

数字图像边缘检测方法的分析与研究

张太发,高朝阳

(黑龙江科技学院 数力系,黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要:一幅数字图像就是一个信息系统,大量的信息是由图像的边缘提供的。在图像处理问题中,边缘作为图像的一种基本特征,为人们描述或识别目标以及解释图像提供了一个重要的特征参数。边缘检测是数字图像处理与分析的基础内容之一,在图像处理中占有很重要的地位,其算法的优劣直接影响着所研制系统的性能。介绍了边缘检测技术的基本原理,描述了几种边缘检测方法,对各种方法的优缺点进行了分析,并通过试验对不同算子边缘检测结果进行了详细的分析与比较。最后指出在实践中应根据待解决问题的特点和要求决定采用最优的检测方法。

关键词:边缘检测;小波变换;神经网络;遗传算法;数学形态学

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)10-0141-05

Analysis and Study of Edge Detection Approach in Digital Images

ZHANG Tai-fa, GAO Chao-yang

(Department of Mathematics and Mechanics, Heilongjiang Institute
of Science and Technology, Harbin 150027)

Abstract: An image is an information system, and a great deal of information is offered by edges of the image. Edge is one of the basic characters of an image, which offers people important parameters to describe and recognize objects in image processing. Edge detection is one of the most basic technologies of the digital image processing and analysis. The technology of edge detection takes an important position in image processing. The accuracy of the algorithm influences the whole capability of the developed system directly. The basic principles of edge detection are introduced, several kinds of edge detection methods are described, the advantages and disadvantages are analyzed, and the experimental results of different edge detection are analyzed and compared in detail. Finally, suggest that the optimal edge detection algorithm can be chosen largely depending on the nature of the problem in practice.

Key words: edge detection; wavelet transform; neural network; genetic algorithm; mathematical morphology

0 引言

在图像处理的研究和应用中,人们往往对图像中的某些部分感兴趣,这些感兴趣的部分常称为目标或对象,它们一般对应图像中特定的、具有独特性质的区域^[1]。

图像最基本的特征是边缘,图像的大部分信息都存在于图像的边缘中,主要表现为图像局部特征的不连续性,即图像中灰度变化比较剧烈的地方。因此,把边缘定义为其周围像素灰度有阶跃性变化或屋顶状变化的像素的集合。它存在于目标与背景、目标与目标、

区域与区域、基元与基元之间,为人们描述或识别目标以及解释图像提供了一个有价值 and 重要的特征参数^[2~5]。

边缘检测是数字图像处理与模式识别的基础内容之一,也是图像分割、区域形状提取等图像分析方法的基础,其算法的优劣直接影响着所研制系统的性能。经过人们长期的研究,已经提出了很多具有不同特点的边缘检测方法,但同时也都存在着各自的局限性和不足之处,因此图像的边缘检测这个领域有待于进一步的改进和发展。而根据具体应用的要求,设计新的边缘检测算法或对现有的方法进行改进,得到满意的边缘检测结果仍然是研究的主流方向^[5]。

文中详细介绍并比较了现有的边缘检测方法,给出了边缘检测的基本原理,并通过标准图像对经典的微分算子的边缘检测效果进行了比较,总结出了各种算法的优缺点和使用范围,从而为人们在实际应用中选择合适的边缘检测方法提供了依据。

收稿日期:2010-03-02;修回日期:2010-06-16

基金项目:黑龙江省科技计划项目(GZ08A109);黑龙江省教育科研项目(11541323)

作者简介:张太发(1981-),男,山东郓城人,讲师,硕士,研究方向为计算机图形学与图像处理;高朝阳,副教授,研究方向为应用数学。

1 边缘检测的基本原理

边缘检测是基于物体和背景之间在灰度或纹理特性上存在某种不连续性或突变性进行的一种检测技术,它在计算机视觉、图像分析等应用中起着重要作用,是图像分析与三维重建的重要环节。在图像中,边界表明了一个特征区域的终结和另一个特征区域的开始,边界所分开区域的特性相对比较均匀一致,而不同区域之间在特性上则存在一定差异,边缘检测正是利用物体和背景在某种图像特征上的差异来实现的,这些差异包括灰度、颜色或纹理特征。

边缘检测的基本原理是首先利用边缘增强算子,突出图像中的局部边缘,然后定义图像中的“边缘强度”,通过设置门限的方法提取边缘点。由于轮廓产生于浓度急剧变化的地方,因此可以取出函数变化部分的微分运算就能抽出图像的轮廓。边缘检测的步骤如图1所示^[6]。

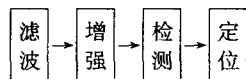


图1 边缘检测步骤

2 传统的边缘检测方法

按照处理的技术,可将边缘检测分为串行和并行两种方式。串行指要想确定当前像素点是否属于欲检测边缘上的一点,取决于先前像素的验证结果;而在并行技术中,一个像素点是否属于检测边缘上的一点取决于当前正在检测的像素点及其邻域内的像素点。最简单的边缘检测方法是并行微分算子法,它利用相邻区域的像素值不连续的性质检测边缘点^[7,8]。

2.1 并行微分算子法

对图像中灰度的变化进行检测,通过求一阶导数极值点或二阶导数过零点来检测边缘,包含一阶微分算子和二阶微分算子两类^[2~4,9,10]。

2.1.1 一阶导数算子

对阶跃状边缘,在边缘点处的一阶导数有极值,因此可以计算每个像素处的梯度来检测边缘点。对图像 $p(x, y)$, 在 (x, y) 处的梯度为 $\text{grad}(x, y) = [\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}]^T$, 其大小和方向为:

$$|\text{grad}(x, y)| = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 + (\frac{\partial f}{\partial y})^2}, \theta = \arctan(\frac{\partial p}{\partial y} / \frac{\partial p}{\partial x})$$

为简化计算,可用梯度的近似表达式:

$$|\text{grad}(x, y)| = \max(|f'_x|, |f'_y|) \text{ 或 } |\text{grad}(x, y)| = |f'_x| + |f'_y|$$

$$\text{其中: } f'_x = f(x+1, y) - f(x, y), f'_y = f(x, y+1) - f(x, y)$$

梯度算子的模板表示见(1),梯度的大小代表边缘的强度,其方向与边缘走向垂直。梯度算子仅计算相邻像素的灰度差,对噪声敏感,无法抑制噪声的影响。

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Prewitt 算子从加大边缘增强算子的模板出发,由 2×2 扩大到 3×3 ,可在检测边缘的同时受噪声的影响较少,模板见(2)。

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sobel 算子在 Prewitt 算子的基础上,对 4 邻域采用带权的方法计算差分,其模板见(3),该算子不仅能检测边缘点,而且能较好地抑制噪声,但得到的边缘较宽。

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.1.2 二阶导数算子

拉普拉斯算子是二阶微分算子,即:

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}$$

对数字图像而言,其表达式为:

$$\nabla^2 f(x, y) = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y)$$

该算子对应的模板见(4),它是一个与方向无关的各向同性边缘检测算子。

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

而 Wallis 算子就是结合拉普拉斯算子与对数算子构造出来的一种微分算子,其对数字图像中的画面锐化比较均衡。

高斯拉普拉斯算子是在拉普拉斯算子的基础上实现的,为了去除噪声的影响,首先要用高斯函数对图像进行滤波,然后对滤波后的图像求二阶导数,即^[11]:

$$f(x, y) = \nabla^2 (G(x, y) * p(x, y)) = (\nabla^2 G(x, y)) * p(x, y)$$

其中, $\nabla^2 G(x, y) = \frac{1}{\pi \delta^4} (\frac{x^2 + y^2}{2\delta^2} - 1) \exp(-\frac{x^2 + y^2}{2\delta^2})$, 是一个各向同性的轴对称函数,称为高斯拉普拉斯算子,边缘检测就是要寻找其过零点。

Canny 算子力图在抗噪声干扰和精确定位之间寻求最佳折中方案,其边缘检测的步骤:

- ① 用高斯滤波器平滑图像;
- ② 计算滤波后图像梯度的幅值和方向;
- ③ 对梯度幅值应用非极大值抑制,其过程为找出图像梯度中的局部极大值,把其他非局部极大值点置零以得到细化的边缘;
- ④ 用双阈值算法检测和连接边缘,使用两个阈值 T_1 和 T_2 ($T_1 > T_2$), T_1 用来找到每条线段, T_2 用来在这些线段的两个方向上延伸寻找边缘的断裂处,并连接这些边缘。

在前面介绍的算子中,相对而言, Canny 的去噪能力最强,能够较好平衡噪声和边缘检测的关系,同时也可检测到真正的弱边缘,但它也易于滤掉一些微小边缘^[12]。

2.2 串行边界查找法

串行边界查找方法通常是查找高梯度值的像素点并将它们连接起来形成最终的边缘。该方法受几个因素的制约:一是起始像素点的选择,二是之前检测到的像素点的连接,三是噪声的影响。典型的串行边缘方法是将该问题转化为寻求最小代价路径的问题。一般有两类方法来寻求最小代价:①贪算法,即在图中进行全局搜索寻找最小代价路径,其不足之处是计算量比较大;②动态规划优化法,为了加快计算的速度,寻求次优解。20 世纪 80 年代初,在 X 射线的心血管图像及肺部图像的边缘检测中已经使用了串行边界查找方

法^[7]。

2.3 实验对比分析

分别采用上述几种常用的微分算子对标准图像进行边缘检测,其结果如图 2 所示。

由图可知,梯度算子提取的边缘有一定丢失,其定位不够准确;Prewitt 算子和 Sobel 算子对边缘的定位就比较准确、完整,但得到的边缘较宽;拉普拉斯算子对噪声的敏感性比一阶算子大,容易产生虚假边缘,很少直接用于边缘检测;Wallis 算子对暗处部分的边缘最为敏感;高斯拉普拉斯算子边缘提取的结果明显优于前面的算子,边缘比较完整准确;相比而言, Canny 算子提取的边缘最为完整、连续、细锐。

上述几种基于微分的传统边缘检测算子的共同优点是计算简单、速度较快,缺点是对噪声的干扰都比较敏感,在实际应用中,要对微分算子加以改进或结合其他算法对图像进行边缘检测。

3 结合特定理论工具的边缘检测方法

3.1 基于拟合的方法

对数字图像进行某种形式的拟合,根据拟合参数确定边缘,包括曲线拟合和曲面拟合。

3.1.1 基于边界曲线的拟合

常用二维曲线来表示不同区域之间的边界,并由图像的梯度等信息确定正确表示边界的曲线。由于该方法得到的是边界曲线而不是离散的像素点,因而对后继处理如物体识别等高层处理有益。在实际的应用

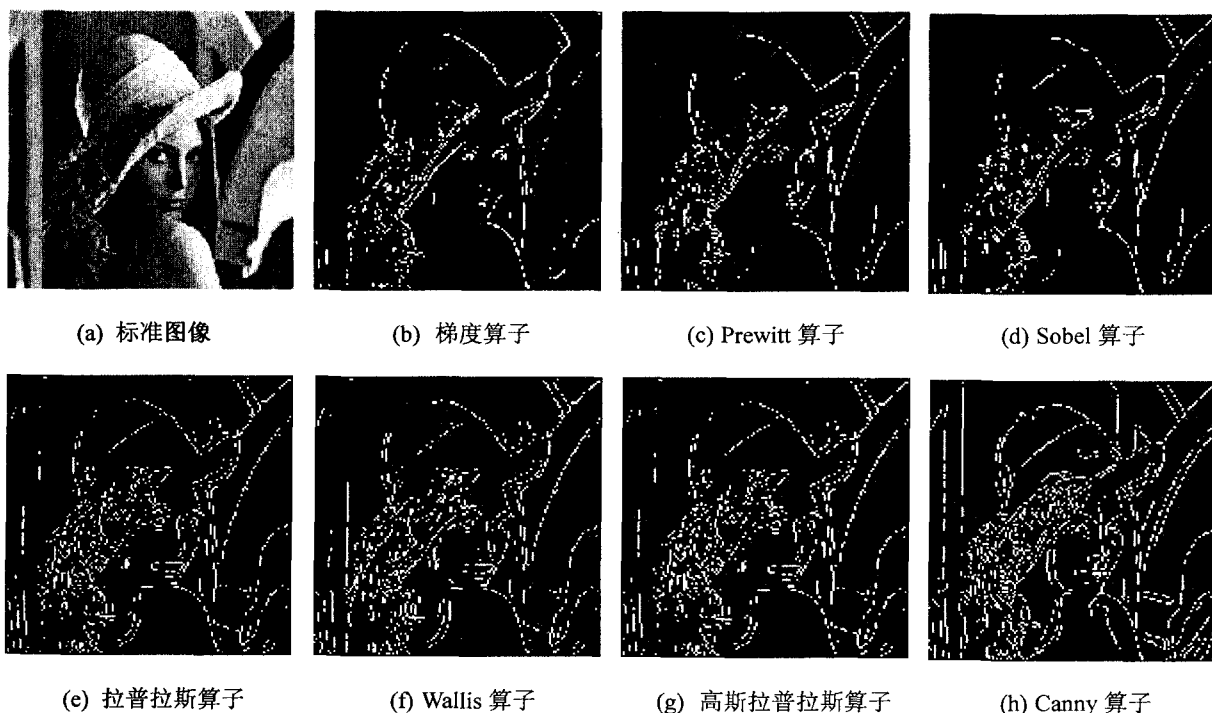


图 2 几种微分算子边缘检测的比较图

中,根据对同类图像分割的知识,给出一条初始的曲线,然后再在具体分割中根据图像数据进行优化修改初始曲线的参数,得到由图像数据决定的最终曲线。除了使用 Fourier 模型外,还可以使用 Gaussian 曲线来设计和拟合边界曲线^[7]。

3.1.2 基于曲面的拟合

将灰度看成是高度,将每一个小窗口内的数据用一个曲面进行拟合,然后根据该拟合的曲面来决定边缘点。如四点拟合灰度表面法,用一平面 $p(x, y) = ax + by + c$ 来拟合空间四邻域像素的灰度值 $f(x, y)$ 、 $f(x, y + 1)$ 、 $f(x + 1, y)$ 、 $f(x + 1, y + 1)$, 均方差为

$$\epsilon = \sum [p(x, y) - f(x, y)]^2$$

按均方差最小准则,令 $\frac{\partial \epsilon}{\partial a} = \frac{\partial \epsilon}{\partial b} = \frac{\partial \epsilon}{\partial c} = 0$, 可解得参数 a, b, c 。按梯度的定义,由平面 $p(x, y)$ 的偏导数 $\frac{\partial p}{\partial x} = a, \frac{\partial p}{\partial y} = b$ 很容易求得梯度。该方法可简化为用模板对图像求卷积进行边缘检测,计算 a 和 b 对应的模板如下:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline -1/2 & -1/2 \\ \hline 1/2 & 1/2 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline -1/2 & 1/2 \\ \hline -1/2 & 1/2 \\ \hline \end{array} \quad (5)$$

3.2 基于小波变换的方法

Mallat 小波边缘检测算子是在 1992 年基于 Canny 检测算子提出的,它是一种多尺度小波变换极大值的方法。从边缘检测的角度,该方法的特点:①数学上的描述完备性;②通过选取合适的滤波器,可以极大地减免所提取的不同特征之间的相关性;③变焦性,即在低频段可使用高频分辨率和低时间分辨率,在高频段可使用低频分辨率和高时间分辨率;④可用过快速算法实现^[5,13]。

小波变换是传统的 Fourier 变换的继承和发展,又有一定的分析非平稳信号的能力,特别适合于图像这一类非平稳信号的处理,其基本思想是沿着梯度方向,分别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变换情况,并通过阈值的选取,再在不同尺度上进行综合,得到最终的边缘,它可以较好地解决噪声和定位之间的矛盾^[7,12,14,15]。

3.3 基于自适应平滑滤波法

基本思想是利用一个小的平均加权模版与图像进行迭代卷积,对应点的信号连续性确定了该模版的系数,它控制了迭代过程中所要保留下来的突变点的幅度。

高斯滤波器是图像平滑处理中最常用的滤波器,这种滤波器有着理想的特性,尤其是随着高斯标准差的增加,对平滑信号的拉普拉斯算子运算不会增加新

的零交叉点,而且高斯卷积可以由一系列的有限窗口均值滤波器得到,比如等权值的小窗口。自适应平滑处理过的图像很好地保留了突变的边缘信息,而且还会使边缘信息得到一定程度的增强,同时噪声信号被平滑掉了。因此,对经过自适应平滑的信号,进行简单的差分运算,然后检测出极大值,就可以实现边缘检测。

3.4 基于神经网络的方法

近年来神经网络提取图像边缘已成为一个新的研究分支,人工神经网络具有的分类属性是实现边缘检测、区域分割的基础,它需要的输入知识较少,也比较适合并行实现。与传统的图像边缘检测方法相比,神经网络具有独特的大规模并行处理、分布式信息存储、良好的自适应性和自组织性,以及很强的学习、联想和容错功能等特征,因此神经网络应用于图像的边缘检测能够得到精确的边缘。

在各种 HN 模型中,应用最广泛的是一类前馈型 HN,用于训练前馈网络的最常用的方法是反向传播 (BP) 算法,其主要思想是从后向前逐层传播输出层的误差,以间接算出隐层误差。目前已经有很多基于 BP 网络的边缘检测算法,但该方法的收敛速度较慢,容易收敛于局部极值,数值稳定性差,而且不容易调整参数,因此在很多实际应用中还要结合其他方法加以改进^[7,12,13]。

3.5 基于遗传算法的方法

遗传算法主要是从达尔文的生物进化论得到启示而新发展起来的一种优化算法,是基于自然选择和基因遗传学原理的搜索算法,计算简单、功能较强,已经应用于图像的边缘检测算法中。采用二阶的边缘检测算子对图像进行边缘检测处理后再进行零交叉,其计算量大、速度慢,所以人们提出了一种二次搜索寻优的阈值选取策略。利用遗传算法自动提取阈值,显著地提高了阈值选取速度,增强了整个视觉系统的实时性和鲁棒性^[12]。

3.6 基于模糊集的方法

图像边缘检测是一种结构不良问题,而描述模糊性和随机性的模糊集理论具有描述不良问题的能力,因此人们将模糊理论引入到解决图像边缘检测的问题之中。二十世纪八十年代中期,Pal 和 King 等提出了一种图像边缘检测模糊算法,首次将模糊集合理论引入到图像的边缘检测中,有效地将物体从背景中分离了出来,并在模式识别和医学图像中获得了良好的作用^[13]。到了九十年代,Udupa 明确阐述了如何更加有效地利用模糊理论来解决实际问题中提出的几点建议,并提出了对目标对象进行刻画的模糊连接度的概

念,他认为目标是以某种凝聚力凝聚在一起而形成物体的,其方法在医学图像的分割问题中得到了较好的结果^[12]。但该方法需要选择阈值和初始种子点,并且模糊连接度中的参数选择问题是一个值得进一步研究的课题。

3.7 基于数学形态学的方法

数学形态学诞生于1964年,它是一门建立在严格的数学理论基础上的学科,所有的形态学处理都基于填充结构元素的概念,结构元素可以具有任意大小和形状。腐蚀和膨胀是基本的形态学运算,它们互为对偶运算,腐蚀具有收缩图像的作用,膨胀具有扩大图像的作用,它们的一些基本运算相互结合可以构造出许多非常有效的图像处理与分析方法^[7,13,16]。

根据形态学的腐蚀、膨胀、开、闭运算定义及扩张性,有四种形态梯度。当结构元素 A 包含原点时,有膨胀型 $MEO1 = f \oplus A - f$ 、腐蚀型 $MEO2 = f - f \ominus A$ 、膨胀腐蚀性 $MEO3 = f \oplus A - f \ominus A$ 、开运算型 $MEO4 = f - f \circ A$ 、闭运算型 $MEO5 = f \cdot A - f$ 、开闭运算型 $MEO6 = f \cdot A - f \circ A$ 。上述形态边缘检测算子是传统线性差分算子在一定意义上的推广,而且其检测出的边缘与结构元素 A 有关。近年来,在传统形态学的基础上,基于顺序形态变换和柔性形态学的边缘检测方法也得到了比较广泛的研究与应用,如顺序病态变换在图像边缘检测中的应用及基于顺序形态边缘检测的红外图像小目标检测方法等。

4 结束语

图像的边缘检测是基于边界的图像分割方法,文中对各种图像边缘检测方法的基本原理进行了较为详细的分析和研究,并通过实例分析比较了经典微分算子边缘检测的结果,为以后的科学研究和实际应用提供了一定的理论依据。

在图像边缘检测中,定位边缘与滤除噪声是相互矛盾处理,很难圆满地同时解决这两个问题。边缘检测作为视觉的初级阶段,实质上通常被认为是一个病态问题,因此很难从根本上解决。近些年来,随着科技的发展和研究的深入,已经有很多研究人员正致力于图像的边缘检测问题,陆续发表了很多的研究成果。

但是由于边缘检测问题自身的复杂性,到目前为止,得到的方法大多都是针对于某个具体系统或任务而言的,还没有一个通用的解决任何一副图像边缘提取的办法。此外,图像边缘检测算法也还没有一个大家都认可的通用的评价标准,这些问题仍需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 贾永红. 数字图像处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [2] 朱红. 数字图像处理基础[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] Marr D, Hildreth E. Theory of Edge Detection[J]. Proceeding of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences, 1980, 207(1167): 187-217.
- [4] Hildreth E C. Edge Detection[J]. A. I. Memo, 1985(858): 1-22.
- [5] 任毅斌, 王子嫣, 于吉红. 数字图像中边缘检测算法综合研究[J]. 计算机与信息技术, 2007(8): 23-26.
- [6] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法综述[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 415-419.
- [7] 林瑶, 田捷. 医学图像分割方法综述[J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(2): 192-204.
- [8] 季虎, 孙即祥, 邵晓芳, 等. 图像边缘提取方法及展望[J]. 计算机工程与应用, 2004(14): 70-73.
- [9] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(1): 679-698.
- [10] Heath M, Sarkar S, Sanocki T, et al. Comparison of Edge Detectors[J]. Compute Vision and Image Understanding, 1998, 69(1): 38-54.
- [11] 张太发, 程东旭, 石端银. 基于Log算子的一种新的边界轮廓线提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(22): 183-185.
- [12] 魏伟波, 芮筱亭. 图像边缘检测方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2006(30): 88-91.
- [13] 迟健男. 图像形态学和小波分析在图像增强与边缘检测中的应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [14] 王康泰. 灰度图像边缘检测研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2007.
- [15] 关琳琳, 孙媛. 图像边缘检测方法比较研究[J]. 现代电子技术, 2008(22): 96-98.
- [16] 崔崎. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.