

基于多尺度轮廓结构元素的多形状边缘检测*

熊立志¹, 陈立潮¹, 潘理虎^{1,2†}, 闫慧敏², 张晓艳¹

(1. 太原科技大学 计算机学院, 太原 030024; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 在图像边缘检测过程中, 针对滤除噪声及有效保留图像边缘信息这对矛盾点进行了研究, 给出一种基于多尺度轮廓结构元素的多形状边缘检测算法。该算法通过多次使用轮廓结构元素的开最大和闭最小运算操作滤除噪声, 运算次数通过比较图像峰值信噪比确定, 降低结构元素对边缘信息的影响; 然后采用多形状多尺度结构元素提取图像边缘, 并利用图像峰值信噪比控制结构元素尺度的选取。与经典边缘检测算法相比, 该算法具有更强的去噪声能力, 且能保留更多的图像细节。仿真实验表明, 有区别地使用轮廓结构元素及多形状多尺度结构元素, 能有效去噪并保留边缘信息。

关键词: 多尺度; 轮廓结构元素; 数学形态学; 边缘检测; 多形状结构元素

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)09-3497-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.079

Morphologic edge detection based on multi-scale contour structuring elements with multiple structuring elements

XIONG Li-zhi¹, CHEN Li-chao¹, PAN Li-hu^{1,2†}, YAN Hui-min², ZHANG Xiao-yan¹

(1. School of Computer Science & Technology, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the research about how to keep more edge information effectively while filtering the noise in the process of image edge detection, this paper proposed an edge detection algorithm based on multi-scale contour structuring elements with multiple structuring elements. Firstly, it adopted a class of open maximum and close minimum morphological filter by using multi-scale contour structuring elements several times determined by the peak signal noise ratio (PSNR), thereby reducing it on the impact of the edge. Then, it adopted multiple structuring elements to extract the edge, determined the scale of the multiple structuring elements by the PSNR. Compared with the classical edge detection algorithm, this algorithm had robust ability to filter the noise, and could retain more edge information. Experimental results show that using the multi-scale contour structuring elements and the multiple structuring elements differently can filter the noise effectively and retain the edge information.

Key words: multi-scale; contour structuring element; mathematical morphology; edge detection; multiple structuring elements

0 引言

图像边缘包含图像的大量信息, 是图像最基本的特征, 边缘检测能提高图像分析和理解水平。由于图像边缘及噪声同属于高频成分, 在有效抑制噪声的同时能尽量检测到更多边缘信息是评价边缘提取方法优劣的一个主要方面。一般来说, 理想的边缘检测算子应具备以下要求: a) 定位精度高, 不发生边缘漂移; b) 对不同尺度的边缘都有良好的响应, 并能充分表现图像边缘的细节特征; c) 对噪声不敏感, 不致因噪声而造成虚假检测; d) 检测灵敏度受边缘方向影响小^[1]。

传统的边缘检测算法是基于空间卷积的, 包括一阶微分的梯度法和二阶微分法, 主要有 Robert、Sobel、Prewitt、Laplacian、Canny 和 LOG 等算子, 这些算子普遍对噪声比较敏感。基于小

波分解的边缘检测方法^[2], 处理效果往往取决于小波分解的级数, 计算量较大。基于数学形态学的边缘是以一定形态的结构元素去度量 and 提取图像中的对应形状, 能有效抑制噪声, 且易实现并行处理, 是一种有效的边缘检测算法。目前, 基于数学形态学的边缘检测算法或注重于使用全方位多角度结构元素而保留更多的边缘信息^[3,4], 或注重于使用多尺度轮廓结构元素而有效地去除噪声。使用全方位多角度结构元素很难有效地去除噪声^[5,6], 而使用轮廓结构元素提取边缘信息的能力却有限, 仅使用轮廓结构元素或仅使用全方位多结构元素提取边缘, 都很难达到去噪并保持边缘信息能力均衡的目的。针对遥感影像的特点(噪声较多、细节信息丰富), 需要一种去噪性能强并能较好地保持影像边缘信息的算法。

本文在基于轮廓结构元素形态学(即 CB 形态学)和广义

收稿日期: 2012-01-14; **修回日期:** 2012-03-12 **基金项目:** 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-EW-306); 国家自然科学基金资助项目(41071344); 太原科技大学博士创新基金资助项目(20102030)

作者简介: 熊立志(1985-), 男, 湖北嘉鱼人, 硕士, 主要研究方向为图像处理、模式识别; 陈立潮(1961-), 男, 山西万荣人, 教授, 博士, 主要研究方向为人工智能、软件工程; 潘理虎(1974-), 男(通信作者), 河南上蔡人, 副教授, 博士, 主要研究方向为人工智能、复杂系统模拟(panlyhoo@sohu.com); 闫慧敏(1974-), 女, 内蒙古锡盟人, 副研究员, 博士, 主要研究方向为土地利用变化及其生态环境效应; 张晓艳(1985-), 女, 河北遵化人, 硕士, 主要研究方向为图像处理、模式识别。

形态开最大(闭最小)滤波器的基础上,给出一种新的多尺度 CB 形态学算子,使用轮廓结构元素降低对边缘信息的影响,且能在尽可能多地保留图像信息的情况下具有更强的噪声抑制功能;在此基础上使用多尺度多形状的结构元素,并使用一种更有效的边缘检测算子,提取更多的边缘信息。

1 数学形态学及形态学滤波器

数学形态学运算主要应用于二值图像,灰度形态学是二值形态学的推广,二者最大的不同在于处理对象和处理时使用的结构元素的差异。

1.1 灰度形态学基本运算

令 $f(x, y)$ 代表输入图像, $B(x, y)$ 代表结构元素, D_f 和 D_B 分别是函数 f 和 B 的定义域。灰度腐蚀的定义为

$$(f \ominus B)(x, y) = \min \{ f(x+i, y+j) - B(i, j) / (x+i, y+j) \in D_f; (i, j) \in D_B \} \quad (1)$$

灰度膨胀的定义为

$$(f \oplus B)(x, y) = \max \{ f(x-i, y-j) - B(i, j) / (x-i, y-j) \in D_f; (i, j) \in D_B \} \quad (2)$$

灰度开运算是用结构元素 B 对灰度图像先进行腐蚀操作然后进行膨胀操作,即

$$f \circ B = (f \ominus B) \oplus B \quad (3)$$

灰度闭运算是用结构元素 B 对灰度图像先进行膨胀操作然后进行腐蚀操作,即

$$f \cdot B = (f \oplus B) \ominus B \quad (4)$$

1.2 形态滤波器

由式(1)~(4)可见,当结构元素的值为正时,灰度膨胀使输出图像更明亮,同时削减或去除暗细节;灰度腐蚀会使输出图像变暗,同时削减或去除亮细节。腐蚀去除了较小的亮细节,而随后的膨胀中又没有恢复,所以灰度开运算常用于去除相对于结构元素而言较小的亮点,同时保留所有的灰度和较大的亮区特征不变;同样膨胀运算除去了较小的暗细节,而这些细节在腐蚀运算中没能恢复,因此,灰度闭运算常用来除去较小的暗细节,使得图像变亮。

形态学滤波器正是基于形态开闭运算来实现噪声去除的,形态开(闭)滤波器可以抑制信号中的正(负)脉冲噪声,但在滤除正负脉冲噪声的同时,也会加大负(正)脉冲噪声的幅度;但是如果使用同一尺度的结构元素进行开闭、闭开滤波,将不能很好滤除正(负)脉冲噪声。为了同时抑制正负脉冲噪声,出现了广义形态开闭和广义形态闭开滤波器,这类滤波器在进行开闭、闭开过程中采用了多尺度的结构元素,能更好滤除正负脉冲噪声^[7]。

对于使用多角度轮廓结构元素去噪,可能会造成在相对于轮廓结构元素尺度上的像素点模糊,对于保留边缘信息会造成很大的影响。基于轮廓结构元素的形态学运算以图像信号团块延展度为处理原则,一般来说,噪声信号的团块延展度小,而图像信号团块延展度较大。由此,基于轮廓结构元素的形态学运算,在去噪时除了对小延展度团块进行处理(填充或删除)外,将完整地保留下那些有用的图像细节而不至于丢失。根据噪声信号与图像信号的不同性质,使用基于轮廓结构元素的形态学运算可降低轮廓结构元素对边缘检测的影响^[5-8]。

定义 1 结构元素 B 的轮廓记为 ∂B ,按连通轮廓定义,则

$\partial B = B - B \ominus N_8$,其中 N_8 如图 1 所示, $\bigcirc$ 为原点。

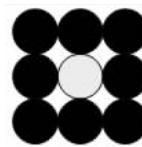


图1 N_8 示意图

定义 2 设灰度图像为 $f(x, y)$, 定义 f 关于 B 的 CB 开变换和 CB 闭变换分别为

$$CBO = f \circ B = (f \ominus \partial B) \oplus B \quad (5)$$

$$CBC = f \cdot B = (f \oplus \partial B) \ominus B \quad (6)$$

1.3 广义 CB 形态开最大和闭最小滤波器

由式(5)(6)可以看出,轮廓开(闭)运算本质上属于广义形态开闭、闭开滤波器,是广义形态开闭、闭开滤波器特殊情况。CB 形态学开(闭)运算在对图像上的堆(坑)进行拉平处理,却加强了一部分坑(堆),而且会损坏图像的细节信息;而广义形态开最大和广义形态闭最小滤波器使用多尺度结构元素,经过取大和取小运算后会减小坑(堆)程度,但仍然存在边缘信息的丢失。由此提出基于轮廓结构元素的广义开最大和闭最小滤波器:

$$MCBO = \max(f, CBO) \quad (7)$$

$$MCBC = \min(f, CBC) \quad (8)$$

$$(MCBO)^r = \underbrace{(MCBO(MCBO(MCBO(f), f), f), \dots, f)}_r \quad (9)$$

$$(MCBC)^r = \underbrace{(MCBC(MCBC(MCBC(f), f), f), \dots, f)}_r \quad (10)$$

可以看出,式(9)(10)的形态滤波器由于反复使用广义 CB 形态开最大和闭最小操作,其结果是最接近原始图像的,因此能保留更多的边缘信息;比广义开闭(闭开)的取大取小运算具有更强的保留边缘信息能力。本文采用重复广义 CB 形态开最大(闭最小)操作,去噪的同时可以有效地保留更多的边缘信息,然后使用峰值信噪比控制 r 大小的选取,因此它具有更强的去噪和保持边缘信息的能力。

2 基于数学形态学的边缘检测

数学形态学边缘检测的基本思想是利用结构元素对信号进行探测,保留与结构元素相似的对象,去除不相关的噪声。形态学边缘检测的输出结果不仅取决于变换形式,而且取决于结构元素的尺寸和形状。单一形状的结构元素,一般很难检测出不同方向的边缘;而多尺度则能保留更多的边缘信息。

2.1 边缘检测算子

传统的数学形态学边缘检测算子有:

膨胀型: $DE = f \oplus B - f$ (外边缘)

腐蚀型: $EE = f - f \ominus B$ (内边缘)

膨胀腐蚀型: $DEE = f \oplus B - f \ominus B$ (欧氏边缘)

文献[9~14]中提到了抗噪型形态学边缘检测算子,修正并提出了下面三种对正负脉冲都有抑制作用的算子:

抗噪膨胀腐蚀型: $NDEE = (f \ominus B) \oplus B - (f \cdot B) \ominus B$

抗噪膨胀型: $NDE = (f \circ B) \oplus B - (f \circ B) \cdot B$

抗噪腐蚀型: $NEE = (f \cdot B) \ominus B - (f \cdot B) \oplus B$

修正以后的边缘检测算子具有很强的噪声抑制能力,对正负脉冲噪声都有很好的抑制作用。虽然这些算子具有良好的噪声抑制能力,但由于采用的是同一尺度结构元,因此其不能

检测得到不同尺度下的边缘;而且在结构元素尺度范围内的邻域,取大(取小)运算后,可能会造成此邻域内均取同一值而模糊边缘,很难保持更多的边缘信息,结构元素越大,模糊程度越高。因此需采用不同尺度的结构元素,一方面有更强的去除噪声能力,另一方面能保留更多的边缘信息。

多尺度梯度算法对于边缘间的相互影响具有很强的抑制作用。在文献[14]中亦提出多尺度定义:设 B_i ($0 \leq i \leq n$) 为一组正方形的结构元素, B_i 的大小为 $(2i+1) \times (2i+1)$, 则多尺度梯度定义为

$$MG(f) = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n [(f \oplus B_i) - (f \ominus B_{i-1}) \ominus B_{i-1}]$$

本文检测边缘所用的多尺度多形状结构元素的形状为: 0° 、 45° 、 90° 、 135° , 如图2所示。其尺度为 3×3 、 5×5 、 7×7 、 $\dots$, 边缘检测算子为

$$MEF1(f) = [(f \ominus B_{i+1}) \oplus B_i \oplus B_{i-1} - (f \oplus B_{i+1}) \ominus B_i \ominus B_{i-1}]$$

$$MEF2(f) = [(f \ominus B_i + 1) \oplus B_i \oplus B_{i-1} - (f \oplus B_{i+1}) \ominus B_i \cdot B_{i-1}]$$

$$MEF3(f) = [(f \ominus B_{i+1}) \oplus B_i \oplus B_{i-1} - (f \oplus B_{i+1}) \ominus B_i \ominus B_{i-1}]$$

其中, $B_{i+1} \supset B_i \supset B_{i-1}$ 。

在一些文献中,为了获得更多的边缘信息,对检测不同尺度或不同形状下的边缘进行加权求和,有的使用均值法,有的使用不同权值,此种方法可能会造成边缘的漂移。本文使用的结构元素为 $B_{i+1} \supset B_i \supset B_{i-1}$, 该算子在进行边缘检测时尺度依次从大到小的顺序,大尺度定位图像边缘,小尺度精确图像的边缘,提取更多的边缘信息。

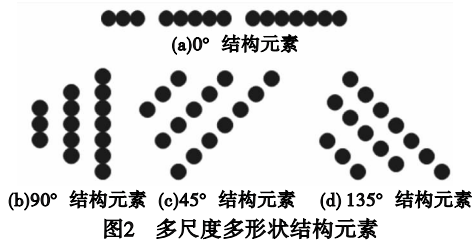


图2 多尺度多形状结构元素

2.2 结构元素尺度的选取

在文献[14]中提出,边缘与尺度之间存在的一定关系:结构元素尺度过大,将导致梯度极大值与边缘不一致;而结构元素尺度过小,将导致梯度图像中心边缘亮度变小。文献[16]研究得出了结构元素尺度 δ 与特征要素边缘尺寸 γ 和特征要素空间尺度 λ 之间的一定关系,并提出了一种最佳结构元素尺寸的自适应确定算法,其中得出结论:当结构元素过大和过小时,相邻尺度间的梯度的差值图像中心边缘都较暗。对于边缘尺度一定的图像,如果结构元素尺度过小,可能会导致检测出来的梯度图像中心边缘的亮度很小,梯度图像甚至会成一幅全黑图像;如前面提到的,如果结构元素尺度越大,梯度图像会越模糊而使检测边缘信息能力变弱。

当选取的结构元素尺度最适宜的时候,其与相邻尺度的梯度图像差值最大,相邻尺度的梯度图像的峰值信噪比差值将最大。当尺度达到一定程度,它们之间的差值基本为零。对于结构元素尺度的选取,本文首先选取的多结构元素尺度为 7×7 、 5×5 、 3×3 , 然后与相邻尺度的梯度之间进行比较,直至当前尺度的梯度图像的信噪比与相邻的信噪比差值最大为止。当然,尽量选择较小尺度,因为相对较小的尺度其保持边缘信息的能力较强。利用客观评价因子 MSE(均方差)和 PSNR(峰值信噪比),其定义如下:

$$MSE = \frac{\sum_{0 \leq i \leq M} \sum_{0 \leq j \leq N} (f_{ij} - f'_{ij})^2}{M \times N}$$

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{M \times N}{MSE}$$

如图3所示,不同形状的结构元素对于不同方向上的边缘灵敏度不同。 0° 对水平方向上的灰度变化有较好的识别能力; 90° 对垂直方向上的灰度变化有较好的识别能力; 45° 对 45° 角方向上的灰度变化有较好的识别能力; 135° 对 135° 角方向上的灰度变化有较好的识别能力。



图3 多形状多尺度提取边缘

2.3 算法实现

根据上述描述,为了能有效抑制噪声的同时提取更多的边缘信息,将形态学去噪及形态学提取边缘两部分,具体的实现算法如下:

- 利用式(9)(10),对图像进行广义 CB 开最大(闭最小)操作。
- 当信噪比取峰值时,开始执行步骤 c), 否则返回步骤 a)。
- 进行多尺度边缘检测,选取初始尺度为 7×7 、 5×5 、 3×3 , 比较相邻尺度梯度图像,相邻尺度的梯度信噪比差值最大即为最适宜尺度。不满足条件则缩小结构元素尺度,若再不满足条件则加大结构元素尺度。
- 依次使用四种形状的结构元素,提取不同方向的边缘。

3 实验结果分析

选取图4(a)作为测试图,测试图中遥感影像地点为长江三角洲,影像为 244×202 像素,256 个灰度级。通过实验验证算法的去噪性能及其保留图像边缘方面的能力。对比 Sobel 算子及 Canny 算子,并对未加噪图及加噪声图的实验结果进行分析。

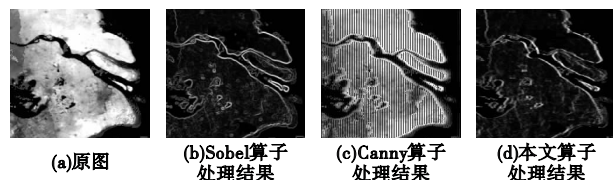


图4 未加噪图处理结果比较

从图4中的四幅图可以看出,在未加噪情况下,本文算子

具有很强的提取边缘信息能力,其抗噪能力更为突出。Sobel 算子提取的边缘较细,但对于边缘较丰富的地方,算子的边缘提取能力较弱,而且抗噪能力较弱;而 Canny 算子提取的边缘较粗,边缘丢失较严重。对比可以看出本文算法提取的边缘较细,抗噪能力较强,且对于遥感影像中纹理信息有较好的识别能力。

图 4(a) 显示在崇明县及上海东面靠海等地方存在大面积的噪声。图 4(b) 显示 Sobel 算子对噪声很敏感,过分割现象较严重,且算子对于较丰富的边缘信息不能较好地处理。对于含有小面积的噪声区域基本不能形成有意义的对象区域而形成太多没有任何意义的圈点的小区域;而对大面积的噪声,则基本没有抑制作用而把它们当做有意义的对象而加以分割。图 4(c) 显示,虽然可以从图中清晰地分辨出一些对象,可是提取的边缘过于模糊,且把太湖下面的一些明显不属于一个区域的地方全合并成为一个大区域。图 4(d) 显示,整幅图滤除了大部分没有意义的对象,在去噪性能及复杂信息的处理能力上都明显优于 Sobel 算子,如对于上海东面靠海的小阴影部分,可以从图 4(d) 中清晰分辨;对于太湖下面明显的灰度变化也可以清晰分辨;在复杂的信息方面,不再是把它们过分割而是分割成有意义的对象。在提取边缘细节信息能力上明显优于 Canny 算子,对于太湖无锡市段,边缘明显比较清晰且细致,对于常熟市最上方的一个小湖泊 Canny 已经不能提取出来。以上只给出了 0° 形状结构元素提取边缘图,对于其他方向 45°、90°、135° 形状结构元素依然能提取出丰富的边缘信息,而且有效地弥补了单一方向的结构元素只对当前方向边缘敏感的缺陷,从而绘出更精确的边缘图。

对于算子的去噪能力,本文主要从两个方面去印证,一是对比客观评价因子 MSE(均方差)和 PSNR(峰值信噪比),二是对比在加噪情况下算子的性能。

表 1 是对于未加噪声时,算子间性能的比较。

表 1 未加噪声时的性能比较

比较项	Sobel 算子	Canny 算子	本文算子
MSE	3 631	3 453	3 042
PSNR	58.325 4	58.472 9	59.049 0

表 2 是对于加噪后,算子间性能的比较。

表 2 加噪声后的性能比较

比较项	Sobel 算子	Canny 算子	本文算子
MSE	3 969	3 786	3 205
PSNR	57.8680	58.0730	58.796 5

由表 1 可以看出,在没有加噪的情况下,本文算子的 MSE 均小于其他传统算法,PSNR 均大于其他传统算法,表明该算法在去噪性能方面优于传统算法。对比表 1 和 2 可以看出,对于加噪以后,本文算法的因子 MSE 及 PSNR 没有明显下降,而传统算法下降明显。

从图 5 的四幅图可以看出,在加噪情况下,本文算子依然能很好地提取图像的边缘。Sobel 算子还能提取影像的外边缘而对于影像的内边缘提取能力很弱,特别是在一些噪声严重的地方,该算子对于提取边缘就无能为力,而 Canny 算子提取的边缘较粗且不能提取部分细小对象,对比可以看出本文算法依然具有很好的边缘提取能力,而且对于遥感影像的中间的纹理信息有较好的识别能力。

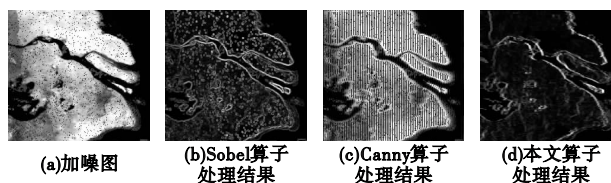


图 5 加噪图处理结果比较

对比图 4(d) 及图 5(d) 可以看出,算子提取的边缘信息基本没有明显区别,加噪和未加噪算子的整体性能基本没有下降,而最明显的区别就是提取的边缘比较粗糙,这主要是由去噪多次使用形态学操作造成的。

对比图 5(b) ~ (d) 可以看出,本文算子并不如 Sobel 算子及 Canny 算子那样在图像加噪情况下性能明显下降。由图 5(b) 看出, Sobel 算子过分割现象更严重,在太湖无锡市附近的太湖边缘很难提取出有边缘意义的边缘了,且对于常熟市附近最上面的一个小湖泊已经被噪声淹没而无法提取,而对于原图上海市附近的一个明显的灰度变化也基本无法辨识。图 5(c) 中,虽然 Canny 算子在抗噪方面优于 Sobel 算子,但图 5(b) 中存在的问题图 5(c) 依然存在,只是比 Sobel 算子稍微有点改善。图 5(d) 显示,对于图 5(b) 及图 5(c) 存在的问题,图 5(d) 有明显改善,对于边缘信息较丰富的点有很好的识别能力,且具有很强的抗噪能力。

4 结束语

本文在基于轮廓结构元素形态学(即 CB 形态学)和广义形态开最大(广义形态闭最小)滤波器分析的基础上,提出了一种多尺度 CB 形态学算子,在此基础上使用多尺度多形状的结构元素提取图像边缘。实验表明该算子具有更强的噪声抑制能力,并能提取更多的边缘信息,有效地利用图像信号与噪声信号之间的区别,有区别地使用轮廓结构元素去噪及保持图像信息方面的能力及多角度多尺度结构元素在提取边缘方面的能力,可以有效实现去噪和保持边缘。如何有效地将各个方向检测得到的边缘融合而不是简单地加权还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 迟健男,方帅,徐心和,等.基于多结构元顺序形态变幻的灰度图像边缘检测[J].中国图象图形学报,2006,11(1):41-46.
- [2] SIGNOLLE N, REVENU M, PLANCOULAIN B, et al. Wavelet-based multiscale texture segmentation; application to stromal compartment characterization on virtual slides [J]. Signal Processing, 2010,90(8):2412-2422.
- [3] 赵春晖,王伟.全方位多结构元形态滤波器[J].中国图象图形学报,1997,2(7):500-503.
- [4] 亢洁,杨刚.自适应权重形态学边缘检测算法仿真研究[J].计算机工程与应用,2010,46(17):163-168.
- [5] 肖梅,韩崇昭,张雷.基于多尺度轮廓结构元素的数学形态学边缘检测[J].西安交通大学学报,2005,39(6):659-660.
- [6] 亢洁,史忠科,杨刚.新颖的 CB 形态学串并复合散斑噪声滤波器[J].光电工程,2008,35(2):85-89.
- [7] 白银刚,于盛林.一种广义多结构元形态滤波器[J].电子学报,2009,37(4):792-797.
- [8] KUMAR J, SHUMUGAM M S. A new approach for filtering of surface profiles using morphological operations [J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture,2006,46(3-4):260-270.

(上接第 3500 页)

- [9] 杨述彬,彭复员,张增常. 多尺度自适应加权形态边缘检测方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2002,30(10):87-89.
- [10] 王坤,高立群,郭丽,等. 多尺度结构元素的数学形态学边缘检测新方法[J]. 东北大学学报:自然科学版,2008,29(4):473-476.
- [11] HE Qing-hang, ZHANG Zhen-xi. A new edge detection algorithm for image corrupted by white-Gaussian noise[J]. *International Journal Electronic Communication*, 2007, 61:546-550.
- [12] PI Qing-ling, HU Jian-yu. Analysis of sea surface temperature fronts in the Taiwan strait and its adjacent area using an advanced edge detection method[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(7): 1008-1016.
- [13] 白相志,周付根. 基于改进形态学算子的多尺度边缘检测[J]. 中国图象图形学报,2007,12(9):1610-1613.
- [14] 卢官明. 一种计算图像形态梯度的多尺度算法[J]. 中国图象图形学报,2001,6(3):214-218.
- [15] BAI Xiang-zhi, ZHOU Fu-gen. Edge detection based on mathematical morphology and iterative thresholding[C]//Proc of International Conference on Computational Intelligence and Security. Berlin: Springer, 2007:953-962.
- [16] 薛存金,苏奋振,周军其. 最佳结构元素尺寸的自适应确定算法[J]. 中国图象图形学报,2006,11(3):317-324.