

# 各向异性高通滤波中一种改进型边缘方向估计算法

潘 晴 严国萍 张玉宽

(华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

**摘 要** 由于采用梯度估计法得到的边缘方向往往与实际边缘方向有较大的差距, 从而导致高通滤波的效果降低, 为了提高高通滤波效果, 在研究了滤波器长轴和边缘方向的夹角对滤波效果的影响曲线的基础上, 结合坐标变换, 提出了一种改进型的边缘方向角估计算法。由于该算法尽可能多地利用了区域中像素点的灰度值参与估计, 并选择了1个最优化的方向角估计值, 因此估计的边缘方向更贴近实际边缘。实验中, 以严格遵循“滤波器长轴与实际边缘方向重合”时得到的滤波效果和实验数据作为理想高通滤波的基准, 实验结果表明, 采用这种改进型边缘估计算法所得到的滤波效果和实验数据更趋近于理想高通滤波的基准。

**关键词** 坐标变换 边缘方向估计 各向异性高通滤波

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)06-1077-05

## An Improved Edge's Orientation Estimation Algorithm in Anisotropic High-pass Filtering

PAN Qing, YAN Guo-ping, ZHANG Yu-kuan

(Department of Electronics and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** The edge's orientation obtained with the method of the gray gradient orientation is quite different from the real edge's orientation. Therefore, it causes the deterioration of the high-pass filtering performance, if we place the filter according to the estimated angle obtained with the gray gradient orientation. The influences of the angle of edge's orientation and filter's long axis on the filtering performance have been studied in this paper. Based on the analysis of the curve and combined with a coordinate transformation, an improved algorithm on the method of the gray gradient orientation is proposed. Because of the algorithm making full use of the pixels in the region for a better estimation, then the optimized estimated angle is selected, which is closer to that of the real edge's orientation. If the orientation of the filter's long axis is strictly consistent with that of the real edges, the filtering performance and its material experimental data are regarded as a performance criterion. The experimental result shows that using the algorithm, both the filtering performance and its material experimental data are close better to the performance criterion mentioned above.

**Keywords** coordinate transformation, edge's orientation estimation, anisotropic high-pass filtering

## 1 引言

众所周知, 边缘检测中的高通滤波将直接影响边缘检测的效果, 因此对高通滤波设计方案的研究有着很现实的意义。通常情况下, 图像中边缘的类

型是不同的, 主要表现在边缘缓变的程度不同和边缘方向随机。长期以来, 人们一直在研究如何根据边缘的类型来设计合理的高通滤波器, Witkin 提出了多尺度空间理论<sup>[1]</sup>, 该理论根据图像中不同边缘的缓变程度选择不同尺度的高斯函数进行滤波, 但采用各向同性滤波器必然会损失很多重要的信息。

基金项目: 航天支撑技术基金项目(031.3 JW05)

收稿日期: 2006-09-28; 改回日期: 2006-12-26

第一作者简介: 潘 晴(1975 ~ ), 男, 2007年6月于华中科技大学电信系获通信与信息系统专业博士学位。现为广东工业大学信息工程学院讲师。主要研究方向为图像处理、自动目标识别、光纤通信。E-mail: qpan\_r108@163.com

文献[2]提出了一种方向自适应滤波器设计方法,滤波器是由一组方向滤波器基集元素通过插值后取代数和得到的,但对于基集中各个元素及插值如何选取才能合理地反映滤波器的方向至今仍然是个难题。文献[3]提出了一种自适应高斯滤波方法,其主要思想是在边缘过渡区和平滑区采用不同尺度的高斯核,其不足之处是高斯核的选取方案受图像噪声特性这一不确定因素的影响很大,因此该方法通用性不强,且滤波器是各向同性的。Geusebroek 提出了一种快速各向异性高斯滤波方法<sup>[4]</sup>,该方法通过将某一方向上的滤波器沿两个非正交方向分解为 1 维滤波器与图像卷积,从而使计算简化,其不足之处在于滤波器的长轴方向固定,最终将会影响滤波的效果。在此基础上,王怀野等人也提出了一种自适应各向异性高斯滤波器的设计方法<sup>[5]</sup>,该方法具有以下特点:①滤波器的长轴尺度由独立强度传播模型确定;②长短轴比例由邻域的灰度分布决定;③长轴方向由所在位置的灰度值梯度方向决定。将该方案设计的滤波器不仅能很好地去噪,同时滤波后的图像也很清晰,这显示了该设计方法优于高斯滤波和文献[4]的方法。

可见,对于滤波器设计方案的研究主要集中在滤波器的尺度如何设计,对各向异性滤波器应考虑以下两种极端情况:①当滤波器的长轴方向与边缘方向重合时,对边缘的保持最好;②当滤波器的长轴方向与边缘方向垂直时,边缘最模糊。可见,在各向异性滤波器的设计中,对滤波器的摆放角度进行研究是很有意义的。

文献[4]、[5]是先利用区域的梯度方向估计的边缘方向来确定各向异性滤波器的摆放角度,再滤波。其缺陷是估计的边缘方向往往与实际的边缘方向差异较大,从而使滤波效果大大降低。本文通过研究滤波器长轴和边缘方向的夹角对滤波效果的影响,并结合坐标变换,提出了一种改进型的边缘方向角估计算法。

## 2 理论分析

采用 2 维高斯-拉普拉斯函数作为高通滤波器,其数学表达式为

$$\nabla^2 G_D(u, v) = K \left( 2 - \left( \frac{u^2}{\delta_u^2} + \frac{v^2}{\delta_v^2} \right) \right) \times$$

$$\exp \left[ - \left( \frac{u^2}{2\delta_u^2} + \frac{v^2}{2\delta_v^2} \right) \right] \quad (1)$$

式(1)中,  $K$  为比例常数,  $\delta_u$  和  $\delta_v$  ( $\delta_u > \delta_v$ ) 分别为  $u$  和  $v$  方向上的不同的尺度。设  $u$  方向与  $x$  方向的夹角为  $\theta$ , 则  $u-v$  坐标与  $x-y$  坐标的关系为

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 可得长轴位于  $u$  轴方向上的滤波算子, 即

$$\begin{aligned} \nabla^2 G_D(x, y, \theta) = & K \left( 2 - \left( \frac{(x \cos\theta + y \sin\theta)^2}{\delta_u^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{(y \cos\theta - x \sin\theta)^2}{\delta_v^2} \right) \right) \times \\ & \exp \left[ - \left( \frac{(x \cos\theta + y \sin\theta)^2}{2\delta_u^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{(y \cos\theta - x \sin\theta)^2}{2\delta_v^2} \right) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

图像边缘可看作是不同方向的阶跃函数组合, 某一小段边缘可用以下阶跃函数表示:

$$S_{h,k}(x, y) = \begin{cases} h & \text{如果 } y \leq kx \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$S_{h,k}(x, y)$  边缘线表示为

$$L_{h,k}(x, y) = \begin{cases} h & \text{如果 } y = kx \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

设边缘线与  $x$  轴的夹角为  $\beta$ , 其中  $k = \tan\beta$ 。为分析方便, 令式(3)中的  $\theta = 0$ , 则式(3)变为

$$\begin{aligned} \nabla^2 G_D(x, y) = & K \left( 2 - \frac{x^2}{\delta_u^2} - \frac{y^2}{\delta_v^2} \right) \times \\ & \exp \left[ - \left( \frac{x^2}{2\delta_u^2} + \frac{y^2}{2\delta_v^2} \right) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

对式(6)和式(4)求卷积得

$$I(x, y) = \nabla^2 G_D(x, y) * S_{h,k}(x, y) \quad (7)$$

其中  $*$  表示卷积,  $I(x, y)$  表示滤波后图像中  $(x, y)$  位置上像素点的灰度值。式(7)中原点梯度为

$$\nabla I = \frac{\partial I}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial I}{\partial y} \mathbf{j} \Big|_{x=0, y=0} \quad (8)$$

其中, 滤波后图像  $I$  为图像像素点灰度值矩阵, 式(8)也可视为  $\beta$  的函数, 如式(9)所示

$$\nabla I = f(\beta) \mathbf{i} + g(\beta) \mathbf{j} \quad (9)$$

对式(9)求关于  $\beta$  的一阶偏导数得

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\nabla I)}{\partial \beta} = & \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial \beta} \mathbf{i} + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial \beta} \mathbf{j} \\ = & f_1(\beta) \mathbf{i} + g_1(\beta) \mathbf{j} \quad (10) \end{aligned}$$

式(10)的多项式拟合为

$$\frac{\partial(\nabla I)}{\partial \beta} \approx \sum_{i=0}^n a_i \beta^{n-i} \mathbf{i} + \sum_{i=0}^n b_i \beta^{n-i} \mathbf{j} \quad (11)$$

其中,  $\sum_{i=0}^n a_i \beta^{n-i}$  和  $\sum_{i=0}^n b_i \beta^{n-i}$  分别为  $f_1(\beta)$  和  $g_1(\beta)$  的多项式拟合表达式。对式(11)求积分得

$$\nabla I = \int \frac{\partial(\nabla I)}{\partial \beta} d\beta \approx \left( \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_1 \right) \mathbf{i} + \left( \sum_{i=0}^n \frac{b_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_2 \right) \mathbf{j} \quad (12)$$

$c_1$  和  $c_2$  分别为对  $\sum_{i=0}^n a_i \beta^{n-1}$  和  $\sum_{i=0}^n b_i \beta^{n-1}$  求不定积分后所得的常数项,由式(4)和式(5)可得

$$\sum_{i=0}^n \frac{a_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_1 \Big|_{\beta=0} = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^n \frac{b_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_2 \Big|_{\beta=\frac{\pi}{2}} = 0 \quad (14)$$

当  $n \in N$  时,则可由式(13)和式(14)求不同  $n$  值下的  $c_1$  和  $c_2$ ,再代入式(15),即可得到边缘亮度的变化趋势。

$$|\nabla^2 I| = \sqrt{\left( \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_1 \right)^2 + \left( \sum_{i=0}^n \frac{b_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_2 \right)^2} \quad (15)$$

例如,当  $n=7$  时,则通过式(13)和式(14)可得  $c_1=0, c_2=1.8023$ ,该变化趋势见图1。

图1中,滤波效果的优劣用滤波后边缘亮度衡量。当估计的边缘角度越趋近于边缘实际角度时,滤波后的灰度值越大,由此就构成了本文滤波算法的设计思想。

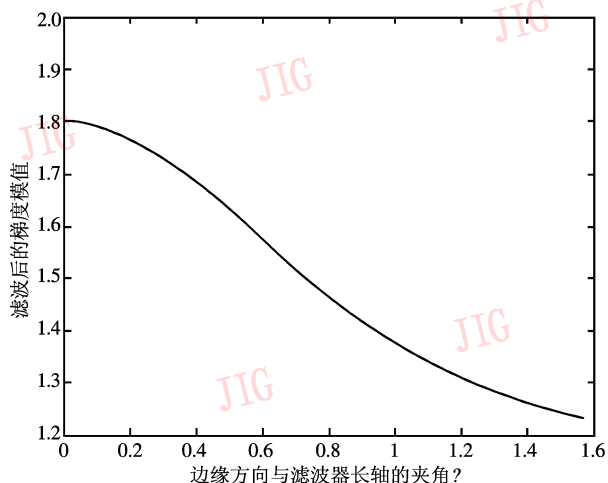


图1 边缘亮度相对于  $\beta$  的变化趋势

Fig. 1 The brightness of edges Vs  $\beta$

### 3 改进型边缘方向估计算法

文献[5]中首先将 Gauss 函数分解为垂直和水平方向上的方向导数,然后通过其与图像的卷积来得到以下水平和垂直方向的梯度<sup>[6]</sup>:

$$E_x = \frac{\partial G(x,y)}{\partial x} * I_1(x,y) \quad (16)$$

$$E_y = \frac{\partial G(x,y)}{\partial y} * I_1(x,y) \quad (17)$$

式中,  $G(x,y)$  为高斯滤波算子,  $I_1(x,y)$  为原始图像中坐标为  $(x,y)$  的像素点的灰度值。对于式中的  $E_x$  和  $E_y$ ,其计算有以下两种方法:

(1)  $2 \times 2$  邻域一阶偏导的有限差分法<sup>[7]</sup>:

$$E_x(x,y) = (I_1(x,y+1) - I_1(x,y) + I_1(x+1,y+1) - I_1(x+1,y))/2 \quad (18)$$

$$E_y(x,y) = (I_1(x,y) - I_1(x+1,y) + I_1(x,y+1) - I_1(x+1,y+1))/2 \quad (19)$$

(2) 像素 8 邻域内一阶偏导数有限差分法<sup>[6]</sup>:

$$E_x(x,y) = I_1(x+1,y) - I_1(x-1,y) \quad (20)$$

$$E_y(x,y) = I_1(x,y+1) - I_1(x,y-1) \quad (21)$$

改进型边缘方向估计算法是先计算点  $(x,y)$  处的梯度方向角

$$\theta(x,y) = \arctg \left[ \frac{E_y(x,y)}{E_x(x,y)} \right] + \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

再将求得的  $\theta(x,y)$  代入式(3)中,即可设计点  $(x,y)$  处的各向异性高通滤波器。以上仅用了  $3 \times 3$  区域中的 4 个像素,为了能够更精确地反映边缘的实际方向角度,需要尽可能多地使用区域中的像素点进行边缘方向估计。

图2中的  $l$  表示图像的边缘,在  $x-y$  坐标系下与  $x$  轴正方向的夹角为  $\theta$ ;若将  $x-y$  坐标系逆时针旋转  $\frac{\pi}{4}$ ,且变换为  $x_1-y_1$  坐标系后,边缘方向与  $x_1$  轴的正方向夹角为  $\theta_1$ ,则有

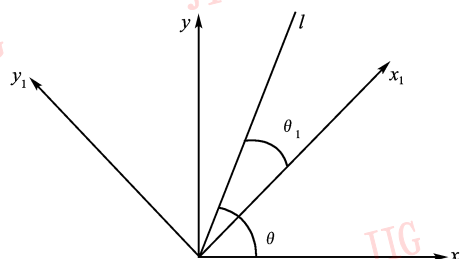


图2 边缘的坐标变换

Fig. 2 The coordinate transformation of the edges

$$\theta = \theta_1 + \frac{\pi}{4} \tag{23}$$

由像素 8 邻域内一阶偏导数有限差分法<sup>[6]</sup>可得

$$\begin{aligned} E_{135^\circ}(x,y) &= I_1(x+1,y+1) - \\ &\quad I_1(x-1,y-1) \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned} E_{45^\circ}(x,y) &= I_1(x-1,y+1) - \\ &\quad I_1(x+1,y-1) \end{aligned} \tag{25}$$

$$\theta_1(x,y) = \arctg\left[\frac{E_{135^\circ}(x,y)}{E_{45^\circ}(x,y)}\right] + \frac{3\pi}{4} \tag{26}$$

设  $\alpha_1 = \theta, \alpha_2 = \theta_1 + \frac{\pi}{4}, \alpha_3 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ , 其中  $\alpha_1, \alpha_2$

和  $\alpha_3$  仅为估计的边缘方向角度值,而在本文的改进型边缘方向角度估计算法中,则需要在其中选择最优化的边缘方向角度估计值,与边缘方向角估计值对应的图像灰度值为

$$\begin{aligned} C_i(x,y) &= \nabla^2 G_D(x,y,\alpha_i) * I(x,y) \\ i &= 1,2,3 \end{aligned} \tag{27}$$

$$D(x,y) = \max\{C_1(x,y), C_2(x,y), C_3(x,y)\} \tag{28}$$

式中,  $C_i(x,y)$  为对应于  $\alpha_i$  的滤波后的灰度值,  $D(x,y)$  为与最优化的边缘方向角度估计值对应的滤波后的灰度值,其所对应的  $\alpha_i$  为区域中估计的边缘方向角。

4 仿真结果分析

为验证本文算法的滤波效果,采用不同的滤波器对图 3(a)进行了高通滤波实验,图 3(b)为利用传统的 LOG 算子滤波的效果,该图显示整个图像滤波效果较差,细节丢失严重。本文仅研究各向异性滤波器放置角度对滤波效果的影响,为了便于对比分析,各滤波器均采用  $\delta_u = 0.8, \delta_v = 0.6$  的定尺度各向异性滤波器。图 3(c)为采用文献[5]边缘方向估计思想的滤波效果,该算法已使滤波效果明显改善。图 3(d)为采用本文滤波算法的滤波效果,显然,相比于图 3(c),图 3(d)的边缘信号更加清晰。

图 4(a)和图 4(b)分别为图 3(c)和图 3(d)中标定区域的放大图,对比两图可见图 4(b)比图 4(a)具有更多的图像细节。图 4(c)为遵循“滤波器长轴与实际的边缘方向一致”原则时的滤波效果,此时角度搜索采样精度为  $\frac{\pi}{100}$ 。相比于图 4(a),

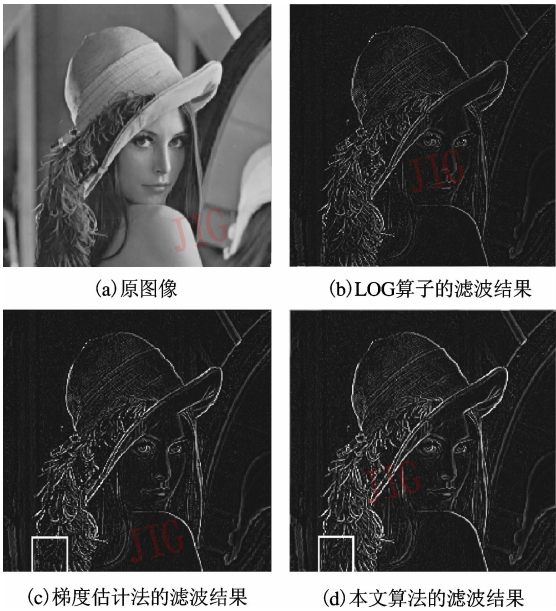


图 3 不同滤波方案的结果

Fig3 Results of different filter

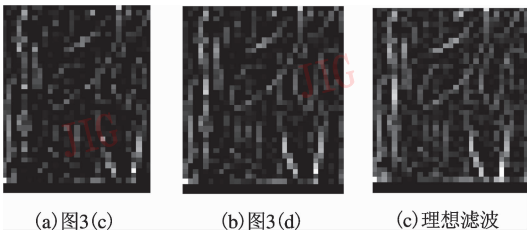


图 4 不同滤波方案下的图 3 中局部区域放大效果图

Fig. 4 The local magnifying plot in Fig. 3 used different filtering scheme

图 4(b)的滤波效果更接近于图 4(c)。

为了更进一步地对比不同算法的滤波效果,在该区域随机地抽取 13 个采样点(将图 4 中各图的左上角第 1 个点的坐标位置定为(0,0),依次类推),表 1 中列出了图 4 中的 3 种滤波算法得到的各点上滤波器摆放角度和滤波后的灰度级。由表 1 可以看出,采用文献[5]的滤波算法,几乎所有点的滤波效果都差于理想情况。而采用本文的滤波算法后,表中一部分像素点的数据发生了变化,滤波后一些像素点的灰度值也明显提高,某些像素点滤波后的灰度值几乎达到理想值。

图 5(a)~图 5(c)分别为图 4(a)~图 4(c)的灰度直方图,相比于图 5(a),图 5(b)中的高灰度值像素点数目明显增加,且更接近图 5(c)。

虽然改进型的边缘方向角估计算法已使得高通滤波效果有了很大的提高,但图 3(c)和图 3(d)所

表 1 不同滤波方案下各采样点的数据比较  
Tab.1 The experimental data of the sampling  
used different filtering scheme

|         | 图 4(a)  | 图 4(b)  | 图 4(c)  | 图 4(a) | 图 4(b) | 图 4(c) |
|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
|         | 中角度     | 中角度     | 中角度     | 中灰度    | 中灰度    | 中灰度    |
| (10,5)  | 1.623 4 | 1.623 4 | 2.324 8 | 41     | 41     | 64     |
| (21,8)  | 1.735 9 | 1.735 9 | 3.141 6 | 0      | 0      | 17     |
| (26,20) | 1.570 8 | 1.570 8 | 1.570 8 | 139    | 139    | 139    |
| (25,5)  | 0.808 7 | 0.808 7 | 1.570 8 | 71     | 71     | 87     |
| (34,16) | 2.819 8 | 2.819 8 | 0.565 5 | 31     | 31     | 32     |
| (19,13) | 1.012 2 | 1.012 2 | 0.754 0 | 77     | 77     | 96     |
| (28,15) | 2.553 6 | 1.607 3 | 2.230 5 | 13     | 31     | 33     |
| (28,27) | 0.876 1 | 0.876 1 | 0.911 1 | 168    | 168    | 169    |
| (5,29)  | 1.570 8 | 1.570 8 | 2.356 2 | 0      | 0      | 10     |
| (14,26) | 1.460 1 | 1.460 1 | 2.293 4 | 33     | 33     | 38     |
| (23,11) | 2.863 3 | 2.118 3 | 2.261 9 | 0      | 21     | 22     |
| (18,10) | 2.896 6 | 1.963 5 | 1.570 8 | 0      | 49     | 49     |
| (28,20) | 2.976 4 | 1.804 6 | 2.199 1 | 48     | 183    | 185    |

对应的滤波方案平均计算时间分别为0.001 86 s/pixel 和 0.005 42s/pixel。由于本文的滤波方案对于图像中的各个像素点,都要设计 3 个滤波器摆放角度,因此其计算量也提高了近 3 倍。由此看来,该算法在改善滤波效果的同时,也带来了计算量的增加。

5 结 论

本文提出了一种改进型的边缘方向估计算法,由于该算法尽可能多地利用了区域中的像素灰度值,因此估计的边缘方向与实际的边缘方向更接近。实验表明,新的滤波方案虽然确实能得到更加清晰的滤波效果,但是却降低了实时性能。在实际应用中,如果能尽量选取较小的模板来降低计算成本,则该高通滤波方案将具有很高的工程价值。

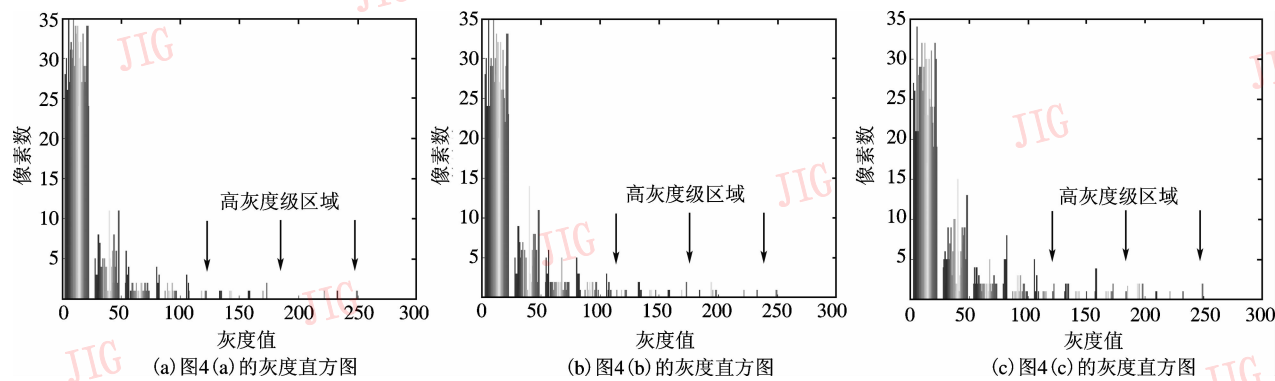


图 5 不同滤波方案的灰度直方图  
Fig.5 The grey scale histograms of different filtering scheme

参考文献 (References)

1

Witkin A P. Scale-space filtering [A]. In: Proceedings of the ACM International Joint Conference on Artificial Intelligence [C], New York, USA,1983, 2: 1019 ~ 1022

2

Freeman W T, Adelson E H. The design and use of steerable filters [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(9): 891 ~ 906.

3

Deng G, Cahill L W. An adaptive gaussian filter for noise reduction and edge detection [A]. In: Proceedings of IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference [C], San Francisco, CA, USA,1993, 3: 1615 ~ 1619.

4

Geusebroek J M, Smeulders A W M, Weiije J V D. Fast anisotropic gauss filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 938 ~ 943.

5

Wang Huai-ye, Zhang Ke, Li Yan-jun. Anisotropic Gaussian filtering for infrared image. [J]. Infrared Millimeter Waves, 2005, 24(2): 109 ~ 113. [王怀野,张科,李言俊. 各向异性滤波在红外图像处理中的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 109 ~ 113.]

6

Wang Zhi, He Sai-xian. An adaptive edge-detection method based on Canny algorithm [J]. Journal of Image and Graphics,2004, 9(8): 957 ~ 962. [王植,贺赛先. 一种基于 Canny 理论的自适应边缘检测方法[J]. 中国图象图形学报,2004,9(8): 957 ~ 962.]

7

Jia Yun-de. Computer Vision [M]. Beijing: Science Press, 2000. [贾云德. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]