基于邻域加权的多层次模糊边缘检测算法

张文杰[1],熊庆宇[2],石为人[1],陈舒涵[1]

(1.重庆大学 自动化学院,重庆 400030;2. 重庆大学 软件学院,重庆 401331)

摘 要:针对目前边缘检测方法在低对比度图像、噪声图像中检测效果不理想的问题,本文结合微分算子和模糊边缘检测的优点,提出一种基于邻域加权的多层次模糊边缘检测方法。首先,利用微分算子计算图像梯度特征,依据图像梯度特征对图像进行自适应地分层;然后构造模糊函数,用模糊函数增强不同强度的图像梯度特征,取得了较好的边缘检测结果。仿真实验表明:基于邻域加权的多层次模糊边缘检测算法能较好地检测低对比度图像的边缘,同时能有效抑制椒盐噪声、高斯噪声对图像边缘检测的干扰。

关键词:信息处理技术;边缘检测;邻域加权;分层模糊增强

中图分类号:TN911.73 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2015)03-0998-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201503046

Weighted neighbor-region based multi-level fuzzy edge detection method

ZHANG Wen-jie[1], XIONG Qing-yu[2], SHI Wei-ren[1], CHEN Shu-han[1]

(1. *College of Automation, Chongqing University, Chongqing* 400030, *China*; 2. *The School of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing* 401331, *China*)

Abstract: Most existing edge detection methods can not perform well in low contrast image and noise images. Combing the advantages of differential operator and fuzzy edge detection, a novel multi-level fuzzy edge detection method based on weighted neighbor-region is proposed. First, this method computes the image gradient features, and utilizes the adaptive method to divide image into multiple tiers based on gradient. Then, a fuzzy function is constructed to strengthen different image gradient features in different levels. Experiment results show that the proposed approach can highlight the gradient features in low contrast region of an image with the help of strengthening. Also this approach outperforms the state-of-art methods in terms of both visual quality and noise (Salt and Pepper noise and Gaussian noise) suppression.

Key words: information processing; edge detection; weighted neighbor-region; stratified fuzzy enhancement

收稿日期:2013-10-23.

基金项目:国家自然科学基金项目(90820017);国家科技重大专项项目(2011BAJ03B13).

作者简介:张文杰(1987-),男,博士研究生.研究方向:图像处理与智能计算. E-mail:daaiyiyejian@cqu.edu.cn

通信作者:熊庆宇(1963-),男,教授,博士生导师.研究方向:智能系统与智能计算,自组织网络与控制.
E-mail:xiong03@cqu.edu.cn

0 引　言

数字图像的边缘检测是图像处理与计算机视觉的一项重要技术。在图像中，边缘表明一个特征区域的终结和另一个特征区域的开始，边缘所分开区域的内部特征或属性是一致的，而不同区域内部的特征或属性是不同的，边缘检测正是利用物体和背景在某种图像特性上的差异来实现的[1]。图像边缘检测方法有：蚁群算法[2]、微分算法[3]、基于神经网络的算法[4]、基于模糊理论的算法[5,6]等多种，其中基于微分与模糊理论的边缘检测算法比较简单，并且能够得到较好的检测效果。本文基于微分算子与模糊函数提出一种多层次模糊边缘检测算法。目前边缘检测技术已经广泛应用于目标检测[7]、人脸识别[8]、图像分割[9]等图像分析领域。

基于微分算子的方法利用图像亮度值的不连续性和相似性，将边缘检测转化成图像梯度特征检测。常见的微分算子有：Roberts 算子，Prewitt 算子和 Sobel 算子，拉普拉斯算子，LOG 算子，Canny 算子等[3]。其中，Canny 算子边缘检测效果相对较好，但对受噪声污染的图像边缘检测效果不佳；文献[10]采用了 AGT(Automatically generate threshold)方法，使得阈值能自适应地随图像对比度的变化而变化；Zhao 等[11]结合路面的边缘检测提出一种改进的 Canny 算法。曲智国等[12]利用 Canny 算法计算图像梯度，然后用 SUSAN (Smallest univalent segment assimilating nucleus)边缘算子处理，检测图像的轮廓信息。基于微分算子的方法的主要优点是形式简单、易于实现、运算速度快，但是多数算法严格依据经典数学理论，而实际的图像边缘是不确定的、具有模糊性，用经典数学描述不准确。国外学者 Pal 和 King[6]首次将模糊理论引入到边缘检测中，由于图像边缘梯度的模糊性，该方法能得到较好的边缘检测效果。但 Pal 等的模糊检测算法也有一些不足：丢失相当多的灰度边缘信息；逆变换易引起图像信息损失，算法计算量大等。杨勇和黄淑英[13]提出了一种改进的模糊边缘检测算法，得到较好的边缘检测效果，能抑制椒盐噪声干扰。Zhang 等[14]提出了一种基于高斯函数的模糊边缘检测方法，该方法采用最大类间方差法(Otsu 算法)计算图像阈值，并根据此阈值利用分段线性隶属度函数将图像映射到模糊特征平面，在增强部分采用高斯函数对图像进行分段增强，算法不涉及迭代过程，速度较 Pal 和 King 的算法有所提高。但对于低对比度的图像模糊检测算法仍值得进一步研究。

本文基于微分算子方法具有简单、运算速度快，模糊算法可以更精确检测边缘的优点，提出一种多层邻域加权模糊边缘检测算法。在梯度图像中不同边缘梯度特征的强度不同，本文提出分层方法对不同强度的边缘梯度特征分别使用模糊函数增强，这样能够检测出低对比度图像的边缘，并且本文使用形态学方法处理增强后的图像，去除噪声对图像的干扰，达到较好的边缘检测效果。

1 邻域加权与模糊增强

设 $f(x,y)$ 为图像在 (x,y) 处的灰度值，$\varphi(x,y)$ 为 $f(x,y)$ 的邻域像素点的灰度值，F 为模糊增强函数。首先选择图像邻域加权算子 Y 作用在 $\varphi(x,y)$ 和 $f(x,y)$ 上得 $Y=(\varphi,f)$，然后将模糊增强函数 F 作用在邻域加权算子 Y 上得 $F=F(Y)$，即边缘检测结果[15]。本文通过微分算子构造邻域加权算子 Y，并选取图像点 (x,y) 的 8 邻域(见图 1)对其处理，计算公式如下：

$$Y(x,y)=\sum_{i=1}^{4} g_i\{2f(x,y)-[\varphi_i(x,y)+\varphi_{i+4}(x,y)]\} \tag{1}$$

式中：$\varphi_i(x,y)$ 为 $f(x,y)$ 第 i 个邻域的灰度值；$g_i(x)$ 为方向梯度算子，计算公式如下：

$$g_i(x)=\begin{cases} x, 0<x<T_1 \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

式中：T_1 为去除噪声的阈值，是权衡噪声与梯度信息的参数。

$Y(x,y)$ 是一阶加权微分算子，本文设置阈

$\varphi_1(x,y)$	$\varphi_2(x,y)$	$\varphi_3(x,y)$
$\varphi_8(x,y)$	$f(x,y)$	$\varphi_4(x,y)$
$\varphi_7(x,y)$	$\varphi_6(x,y)$	$\varphi_5(x,y)$

图 1　图像 $f(x,y)$ 的 8 邻域

Fig. 1　neighboring region of image $f(x,y)$

值 T_1 消除图像梯度变化剧烈的噪声点。设置合适阈值 T_1 能够保留较多的梯度信息。本文将阈值设置为图像最大梯度的 χ 倍($0<\chi<1$)。当 χ 较小时可以消除噪声对检测结果的干扰,但同时也会消除部分梯度信息。相反,当 χ 较大时可以保留较多的梯度信息,同时也减弱了对噪声的抑制。在本文中 $\chi=0.6$ 可以使得算法有较好检测结果。

模糊增强函数能够增强图像边缘梯度特征,同时较好抑制背景信息。本文通过如下方式构造算子 F:

$$F=F(Y)=\frac{2\alpha Y\cdot Y_{\max}}{Y^2+(\alpha\cdot Y_{\max})^2} \tag{3}$$

式中:$Y_{\max}$ 为 Y 的最大值;α 为边缘增强因子,$0<\alpha<1$。

当取 $Y_{\max}=255$,$F_1:\alpha=0.25$,$F_2:\alpha=0.4$,$F_3:\alpha=0.7$ 时,$F=F(Y)$ 的曲线如图 2 所示。

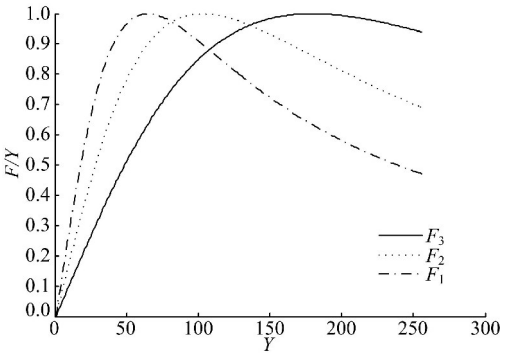


图 2 不同 α 值的函数 $F=F(Y)$ 曲线

Fig. 2 Curves of function $F=F(Y)$ under different α

由 $F=F(Y)$ 的表达式(3)分析可知:①F 在整个定义域[0 255]内先增后减,当 $Y=\alpha\cdot Y_{\max}$ 时取得极大值。在区间[0,$\alpha\cdot Y_{\max}$]上单调递增,$F''(Y)<0$,此时 F 是凹函数,F 随着 Y 的增大而增大的速度逐渐减小;在区间[$\alpha\cdot Y_{\max}$,255]上单调递减,$F''(Y)>0$,此时 F 是凸函数,F 随着 Y 的增大而减小的速度也增大;②$F=F(Y)$ 随 α 的改变,其极大值的位置也会改变。

由上述①分析知模糊增强函数 $F=F(Y)$ 当 $Y=\alpha\cdot Y_{\max}$ 时取得最大值,然后 F 的值向两侧均递减。定义 $Y=\alpha\cdot Y_{\max}$ 为边缘梯度,则与边缘梯度差异较大的梯度被抑制,并且差异越大被抑制得越强。同时调节 α 可以增强不同的边缘梯度特征。当 $Y=\alpha\cdot Y_{\max}$ 时,$F(Y)=1$ 即为边缘,达到边缘检测的目的;当 $Y=0$ 时认为该点为孤立噪声点或非边缘点通过模糊增强函数 $F(Y)$ 被消除,即 $F(Y)=0$。

针对梯度图像中不同强度的梯度特征,本文采用分层方法对不同强度的边缘梯度特征使用模糊函数增强,然后融合增强后的梯度图像,并去除噪声干扰,得到边缘检测结果。算法流程图如图 3 所示。

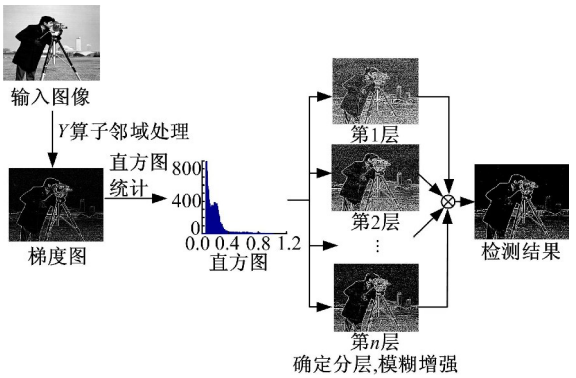


图 3 本文算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the proposed method

2 邻域加权的多层次模糊边缘检测

通过对邻域加权算子与模糊函数的分析,首先,本文使用 Y 算子在 3×3 的邻域计算图像梯度特征;其次,使用直方图统计梯度图像的极值,并分层;然后,构造模糊函数,增强图像的梯度特征;最后,融合增强后的梯度图像同时去除干扰,得到最终的检测结果。在梯度图像中,极大值反映了图像中区域的边缘信息,本文依据极大值确定模糊增强层数。

本文算法具体步骤如下:

步骤 1 Y 算子邻域加权:本文先使用高斯函数处理图像,其次使用式(1)对图像进行邻域加权,然后归一化滤波处理,归一化函数为:

$$Y_d(x,y)=\frac{Y(x,y)-Y_{\min}}{Y_{\max}-Y_{\min}} \tag{4}$$

式中:$Y_d(x,y)$ 为归一化后的梯度图像;$Y_{\min}$ 为 $Y(x,y)$ 的最小值;$Y_{\max}$ 为 $Y(x,y)$ 的最大值。

步骤 2 分层:对梯度图像 $Y_d(x,y)$ 使用自适应的阈值去除背景干扰,然后利用直方图统计,并计算极大值及出现的个数。为了保留更多的梯度信息,本文使用如下公式去除背景干扰:

$$Y_{\text{hist}}(x,y)=\begin{cases}Y_d(x,y), Y_d(x,y)>\lambda\cdot T\\ 0, \text{otherwise}\end{cases} \tag{5}$$

式中：$Y_{\text{hist}}(x,y)$ 为去除背景干扰的梯度图像；T 为 $Y(x,y)$ 的均值；λ 为阈值参数，为了保留更多的梯度信息，本文取 $\lambda=0.1$。

步骤 3　模糊增强：设 $Y_{\text{hist}}(x,y)$ 的极值点为 $a_i \in \{a_1,a_2,\cdots,a_n\}$，令 $\alpha_i \cdot \max\{Y_d(x,y)\}=a_i$，其中 $\max\{Y_d(x,y)\}$ 为 $Y_d(x,y)$ 的最大值；n 为 $Y_{\text{hist}}(x,y)$ 的极值点个数。为了增强各层的边缘梯度特征，本文依据式(3)的函数性质构造模糊增强函数如式(6)所示：

$$f'_i(x,y)=\begin{cases}\dfrac{2Y_d(x,y)\cdot\alpha_i\cdot\max\{Y_d(x,y)\}}{Y_d(x,y)^2+(\alpha_i\cdot\max\{Y_d(x,y)\})^2}+Y_d(x,y), \\ \quad \text{if } \dfrac{2Y_d(x,y)\cdot\alpha_i\cdot\max\{Y_d(x,y)\}}{Y_d(x,y)^2+(\alpha_i\cdot\max\{Y_d(x,y)\})^2}> \\ \quad \beta\cdot\max\{\dfrac{2Y_d(x,y)\cdot\alpha_i\cdot\max\{Y_d(x,y)\}}{Y_d(x,y)^2+(\alpha_i\cdot\max\{Y_d(x,y)\})^2}\} \\ \dfrac{2Y_d(x,y)\cdot\alpha_i\cdot\max\{Y_d(x,y)\}}{Y_d(x,y)^2+(\alpha_i\cdot\max\{Y_d(x,y)\})^2},\text{otherwise}\end{cases} \tag{6}$$

式中：$f'_i(x,y)$ 为第 i 层模糊增强后的梯度图像；α_i 为边缘增强因子；β 为增强阈值参数，本文取 $\beta=0.1$。

步骤 4　将分层增强的梯度图像合成：

$$f'(x,y)=\prod_{i=1}^{n}f'_i(x,y) \tag{7}$$

式中：$f'(x,y)$ 为合成后的图像；n 为 $Y_{\text{hist}}(x,y)$ 的极值点个数。

步骤 5　确定图像边缘并去除伪边缘：由于步骤 3 的分层增强处理，在增强边缘的同时也使其他非边缘及噪声增强，造成图像边缘检测效果变差，需要去除噪声以及伪边缘。本文使用形态学中的开运算操作抑制噪声的影响，然后使用闭运算操作重建由于开运算丢失的边缘，得到最终的边缘图像。

3　实验结果及分析

本文采用 Matlab R2010a 软件进行仿真实验评估算法。为了证明邻域加权的多层次模糊增强边缘检测方法的有效性，本文选用低对比度及有椒盐、高斯噪声干扰的图像进行实验，并比较了单层和多层次模糊增强检测算法、文献[10]和[13]以及传统的 Canny 算法的结果。此外，本文还使用信息熵衡量算法的优劣。其中单层模糊增强检测算法是本文方法把多层简化为单层的结果。在单层的边缘检测过程中，为了兼顾不同强度的边缘梯度特征，我们将直方图统计的极大值的均值设定为边缘梯度进行模糊增强。

在本文实验中，实验 1，3，4 采用 The USC-SIPI 图像数据库第 3 卷：Miscellaneous 评估边缘检测算法。该图像数据库由美国南加州大学免费提供，用于支持图像处理、图像分析、机器视觉等领域的研究工作。Miscellaneous 数据集一共包含 44 幅图像(16 幅彩色图像和 28 幅灰度图像)，在进行边缘检测时该数据库图像经常被用来测试算法性能，例如文献[1,2,4,10,13,16-19]。在实验 2 中使用 Rice 图像验证算法。Rice 图像背景亮度不均匀，增加处理难度，常用用于验证算法性能，如文献[1]和[19]。

实验 1　用低对比度的 Lena 图像比较文献[10]和[13]、Canny 算法以及单层和多次模糊增强边缘检测算法的结果，实验结果如图 4 所示。本文提出的多层模糊增强边缘检测算法保留了较多的细节信息，其他算法损失的边缘信息较多，文献[10]和[13]损失了 Lena 图像的脸部以及头发的边缘信息，Canny 算法能够检测较多 Lena 图像脸部边缘，但也损失较多的头发边缘，如图 4(b)(c)(d)所示。

实验 2　椒盐噪声浓度对算法的影响。本实验比较了文献[10]和[13]、Canny 算法以及单层和多次模糊增强边缘检测算法在加 1%椒盐噪声的 Rice 图像上的检测结果，同时给出了算法在含有不同椒盐噪声情况下的检测结果，实验结果如图 5 和图 6 所示。在图 5 中，本文算法对椒盐噪声有较好的抑制作用，文献[13]能较好地检测图像边缘，受椒盐噪声影响较小，如图 5(b)所示；文献[10]对噪声的抑制作用较弱，Canny 对椒盐噪声的抑制不是很理想，不能完全消除噪声影响，如图 5(c)(d)所示，同时单层的模糊增强对大米边缘的噪声处理效果不佳，如图 5(e)。同时比较了不同椒盐噪声浓度对多层模糊增强的边缘检测算法的影响，如图 6 所示。结合图 5(f)可知，在背景亮度不均匀的 Rice 图像上，当椒盐噪声小于 2%时本文算法可以较好地抑制噪声干扰，而小于 5%(大于 2%)对图像底部背景较暗区域检测结果受噪声影响较图像其他区域要大，如图 6(c)所示，而当加 10%椒盐噪声时噪声对底部较暗区域影响增大，但对于其余区域影响较小，如图 6(d)所示。因此，本文多层模糊增强的边缘检测方法



图 4 低对比度 Lena 图像以及不同算法边缘检测结果

Fig. 4 Lena image with low contrast and edge detection results under different methods

对小于 2%椒盐噪声时有较好的抑制作用。

实验 3 本实验分别测试了文献[10]算法、文献[13]算法、Canny 算法以及单层和多次模糊增强边缘检测算法对高斯噪声的抑制作用,并给出了在 Couple 图像上的实验结果(高斯噪声的均值方差均为 0.001),如图 7 所示。本文算法能较好地抑制高斯噪声的干扰,并保留较多的边缘细节;文献[13]算法未能检测部分细节边缘,如图 7(b)中图像的花瓶边缘;Canny 算法与单层的模糊增强对高斯噪声抑制作用较弱,如图 7(d)(e)所示;文献[10]算法受高斯噪声的影响,使得部分边缘比较模糊,如图 7(c)中窗帘部分边缘模糊。

实验 4 边缘信息熵比较。信息熵是衡量信息量多少的一个指标。在图像边缘检测时,经常用来表示边缘检测算法的优劣[16-17]。信息熵越大,算法的边缘检测效果越好。信息熵的计算公式为:

$$H(x)=-\sum_{i=1}^{n}P_i(x)\log_2 P_i(x)$$

式中:$H(x)$ 为信息熵;$P_i(x)$ 为灰度值为 i 的像素点的概率。

表 1 给出了文献[10]算法、文献[13]算法、Canny 算法以及单层和多次模糊增强边缘检测算法在 Miscellaneous 图像数据集上检测结果的平均信息熵。

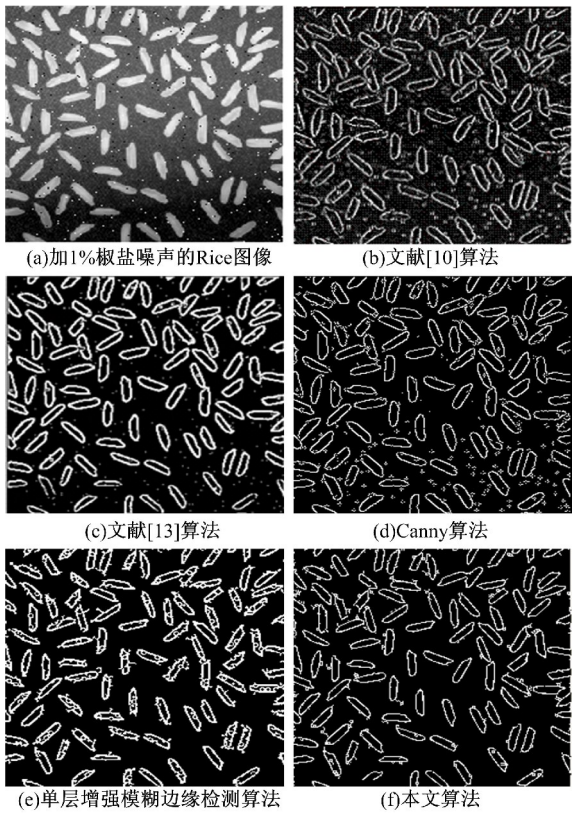


图 5 加椒盐噪声的 Rice 图像以及不同算法边缘检测结果

Fig. 5 Rice image and edge detection results under different methods

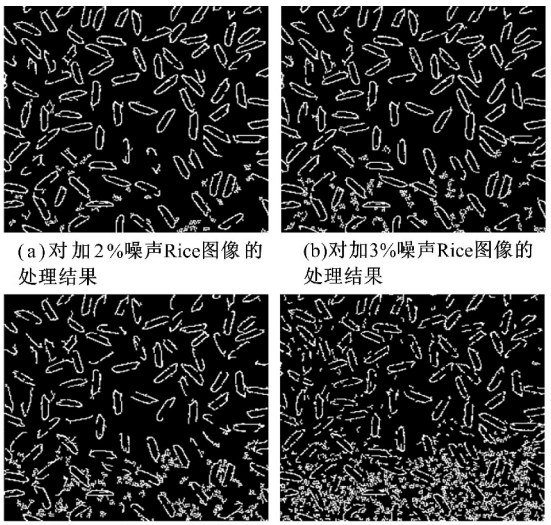
表 1 不同算法的信息熵表

Table 1 Information entropy of different algorithms

算法	信息熵/bit
文献[10]算法	1.70
文献[13]算法	4.83
Canny 算法	0.51
单层模糊增强边缘检测算法	4.22
多层模糊增强边缘检测算法	4.98

由表 1 可知,文献[13]算法的信息熵较单层模糊增强边缘检测算法大,能够保留较多的边缘细节信息。但是对于低对比度图像文献[13]算法检测结果较单层模糊增强算法差,如图 4(c)(e)所示。Canny 算法与文献[10]算法的信息熵较文献[13]算法的小。从表 1 给出的 5 种算法分析,本文采用多层模糊增强的方法进行边缘检测,可以检测较多的边缘细节。

实验结果表明:本文算法对低对比度图像有

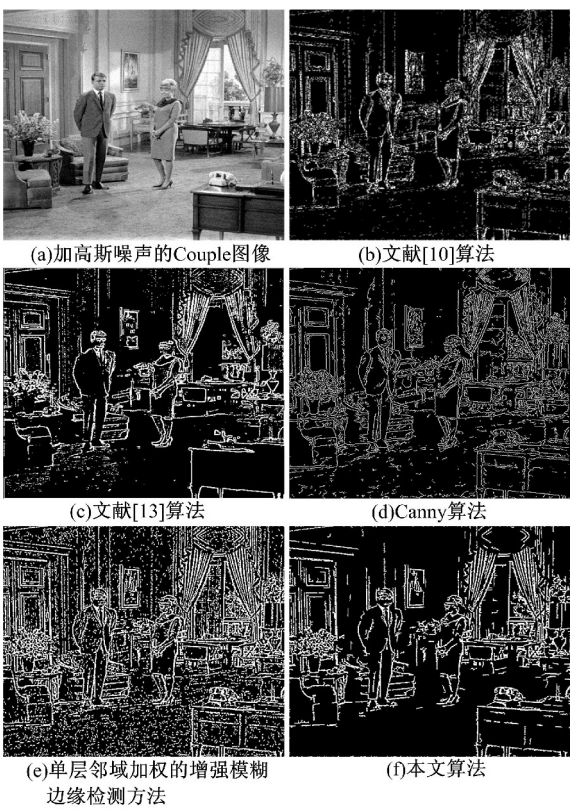


(a)对加2%噪声Rice图像的处理结果　(b)对加3%噪声Rice图像的处理结果

(c)对加5%噪声Rice图像的处理结果　(d)对加10%噪声Rice图像的处理结果

图 6　椒盐噪声对本文多层模糊增强边缘检测算法的影响

Fig. 6　Salt and pepper noise impact on the proposed multi-level fuzzy edge detection



(a)加高斯噪声的Couple图像　(b)文献[10]算法

(c)文献[13]算法　(d)Canny算法

(e)单层邻域加权的增强模糊边缘检测方法　(f)本文算法

图 7　Couple 图像以及不同算法边缘检测结果

Fig. 7　Couple image and edge detection results under different methods

较好的检测效果；同时多层模糊增强边缘检测方法能有效抑制噪声干扰对检测结果的影响。在实验 4 中，本文提出的单层模糊增强算法的信息熵较文献[13]算法的小，但多层模糊增强的方法弥补了单层模糊增强算法的不足，能够保留较多的边缘细节信息。

4　结束语

针对目前图像边缘检测在低对比度图像、噪声图像中出现的检测效果不理想的问题，本文基于邻域加权算子提出了一种多层次模糊增强边缘检测算法。该算法首先用邻域微分算子得到图像的梯度信息，然后依据图像边缘梯度特征，合理分层模糊增强，最后将分层增强的图像合成。本文通过 4 个具体实验验证提出的算法，结果表明：本文算法能够较好地检测低对比度图像的边缘信息，并且多层比单层算法在边缘检测时能够保留更多的边缘细节信息。同时，对于受椒盐噪声、高斯噪声干扰影响的图像，本文算法与其他算法相比有较好的检测效果。因此，本文方法是一种行之有效的边缘检测方法。在将来的研究中，如何准确快速地提取图像中感兴趣对象的边缘，并有效抑制背景区域的边缘，将是我们的研究重点。

参考文献：

[1] 陈超. MATLAB 应用实例精讲：图像处理与 GUI 设计篇[M]. 北京：电子工业出版社，2011：179-188.

[2] Reza-Alikhani H, Naghsh A, Jalali-Varnamkhasti R. Edge detection of digital images using a conducted ant colony optimization and intelligent thresholding[C]// Proceedings of 2013 First Iranian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis, Birjand, 2013: 1-6.

[3] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986(6): 679-698.

[4] Abid S, Fnaiech F, Ben Braiek E. A novel neural network approach for image edge detection[C]// Proceedings of 2013 International Conference on Electrical Engineering and Software Applications, Hammamet, Algeria, 2013: 1-6.

[5] Zhang Jin-ping, Lian Yong-xiang, Dong Lin-fu, et al. A new method of fuzzy edge detection based on Gauss function[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, Singapore, 2010: 559-562.

[6] Pal S K, King R A. On edge detection of X-ray images using fuzzy sets[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983(1): 69-77.

[7] 陈大伟,刘海龙,李金屏. 复杂静态背景下多移动目标实时检测系统的FPGA实现[J]. 吉林大学学报:工学版,2013,43(增刊1):287-290.
Chen Da-wei, Liu Hai-long, Li Jin-ping. FPGA implementation of real-time detection system of moving objects in complicated static background[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2013,43(Sup.1):287-290.

[8] Chiang M L, Lau S H. Automatic multiple faces tracking and detection using improved edge detector algorithm[C]// Proceedings of 2011 7th International Conference on Information Technology in Asia, Kuching, Sarawak,2011:1-5.

[9] Huang J, You X G, Tang Y Y, et al. A novel iris segmentation using radial-suppression edge detection [J]. Signal Processing,2009,89(12):2630-2643.

[10] 冯珂,朱敏,钟煜,等. 一种改进的canny边缘检测AGT算法[J]. 计算机应用与软件,2012,29(3):265-267.
Feng Ke, Zhu Min, Zhong Yu, et. al. An improved canny edge detection AGT algorithm[J]. Computer Applications and Software,2012, 29(3):265-267.

[11] Zhao Hui-li, Qin Guo-feng, Wang Xing-jian. Improvement of canny algorithm based on pavement edge detection[C]// Proceedings of 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, China,2010:964-967.

[12] 曲智国,王平,高颖慧,等. 基于开关式周围抑制的轮廓检测方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2012,42(6):1602-1607.
Qu Zhi-guo, Wang Ping, Gao Ying-hui, et al. Contour detection based on switching surround suppression[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2012,42(6):1602-1607.

[13] 杨勇,黄淑英. 一种改进的Pal和King模糊边缘检测[J]. 仪器仪表学报,2008,9(9):1918-1923.
Yang Yong, Huang Shu-ying. A modified Pal and King algorithm for fuzzy edge detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 9(9): 1918-1923.

[14] Zhang Jin-ping, Lian Yong-xiang, Dong Lin-fu, et al. A new method of fuzzy edge detection based on gauss function[C]// 2010 the 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, Singapore,2010:559-562.

[15] 洪文松,陈武凡. 实现图像边缘检测的改进广义模糊算子法[J]. 中国图象图形学报,1999,2(4):143-147.
Hong Wen-song, Chen Wu-fan. An improved GFO (Generalized fuzzy operator) algorithm for high quality edge-detection of images[J]. China Journal of Image and Graphics,1999,2(4):143-147.

[16] Zhou Ji-hong, Lu Jun, Ling Xian-qing. An adaptive fuzzy entropy algorithm in image edge detection[C]// Proceedings of 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Harbin, China, 2012: 371-374.

[17] Ma Wei-feng, Deng Cai-xia. An improved wavelet multi-scale edge detection algorithm[C]// Proceedings of 2012 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Xi'an, China, 2012: 302-306.

[18] Dun L, Dong Y. A multi-scale edge detection algorithm based on wavelet transform[C]// Proceedings of 2012 Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, Tianjin, China, 2012:21-24.

[19] 冈萨雷斯,伍兹,埃丁斯,等. 数字图像处理:MATLA版[M]. 北京:电子工业出版社, 2005:280-295.