

# 一种新的基于区域角度搜索的各向异性高通滤波算法

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** 采用梯度方向法估计的边缘方向往往与实际边缘方向存在的较大差距,导致高通滤波的效果降低。在研究了滤波器长轴和边缘方向的夹角对滤波效果影响曲线的基础上,提出了一种新的基于区域角度搜索的各向异性高通滤波算法,以采用梯度方向法估计的边缘方向角为初始值,利用区域搜索寻找实际的边缘方向角,同时获得该搜索步长下最佳的滤波效果。如果严格遵循“滤波器长轴与实际边缘方向重合”时,将得到理想高通滤波效果,实验结果表明,采用本文滤波方案所得到的滤波效果更趋近于理想。

**关键词** 区域角度搜索 边缘方向估计 各向异性高通滤波

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)09-1549-06

## A New Anisotropic High-pass Filtering Algorithm Based on Region Angle Searching

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 gray gradient orientation may be quite different from the real edge's orientation, leading to the deterioration of the high-pass filtering performance. The influences of the angle of the edge's orientation and the filter's long axes on the filtering performance are studied, and a new anisotropic high-pass filtering algorithm based on region angle searching is proposed in this paper. The angle of gradient is taken as an initial angle. The region angle searching algorithm is then employed to calculate the real edge orientation and to obtain the best high-pass filtering performance at the current searching step. We can achieve the ideal filtering performance on the condition that the orientation of the filter's long axes is consistent well with that of the real edges. The experimental result shows that the filtering performance with the new algorithm put forward in the paper is close to the ideal performance.

**Keywords** region angle searching, edge's orientation estimation, anisotropic high-pass filtering

## 1 引言

边缘检测一直是图像处理中很重要的课题,包括高通滤波、图像二值化等步骤。而高通滤波将直接影响边缘检测的效果。因此对边缘检测中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

要表现在边缘缓变程度的不同和边缘方向的不确定。长期以来,人们一直在研究如何根据边缘的类型设计合理的高通滤波器,Wiktin<sup>[1]</sup>提出了多尺度空间理论,即根据图像中不同的边缘缓变程度选择不同尺度的高斯函数进行图像处理,缺点在于边缘是与方向密切相关的信息,采用这种各向同性滤波必然会损失很多重要的信息。文献[2]提出了一种方向自适应滤波器设计方法,该方向滤波器

基金项目:航天支撑技术基金项目(03 1.3 JW05)

收稿日期:2006-05-12;改回日期:2006-06-26

第一作者简介:潘晴(1975-),男,华中科技大学电子与信息工程系在读博士研究生。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

由一组方向滤波器基集的元素通过计算插值后取的代数和得到,但对于基集中各个元素如何选取以及插值如何确定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,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,而该方案中高斯核尺度是在高斯噪声方差已知的前提下设定的,因此在设计前必须预测高斯噪声的方差。由此看来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,方法通用性不强,且滤波器也是各向同性的。Geusebroek<sup>[4]</sup>提出了一种快速各向异性高斯滤波方法,通过将某一方向上的滤波器沿两个非正交方向分解为两个 1 维滤波器与图像卷积,使计算简化,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<sup>[5]</sup>也提出了一种自适应各向异性高斯滤波器的设计方法,滤波器的长轴尺度根据 DS(独立强度传播)模型确定;长短轴比例由邻域的灰度分布决定;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用于红外图像的处理,不仅能很好地去噪,同时滤波后的图像也很清晰,显示了该设计方法优于高斯滤波和 Geusebroek 法。

对各向异性滤波器考虑两种极端情况,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;当滤波器的长轴方向与边缘方向垂直时,边缘最模糊。可见,即使各向异性滤波器的尺度算法设计得再完美,如果摆放角度不合理,也会大大影响滤波的效果,所以在各向异性滤波器的设计中,对滤波器的摆放角度的研究也是很有意义的。

文献[4]、[5]中显然已经注意到了这个问题,利用区域灰度梯度方向法估计的边缘方向确定各向异性滤波器摆放角度再滤波。但由此估计的边缘方向往往与实际边缘方向差异较大,使滤波器长轴与实际边缘方向夹角过大而大大降低了滤波效果。本文首先从理论上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,以梯度方向法估计的边缘方向角度为初始值,结合区域角度搜索算法,寻找实际边缘方向和当前搜索步长下的最佳滤波效果。实验表明,该高通滤波算法能使滤波效果明显提高。

## 2 理论推导及分析

通常用的高通滤波器实际上是 2 维高斯-拉普

拉斯函数,其数学表达式为

$$\nabla^2 G_0(u, v) = K(2 - (u^2/\delta_u^2 + v^2/\delta_v^2)) \times \exp[-(u^2/2\delta_u^2 + v^2/2\delta_v^2)] \quad (1)$$

式中,  $K$  为比例常数,  $\delta_u$  和  $\delta_v$  ( $\delta_u > \delta_v$ ) 分别为在  $u$  和  $v$  方向上选取的不同的尺度,可得各向异性的高通滤波器,设  $u$  方向与  $x$  方向的夹角为  $\theta$ ,则由坐标变换可以得到  $u-v$  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,

$$\nabla^2 G_0(x, y) = K(2 - ((x\cos\theta + y\sin\theta)^2/\delta_u^2 + (y\cos\theta - x\sin\theta)^2/\delta_v^2)) \times \exp[-((x\cos\theta + y\sin\theta)^2/2\delta_u^2 + (y\cos\theta - x\sin\theta)^2/2\delta_v^2)] \quad (3)$$

式中,  $\theta$  表示滤波器长轴与  $x$  轴的夹角。

边缘的理想模型可以表示为非常靠近的,但像素灰度有较大差异的像素群体现出来的整体效果。复杂的图像边缘可看作不同方向的阶跃函数组合,其中的一小段边缘可用阶跃函数表示:

$$S_{k,k}(x, y) = \begin{cases} h_1 & y \leq kx \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$S_{k,k}(x, y)$  边缘线表示为

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

设边缘与  $x$  轴的夹角为  $\beta$ ,式(5)中,  $h$  为边缘强度,  $k = \tan\beta$ 。主要研究边缘和滤波器长轴的夹角大小对滤波效果的影响,为了分析方便,令式(3)中  $\theta = 0$ ,滤波器长轴与  $x$  轴重合,则式(3)变为

$$\nabla^2 G_0(x, y) = K(2 - x^2/\delta_u^2 - y^2/\delta_v^2) \times \exp[-(x^2/2\delta_u^2 + y^2/2\delta_v^2)] \quad (6)$$

此时,  $\beta$  为边缘与滤波器长轴的夹角。对式(6)和式(4)求卷积得

$$I(x, y) = \nabla^2 G_0(x, y) * S_{k,k}(x, y) \quad (7)$$

式(7)中的原点梯度为

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

式(8)也可视为  $\beta$  的函数,

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

以下为对式(9)中  $|\text{grad}I|$  随  $\beta$  的变化规律作定性分析,求一阶偏导数得

$$\frac{\partial(\text{grad}I)}{\partial\beta} = \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial \beta} \mathbf{i} + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial \beta} \mathbf{j} = f_1(\beta)\mathbf{i} + g_1(\beta)\mathbf{j} \quad (10)$$

式(10)的多项式拟合为

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

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

$$\begin{aligned} \text{grad}I &= \int \frac{\partial(\text{grad}I)}{\partial\beta} d\beta \\ &\approx \left( \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_1 \right) \mathbf{i} + \\ &\quad \left( \sum_{j=0}^n \frac{b_j}{n-j+1} \beta^{n-j+1} + c_2 \right) \mathbf{j} \quad (12) \end{aligned}$$

根据式(4)和式(5),当  $\beta = 0$  时,  $\frac{\partial I}{\partial x} = 0$ ; 当  $\beta = \frac{\pi}{2}$

时,  $\frac{\partial I}{\partial y} = 0$ 。即

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

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

当  $n=7$  时,得  $c_1=0, c_2=1.8023$ ,并代入式(15)

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

图1定性地描绘了图像边缘穿过算子中心时,梯度模值随  $\beta$  在  $[0, \frac{\pi}{2}]$  内的变化趋势,用梯度模值来描述高频滤波的效果。当  $\beta=0$ ,即边缘方向与算子长轴方向重合时,梯度模值为最大,表明滤波效果最好;随着  $\beta$  值的逐渐变大,梯度模值呈现单调降低的趋势;当  $\beta = \frac{\pi}{2}$  时,梯度模值最低,此时滤波效果也最差。

当各向异性滤波器长轴与图像实际边缘方向完全重合时,高通滤波效果最佳。图1中高通滤波效果的性能可采用滤波后边缘亮度来衡量(即对于数字图像而言,采用滤波后的灰度级衡量)。而实际边缘方向角只是一个在区间  $[0, \pi]$  内的未知量。当滤波器的长轴方向角在区间  $[0, \pi]$  内变化时,滤波后的灰度值必将在某个角度上呈现极大值,此时滤波器长轴与实际边缘方向重合。实际上,不可能精确地寻找到这一理想化的角度。在工程上,也不可能从零度角开始以一定的搜索步长寻找满足滤波后灰度级出现极大值的角度来追求图像的理想滤波效

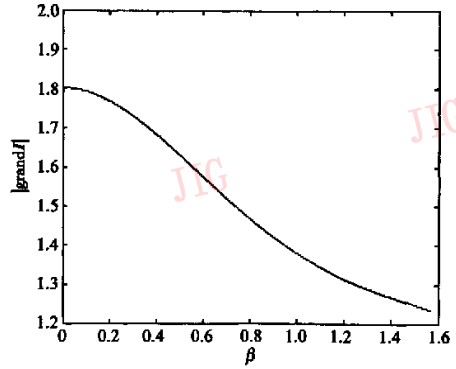


图1 边缘亮度相对于  $\beta$  的变化趋势

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

果,因为这需要耗费大量的计算时间。但是这样得到的滤波效果和数据却可以成为衡量高通滤波算法性能优劣的基准。梯度方向对实际边缘的估计有较大的参考意义,决定了实际边缘方向角在估计值附近,而图1中曲线的单调性决定了搜索只需沿单向即可。由此构成了本文区域角度搜索算法的设计思想。

### 3 基于区域角度搜索的高通滤波算法

利用梯度方向法估计边缘方向,主要采用Canny这种常用的边缘检测算子<sup>[5]</sup>,将 Gauss 函数分解为垂直和水平方向上的方向导数与图像的卷积得到图像在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, \* 表示卷积。对于式中  $E_x$  和  $E_y$  的计算有以下两种方法:

(1) 采用  $2 \times 2$  邻域一阶偏导的有限差分计算<sup>[6]</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) 利用像素8-邻域内的一阶偏导数有限差分计算<sup>[7]</sup>:

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

$E_y(x, y) = I_1(x, y + 1) - I_1(x, y - 1)$  (21)  
并计算  $(x, y)$  处的梯度方向角  $\theta_{\perp}$  :

$$\theta_{\perp}(x, y) = \arctg\left[\frac{E_y}{E_x}\right] \quad (22)$$

边缘的方向角度  $\theta$  与  $\theta_{\perp}$  满足:  $\theta = \theta_{\perp} + \frac{\pi}{2}$ 。如前所述, 此时的  $\theta$  由于与实际边缘的方向角有较大的差距, 如果按照  $\theta$  角度放置各向异性滤波器, 将会大大地降低滤波效果。需要在此估计的边缘方向角的基础上按照下式进行修正,

$$\alpha = \theta + ks \quad (23)$$

其中,  $k$  为修正系数, 取整数;  $s$  为角度搜索步长, 可以根据需要达到的精度和处理时间自行选择  $s$ 。设

$$\begin{cases} \alpha_0 = \theta + ks \\ \alpha_1 = \theta + (k+1)s \\ \alpha_{-1} = \theta - (k+1)s \\ c_i(x, y) = \nabla^2 G(x, y, \alpha_i) * I_1(x, y) \quad i = -1, 0, 1 \end{cases} \quad (24)$$

式中,  $\alpha_1$  和  $\alpha_{-1}$  分别为与  $\alpha_0$  邻近的正向和反向的搜索角度, 而  $c_i(x, y), i = -1, 0, 1$  分别表示在坐标为  $(x, y)$  的像素点上, 将滤波器分别以  $\alpha_i, i = -1, 0, 1$  角度放置时的滤波后灰度级。具体的搜索算法如下:

(1) 搜索方向的确定 式(24)中, 当  $k=0$  时, 若  $c_0(x, y) > c_1(x, y)$  且  $c_0(x, y) > c_{-1}(x, y)$ , 则不搜索,  $\alpha = \alpha_0$ ; 若  $c_{-1}(x, y) < c_0(x, y) < c_1(x, y)$ , 则确定搜索方向为正向搜索; 若  $c_{-1}(x, y) > c_0(x, y) > c_1(x, y)$ ,

则确定搜索方向为反向搜索; 若  $c_0(x, y) < c_1(x, y)$  且  $c_0(x, y) < c_{-1}(x, y)$ , 则不搜索,  $\alpha = \alpha_0 + \pi/2$ 。

(2) 正向搜索策略 在正方向以  $s$  为搜索步长进行实际边缘方向角度搜索, 从  $k=1$  起, 根据式(24)计算  $c_0(x, y)$  和  $c_1(x, y)$ , 直到  $c_0(x, y) > c_1(x, y)$  时则停止搜索,  $\alpha = \alpha_0$ 。

(3) 反向搜索策略 在反方向以  $s$  为搜索步长进行实际边缘方向角度搜索, 从  $k=1$  起, 根据式(24)计算  $c_0(x, y)$  和  $c_{-1}(x, y)$ , 直到  $c_0(x, y) > c_{-1}(x, y)$  时则停止搜索,  $\alpha = \alpha_0$ 。则

$$D(x, y) = \nabla^2 G(x, y, \alpha) * I_1(x, y) \quad (25)$$

式(25)中,  $D(x, y)$  为滤波后的灰度值, 此时  $\alpha$  为区域中通过区域搜索法估计的边缘方向角。

### 4 仿真结果分析

采用不同的滤波器对图 2(a) 进行高通滤波, 图 2(b) 为利用传统的 LOG 边缘检测算子滤波的效果, 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, 为了便于分析, 对滤波器长短轴不采用变尺度。实验中利用  $\delta_x = 0.8, \delta_y = 0.6$  的各向异性滤波器, 图 2(c) 为采用文献[5]中用灰度梯度方向法估计边缘方向的思想进行滤波的效果, 与图 2(b) 相比, 滤波效果明显改善。图 2(d) 为采用本文的区域角度搜索算法进行滤波的效果图, 搜索步长为 0.1, 从而得到比图 2(b) 更清晰的滤波效果。

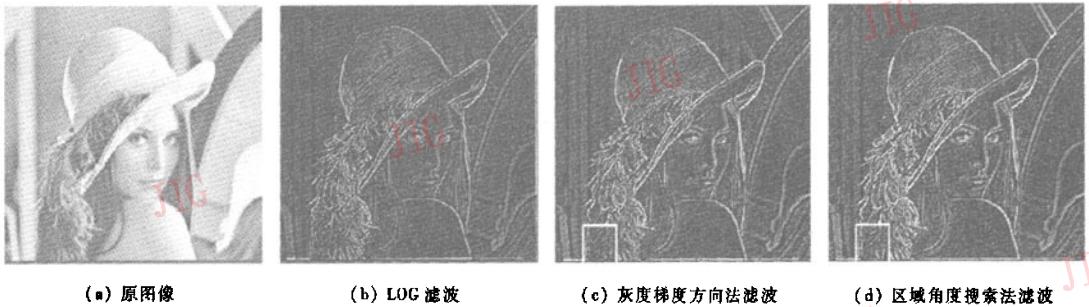


图 2 不同滤波方案的结果

Fig.2 Results of different filter

图 3(a) 和 (b) 分别表示图 2(c) 和 (d) 中标定区域放大图, 在图 3(b) 中具有比图 3(a) 中更多的图像细节。图 3(c) 表示遵循“滤波器长轴与实际边缘的方向一致性”时的滤波效果, 此时角度采样精

度为  $\pi/100$  (也可根据需要自行设计采样精度)。相比于图 3(a), 图 3(b) 更接近于图 3(c), 可见本文的滤波方案与文献[5]中灰度梯度方向法相比, 其滤波效果更趋于理想。

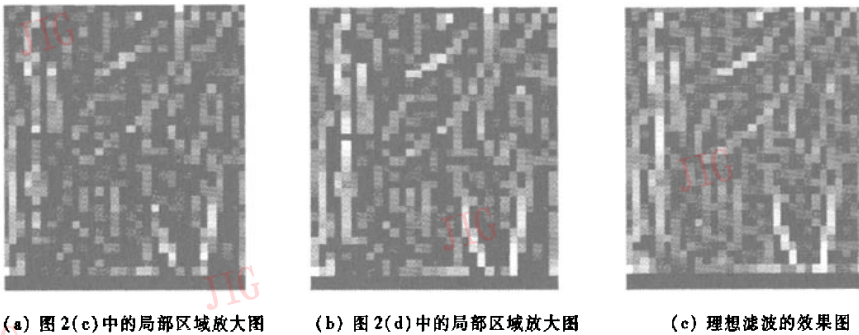


图3 不同滤波方案下的图2中局部区域放大效果图

Fig.3 The local magnifying plot in Fig.2 used different filtering scheme

以下从具体的实验数据上分析造成上述滤波效果差异的原因,于标定区域中随机抽取10个采样点,表1列出了分别用图3中的3种滤波方案得到的各点上滤波器摆放角度和滤波后的灰度级。角度数据和灰度数据的第一列分别列出了采用文献[5]中滤波算法所得到的角度和滤波后的灰度级,可见除了如(26,20)的极个别点上滤波后灰度级与理想情况相同外,其余各点的滤波后灰度级都远远低于理想情况,这是由于采用区域灰度方向估计的边缘方向与真实的边缘方向还有较大的

差距所造成的(理想情况下的边缘角度和滤波后的灰度级见表中角度数据和灰度数据的第3列)。表中角度数据和灰度数据的第3列表示采用本文的区域角度搜索算法后所得到的滤波器放置角度和滤波后的灰度值,显然它们都更加逼近于理想情况。图3(b)和3(c)之间在滤波效果和实验数据上的差别主要是由于采用区域角度搜索算法的搜索步长与理想滤波(严格遵循各向异性滤波器长轴方向与实际边缘方向重合的规律)方案下的采样精度不同所造成的。

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

坐标	图3(a)中角度	图3(b)中角度	图3(c)中角度	图3(a)中灰度	图3(b)中灰度	图3(c)中灰度
(10,5)	1.6234	2.4234	2.3248	41	64	64
(26,20)	1.5708	1.5708	1.5708	139	139	139
(25,5)	0.8087	1.7086	1.5708	71	87	87
(34,16)	2.8198	0.0782	0.5655	31	31	32
(19,13)	1.0122	0.6122	0.7540	77	96	96
(28,15)	2.5536	2.1536	2.2305	13	32	33
(28,27)	0.8761	0.8761	0.9111	168	168	169
(14,26)	1.4601	2.3601	2.2934	33	38	38
(18,10)	2.8966	1.9635	1.5708	0	49	49
(28,20)	2.9764	2.0764	2.1991	48	185	185

仿真实验中也对图3中3幅图像的各自灰度级总和进行了计算,图3(a)、(b)和(c)中灰度级的总和分别为14855、21613和25548。对于滤波后只含有高频信号的图像,其灰度级总和越大,表明滤波后能保持的高频信号越多,细节越丰富。

以上从具体的实验数据上验证了采用灰度梯度估计边缘的滤波算法得到的滤波效果与理想滤波效果还有比较大的差别,而采用本文的区域角度搜索算法后,滤波效果得到了改善。从图3中3幅图像的灰度直方图上分析,也可以得到这种变化趋势。

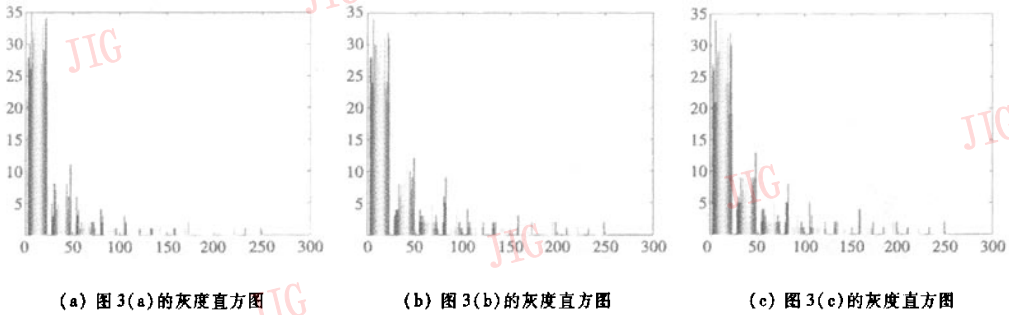


图 4 不同滤波方案的灰度直方图

Fig.4 The grey scale histograms of different filtering scheme

图 4(a)~(c)分别为图 3(a)~(c)的灰度直方图,相比于图 4(a)和(b)中高灰度级像素点数目明显增加,在灰度级大于 100 以后表现得尤为明显,且接近于理想滤波后的直方图(图 4(c))。

最后对图 2 中涉及的几种滤波算法的像素的平均计算时间进行了比较(计算机配置为 XP2500 中央处理器、256M 内存),图 2(b)、(c)和(d)所对应的滤波方案中平均计算时间分别为 0.000 03s/pixel、0.001 86s/pixel、0.011 96s/pixel。显然图 2(b)中采用现成的 LOG 模板省去了生成不同方向滤波器模板的过程,其计算时间相对于图 2(c)中的灰度梯度估计边缘角度的算法也就缩短了很多。而本文的方案(图 2(d))在判断各点的角度搜索方向时,需要计算滤波器分别以 3 个不同的角度放置时的滤波效果,相对于图 2(c)中的方案,其计算时间在区域搜索开始之前就已经提高了 3 倍,而总体计算时间则提高了近 7 倍。由此可见,本文的滤波方案在带来更好滤波效果的同时,也增加了计算时间。因此在实际工程应用中,首先应该尽量选取较小的模板来降低计算的成本;其次,应该根据高通滤波所要求的精度和处理时间来合理选择搜索的步长。

## 5 结论

本文针对各向异性高通滤波中采用梯度估计的边缘方向与实际边缘方向差距较大,从而大大降低滤波效果的缺陷。在证明和分析了滤波器长轴和边缘方向的夹角与滤波效果关系曲线的基础上,提出

了区域角度搜索算法。以采用梯度估计的边缘方向角为初始值,利用区域搜索的方法寻找实际的边缘方向角和该搜索步长下最佳的滤波效果。实验表明本文的滤波方案确实能得到更加清晰的滤波效果。如果能尽量选取较小的模板来降低计算成本,并能根据精度和处理时间合理选择搜索步长,则该高通滤波方案将具有很高的工程价值。

## 参考文献 (References)

- 1 Witkin A P. Scale-space filtering [A]. In: Proceedings of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence [C], Karlsruhe, Germany, 1983, 2: 1019 ~ 1022.
- 2 Freeman W T, Adelson E H. The design and use of steerable filters [J]. IEEE Patt Anal Machine Intell, 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, Weije 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 Millim. 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 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.]
- 7 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.]