

基于 Canny 算子改进型的影像测量边缘检测

张加朋*, 于凤芹

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要 针对采用高斯滤波器对图像进行滤波会导致图像边缘平滑,人为设定高、低阈值会导致阈值的自适应性差,采用双阈值法去除虚假边缘会导致去除效果不佳等问题,提出改进的 Canny 边缘检测算法并应用于影像测量领域。首先使用开关中值滤波代替高斯滤波,在去除噪声的同时保留非噪声像素点的灰度值不变,从而提高边缘定位精度;然后采用 K-means 聚类算法以得到高、低梯度值聚类中心,采用 OTSU 算法以得到梯度阈值,将两个方法结合,可以实现高、低阈值的自适应;最后采用面积形态学的方法去除图像的干扰边缘。实验结果表明,改进的算法具有定位精度高、自适应性强以及干扰点去除效果好等优点。

关键词 图像处理; Canny 算子; 影像边缘检测; 开关中值滤波; K-means 算法; 面积形态学

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: doi:10.3788/LOP57.241024

Improved Image Measurement Edge Detection Based on Canny Operator

Zhang Jiapeng*, Yu Fengqin

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract In this study, the Canny edge detection algorithm is proposed and applied to the image measurement field to solve the problems of image edge smoothing due to Gaussian filtering, poor self-adaptability of the threshold caused by artificially setting high and low thresholds, and poor removal effect caused by using the double threshold method to remove the false edge. First, the switching median filter instead of the Gaussian filter is used. The gray value of non-noise pixels is kept unchanged while denoising to improve the edge positioning accuracy. Next, the K-means clustering algorithm is employed to obtain the clustering center of the high and low gradient values. The OTSU algorithm is employed to acquire the gradient threshold value. The self-adaptation of the high and low threshold values could be achieved by combining the two methods. Finally, the interference edge of the image is removed by area morphology. The experimental results show that the improved algorithm has the advantages of high positioning accuracy, strong self-adaptability, and good removal effect of disturbance points.

Key words image processing; Canny operator; image edge detection; switching median filtering; K-means algorithm; area morphological

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 330.1880; 330.7310

1 引言

影像测量技术是以现代光学为基础,融计算机图像图形学、计算机视觉、信息处理和光电子学等科学技术为一体的现代测量技术。该技术将待测图像当作检测和传递信息的载体,从中提取有用的信号来获得待测参数^[1],已广泛应用于空间距离测量^[2]、混凝土裂缝测量^[3]和工业零件尺寸测量^[4-5]等领域。影像测量的过程中,边缘检测的好坏决定影像测量

结果的准确性,因此边缘检测在影像测量的过程中占据十分重要的地位。边缘检测的方法主要有灰度熵法^[6]、高斯曲线梯度拟合法^[7]以及各种边缘检测算子^[8],其中 Canny 算子因具有较高的检测精度以及较好的去噪能力而得到广泛应用。

Canny 算子边缘检测的过程主要分为高斯滤波去噪、梯度幅值和方向的计算、梯度非极大值抑制、双阈值处理和虚假弱边缘去除 5 步。针对高斯滤波平滑图像,文献[9-10]提出了一种自适应中值滤波

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-06-18; 录用日期: 2020-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(61573168)

*E-mail: 2439480318@qq.com

算法,该算法可以较好地保留图像的边缘信息,但改变了非噪声像素点的灰度值,计算量大;文献[11-12]使用了形态学滤波对图像进行去噪,该处理过程可以去除图像中的孤立噪声点,但平滑图像边缘以及模板选择困难;文献[13]采用了改进的梯度倒数加权法对图像进行滤波,该方法可以较好地保留图像的边缘信息,但计算过程较为繁琐且对椒盐噪声的去除效果不佳。为了提高梯度幅值和方向的计算精度,文献[9-14]计算了 45° 和 -45° 方向的梯度;文献[15]在Canny算子边缘检测的过程中引入引力场强度来代替图像梯度以提高边缘定位的准确性,该方法可以较好地检测出弱边缘,但会增加虚假边缘。为了实现阈值自适应,文献[16-17]引入了最大类间方差(OTSU)算法,但该算法对阈值的定位精度低,且计算效率低;文献[14]使用了类内方差与类间方差的结合算法来提高阈值的定位精度;文献[9]利用了二分查找原理改进OTSU的计算方法,该方法可以提高查找效率。针对干扰边缘的问题,文献[18]使用了形态学处理方法中的腐蚀和膨胀操作去除干扰边缘,但形态学算子的选取普适性差;文献[5]采用了Grubbs准则去离群值法去除干扰边缘,但计算量大,耗时较长,且离群距离的选择至关重要,距离选择过大,干扰点去除不完全,距离选择过小,容易丢失真实边缘。

采用高斯滤波对图像进行滤波会导致图像边缘平滑,人为设定高、低阈值会导致阈值的自适应性差,采用双阈值法去除虚假边缘会导致干扰边缘的去除效果不佳。针对上述问题,本文提出改进的Canny边缘检测算法并应用于影像测量领域。首先使用开关中值滤波代替高斯滤波,并对图像进行去噪以避免图像平滑;接着采用 K 均值(K -means)聚类算法得到高、低梯度值的聚类中心,采用OTSU算法得到梯度的OTSU阈值;然后分别在高聚类中心、OTSU阈值和低聚类中心之间取得高、低阈值;最后采用面积形态学开运算对干扰边缘进行去除,最终实现对边缘的准确检测。

2 改进的Canny算子基本原理

2.1 开关中值滤波去噪

对图像进行中值滤波前,先对噪声进行检测。对于一幅图像 v ,椒盐噪声检测的表达式为

$$F_{(i,j)} = \begin{cases} 1, & a_{\min} \leq G_{(i,j)} \leq a_{\max}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $G_{(i,j)}$ 表示 v 中第 i 行、第 j 列像素点的灰度

值; a_{\min} 和 a_{\max} 分别表示以点 (i,j) 为中心的 3×3 窗口内的最小灰度均值和最大灰度均值; $F_{(i,j)}$ 表示第 i 行、第 j 列的像素点是否为噪声点。当 $G_{(i,j)}$ 处于 a_{\min} 和 a_{\max} 之间时,表示该像素点很可能为非噪声点,此时将 $F_{(i,j)}$ 标记为1,反之该点为噪声点,将 $F_{(i,j)}$ 标记为0。根据开关中值滤波的原理对标记为0的像素点进行处理,即对 $F_{(i,j)}$ 标记为1的像素点保持灰度值不变,对 $F_{(i,j)}$ 标记为0的像素点灰度值使用其所在位置的中值来代替。

当采用开关中值滤波算法对图像进行处理时,该算法既可以去除噪声点,又可以保留非噪声点的灰度值,这可以提高真实边缘点的定位精度。

2.2 K -means聚类中心偏移求阈值

当使用影像测量仪测量图像梯度时,通常图像中会出现较明显的两类点,采用OTSU算法得到的阈值 T 可以很好地分为边缘点与非边缘点^[8],但存在虚假边缘以及干扰点,这会导致分类效果较差。因此,引入 K -means算法得到高、低梯度值的聚类中心 c_h 和 c_l ,则高阈值 T_h 必在 $[T, c_h]$ 区间中取得,低阈值 T_l 必在 $[c_l, T]$ 区间中取得。为了准确得到高、低阈值以达到最佳的分离效果,引入低聚类中心偏移因子 u_1 和高聚类中心偏移因子 u_2 ,其中 u_1 和 u_2 的取值范围为 $[0, 1]$,则高、低阈值分别为

$$T_l = c_l + u_1(T - c_l), \quad (2)$$

$$T_h = c_h - u_2(c_h - T). \quad (3)$$

K -means聚类算法是一种统计聚类算法,其可以简单高效地将具有相同属性的数据分为一类^[10]。该算法不需要为了增加训练数据量而进行学习,只需要知道怎么计算样本之间的相似度并将相似样本进行归类即可。

K -means算法的基本原理:首先在待分类数据中选取 k 个聚类中心,即 c_1, c_2, \dots, c_k ,接着按照待分类数据到 k 个聚类中心距离的大小分为相应位置所在的类。通常采用误差平方和作为目标函数来衡量分类效果,误差平方和 V_{SSE} 的表达式为

$$V_{SSE} = \sum_{s=1}^k \sum_{x \in c_s} (c_s - x)^2, \quad (4)$$

式中: c_s 表示第 s 个聚类中心的值; x 表示第 s 个聚类中心的数据点。为了使 V_{SSE} 值最小,则对 V_{SSE} 求偏导并令其为0,表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial c_s} V_{SSE} &= \frac{\partial}{\partial c_s} \sum_{s=1}^k \sum_{x \in c_s} (c_s - x)^2 = \\ & \sum_{s=1}^k \sum_{x \in c_s} \frac{\partial}{\partial c_s} (c_s - x)^2 = \end{aligned}$$

$$\sum_{x \in c_s} 2(c_s - x) = 0. \quad (5)$$

由(5)式可以得到 $c_s = \frac{1}{m_s} \sum_{x \in c_s} x$, 其中 m_s 为第 s 个聚类中心包含的数据个数。从所得结果可以看到, 当聚类中心的值取该类数据的均值时, 可以使 V_{SSE} 的局部值最小, 故将各个类数据的均值作为新的聚类中心的值并重新分类, 再求解各类数据的均值, 直到各均值基本不发生变化, 此时 V_{SSE} 值为全局最小值, 各均值均为最佳的聚类中心。

K-means 聚类中心偏移求解阈值或以避免由人工设置阈值导致自适应性较差, 也可以解决由高阈值与经验系数相乘选取低阈值, 经验系数不能自适应获取而导致分类效果不佳的问题。

2.3 面积形态学去除干扰边缘

面积形态学与标准形态学不同, 其只有一个参数, 结果也只与面积参数的大小有关^[20]。面积形态学仅有两个基本面积算子, 即面积开算子和面积闭算子。

在二值图像中, 定义位置 p 处的连通域 $C_g(p)$ 为

$$C_g(p) = \{q; \exists P_g(p, q)\}, \quad (6)$$

式中: $P_g(p, q)$ 表示去噪后图像 g 在位置 p 和位置 q 之间的连续路径。路径中的连通元素被定义为 8 连通。

定义面积形态学开运算的表达式为

$$g \circ (S) = \{p; \exists |C_g(p)| \geq S\}, \quad (7)$$

式中: $|C_g(p)|$ 表示像素值为 1 且连通的区域面积; S 表示设定的面积阈值; \circ 表示开运算操作。由(7)式可知, 面积形态学开运算的结果是将像素值为 1 的连通域中面积小于 S 的像素值置 0。当 $S = 4$ 时, 形态学面积开运算的处理结果如图 1 所示。

(a) 1	0	0	0	0	0	(b) 0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0

图 1 形态学面积开运算的处理结果。(a)处理前;(b)处理后

Fig. 1 Processing results of morphological area opening operation. (a) Before treatment; (b) after treatment

定义面积形态学闭运算的表达式为

$$g \cdot (S) = \{p; \exists |C_g^{\sim}(p)| \geq S\}, \quad (8)$$

式中: $|C_g^{\sim}(p)|$ 表示原图像取反后像素值为 1 且连通的区域面积; \cdot 表示闭运算操作。由(8)式可知, 面积形态学闭运算的结果是将像素值为 0 的连通域中面积小于 S 的像素值置 1。当 $a = 4$ 时, 形态学面积闭运算的处理结果如图 2 所示。

(a) 1	0	0	0	0	0	(b) 1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1
1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1

图 2 形态学面积闭运算的处理结果。(a)处理前;(b)处理后

Fig. 2 Processing results of morphological area closure operation. (a) Before treatment; (b) after treatment

边缘检测的过程中, 因虚假的边缘面积通常小于 100 pixel, 与真实的边缘面积相差较大, 所以可通过面积形态学开运算对干扰边缘点进行去除。

3 算法实现步骤

改进的 Canny 算子的边缘检测流程如图 3 所示, 具体步骤如下。

1) 在 3×3 窗口内处理图像, 计算窗口内的 a_{max} 、 a_{min} 以及灰度中值 a_{med} 。

2) 将 $G(i, j)$ 与 a_{max} 和 a_{min} 进行比较, 如果 $G(i, j)$ 处于 a_{max} 和 a_{min} 之间, 则保持 $G(i, j)$ 值不变, 反之使用 a_{med} 来代替 $G(i, j)$, 从而得到去除噪声后的图像。

3) 对去噪后的图像在水平方向、垂直方向、 45° 方向和 -45° 方向进行一阶偏导数差分以计算梯度, 从而得到每个像素点的梯度幅值和梯度方向。

4) 对梯度图像中每个梯度值与其梯度方向上相邻两梯度值的大小进行比较, 如果梯度值比梯度方向上相邻的两个梯度值都大, 则对其进行保留, 反之对其进行抑制, 从而保证得到单像素宽度的边缘图像。

5) 采用 K-means 聚类算法来得到 c_h 和 c_l , 采用 OTSU 算法来得到 T , 使用 T 对 c_h 和 c_l 进行适当调节, 从而得到最佳的 T_h 和 T_l 。

6) 使用高、低阈值处理图像边缘。将梯度值大于高阈值的点置 1, 梯度值小于低阈值的点置 0, 对梯度值处于高、低阈值之间的点, 查找其 8 邻域是否存在大于高阈值的梯度值, 若存在则置 1, 反之置 0, 从而得到连接性较好的二值化边缘。

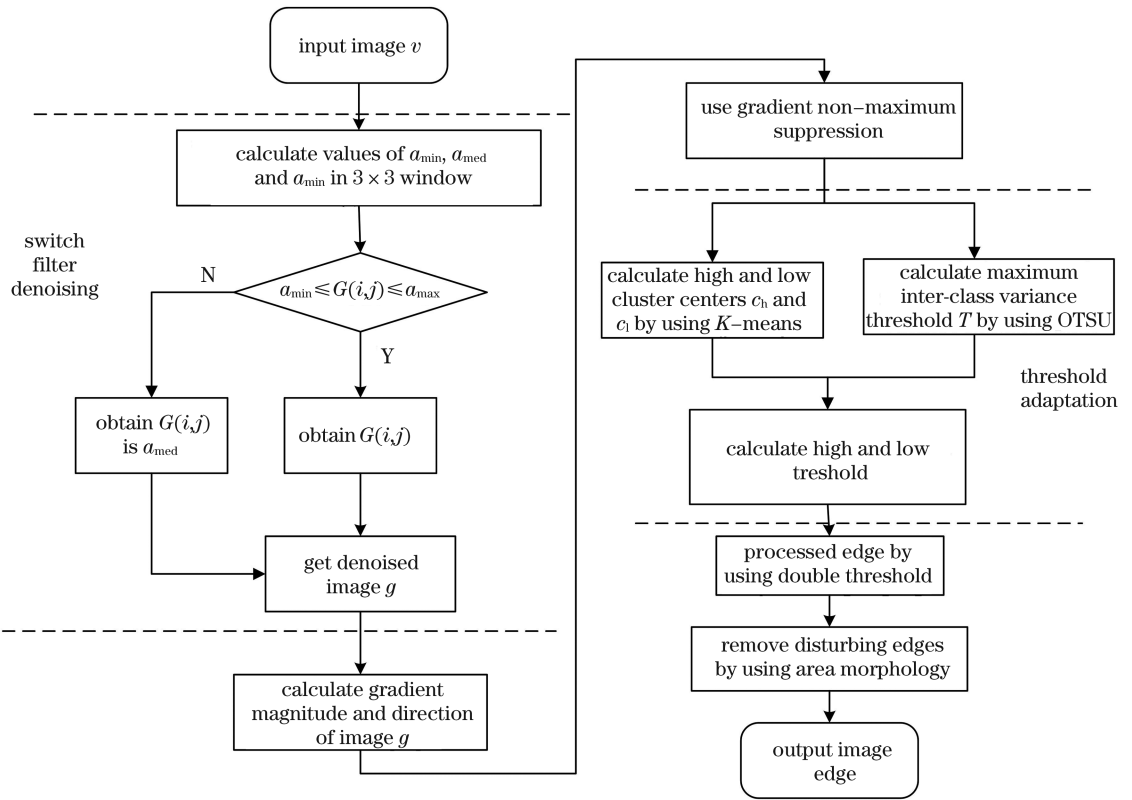


图 3 改进的 Canny 算子边缘检测流程图

Fig. 3 Flowchart of improved Canny operator edge detection

7)对得到的二值化边缘进行面积形态学开运算处理,对连通域面积过小的边缘认定其为干扰边缘并去除,从而得到定位准确且无干扰的边缘。

4 实验及结果分析

实验使用的算法是在 MATLAB 2016a 软件上编程实现的,实验图像是由工业模拟相机采集而得到。首先通过实验来确定 u_1 和 u_2 的大小;然后在图像中分别加入 0.02 和 0.05 的椒盐噪声,验证传统的 Canny 算法、文献[9]算法及所提算法对含有椒盐噪声的图像边缘检测效果;接着对传统的

Canny 算法、文献[9]算法、文献[5]算法和所提算法对影像边缘检测结果及运行时间进行分析;最后对传统的 Canny 算法、文献[9]算法、文献[5]算法及所提算法检测到的边缘进行最小二乘拟合,从而定量计算各种检测算法的精度,实验过程如下。

首先确定聚类中心偏移因子的大小。对图像中的真实边缘像素点数与虚假边缘像素点数(即与真实边缘不相连的像素点)进行统计分析,结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看到,随着 u_1 值的增加,虚假边缘像素点数基本保持不变,但当 u_2 值等于 1 时,随着 u_1 值的增加,虚假边缘像素数会下降,因此取

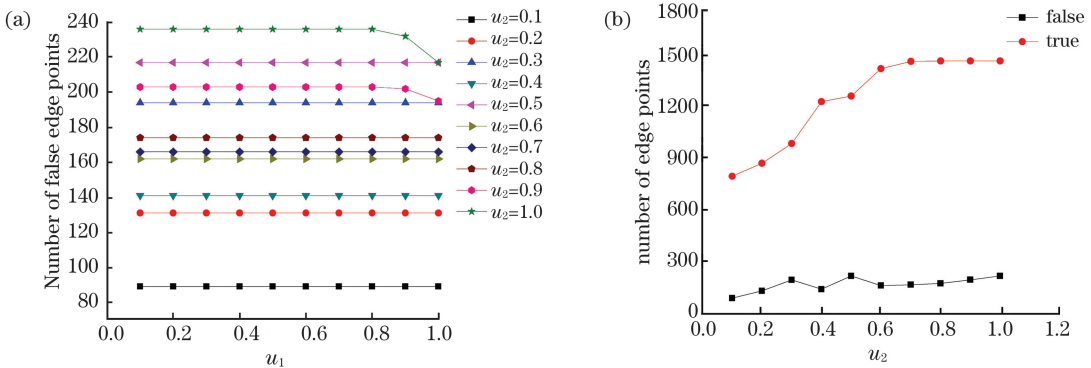


图 4 边缘数随偏移因子的变化曲线。(a) u_1 ; (b) u_2

Fig. 4 Change curves of number of edges with offset factor. (a) u_1 ; (b) u_2

u_1 值为 1。从图 4(b) 可以看到, 随着 u_2 值的增加, 真实边缘像素点数逐渐增加直至趋于不变, 此时所有的边缘点都已检测到, 而虚假边缘像素点数的曲线处于波动的趋势。原因在于当边缘不连续时, 则将真实边缘点误认为虚假边缘点, 随着 u_2 值的增加, 真实边缘变得更连续, 此时误判的情况大大减少, 所以虚假边缘数会出现突然下降的趋势, 当真实边缘全部检测完毕后, 虚假边缘点数呈现缓慢增加的趋势。为了使真实边缘点数尽可能多以及虚假边缘点数尽可能少, 结合图 4(b) 可知 u_2 的最佳取值

为 0.7。

为了评价所提算法对椒盐噪声的去除效果, 在图像中分别加入 0.02 和 0.05 的噪声, 含噪图像的边缘检测效果如图 5 所示。从图 5 可以看到, 当加入 0.02 椒盐噪声时, 传统的 Canny 算法处理后的边缘出现一些毛刺, 当椒盐噪声增大时, 毛刺更明显; 文献[9]算法虽然可以避免毛刺的产生, 但边缘附近经常出现孤立点, 这会导致平滑度稍有欠缺; 所提算法既可以避免毛刺的产生, 又可以较好地反映边缘的位置。

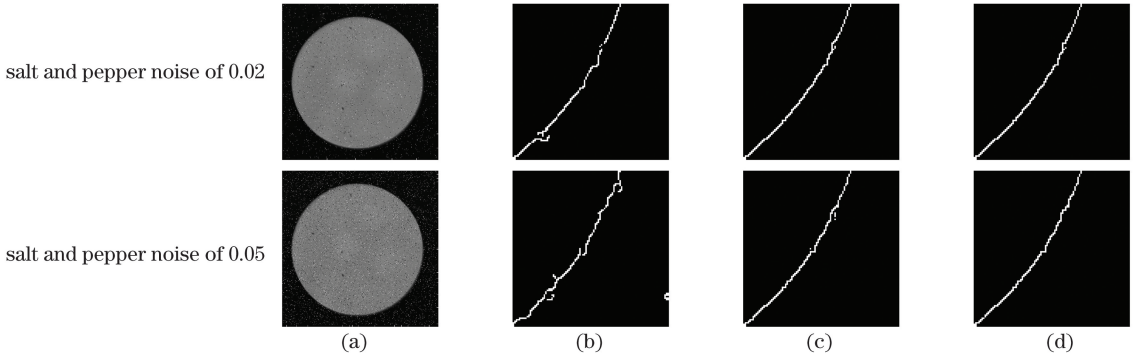


图 5 含噪图像的边缘检测效果。(a)原始图像;(b)传统的 Canny 算法;(c)文献[9];(d)所提算法

Fig. 5 Edge detection effects of noisy images. (a) Original images; (b) traditional Canny algorithm; (c) Ref. [9]; (d) proposed algorithm

为了定性评价所提算法的检测效果, 将所提算法检测到的边缘分别与传统的 Canny 算法、文献[9]算法和文献[5]算法进行比较, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看到, 传统的 Canny 算法处理后的图像中存在大量的干扰点, 原因在于使用高斯滤波器平滑图像会导致自适应阈值选取过小; 文献[9]算法处理后的图像中的干扰点有所减少且边缘毛刺减少, 原因在于其采用自适应中值滤波来代替高斯滤波, 从而避免图像平滑; 文献[5]算法虽然可以去除

大部分的干扰点, 但距离真实边缘较近的干扰点仍然存在, 主要原因在于离群点距离的选取不能做到干扰点与真实边缘连续性的完美协调; 所提算法得到的边缘在准确定位的基础上可以去除全部干扰点。

各算法的运行时间如表 1 所示。从表 1 可以看到, 文献[5]算法用时较长, 原因在于算法首先需要最小二乘拟合来确定初始中心及半径, 然后对干扰点进行去除; 传统的 Canny 算子用时最

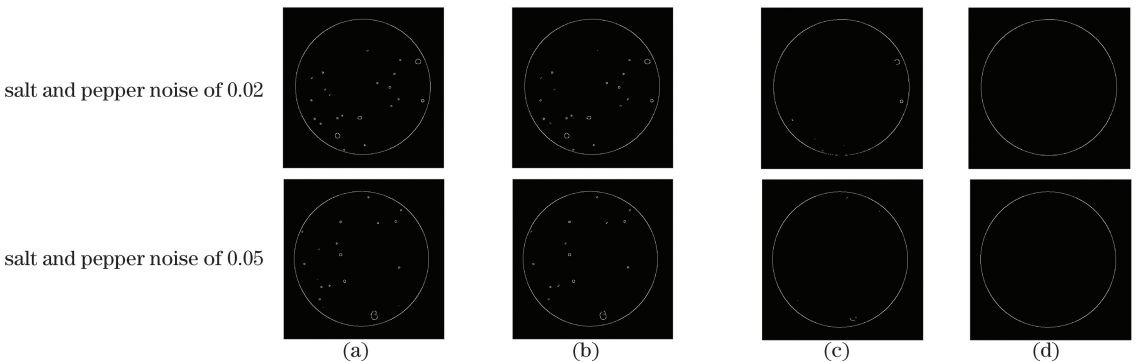


图 6 含噪图像的边缘检测结果。(a)传统的 Canny 算法;(b)文献[9]算法;(c)文献[5]算法;(d)所提算法

Fig. 6 Edge detection results of noisy images. (a) Traditional Canny algorithm; (b) Ref. [9]; (c) Ref. [5]; (d) proposed algorithm

表 1 各算法的运行时间
Table 1 Running time of each algorithm

Algorithm	Traditional Canny algorithm	Ref. [9]	Ref. [5]	Proposed algorithm
Running time /s	0.246969	6.308119	15.519899	4.375846

短;所提算法用时较长,原因在于开关中值滤波的处理时间比高斯滤波长,此外计算聚类中心及面积形态学等操作均需一定的时间;文献[9]算法使用了自适应中值滤波对图像进行去噪,因对每个窗口进行两次灰度值的大小比较,故用时比所提算法长。

为了定量评价所提算法的效果,将所提算法检测到的边缘精度分别与传统的 Canny 算法、文献[9]算法和文献[5]算法进行比较。首先分别使用传统的 Canny 算法、文献[9]算法、文献[5]算法和所提算法对工业标准校正片(拍摄影像所用相机的像素尺寸为 $1.5 \mu\text{m}$)中半径相等的 36 个圆逐个进行边缘检测,然后对检测到的边缘点进行最小二乘拟合以得到半径,通过实验数据验证所提算法的准确性。工业标准校正片如图 7 所示,检测结果如图 8 所示。



图 7 工业标准校正片

Fig. 7 Industrial standard correction sheet

从图 8 可以看到,传统的 Canny 算法所得到的曲线波动较大且半径值普遍较小,原因在于算法的定位准确度较低且检测到的边缘内部干扰点较多;文献[9]算法所得到的曲线波动较大,原因在于算法检测到的边缘内部同样存在干扰点;文献[5]算法所得到的曲线仍然出现局部波动较大的现象,原因在

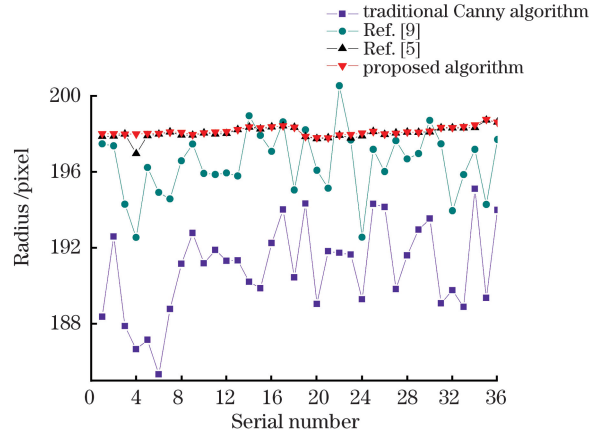


图 8 不同算法的检测结果

Fig. 8 Detection results of different algorithms

于算法未完全去除干扰边缘以及边缘定位不够准确;所提算法所得到的曲线波动最小,结果最接近真实值。

为了更准确地描述算法的检测精度,对图 8 所得数据进行分析以得到各算法的检测精度。检测分辨率 $P_{\text{resolution}}$ 的表达式为

$$P_{\text{resolution}} = \frac{D_{\text{max}} - D_{\text{min}}}{2}, \quad (9)$$

式中: D_{max} 表示 36 个圆的最大检测值; D_{min} 表示 36 个圆的最小检测值。

因所用相机的像素尺寸为 $1.5 \mu\text{m}$,故检测精度 P_{accuracy} 的表达式为

$$P_{\text{accuracy}} = 1.5 P_{\text{resolution}}. \quad (10)$$

不同算法的检测结果如表 2 所示。从表 2 可以看到,所提算法较其他几种算法在检测精度方面具有明显优势,最高检测精度可达 $0.6780 \mu\text{m}$,算法精度在 $1 \mu\text{m}$ 以内,说明所提算法适合高精度的测量场景。

表 2 不同算法的检测结果分析

Table 2 Analysis of detection results of different algorithms

Detection result	Traditional Canny algorithm	Ref. [9]	Ref. [5]	Proposed algorithm
D_{max} /pixel	195.1019	200.5335	198.7311	198.7078
D_{min} /pixel	185.3264	192.5422	196.9614	197.7918
$P_{\text{resolution}}$ /pixel	4.8880	3.9960	0.8850	0.4580
P_{accuracy} / μm	7.3320	5.9940	1.3280	0.6780

5 结 论

提出一种改进的 Canny 算法, 并采用该算法对图像进行边缘检测。首先使用开关中值滤波对图像进行去噪, 可以得到非噪声点灰度值不变的图像; 然后采用 K -means 聚类中心与 OTSU 相结合的算法, 可以实现阈值自适应; 最后使用面积形态学来去除干扰边缘, 从而得到准确的图像边缘信息。实验结果表明, 所提算法具有更好地去除椒盐噪声的能力、更高的定位精度(在 $1\ \mu\text{m}$ 以内)以及更稳定的去干扰能力, 该算法为后续影像图形的识别奠定良好的基础。所提算法因使用开关中值滤波对图像进行处理会导致用时较长, 所以下一步的工作将是针对高斯噪声的特点进行改进, 使其应用领域更为广泛。

参 考 文 献

- [1] Zhang W J, Yang Y L, Li D, et al. Key algorithms of automatic image measurement system[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 294-301.
张舞杰, 杨义禄, 李迪, 等. 自动影像测量系统关键算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 294-301.
- [2] Liu T, Liu Y, Liu K, et al. Intrusion object recognition and space distance measurement in safety area of high voltage transmission lines[C]//2019 6th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), November 2-4, 2019, Shanghai, China. New York: IEEE, 2019: 878-883.
- [3] Barkavi T, Chidambarathanu N. Processing digital image for measurement of crack dimensions in concrete [J]. Civil Engineering Infrastructures Journal, 2019, 52(1): 11-22.
- [4] Song L M, Li D P, Qin M C, et al. Research on high-precision hole measurement based on robot vision method[J]. Optoelectronics Letters, 2014, 10(5): 378-382.
- [5] Duan Y X. Study on the measurement method of part size of automatic image measuring instrument[D]. Taiyuan: North University of China, 2019: 18-24.
段宇秀. 全自动影像测量仪零件尺寸测量方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2019: 18-24.
- [6] Zheng Z, Zha B T, Xuchen Y S, et al. Adaptive edge detection algorithm based on grey entropy theory and textural features[J]. IEEE Access, 2019, 7: 92943-92954.
- [7] Shang Y C, Chen J, Tian J W. Sub-pixel edge detection algorithm based on Gauss fitting [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(1): 179-181.
尚雅层, 陈静, 田军委. 高斯拟合亚像素边缘检测算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(1): 179-181.
- [8] Hua C J, Xiong X M, Chen Y. Feature extraction of workpiece circular arc contour based on sobel operator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021011.
化春键, 熊雪梅, 陈莹. 基于 Sobel 算子的工件圆弧轮廓特征提取[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021011.
- [9] Duan S L, Yin C C, Li D W. Improved adaptive Canny edge detection algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(6): 1645-1652.
段锁林, 殷聪聪, 李大伟. 改进的自适应 Canny 边缘检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(6): 1645-1652.
- [10] Shu Q L, Shan B. Sub-pixel localization algorithm based on modified Canny operator [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(10): 165-168.
舒启林, 山博. 改进 Canny 算子的亚像素定位算法[J]. 机械设计与制造, 2018(10): 165-168.
- [11] Deng C X, Wang G B, Yang X R. Image edge detection algorithm based on improved Canny operator [C]//2013 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, July 14-17, 2013, Tianjin, China. New York: IEEE, 2013: 168-172.
- [12] Yuan Q Q, Zhang G, Chen X J, et al. Regularization of point cloud features by fusing improved canny algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(16): 162801.
袁俏俏, 章光, 陈西江, 等. 融合改进 Canny 算法的点云特征规则化[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(16): 162801.
- [13] Ju Z Y, Zhang W X, Zhai C Y. Garbage image edge detection based on improved Canny algorithm [J]. Electronic Science and Technology, 2020, 33(8): 16-20.
巨志勇, 张文馨, 翟春宇. 基于改进 Canny 算子的垃圾图像边缘检测[J]. 电子科技, 2020, 33(8): 16-20.
- [14] Liang Z J, Zhong J. Adaptive Canny algorithm improvement based on Otsu algorithm and histogram analysis[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(11): 54-58.
梁肇峻, 钟俊. 基于 Otsu 算法与直方图分析的自适应 Canny 算法的改进[J]. 现代电子技术, 2019, 42

- (11): 54-58.
- [15] Rong W B, Li Z J, Zhang W, et al. An improved Canny edge detection algorithm [C]//2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 3-6, 2014, Tianjin, China. New York: IEEE, 2014: 577-582.
- [16] Chen X F, Guan H B, Gu J N, et al. A study and improvements on Canny algorithm [J]. Advanced Engineering Forum, 2012, 6/7: 205-209.
- [17] Liu L X, Li B W, Wang Y P, et al. Remote sensing image segmentation based on improved Canny edge detection[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(12): 54-58, 180.
刘丽霞, 李博文, 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, 180.
- [18] Xu H Y, Xu X L, Zuo Y B. Applying morphology to improve Canny operator's image segmentation method [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23): 8816-8819.
- [19] He Y B, Chen R L, Wu K, et al. Point cloud simplification method based on K -means clustering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 091002.
贺一波, 陈冉丽, 吴侃, 等. 基于 K -means 聚类的点云精简方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091002.
- [20] Xiong Z Y, Fan X P, Li Y. A new binary-area-morphology-based algorithm for license plate localization [J]. Computer Simulation, 2008, 25(11): 285-287, 296.
熊哲源, 樊晓平, 黎燕. 一种新的基于二值面积形态学的车牌定位算法[J]. 计算机仿真, 2008, 25(11): 285-287, 296.