

融合小波变换和新形态学的含噪图像边缘检测

余小庆 陈仁文 唐杰 许锦婷

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘要 针对图像边缘检测中,滤除图像噪声并有效保留图像边缘信息这一研究,提出了一种融合小波变换模极大值和新型改进的数学形态学的含噪图像边缘检测方法。首先介绍了基于小波变换模极大值的图像边缘检测算法;然后提出了一种新型改进的数学形态学检测算法;最后为了综合两种算法的优点,应用新的融合方式将两种方法的检测结果融合到一起,提出一种融合小波变换和新形态学的含噪图像边缘检测方法。实验结果表明,提出的融合检测算法相比于单独使用小波变换模极大值或数学形态学算法,能更有效地抑制噪声,提高边缘检测效果。

关键词 模极大值,数学形态学,图像融合,边缘检测

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Edge Detection for Noisy Image Based on Wavelet Transform and New Mathematical Morphology

YU Xiao-qing CHEN Ren-wen TANG Jie XU Jin-ting

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract In order to remove image noise and preserve image edge information in image edge detection, a edge detection method for noisy image based on wavelet transform modulus maxima and improved mathematical morphology edge detection was proposed. Firstly, the image edge detection algorithm based on wavelet transform modulus maxima was introduced. Then a new improved mathematical morphology was proposed. Finally, in order to synthesize the merits of the two algorithms, a new fusion method was used to fuse the results of the two methods together, and a novel edge detection method for noisy image based on wavelet transform and new morphology was proposed. The experimental results show that the proposed fusion detection algorithm can suppress the noise more effectively and improve the edge detection effect than using wavelet transform modulus maxima or new mathematical morphology alone.

Keywords Modulus maximum, Mathematical morphology, Image fusion, Edge detection

1 引言

边缘体现了图像的不连续性,包含了物体的特点和图像的基本信息,是图像最基本的特征。在图像分割与匹配、特征提取和计算机视觉方面,边缘检测发挥着重要的作用,是对图像进一步分析与处理的重要环节^[1-2]。因此,深入研究图像边缘检测方法很有必要。

现有的图像边缘检测的方法有很多,主要分为空域检测和变换域检测。Sobel 算子、Canny 算子、Laplace 算子、Roberts 算子等传统经典的边缘检测算法都属于空域检测。其中应用最为广泛的是 Sobel 算子和 Canny 算子,并且 Canny 算子从理论上首次形成了完善的最优边缘检测理论,已成为边缘检测方面的标准^[3-4]。由于边缘检测涉及方向性,这些算子普遍对噪声很敏感,在实际使用中存在着极大的缺陷^[5]。

小波变换由于在多尺度分析和时频局部化方面有着良好的表现,适用于检测局部突变信号,是滤除图像噪声和边缘检测的有效工具。如文献^[6]根据边缘和噪声的差异,用模极大值法实现了噪声和边缘的分离。数学形态学是一种非线性滤波方法,是物体形状集合与结构元素之间的相互作用,它对边

缘方向不敏感,可以在很大程度上抑制噪声,探测到真正的边缘^[7]。如 Suman 用包含多个结构元素的数学形态学检测器对含有噪声的医学图像进行边缘检测,使得医学图像获得更清晰和连续性更好的边缘图^[8]。

尽管小波变换或数学形态学都有着较好的边缘检测效果,但单一的检测方法只能从单方面反映图像的边缘信息。为了综合两种方法的优点,很多学者将这两种方法进行了融合。如将对小波分解的高频子图像和低频子图像用不同的边缘检测法,将得到的边缘子图像再用小波逆变换融合成最终的边缘图像^[9-10];Yu 等^[11]对小波分解得到的低频成分用拉普拉斯滤波器进行系数增强,对高频成分进行小波阈值去噪和高频系数线性增强,经小波逆变换后再对得到的图像进行形态学边缘检测;Liu 等^[12]将图像小波分解后,对低频子图像用低通滤波器滤波得到形态学梯度图,对高频子图像用模极大值法得到边缘图,对梯度图和边缘图进行不可分加性小波逆变换得到边缘梯度图,最后对其进行二值化后得到最终的边缘图。

本文为了结合小波变换和数学形态学的优点,利用新的图像融合模式,将两种方法融合起来,提出了一种针对含噪图像的边缘检测方法。

本文受国家自然科学基金项目(51675265),江苏高校优势学科建设工程基金资助。

余小庆(1992—),男,硕士,主要研究方向为图像处理、模式识别、机器视觉;陈仁文(1966—),男,博士,教授,主要研究方向为图像处理、压电振动能量采集、智能结构、模式识别、机器学习, E-mail:rwchen@nuaa.edu.cn。

2 原理分析

2.1 基于小波变换模极大值的图像边缘检测

模极大值法主要是通过小波多尺度提取图像边缘。其基本思想是沿着梯度方向,用几个不同尺度的边缘检测算子在相应点上检测模极大值的变换情况。由于在频域内,图像的边缘和噪声都属于高频成分,但边缘含有方向属性和结构属性等特性,因此该方法可以较好地解决抑制噪声和检测边缘之间的矛盾。

小波变换实质上是信号被平滑函数低通滤波后的导数。

设 $\theta(x, y)$ 为二维可微的高斯平滑函数^[13-14], 令

$$\theta(x, y) = \frac{1}{s^2} \theta\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (1)$$

其中, $s=2^j$ 为小波变换尺度。

求 $\theta(x, y)$ 分别对 x 和 y 的偏导数, 可得到小波函数为:

$$\phi_s^1(x, y) = \frac{1}{s^2} \psi^1\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (2)$$

$$\phi_s^2(x, y) = \frac{1}{s^2} \psi^2\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (3)$$

设图像 $f(x, y) \in L^2(R^2)$, 对 $f(x, y)$ 进行卷积处理, 得到尺度 s 上的二维小波变换的两个分量为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} W_s^1 f(x, y) \\ W_s^2 f(x, y) \end{bmatrix} &= s \begin{bmatrix} f(x, y) * \phi_s^1(x, y) \\ f(x, y) * \phi_s^2(x, y) \end{bmatrix} \\ &= s \vec{\nabla} [f(x, y) * \theta(x, y)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\vec{\nabla}$ 为图像函数 $f(x, y)$ 的梯度矢量。

在尺度 s 下, 梯度矢量 $\vec{\nabla}$ 的模为:

$$M_s f(x, y) = \sqrt{|W_s^1 f(x, y)|^2 + |W_s^2 f(x, y)|^2} \quad (5)$$

幅角为:

$$A_s f(x, y) = \arctan\left(\frac{W_s^2 f(x, y)}{W_s^1 f(x, y)}\right) \quad (6)$$

图像的边缘点是模极大值的局部极大值点, 而局部极大值方向就是梯度矢量的方向, 因此沿着梯度矢量 $\vec{\nabla}$ 的方向检测极大值点即可得到图像边缘。

2.2 基于新形态学的图像边缘检测

数学形态学运算主要应用于二值图像。利用形态学检测边缘主要是利用结构元素对图像进行膨胀、腐蚀或者开启、闭合运算后, 再与原图建立一定的数学关系得到图像边缘。

数学形态学的基本运算有: 灰度膨胀运算、灰度腐蚀运算、灰度开运算和灰度闭运算^[15]。令 $f(x, y)$ 代表输入图像, $B(x, y)$ 代表结构元素, D_f 和 D_B 分别代表函数 f 和 B 的定义域。

灰度膨胀的定义为:

$$(f \oplus B)(x, y) = \max\{f(x-i, y-i) - B(i, j)\} \quad (7)$$

灰度腐蚀的定义为:

$$(f \ominus B)(x, y) = \min\{f(x+i, y+i) - B(i, j)\} \quad (8)$$

其中, $(x-i, y-i) \in D_f, (x+i, y+i) \in D_f, (i, j) \in D_B$ 。

灰度开运算是用结构元素 B 对灰度图像先进行腐蚀运算再进行膨胀运算, 即:

$$f \circ B = (f \ominus B) \oplus B \quad (9)$$

灰度闭运算是用结构元素 B 对灰度图像先进行膨胀运算再进行腐蚀运算, 即:

$$f \bullet B = (f \oplus B) \ominus B \quad (10)$$

这些基本的形态学运算虽然操作起来比较简单快速, 但是对噪声很敏感, 且得到的结果很粗糙, 在实际中难以应用。针对这些特点, 有学者提出针对噪声的抗噪型算子^[16]。

抗噪膨胀型算子:

$$y_d = (f \circ B) \oplus B - (f \circ) \bullet B \quad (11)$$

抗噪腐蚀型算子:

$$y_e = (f \bullet B) \ominus B - (f \bullet) \oplus B \quad (12)$$

抗噪膨胀腐蚀型算子:

$$y_{de} = (f \circ B) \oplus B - (f \bullet B) \ominus B \quad (13)$$

文献[3]在这 3 种检测算子的基础上, 分析证明了先进行开运算后进行闭运算可以得到最佳效果的滤波。结合这些学者的研究基础, 通过反复实验分析, 本文提出新抗噪膨胀和腐蚀检测算子:

$$y_d = (((f \circ B_1) \bullet B_2) \oplus B_2) \oplus B_1 - (f \circ B_1) \bullet B_2 \quad (14)$$

$$y_e = (f \bullet B_1) \bullet B_2 - (((f \bullet B_1) \bullet B_2) \ominus B_2) \circ B_1 \quad (15)$$

定义新的边缘检测算子为:

$$y = y_d + y_e \quad (16)$$

其中, B_1 和 B_2 是多次实验得到的较好的结构元素:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

由式(16)得到的边缘图像细节不够丰富, 而式(14)和式(15)得到的边缘图像中有很多细节信息, 因此对两幅图做最小值运算得到细节边缘, 加入边缘图中^[17]。细节信息为:

$$e = \min\{y_d, y_e\} \quad (17)$$

因此, 最终的边缘检测算子为:

$$y_f = y + e \quad (18)$$

本文将该方法定义为新型形态学边缘检测算法, 其具体检测流程如下。

步骤 1 用结构元素 B_1 和 B_2 对噪声图像进行滤波并得到图像边缘。

$$y_d = (((f \circ B_1) \bullet B_2) \oplus B_2) \circ B_2 - (f \circ B_1) \bullet B_2$$

$$y_e = (f \bullet B_1) \bullet B_2 - (((f \bullet B_1) \bullet B_2) \ominus B_2) \bullet B_2$$

步骤 2 提取边缘, 即:

$$y = y_d + y_e$$

步骤 3 对步骤 1 中得到的边缘做最小值运算, 即:

$$e = \min\{y_d, y_e\}$$

步骤 4 对步骤 2 和步骤 3 中的图像边缘做求和运算, 得到最终的图像边缘:

$$y_f = y + e$$

2.3 融合小波变换和新形态学的边缘检测方法

为了综合小波变换模极大值法和数学形态学这两种方法的优点, 得到更好的去噪效果和图像边缘, 现利用小波变换图像融合的方法, 将小波变换模极大值法和改进的新型形态学边缘检测法相融合, 得到最终的图像边缘检测算法(本文使用的小波函数是 db4 小波)。其具体步骤为:

1) 在原始图像中加入噪声, 得到含噪图像。

2) 用小波变换模极大值法提取边缘, 得到边缘图像 A 。

3) 用新型形态学边缘检测算法提取边缘, 得到边缘图像 B 。

4) 应用融合函数对图像 A 和图像 B 进行图像融合。先利用 db4 小波分别对两幅图像进行三层小波分解, 对每层分解得到的 4 个子图像采用系数法融合, 得到每一层融合后的 4 个子图, 再层层重构至得到最终的边缘图像。

融合检测算法的流程图如图1所示。

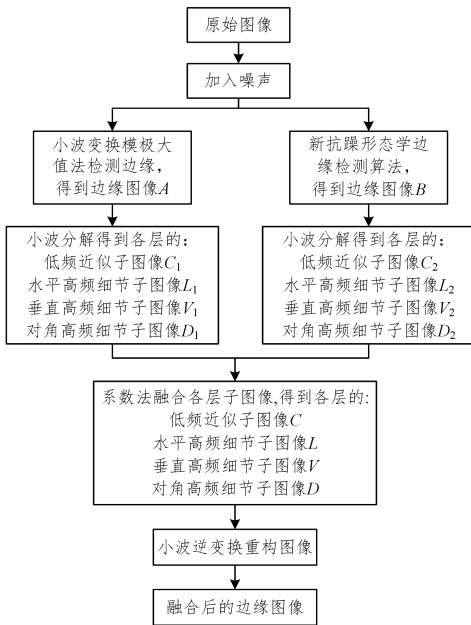


图1 融合检测算法流程

3 实验结果与分析

3.1 新形态学的实验与分析

为了验证本文提出的基于新型形态学的边缘检测法的边缘检测效果和去噪性能,向图片 lena 中加入平均值为 0.1 的椒盐噪声,再分别用文献[3]的算法、文献[17]的算法和本文的形态学算法对其进行边缘检测,检测结果如图2所示。

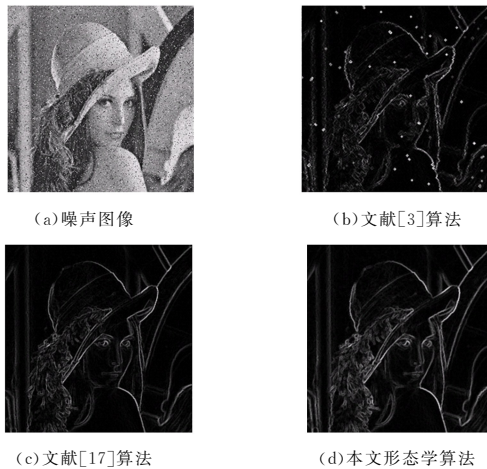


图2 形态学算法处理 lena 图片

从图2中可以看出,文献[3]算法的检测结果边缘不清晰,且噪声没有完全滤除;文献[17]算法的检测结果边缘连续且较清晰,去噪效果很好,但细节信息不丰富;本文的形态学算法的检测结果边缘最为清晰,细节更为丰富,去噪效果很好。为了客观、有效地评价3种算法的边缘检测效果,本文将无噪声条件下 Canny 算法边缘检测的结果作为标准,给出3种算法在不同椒盐噪声浓度下的峰值信噪比(PSNR),结果如表1所列。由表1可得,本文的形态学算法和文献[17]的算法在指标上均远优于文献[3]的算法,这与图2的结果相同;而在噪声浓度较低时,本文的形态学算法与文献[17]的算法结果相近,但当噪声浓度较高时,本文的形态学算法比文献[17]的算法的效果更好,去噪能力更强。

表1 不同噪声浓度下3种形态学算法的PSNR

椒盐噪声	0.005	0.01	0.05	0.1
文献[3]算法	11.2483	11.2528	11.2672	11.1146
文献[17]算法	11.7569	11.7450	11.7379	11.7224
本文形态学算法	11.7578	11.7568	11.7517	11.7454

3.2 融合检测算法的实验与分析

为了验证本文融合算法的边缘检测效果和去噪能力,向图片 lena 中分别添加平均值为 0.05 的椒盐噪声和均值为 0、方差为 0.005 的高斯噪声,再分别用 Sobel 算法、Canny 算法、小波变换模极大值法、新型形态学法和融合检测算法对其进行边缘检测,结果分别如图3和图4所示。

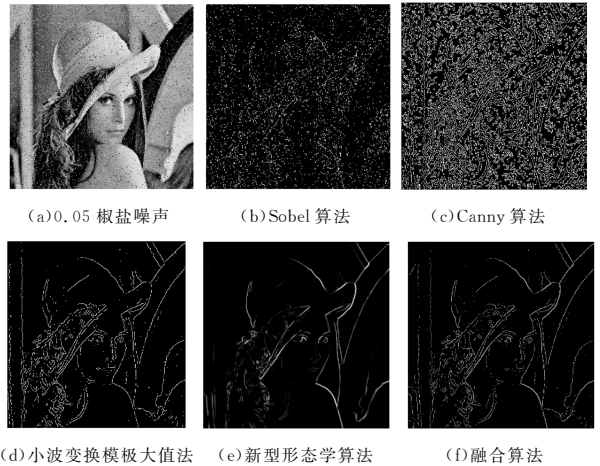


图3 0.05 椒盐噪声的 lena 边缘检测结果

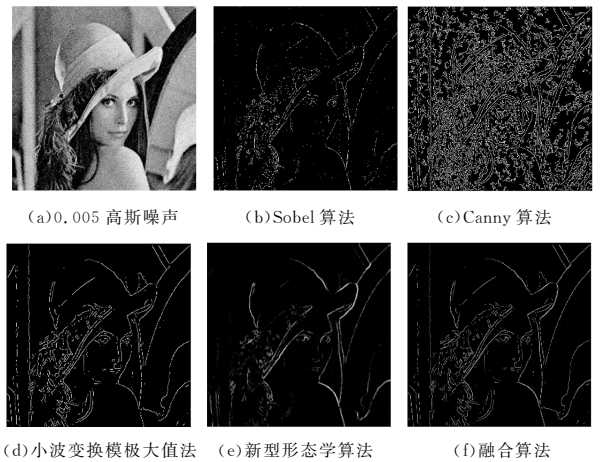


图4 0.005 高斯噪声的 lena 边缘检测结果

由图3和图4可知,传统算法对椒盐噪声或高斯噪声都比较敏感,检测结果受噪声影响较大,且仍有很多噪声未消除;而不论是小波变换模极大值法、新型形态学还是融合算法,对噪声的抑制效果都明显优于传统算法。小波变换模极大值法的边缘性好,但细节信息不丰富,连续性较差;新型形态学的连续性很好,但是边缘信息不够突出;而融合算法将前两者的优点融合到一起,在抑制噪声的同时,既有很好的连续性,又有较好的边缘信息和细节信息。

为客观、有效地评价小波变换模极大值法、新型形态学算法和融合算法的边缘检测效果,分别给出3种算法检测结果的峰值信噪比(PSNR),结果如表2所列。从表2数据可知,融合检测算法在峰值信噪比指标上均优于小波变换模极大值法和新型形态学检测算法,这表明融合算法的去噪能力更强,检测效果更好。

表 2 3种算法在不同噪声下的 PSNR

	小波变换	新形态学	融合算法
0.05 椒盐噪声	11.2382	11.7517	11.9791
0.005 高斯噪声	11.7077	11.5665	12.1746

为进一步分析小波变换模板大值法、新型形态学算法和融合算法在不同噪声条件下的边缘检测效果随噪声变化的情况,分别对如图 5 所示的图片 lena 和 peppers 添加不同浓度的椒盐噪声(平均值分别为 0.001,0.005,0.01,0.05,0.1)和高斯噪声(均值为 0,方差分别为 0.001,0.005,0.01,0.05,0.1),计算 3 种方法检测结果的 PSNR,绘制如图 6 所示的折线图。



图 5 实验图片

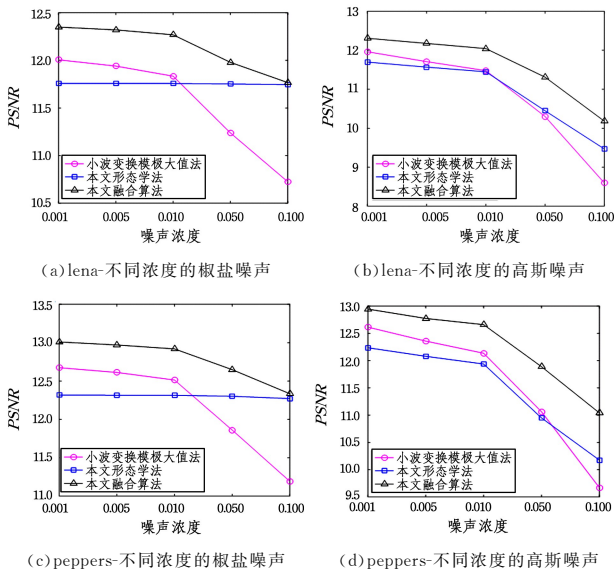


图 6 3种算法对不同噪声图片的检测结果

从图 6 中可知,本文的形态学边缘检测算法对椒盐噪声有着很好的鲁棒性,对于不同浓度的椒盐噪声其检测结果的 PSNR 都能维持稳定,而对高斯噪声则没有很好的鲁棒性,会随着噪声的增加而衰减;不管是椒盐噪声还是高斯噪声,在浓度较低时,小波变换模板大值法和本文的融合算法随着噪声浓度的增加,检测结果的 PSNR 衰减速度较慢,但当浓度超过某一段阈值时,衰减会变快,但本文融合算法的衰减速度更慢;在不同浓度的噪声条件下,融合算法的检测结果均优于单一的小波变换模板大值法和新型形态学算法。

结束语 本文在前人研究的基础上,提出一种新型形态学边缘检测算法,实验表明该算法对噪声图像的检测效果有所提高。之后本文又以一种新的融合方式,将小波变换模板大值法和新型形态学边缘检测算法融合到一起,提出一种融合小波变换和新形态学的含噪图像边缘检测法。实验分析结果表明,本文的融合检测算法对不同浓度、不同类型的噪声图像的边缘检测结果均优于融合前单一的边缘检测算法,在含有噪声的前提下,能更好地抑制噪声、提取图像边缘、保留更多的细节信息,且对不同的图像具有较好的鲁棒性。因而

本文方法更适合含噪图像的边缘检测,更适用于后续图像的处理与分析。

本文尚存在如下几个不足之处有待后期改进:本文的检测方法在噪声浓度较大时,抑制噪声的效果有所降低;且本文的图像融合方法为一般的系数法,没有完全提取每张图像的优点。在后期应用时,应先观察图像特点,根据需要得到的边缘选择合适的形态学算子和结构元素。

参考文献

- [1] 王慧锋,桂柱礼,罗晓明. 基于数学形态学的边缘检测算法研究及应用[J]. 计算机工程与应用,2009,31(2):223-226.
- [2] YANG J,LI X B. Boundary Detection using Mathematical Morphology[J]. Pattern Recognition Letters,1995,16(12):1277-1286.
- [3] 于博,牛铮,王力,等. 抗噪形态学边缘检测新算子[J]. 信息技术,2012(3):10-12.
- [4] 王淑青,姚伟,陈进,等. 基于直方图均衡化与形态学处理的边缘检测[J]. 计算机应用与软件,2016,33(3):193-196.
- [5] ZHANG L,BAO P. Edge Detection by Scale Multiplication in Wavelet Domain[J]. Pattern Recognition Letters,2002,23(14):1771-1784.
- [6] WANG F Y,CHEN M,FEI Q S. The Improved Method for Image Edge Detection Based on Wavelet Transform with Modulus Maxima[J]. Advanced Materials Research,2014,850-851(4):897-900.
- [7] 夏平,刘馨鹭,向学军,等. 基于形态学多结构基元的含噪图像边缘检测[J]. 计算机仿真,2010,27(7):206-209.
- [8] RANI S. A novel mathematical morphology based edge detection method for medical images[J]. Csi Transactions on Ict,2016,4(2-4):1-9.
- [9] 黄海龙,王宏. 一种基于小波变换和数学形态学的边缘检测算法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(9):1315-1318.
- [10] ZHANG W,SHI D,YANG X. An improved edge detection algorithm based on mathematical morphology and directional wavelet transform[C]// International Congress on Image and Signal Processing. IEEE,2016:335-339.
- [11] XIONG Y,LI J,ZUO X, et al. Research on an Edge Detection Algorithm of Remote Sensing Image Based on Wavelet Enhancement and Morphology[J]. Journal of Computers,2014,9(5):1247-1252.
- [12] LIU B,SUN B,GUAN M, et al. Image edge detection method based on nonseparable additive wavelet and morphological gradient[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics,2015,32(6):654-662.
- [13] LIN S. Edge Detection Based on Wavelet Transform and Morphology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2004,25(4):685-687.
- [14] LUAN G,CHE R. A Simple and Efficient Edge Detection Algorithm. [C]// International Symposium on Computer Science and Computational Technology. IEEE,2008:40-44.
- [15] 熊立志,陈立潮,潘理虎,等. 基于多尺度轮廓结构元素的多形状边缘检测[J]. 计算机应用研究,2012,29(9):3497-3500.
- [16] 沈阳. 基于形态学的图像边缘检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2008.
- [17] 邓彩霞,王贵彬,杨鑫蕊. 改进的抗噪形态学边缘检测算法[J]. 数据采集与处理,2013,28(6):739-745.