)}{\partial x^\alpha} + \frac{\partial f^\alpha(x, y)}{\partial y^\alpha} - 5 \frac{\partial f^\alpha(x+1, y+1)}{\partial x^\alpha} + 5 \frac{\partial f^\alpha(x+1, y+1)}{\partial y^\alpha}. \quad (14)$$

由上述分数阶微分的 G-L 定义,将(13)式等号右侧的每一项按(6)式展开并保留前三项,同理将(14)式等号右侧中 $\partial f^\alpha(x, y)/\partial x^\alpha$ 和 $\partial f^\alpha(x, y)/\partial y^\alpha$ 两项按(6)式展开并保留前两项,其余项展开均保留前三项,这样可分别获得 3×3 尺寸下竖直方向和 45° 方向基于分数阶微分的 Sobel 算子模板,即

$$S_x^\alpha = \begin{bmatrix} (-\alpha)(-\alpha+1) & -2\alpha & 2 \\ 2(-\alpha)(-\alpha+1) & -4\alpha & 4 \\ (-\alpha)(-\alpha+1) & -2\alpha & 2 \end{bmatrix}, S_{45^\circ}^\alpha = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & -\frac{5(-\alpha)(-\alpha+1)}{2} \\ -\alpha & 0 & 5\alpha \\ \frac{5(-\alpha)(-\alpha+1)}{2} & -5\alpha & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

将上述两模板中每一元素分别逆时针旋转两个单位即可得到水平方向梯度模板 S_y^α 和 135° 方向梯度模板 $S_{135^\circ}^\alpha$,即

$$S_y^\alpha = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 2 \\ -2\alpha & -4\alpha & -2\alpha \\ (-\alpha)(-\alpha+1) & 2(-\alpha)(-\alpha+1) & (-\alpha)(-\alpha+1) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$S_{135^\circ}^\alpha = \begin{bmatrix} -\frac{5(-\alpha)(-\alpha+1)}{2} & 5\alpha & 0 \\ \alpha & 0 & -5\alpha \\ 0 & -\alpha & \frac{5(-\alpha)(-\alpha+1)}{2} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由此便可得出基于分数阶微分的四方向 Sobel 算子。令四个方向的模板在图像中平滑移动,与每一像素点进行卷积,便可得出该点四个方向的梯度值,其最终梯度值 G 可表示为

$$G = \sqrt{\frac{1}{2}G_x^\alpha + \frac{1}{2}G_y^\alpha + \frac{1}{2}G_{45^\circ}^\alpha + \frac{1}{2}G_{135^\circ}^\alpha}. \quad (18)$$

3.3 自适应阈值选取

针对传统 Sobel 算子需要手动设置梯度阈值的缺点,本文引入最大类间差分法实现阈值的自适应选取。该算法的基本思想是根据图像灰度信息将图像的像素点划分为背景类和目标类,然后通过计算类间方差的最大值获得最佳阈值。对于一幅尺寸为 $M \times N$ 的图像 $I(x, y)$,将背景类与目标类的分割阈值记为 T ,则属于背景类的像素点数为 A ,其占整幅图像的比例记为 ω_1 ,平均梯度为 u_1 ;属于目标类的像素点数为 B ,其占整幅图像的比例记为 ω_2 ,平均梯度为 u_2 ,则有

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{A}{M \times N} \\ \omega_2 = \frac{B}{M \times N} \end{cases}, A + B = M \times N, \omega_1 + \omega_2 = 1. \quad (19)$$

将图像总的平均灰度记为 u ,则有

$$u = u_1 \times \omega_1 + u_2 \times \omega_2, \quad (20)$$

由此可得出图像背景类与目标类之间的方差 g ,用遍历法自适应求出使 g 最大的阈值 T ,当方差 g 最大时,即可认为在此阈值 T 下图像能够实现最佳的边缘检测,方差 g 可表示为

$$g = \omega_1 \times (u - u_1)^2 + \omega_2 \times (u - u_2)^2. \quad (21)$$

4 实验及结果分析

4.1 算法评价标准

本文算法是基于激光主动成像制导这一实际应用背景提出的,最终的边缘图像需满足匹配制导的应用要求,因此除主观视觉判断外,还选用了独立像元数作为评价标准,以检验图像的可匹配性^[3]。

独立像元数常用来度量图像内包含独立景物的多少,其值越大,说明图像中能够用于匹配的目标就越丰富。对于尺寸为 $M \times N$ 的图像,其独立像元数的定义为

$$D = (M/L_h) \cdot (N/L_v), \quad (22)$$

式中 L_h, L_v 分别为图像行方向和列方向上的相关长度。相关长度常用来衡量数据之间的相关性,一般认为行距超过 L_h 或列距超过 L_v 的两个像元是不相关的,其计算方式为图像自相关系数在一个方向上为 e^{-1} (0.368)时的位移增量,即

$$L_h = \int_0^{\infty} \exp[-c_1(h)] dh = \frac{1}{c_1}, \quad (23)$$

$$L_v = \int_0^{\infty} \exp[-c_2(v)] dv = \frac{1}{c_2}, \quad (24)$$

式中 c_1, c_2 均为常数, h, v 分别为行方向和列方向上的增量。

4.2 算法有效性验证

使用 MATLAB R2013b 软件在 Inter(R) Core(TM) i5-2400 3.10GHz 2GB 内存的计算机上进行仿真实验。对多幅图像进行测试,当分数阶微分的阶次 $\alpha = 0.8$ 时,边缘检测效果较理想。图 6(a)为尺寸为 256 pixel \times 256 pixel 的某地区下视激光图像;图 6(b)为本文算法处理后的图像。采用峰值信噪比(PSNR)对去噪算法进行评估,图 6(a)和图 6(b)的 PSNR 值分别为 25.42 和 47.63,这说明经去噪处理后图像质量得到明显提升,基本滤除了噪声,更好地防止了虚假边缘的产生。分别采用 Marr 算子、Roberts 算子、Prewitt 算子、Laplacian 算子、Kirsch 算子、Sobel 算子以及本文算法对图 6(b)所示的去噪图像进行边缘检测并进行对比,实验结果如图 6(c)~(i)所示。

由图 6 可知,Laplacian 算子的边缘检测效果最差,几乎没有检测出连续有效的边缘信息;Marr 算子、Roberts 算子和原始 Sobel 算子漏检、错检现象严重;相比之下,Prewitt 算子、Kirsch 算子边缘检测效果较好,能够连续有效地检测出大部分的图像边缘,但缺点在于边缘较宽、细节部分较模糊;而本文算法不仅继承了 Sobel 算子定位精准的特点,而且通过运用分数阶微分检测出了更多的边缘,在没有造成边缘拓展的前提下,保证了边缘的连续性。从视觉效果来看,本文算法达到了理想的边缘检测效果。

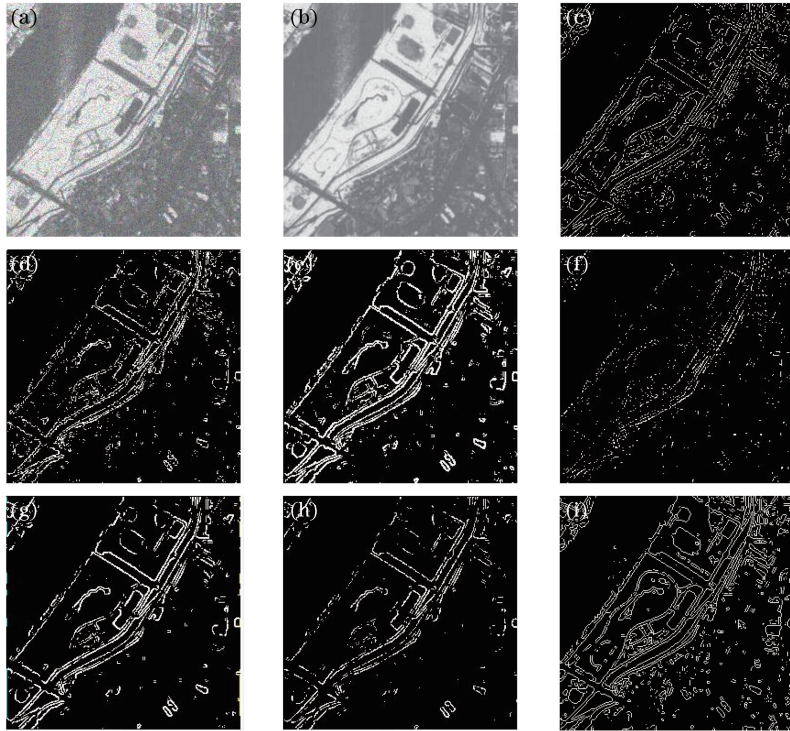


图 6 不同算子边缘检测效果比较。(a)原始图像;(b)去噪图像;(c) Marr 算子;(d) Roberts 算子;(e) Prewitt 算子;
(f) Laplacian 算子;(g) Kirsch 算子;(h) Sobel 算子;(i)本文算法

Fig. 6 Comparison of edge detection with different operators. (a) Original image; (b) denoised image; (c) Marr operator;
(d) Roberts operator; (e) Prewitt operator; (f) Laplacian operator; (g) Kirsch operator; (h) Sobel operator; (i) proposed algorithm

表 1 给出了上述各种边缘检测算子处理后图像的相关长度和独立像元数的统计结果,分析表中数据可知,图 6(b)所示去噪图像的可匹配性不高,而经过边缘检测后,图像行方向和列方向的相关长度均有所降低,从而使独立像元数增大,提高了可匹配性。在几种边缘检测算子中,Laplacian 算子、Marr 算子、Roberts 算子和原始 Sobel 算子等漏检、错检较多的算法检测到的边缘匹配性相对较差;Kirsch 算子、Prewitt 算子检测到的边缘匹配性较好。本文算法由于运用分数阶微分对四方向 Sobel 算子进行改进,因此对边缘信息更加敏感,同时,阈值的自适应选取提高了边缘检测的准确性,该算法最终的检测效果具有更好的匹配性。

表 1 算法性能指标比较

Table 1 Comparison of algorithm performance indexes

Index	Denoised image	Marr	Roberts	Prewitt	Laplacian	Kirsch	Sobel	Proposed algorithm
L_h	24.82	19.68	17.66	16.92	19.91	18.25	18.67	14.98
L_v	38.65	18.16	18.29	15.71	18.47	16.06	17.18	15.68
D	68	183	202	246	178	223	204	278

5 结 论

以激光主动成像制导为应用背景,研究了激光主动成像图像边缘检测算法。针对图像特点设计了去噪算法,从增加模板方向、引入分数阶微分和设计自适应阈值选取规则三个方面对 Sobel 算子进行改进,最后根据图像匹配的需求,选择独立像元数作为评价标准进行实验。实验结果表明,本文算法较传统边缘检测算法能够检测出更多的细节,视觉效果更好,且具有较好的可匹配性,能够满足激光主动成像制导的需求。

参 考 文 献

- [1] Li Jianzhong, Peng Qixian, Li Zeren, *et al.* Technology of missile-borne laser active imaging guidance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1117-1123.

- 李建中, 彭其先, 李泽仁, 等. 弹载激光主动成像制导技术发展现状分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1117-1123.
- [2] Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.* Study on back-scattering light intensity in airborne laser range-gated imaging[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0113003.
寇添, 王海宴, 王芳, 等. 机载激光距离选通成像大气后向散射光强研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0113003.
- [3] Meng Fei, Xia Chaohui, Qiang Zhengjie, *et al.* Edge detection algorithm of intensity image for laser active imaging[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10): 1192-1196.
孟飞, 夏朝辉, 强征捷, 等. 激光主动成像图像边缘检测算法研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1192-1196.
- [4] Hui Xiaowei, Chang Zhengying, Lin Sen, *et al.* Image edge extraction combined with Predator-Prey-AACO algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 051001.
惠晓威, 常正英, 林森, 等. 结合 Predator-Prey-AACO 的图像边缘检测算法[J]. 激光与光电子进展, 2015, 52(5): 051001.
- [5] Zhang Hexin, Wang Qiang, Zhang Tengfei, *et al.* Detection algorithm of image edge for laser active imaging[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(6): 755-760.
张合新, 王强, 张腾飞, 等. 激光主动成像图像边缘检测算法研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(6): 755-760.
- [6] Li Xiaofeng, Xu Jun, Zhang Shengxiu, *et al.* Edge detection algorithm of laser active imaging[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1599-1601.
李晓峰, 徐军, 张胜修, 等. 激光主动成像图像边缘检测方法[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1599-1601.
- [7] Tan Kai, Cheng Xiaojun. Dual-threshold algorithm for intensity image edge extraction of terrestrial laser scanning point cloud[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(9): 1425-1431.
谭凯, 程效军. 双阈值法地面激光点云强度图像边缘提取[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 1425-1431.
- [8] Wang Wei, Wang Jiannong. Study and simulate on image edge detection of laser radar[J]. Laser Journal, 2015, 36(4): 76-78.
王伟, 王建农. 激光成像雷达图像边缘检测算法研究与仿真[J]. 激光杂志, 2015, 36(4): 76-78.
- [9] Tan Jianping, Wang Xian. Laser edge image inpainting based on pixel adjacency analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2728-2735.
谭建平, 王宪. 应用像素邻接特性分析的激光边缘图像修复[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2728-2735.
- [10] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising[C]. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2005, 2(7): 60-65.
- [11] Li Xiaofeng, Xu Jun, Luo Jijun, *et al.* Noise analyzing and denoising of intensity image for laser active imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 20(2): 332-337.
李晓峰, 徐军, 罗积军, 等. 激光主动成像图像噪声分析与抑制[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 332-337.
- [12] Wu Kun, Zhang Hexin, Meng Fei, *et al.* Denoising method of intensity image for laser active imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2397-2402.
吴坤, 张合新, 孟飞, 等. 激光主动成像图像噪声抑制方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2397-2402.
- [13] Chen Qing, Liu Jinping, Tang Zhaohui, *et al.* Detection and extraction of image edge curves and detailed features using fractional differentiation[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(10): 1873-1880.
陈青, 刘金平, 唐朝晖, 等. 基于分数阶微分的图像边缘细节检测与提取[J]. 电子学报, 2013, 41(10): 1873-1880.
- [14] Zhang Guimei, Sun Xiaoxu, Chen Binbin, *et al.* Edge detection algorithm combining fractional order derivative and Canny operator[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(8): 1028-1038.
张桂梅, 孙晓旭, 陈彬彬, 等. 结合分数阶微分和 Canny 算子的边缘检测[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(8): 1028-1038.
- [15] Jiang Wei, Chen Hui. New edge detection model based on fractional differential and Sobel operator[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(4): 182-185.
蒋伟, 陈辉. 基于分数阶微分和 Sobel 算子的边缘检测新模型[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(4): 182-185.