

文章编号: 1672-2892(2011)02-0202-05

Zernike 矩结合 Sobel 算子的边缘检测

董 静, 王正勇

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘 要: 提出了一种亚像素级的噪声图像边缘检测算法。首先使用基于各向异性扩散的非线性正则化 Perona-Malik 模型, 实现对图像的平滑滤波; 然后用改进的 Sobel 算子对图像进行初步边缘检测, 将检测到的包括真正的和少数伪边缘点的坐标生成链表记录下来, 原灰度图像保留; 最后利用 Zernike 矩进行亚像素级的边缘精确定位。实验结果表明, 此算法解决了传统算法中伪边缘点过多和边缘检测结果较宽的问题, 图像的质量接近于定位准确度为亚像素级的小波算法。

关键词: 正则化 Perona-Malik 模型; Sobel 算子; Zernike 矩; 边缘检测; 亚像素级

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

Edge detection based on Zernike moments and Sobel operator

DONG Jing, WANG Zheng-yong

(Image Information Institute, College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: A sub-pixel level algorithm in edge detection of noisy image was proposed. Firstly, the nonlinear regularized Perona-Malik model based on anisotropy diffusion was adopted to realize smooth filtering on the image. Then the improved Sobel operator was used to perform preliminary edge detection on the image and record the coordinates of the real and a few false edge points in the form of linked list with the original gray image being retained. Finally, the proposed Zernike moments were employed to locate the sub-pixel edge accurately. The results indicate that the proposed algorithm has solved the problems of excessive false edge points and the wider edge detection outcome of the traditional algorithm; the image quality treated by the proposed method is close to that treated by wavelet algorithm with a positioning accuracy of sub-pixel.

Key words: regularized Perona-Malik model; Sobel operator; Zernike moment; edge detection algorithm; subpixel

边缘是图像最基本也是最重要的特征之一, 在图像中表现为局部区域亮度显著变化的部分, 该区域的灰度剖面一般可以看作是一个阶跃, 即从一个灰度值很小的缓冲区域急剧变化到另一个灰度相差较大的区域。图像的边缘部分集中了图像的大部分信息, 它的提取对于整个图像场景的识别与理解是非常重要的, 同时也是图像分割所依赖的重要依据, 因而边缘检测具有重要意义。常用的边缘检测算子有: Roberts 边缘检测算子, Sobel 边缘检测算子, Prewitt 及 Canny 边缘检测算子等, 但传统的检测算子对噪声比较敏感, 容易出现一些伪边缘和边缘检测结果较粗的现象, 对噪声图像的处理效果不好^[1]。鉴于此, 本文提出一种对噪声图像边缘检测的新算法: 首先使用基于各向异性扩散的非线性正则化 Perona-Malik 模型, 实现对图像的平滑滤波, 滤除图像中的噪声, 然后使用改进的 Sobel 算子进行图像边缘的初提取, 将结果生成链表记录下来, 最后使用 Zernike 矩进行亚像素级别的边缘检测。

1 正则化 Perona-Malik 模型

传统的图像平滑一般采用高斯滤波, 但是高斯滤波系数 σ 需要人为确定, 不同的滤波系数对图像边缘检测效果影响偏差很大, 而且有可能会放大同样为高频信号的噪声。相比于传统的高斯滤波, 正则化 Perona-Malik 模

型是基于各向异性非线性扩散的滤波方法,根据图像的局部特征,可以自适应地实现去噪和保护边缘的双重功能。

1.1 Perona-Malik 模型

为了达到去噪并同时保护边缘的目的,让扩散过程依赖于图像的局部特征:在图像的重要特征边缘附近,扩散减弱,甚至不扩散,而在图像比较平坦区域,扩散加强,使噪声得到平滑。基于这一思想,1990年 Perona 和 Malik 引入了一个根据图像局部特征控制扩散速度的函数,得到了各向异性非线性扩散模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}(g(|\nabla I|)\nabla I) \\ I(x, y, 0) = I_0(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 表示图像像素值; $|\nabla I|$ 为图像梯度的模值, $|\nabla I| = (I_x^2 + I_y^2)^{1/2}$; $g(|\nabla I|)$ 称为扩散系数函数,也称作边缘停止函数。函数 $g(r)$ 是单调递减函数且满足以下 2 个条件:

$$\begin{cases} g(0) = 1 \\ \lim_{r \rightarrow \infty} g(r) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Perona 和 Malik 给出了 2 种 $g(r)$ 的形式:

$$\begin{cases} g(r) = \frac{1}{1 + r^2/K^2} \\ g(r) = \exp(-(r/K)^2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: r 表示扩散系数; K 表示特定值。

之后有学者对此扩散系数进行了改进,给出了一种边缘保持性更好的 Turkey 模函数:

$$g(r) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r^2}{K^2}\right)^2 & |r| \leq K \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 正则化 Perona-Malik 模型

Perona-Malik 方程存在 2 个问题: a) 图像中一些强的噪声区域也会形成较大的模值,此时噪声也会被当成图像的边缘而保留; b) 当梯度模值比较大时,会沿梯度方向反向扩散,在大多数情况下图像边缘会得到增强,但是该方程在理论上存在不稳定性,是一个病态问题,会造成去噪过程变得不稳定。为了解决上述问题,Catte 等人对 Perona-Malik 方程进行了改进,提出了改进的正则化 Perona-Malik 方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}(g(|\nabla G_\sigma * I|)\nabla I) \\ I(x, y, 0) = I_0(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

式中 G_σ 是方差为 σ 的高斯函数。

$$G_\sigma = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

Catte 证明了此方程解的存在性和唯一性,具有适定性,为应用奠定了基础。基于尺度空间的思想,Perona-Malik 方程对数字图像进行滤波时具有空间选择性,在滤除图像噪声的同时能对边缘进行保护,具有边缘保护性能。由于 Zernike 矩基于积分运算,计算复杂度较高,边缘粗提取之前进行滤波,可以减少粗提取时对边缘的误提取,降低矩运算时的负担,因此本文选择正则化 Perona-Malik 模型实现对图像的平滑滤波。

2 改进的 Sobel 算子

2.1 传统 Sobel 算子

Sobel 检测算法广泛应用于图像处理,特别是边缘检测中,从技术上来讲,它是一个离散型差分算子,计算

图像灰度函数梯度的近似值,图像的任何一点使用此算子,都会产生其对应的梯度适量或是其法矢量^[2]。该算子包含 2 个 3×3 的矩阵,分别为横向及纵向,将其与图像作平面卷积,即可分别得出横向及纵向的亮度差分近似值。为了抑制噪声, Sobel 算子对像素位置的影响做了加权。

其横向和纵向的卷积模板为:

$$\mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 改进的 Sobel 算子

Sobel 算子是基于图像和一个小的、独立的模板进行的横向和纵向方向上的整数值滤波。它的计算相对简单,产生的近似梯度相对粗糙,也会检测出许多的伪边缘,特别是对图像中的高频变量。为了弥补 Sobel 算子的不足,使算法更准确,本文使用 4 个方向上的 5×5 模板 $\mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y, \mathbf{T}_{45}, \mathbf{T}_{135}$ ^[2]。每个模板的权重取决于位置到中心的距离和方向,等距离的点具有相同的权重。

4 个模板如下:

$$\mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 0 & -3 & -2 \\ 3 & 4 & 0 & -4 & -3 \\ 6 & 6 & 0 & -6 & -6 \\ 3 & 4 & 0 & -4 & -3 \\ 2 & 3 & 0 & -3 & -2 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_y = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 6 & 3 & 2 \\ 3 & 4 & 6 & 4 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & -4 & -6 & -4 & -3 \\ -2 & -3 & -6 & -3 & -2 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{45} = \begin{bmatrix} 0 & -2 & -3 & -2 & -6 \\ 2 & 0 & -4 & -6 & -2 \\ 3 & 4 & 0 & -4 & -3 \\ 2 & 6 & 4 & 0 & -2 \\ 6 & 2 & 3 & 2 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{135} = \begin{bmatrix} -6 & -2 & -3 & -2 & 0 \\ -2 & -6 & -4 & 0 & 2 \\ -3 & -4 & 0 & 4 & 2 \\ -2 & 0 & 4 & 6 & 2 \\ 0 & 2 & 3 & 2 & 6 \end{bmatrix}$$

此算法中,本文选择最高输出模板的梯度值作为该边缘像素的灰度梯度值。本文采用此算法对去噪后的图像进行边缘的初提取。

3 Zernike 矩算子亚像素边缘检测原理

3.1 Zernike 矩

矩是一个能很好描述模式特征的量,在模式识别中有较广泛的应用^[3]。重复率为 $q(q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, K)$ 的 p 阶 Zernike 多项式和 $V_{pq}(r, \theta)$ 的定义如下:

$$V_{pq}(r, \theta) = R_{pq}(r)e^{iq\theta} \quad (8)$$

式中: r 为极径; θ 为极角。

对于 1 幅 $N \times M$ 大小的数字离散化二维图像 $f(x, y)$ 的积分用求和形式代替,其 Zernike 矩定义为:

$$\mathbf{A}_{pq} = \frac{n+1}{\pi(N-1)^2} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M f(x, y) \bar{V}_{pq}(x, y) \quad (9)$$

对于 1 幅图像旋转 ϕ 角度后的 Zernike 矩, $\mathbf{A}'_{pq}$ 与其旋转前的 Zernike 矩 $\mathbf{A}_{pq}$ 的关系是:

$$\mathbf{A}'_{pq} = \mathbf{A}_{pq} e^{-iq\phi} \quad (10)$$

从式(11)可以看出,图像旋转前后 Zernike 矩的模不变,只是相角改变,具有旋转不变性^[4]。

3.2 Zernike 矩亚像素检测原理

原始的 Zernike 矩算子为 5×5 模板,通过图像的各阶正交矩计算像素点的 4 个参数,进而进行边缘点的判断^[5]。为了提高边缘检测结果的准确度,本文使用了定位准确度更高的 7×7 模板^[5]。阶跃边缘模型的 4 个参数的物理意义见图 1, k 为边缘阶跃灰度高度, h 标识背景灰度高度, l 代表像素中心到边缘的距离, ϕ 为像素中心到边缘垂线与 x 轴的夹角。

图像 $f(x, y)$ 的 Zernike 矩为 $\mathbf{A}_{pq}$, 为使像素上的边缘平行 y 轴,可将其顺时针旋转 ϕ 角度,平行 y 轴后为 $\mathbf{A}'_{pq}$, 依据矩计算理论,有:

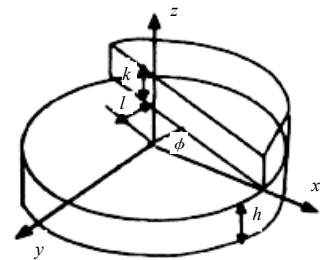


Fig.1 Subpixel edge step model
图 1 平面亚像素边缘阶跃模型

$$A'_{pq} = A_{pq} e^{-jq\phi} \quad (11)$$

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) y dx dy = 0 \quad (12)$$

式中 $f'(x, y)$ 为旋转后的图像, 该式左侧正是矩 A'_{11} 的虚部, 将式(12)虚部展开, 有:

$$\text{Im}[A'_{11}] = \sin \phi \text{Re}[A_{11}] - \cos \phi \text{Im}(A_{11}) = 0 \quad (13)$$

由此可得:

$$\phi = \arctan \frac{\text{Im}[A_{11}]}{\text{Re}[A_{11}]} \quad (14)$$

而矩 A'_{11} 实部因此可得, 再利用旋转后的 Zernike 矩 $A'_{00}, A'_{11}, A'_{20}$, 可计算出矩, 进而计算出图 1 所示的其他参数:

$$\begin{cases} l = A_{20} / A'_{11} \\ k = \frac{3A'_{11}}{2(1-l^2)^{3/2}} \\ h = \frac{A_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin l + kl\sqrt{1-l^2}}{\pi} \end{cases} \quad (15)$$

4 边缘检测步骤

本文结合基于各向异性扩散的非线性正则化 Perona-Malik 模型、修改后的 Sobel 算子和 Zernike 矩算子进行边缘检测, 具体实现步骤如下:

- 1) 图像去噪, 利用基于各向异性扩散的非线性正则化 Perona-Malik 模型, 实现对噪声图像的平滑滤波、去噪和保护边缘的双重功能。
- 2) 初边缘检测, 利用修改后的 Sobel 对去噪后的图像进行边缘检测, 修改后的算子采用 4 个方向的模板, 可以更准确地描述图像边缘点。
- 3) 将初边缘检测的结果生成链表记录下来, 保留原始灰度, 为下一步亚像素的边缘检测做准备。
- 4) 使用 Zernike 矩对初边缘检测的结果进行亚像素级别的边缘检测, 生成最终图像。

5 试验结果分析

本文选取 Lena 图像对新算法的定位准确度进行验证, Lena 图像的去噪实验效果对照如图 2 所示, 边缘检测的实验结果对照如图 3 所示。



Fig.2 Denoising image

图 2 去噪效果图

实验结果证明, 相对于高斯去噪, 基于各向异性扩散的非线性正则化 Perona-Malik 模型对噪声图像的平滑滤波效果良好, 去除噪声的同时, 对图像的边缘保护效果良好。