

# 图像跟踪中的边缘检测技术

陈娟<sup>1,2</sup>, 陈乾辉<sup>1</sup>, 师路欢<sup>1</sup>, 吴建军<sup>1</sup>

(1. 长春工业大学 电气与电子学院, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为提高电视图像跟踪系统的图像检测精度,实现对目标的稳定跟踪,研究一种有效、实时的图像检测方法非常必要。本文介绍了边缘检测技术的基本原理,描述了几种边缘检测方法,如传统的基于经典微分算子的边缘检测、LOG滤波器与Marr-Hildreth边缘检测算子、多灰度图像边缘聚焦法、Canny边缘检测算子、基于梯度信息的自适应平滑滤波和基于小波边缘检测算子等。给出了边缘检测技术在实际图像跟踪中的应用实例,指出实际的电视图像跟踪系统可以根据不同的图像类型,考虑安全性、稳定性、精度噪声等因素,选择最优的边缘检测方法。

**关键词:**边缘检测;图像检测;小波变换;目标跟踪

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A

## Edge detection technology in imaging tracking

CHEN Juan<sup>1,2</sup>, CHEN Qian-hui<sup>1</sup>, SHI Lu-huan<sup>1</sup>, WU Jian-Jun<sup>1</sup>

(1. *Electrical & Electronic Engineering College, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;*

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** To improve the image detection accuracy for TV image tracking system to realize the stable tracking for a space target, it is necessary for the tracking system to research on a high effective and real time image detection technology. In this paper, the basic conception of edge detection is introduced and several kinds of edge detection methods are described, they are traditional edge detection based on classical differential operators, LOG filter and Marr-Hildreth edge detection operator, edge focus for multi-grey image, Canny edge detection operator, adaptive smooth filtering based gradient information, and wavelet based edge detection operator. Then, some examples of edge detection algorithms used in image tracking are given. Finally, this paper suggests that optimal edge detection method can be selected by considering safety, stabilization, accuracy and image noise based different image forms in photoelectric tracking systems.

**Key words:** edge detection; image detection; wavelet transform; target tracking

# 1 引 言

运动目标跟踪在军事和民用领域中有着多种应用。近年来,随着现代技术的发展和作战环境的复杂多变,要求防御武器的探测与跟踪系统具有抗各种干扰、抗反辐射导弹的能力和对付多目标以及全天候作战的能力。图像跟踪系统正是这一趋势下的产物。特别是光电技术、微电子技术及计算机技术的发展,加速了智能跟踪器的研制,而要实现目标跟踪器的各种性能,需要对大量目标信息进行综合处理和分析。

为实现对目标的稳定跟踪,首先就要对图像进行特征提取,把图像从测量空间变换到特征空间。如果能找到一种最为合适的反映目标固有特征的目标描述方法,将被研究的目标在这个特征空间中用一个特征向量来表示,则对下一步进行图像跟踪十分有利,所以研究目标的特征提取很有必要。边缘信息在图像中表现为强度的突变,即非连续性,于是,人们利用边界寻找区域来实现物体的识别和景物分析,获得重要的景物结构。本文介绍几种边缘检测方法,通过对方法的描述,进一步了解其在目标检测中的重要作用。

# 2 边缘检测方法

边缘是图像的最基本特征之一,指周围像素

$$R(i, j) = \sqrt{((f(i, j) - f(i + 1, j + 1)))^2 + ((f(i, j + 1) - f(i + 1, j)))^2}, \tag{2}$$

## 2) Prewitt 算子和 Sobel 算子

Prewitt 边缘检测算子使用两个有向算子(一个水平的,一个是垂直的,一般称为模板),每一

灰度有阶跃变化或屋顶变化的那些像素的集合,有方向和幅度两个特性。沿边缘走向的灰度变化平缓,而垂直于边缘走向的灰度变化剧烈,这种变化可能是阶跃性或斜坡性。边缘反映的是图像灰度的不连续性,在边界检测、图像分割、模式识别、机器视觉等中有很重要的作用。

常见的边缘点有 3 种,即阶梯形边缘、屋顶形边缘和线性边缘。大部分情况下,均把图像的边缘看作是阶梯形边缘,求得检测这种边缘的各种最优滤波器,然后用于实践中。

## 2.1 基于经典微分算子的边缘检测

### 2.1.1 基于一阶微分的边缘检测算子

图像的局部边缘定义为两个强度明显不同的区域之间的过渡,图像的梯度函数即图像灰度变化的速率将在这些过渡边界上存在最大值。因此,研究较好的求导算子成为一种思路。比如:罗伯茨(Roberts)算子、普鲁伊特(Prewitt)算子和索贝尔(Sobel)算子等就是比较简单而常用的例子。

#### 1) Roberts 算子

Roberts 算子是最简单的边缘检测算子,是用图像的垂直和水平差分来逼近梯度算子:

$$\nabla f = ((f(x, y) - f(x - 1, y)) / (f(x, y) - f(x, y - 1))), \tag{1}$$

因此,当寻找边缘的时候,最简单的方法是对每一个像素计算出式(1)的向量,求出绝对值,然后进行阈值操作即可。利用这种思想可得到 Roberts 算子:

个逼近一个偏导数。而 Sobel 算子是一种将方向差分运算与局部平均相结合的方法。图 1 分别给出了 Roberts、Prewitt 和 Sobel 算子的卷积核。

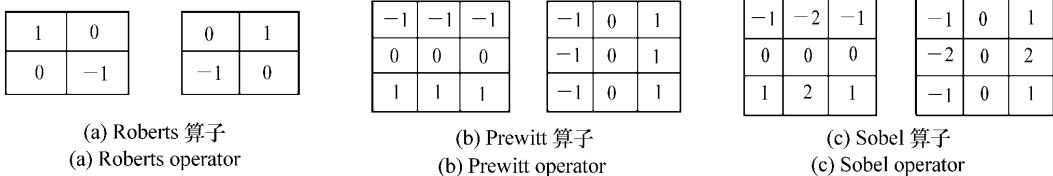


图 1 偏导数估计的卷积核

Fig. 1 Convolution kernels estimated by partial derivatives

在实际应用中,通常是利用简单的卷积核来计算方向差分,不同算子也对应不同的卷积核,他们产生的两个偏导数在图像一个点上用均方值或绝对值求和的形式结合起来。

### 2.1.2 二阶微分—拉普拉斯(Laplacian)算子

该算子通过寻找二阶导数的零交叉点来寻找边缘。二元函数 $f(x, y)$ 的 Laplacian 变换定义为:

$$\nabla^2 f = \left( \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} \right) f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2},$$

也就是二阶偏导数的和。

最常用的模板  $L$  是

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad L = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

## 2.2 LOG 滤波器与马尔-希尔德雷思(Marr-Hildreth)边缘检测算子

Marr-Hildreth 应用高斯函数先对图像进行平滑,然后采用 Laplacian 算子根据二阶导数过零点来检测图像边缘,称之为 Marr-Hildreth 模块或算子,简称 M-H 模块,也称为 LOG 滤波器。高斯函数形式为:

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

平滑后的图像  $f_s(x, y) = f(x, y) * G(x, y)$ , 对  $f_s(x, y)$  做 Laplacian 变换,得到

$$V(x, y) = \nabla^2 f_s(x, y) = \nabla^2 [f(x, y) * G(x, y)] = f(x, y) \nabla^2 G(x, y), \quad (3)$$

式中,

$$\nabla^2 G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^4} \left( \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} - 1 \right) \times \exp\left[ -\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2} \right],$$

即为 Marr-Hildreth 模块或算子。

### 2.3 多灰度图像的边缘聚焦法

用基于离散高斯模糊和记录梯度方向最大导数的边缘检测器产生一幅最初的低分辨率边缘图像  $E(x, y, \sigma_0)$ 。由于图像数据是离散的,边缘图像只在  $x$  和  $y$  的整数值有定义,因此,引入  $E(x, y, \sigma_0)$  来表示。即

$$E(x, y, \sigma_0) = \begin{cases} 1 & ((i, j) \text{ 是一个边缘点}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

### 2.4 坎尼(Canny)边缘检测算子

与 M-H 算子类似,该算子可以用分解的方法来提高速度,即把  $G$  的滤波卷积模板分解为两个一维的行列滤波器

$$\frac{\partial G}{\partial x} = kx \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(x) h_2(y), \quad (4)$$

$$\frac{\partial G}{\partial y} = ky \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(y) h_2(x), \quad (5)$$

其中

$$h_1(x) = \sqrt{k} x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$h_1(y) = \sqrt{k} y \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$h_2(x) = \sqrt{k} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$h_2(y) = \sqrt{k} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$h_1(x) = x h_2(x) \quad h_1(y) = y h_2(y) \quad k \text{ 为常数}$$

将式(4)和式(5)分别与图像  $f(x, y)$  卷积,得到输出:

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

$$\text{令 } A(i, j) = \sqrt{E_x^2(i, j) + E_y^2(i, j)},$$

$$\alpha(i, j) = \arctan\left[\frac{E_y(i, j)}{E_x(i, j)}\right],$$

则  $A(i, j)$  反映了图像上  $(i, j)$  点处的边缘强度,  $\alpha(i, j)$  是图像的  $(i, j)$  点处的法向矢量(正交于边缘方向的方向)。

### 2.5 基于梯度信息的自适应平滑滤波

该算法是利用一种小的平均加权模块与图像进行迭代卷积,该模块的加权系数由对应点信号的连续性,即作为像素点梯度的函数来决定。其步骤为:

(1) 计算梯度  $G_x(x, y)$  和  $G_y(x, y)$

$$G_x(x, y) = \frac{1}{2} [f(x+1, y) - f(x-1, y)],$$

$$G_y(x, y) = \frac{1}{2} [f(x, y+1) - f(x, y-1)],$$

(2) 计算连续性系数

$$\alpha(x, y) = \exp\left(-\frac{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)}{2k^2}\right),$$

(3)对  $f(x, y)$  进行加权平均

$$f^{t+1}(x, y) = \frac{\sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} f^t(x+i, y+j) \omega^{(t)}(x+i, y+j)}{\sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} \omega^{(t)}(x+i, y+j)}, \quad (6)$$

参数  $k$  决定了具有多大幅值的突变边缘将得到保存。

设有一一维信号  $f(x)$ , 在边缘附近有  $f_x > 0$

( $f_x = \frac{df(x)}{dx}$ ), 且  $f_{xxx} < 0$ 。模块权系数表示为

$$\alpha(x, t) = \exp\left(-\frac{[f_x(x, t)]^2}{2k^2}\right)$$

通过  $f_x$  与  $k$  的大小关系可以确定边缘的情况。若  $f_x > k$ , 即信号的梯度幅度足够大, 那么在迭代过程中其幅值将随着迭代次数的增加而增强, 达到锐化的作用; 若太小 ( $f_x < k$ ) 迭代过程中, 信号的不平坦将被平滑掉。

对屋顶状边缘和斜升边缘, 由于它们的二阶导数交叉点都不对应边缘点, 采用自适应平滑非线性算子, 可以将这类边缘转化为理想的阶跃边缘, 然后用一阶导数的最大值或二阶导数的零交叉点进行边缘提取, 从而提高了图像的信噪比。对其平滑后的信号进行简单的差分运算, 然后检测输出的极大值, 就可以很好地实现边缘检测。这一过程如图 2 所示。

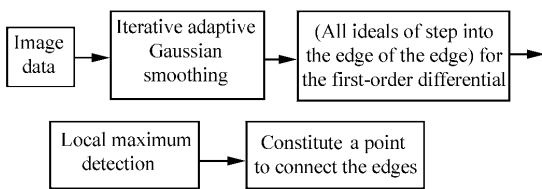


图 2. 自适应平滑特征增强边缘检测

Fig. 2 Feature enhancement of edge detection by adaptive smoothing

### 2.6 其他边缘检测方法

在 20 世纪 90 年代, 随着小波分析的迅速发展, 小波开始用于边缘检测。作为研究非平稳信号的利器, 小波在边缘检测方面具有得天独厚的优势。小波变换属于时频分析技术且具有一定的去噪能力, 它对不同的频率成分在时域上的取样步长具有调节性, 高频者小, 低频者大。因此, 小波变换能够把信号分解成交织在一起的多种尺度

成分, 并对大小不同的尺度成分采用相应粗细的时域或空域取样步长, 从而能够不断地聚焦到对象的任意微小细节。

设  $\alpha(x, y)$  是二维平滑函数, 它沿  $x, y$  两个方向上的一阶导数作为两个基本小波:

$$\begin{aligned} \varphi_a^{(1)}(x, y) &= \frac{1}{a^2} \varphi^{(1)}\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right) = \frac{\partial \theta_a(x, y)}{\partial x} \\ \varphi_a^{(2)}(x, y) &= \frac{1}{a^2} \varphi^{(2)}\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right) = \frac{\partial \theta_a(x, y)}{\partial y} \end{aligned}, \quad (7)$$

其中  $\theta_a(x, y) = \alpha\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right)$

图像  $f(x, y)$  在尺度的小波变换有两个分量:

沿水平方向:

$$WT_f^{(1)}(2^j, x, y) = \langle f(x, y), \varphi_{2^j}^{(1)}(x, y) \rangle$$

沿垂直方向:

$$WT_f^{(2)}(2^j, x, y) = \langle f(x, y), \varphi_{2^j}^{(2)}(x, y) \rangle$$

这两个分量分别反映图像灰度沿水平方向和垂直方向的梯度。定义点  $(x, y)$  处的小波变换的模值为:

$$\begin{aligned} \text{Mod} [ WT_f^{(2)}(2^j, x, y) ] &= \\ \sqrt{|WT_f^{(1)}(2^j, x, y)|^2 + |WT_f^{(2)}(2^j, x, y)|^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

幅角(与  $x$  轴的夹角)为:

$$\text{Arg} [ WT_f(2^j, x, y) ] = \arctan \frac{WT_f^{(2)}(2^j, x, y)}{WT_f^{(1)}(2^j, x, y)}, \quad (9)$$

## 3 在图像跟踪中的应用

图像跟踪系统中, 图像的检测精度决定了整个光电跟踪系统的稳定跟踪精度。边缘检测是一种有效的实时图像检测方法。

传统的边缘检测方法大都利用梯度最大值或二阶导数过零点提取边界点, 如  $3 \times 3$  窗口的 Roberts 算子、Sobel 算子和 Laplacian 算子等等。求解二维实函数的梯度之后, 选取合适的阈值以提取边缘, 通常称之为阈值法。这种微分算子运算简单, 但抗扰性能差, 在检测边缘的同时会放大噪声, 因此应用范围受限制。

1980 年, Marr 和 Hildreth 提出了一种新的边缘检测理论和技术, 把二阶微分求边缘点的方法向前推进了一步。该项技术首先平滑图像, 压低噪声, 再用 Laplacian 算子求二阶微分, 得到一个兼有平滑和二阶微分作用的模块。由于经典的边

缘检测算子和 M-H 的边缘检测算子在实际应用中依然存在噪声和定位之间的基本矛盾,为了检测出图像中的重要边缘,同时能获得高精度的定位,需要将不同指标的平滑结合起来,以信号比为基础使数据自适应地得到平滑。于是,人们提出了边缘聚焦方法。

所谓“边缘聚焦”,即由粗到细跟踪边缘,这一方法将高精度定位与良好的噪声抑制相结合。应用这一方法可以精确地重建不同种类的结合点,这在三维景物重建与识别中是非常重要的。又因聚焦算法无阈值选择,因此可以在更高分辨率下提取新的边缘点而不管它们的强度如何。通常,使用弱模糊进行边缘检测易产生过多噪声和 unnecessary 细节,而使用强模糊进行边缘检测又会使边缘轮廓的形状失真。

1986 年 Canny 用金字塔数据结构提取边缘,其做法可以减少小模块检测中的边缘中断,有利于较为完整的线段。另外,根据边缘检测的有效性和定位的可靠性,Canny 研究了最优边缘检测器所需的特性,推导出最优边缘检测器的数字表达式。

而从边缘检测定位精度上来看,边缘检测可以分为像素级边缘检测和亚像素级边缘检测。Sobel、Canny 等算子是像素级边缘检测算子的代表<sup>[1,2]</sup>,其优点是运行速度快,但不能精确定位边缘,而由 Hueckel 提出的现已发展为插值、几何矩、正交空间矩等多种检测方法<sup>[3,4,5]</sup>的亚像素边缘检测技术,其优点是定位精度较高,但算法运算时间较长。于是,人们又提出将像素级、亚像素级边缘检测方法结合起来的 Sobel-Zernike 矩算子的快速亚像素边缘检测方法<sup>[6]</sup>,该方法既保证了检测精度,又减少了算法的运行时间。

与可见光、红外成像图像相比,被动式毫米波成像图像分辨率(尖锐度)较低<sup>[7]</sup>,且由于成像设备的限制,成像图像中噪声较强。因此直接对毫米波成像图像应用常用的边缘检测算子,如 Canny 算子、Sobel 算子、LoG 算子<sup>[8,9]</sup>等将达不到预期的效果<sup>[10]</sup>,使图像中目标及背景真实边缘无法有效体现。因此,又有人提出了基于图像自适应二值化的边缘检测方法<sup>[11]</sup>,用该方法进行跟踪可以准确检测出图像的边缘,同时又能够有效地除

去无效的伪边缘,有效地保持边缘的连续性,且计算复杂度低,具有较高的实时性。

由上述分析可知,传统的边缘检测算法,如 Roberts 算子、Sobel 算子、Laplacian 微分算子<sup>[12]</sup>等,尽管实时性较好,但抗干扰性差,不能有效克服噪声影响,拟合边缘检测算法基于窗口进行卷积运算,运算量大,难满足实时性要求;而 Canny 根据变分方法得到高斯模板导数逼近的最优算子,性能虽然优于 LOG,但定位方面欠佳。于是,人们又提出了一种多尺度数学形态学边缘检测算法<sup>[13]</sup>,同时又在梯度算子法的基础上,研究一种新的基于梯度算子检测灰度图像边缘的方法<sup>[14]</sup>,该方法不同于传统的通过卷积来计算边缘的方法,它计算简单,边缘图像效果好。在上述方法的基础上,又有人提出了边缘增强算法和简化算法,这两种改进的方法分别适用于边缘线不明显和需要快速提取边缘图像的情况。在边缘增强算法中,引入了增强系数,但该系数还无法实现智能判别,只能通过实验的方法进行选取。因此,如何自适应地选取增强系数是该方法的关键。

当用 CCD 采集图像边缘时,涉及检验精度问题。常用的图像边缘检测算法有模板匹配<sup>[15]</sup>和微分算子<sup>[16]</sup>,由于光的色散、高频噪声和 CCD 光敏元处于临界状态,CCD 采集到的图像的边缘质量有明显下降,实验证明这两种检测方法不适用。它们的缺点是用局部区域灰度变化最大值来定位边缘,而忽视了整个过渡边缘的其它点的信息。改进的方法是:对图像进行滤波后,把在可能边缘附近的所有点的信息都用来定位边缘,基于最小二乘法原理的直线拟合边缘提取方法<sup>[17]</sup>,即考虑整个过渡边缘的图像信息来选取中间较直的部分作直线拟合,然后将边缘点的灰度值代入所得的直线方程从而得到边缘的像素位置值。实际应用中,发现计算得到的边缘值和过渡边缘的几何中心点非常接近,而且在进行直线拟合的时候,边缘定位的重复性没有拟合区间端点的重复性好。因此,提出了根据边缘数据的特点,使用直线拟合法获得一组可能的边缘值,而后选择这组边缘值的中值作为最终的边缘值,即改进的直线拟合线阵 CCD 图像边缘检测方法<sup>[18]</sup>。

图像边缘是由其灰度的不连续性所反映的,

而经典的微分算子边缘检测方法均是基于灰度差分提取出图像边缘的。但用经典微分算子进行边缘检测时,它们的二值化阈值通常是经验值或人为指定,这在实际运用中存在着主观性和局限性,基于这个问题,人们提出了自适应的边缘检测方法,它可以根据实际需要自动地对检测算子进行阈值选取,从而实现对图像的自适应边缘检测<sup>[19]</sup>。其阈值选取方法为:根据图像二值化确定一个灰度值,然后将大于等于此灰度值的像素判为对象并用一个灰度值表示,而将小于此灰度值的像素判为背景并用另一个灰度值表示。或者反之,对象与背景的灰度大小关系对调。分析可知,与 Canny 边缘检测算子广泛应用于灰度图像处理相比,自适应平滑滤波无论是对灰度图像处理,还是对距离图像和平面曲线处理都是非常有效的。

基于小波技术的发展,Mallat 于 1992 年提出了小波变换局部模极大值边缘检测方法。即针对空间灰度变化剧烈的地方,对应位置的模值也较大,沿幅角方向,在相邻 3 点内,找出模值的极大值点,这些模值极大值点包含了目标的边缘。但图像中并不是所有的局部极大值都对应着图像的边缘点,有些是由噪声点引起的,所以如何设置合适的阈值,滤掉由噪声引起的局部模极大值点成为小波边缘检测的一个关键问题。于是,根据边缘与噪声的特征自动计算出阈值,提出了一种阈值自动设定的双阈值小波变换边缘检测方法<sup>[20]</sup>,并实现了噪声与边缘的分离,强边缘与弱边缘的分离。

另外,Mallat 等人还建议用小波模极大值来描述信号的奇异性<sup>[21]</sup>。小波变换对奇异特性尤

为敏感,使其更适合检测图像的边缘和细节,对某一类小波,图像边缘对应于小波变换的局部模极大值<sup>[22]</sup>。因此,利用小波变换在时域和频域都有良好的局部特性的优点,提出基于小波变换模极大值的边缘检测方法<sup>[23]</sup>,即基于小波变换在时空域中分辨率随频率的高低而相应调节:低频粗略、高频精细,它具有可以聚焦到被测对象的任意细节上的特点。

可以看出,上述方法大多是针对各种不同类型的图像所提出的,因而通用性不是很强。因此,有人通过实验提出了一种基于数据融合的边缘检测方法,即结合 Sobel 算子和小波变换的图像边缘检测方法<sup>[24]</sup>。其原理为:首先利用改进的 Sobel 算子和离散小波变换分别对图像进行边缘检测;然后,建立相应的融合原则,把两种方法检测出来的边缘通过数据融合,得到最终的图像边缘输出。实验证明,采用该方法既能有效地去除噪声干扰,又能保留图像边缘细节。

## 4 结 论

通过几种边缘检测方法的比较,可以在考虑安全性、稳定性、精度、误差以及噪声因素后找到一种最优方法用于图像跟踪。由上述分析可知,在高斯平滑中, $\sigma$  表示控制平滑的程度,而自适应平滑算法中  $k$  是选择的新的尺度空间的尺度参数,在迭代收敛时  $k$  在每一个尺度上都有稳定的结果,且新的尺度空间表示在不同的尺度空间都具有精确边缘检测的性质,这也避免了传统尺度空间遇到的繁琐的对应性问题。

### 参考文献:

- [1] ROSENFELD A, KAK A C. *Digital Picture Processing* 2nd ed[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [2] CANNY J. A Computational approach to edge detection[J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 1986, 8(6): 679-698.
- [3] HUECKEL M H. An operator which locate edges in digitized pictures[J]. *J. Association Comput. Mach.*, 1971, 18(1): 113-125.
- [4] KRIS J, DIMITRIS A. Subpixel edge localization and the interpolation of still images[J]. *IEEE T. Image Process.*, 1995, 4(3): 285-295.
- [5] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. *Pattern Recogn.*, 1993, 26(2): 295-306.
- [6] 曲迎东, 崔成松, 陈善本, 等. 利用 Sobel-Zernike 矩算子的快速亚像素边缘检测方法[J]. *光电工程*, 2003, 30(5): 59-61.

- QU Y D ,CUI CH S ,CHEN SH B *et al.*. The use of Sobel-Zernike moment operator of the fast sub-pixel edge detection method[ J ]. *Opto-Electronic Eng.* 2003 30( 5 ) 59-61.( in Chinese )
- [ 7 ] 张光锋,张祖荫,郭伟.最佳毫米波辐射图像的实验研究[ A ]. 2003 年全国微波毫米波会议[ C ]. 上海:中国电子学会,2003.
- ZHANG G F ,ZHANG Z Y ,GUO W. Research on optimal millimeter-wave image[ A ]. 2003 National Conference on Millimeter-wave[ C ]. Shanghai :The Chinese Institute of Electronics 2003.( in Chinese ).
- [ 8 ] 冈萨雷斯. 数字图像处理( 第二版 ) [ M ]. 北京:电子工业出版社,2003.
- GONZALEZ R C. *Digital Image Processing Second Edition*[ M ]. Beijing :Publishing House of Electronics Industry 2003.( in Chinese )
- [ 9 ] 周心明,兰赛,徐燕.图像处理中几种边缘检测算法的比较[ J ]. 现代电力,2000 ,17( 3 ) 65-68.
- ZHOU X M ,LAN S ,XU Y. Comparison of the edge detection algorithms in image processing[ J ]. *Modern Electr. Power* , 2002 ,17( 3 ) 65-69.( in Chinese )
- [ 10 ] 陈浩,谭久彬.一种用于光电目标跟踪的非线性滤波算法[ J ]. 光学精密工程,2006 ,14( 5 ) 917~919.
- CHEN H ,TAN J B. Nonlinear filtering algorithm for improving opto-electric target tracking [ J ]. *Opt. and Precision Eng.* 2006 ,14( 5 ) 917~919.( in Chinese )
- [ 11 ] 史晓希,杜慧茜,梅文博.一种自适应二值化的毫米波图像边缘检测方法[ J ]. 光电工程,2004 31( 12 ) 61-63.
- SHI X X ,DU H Q ,MEI W B. An adaptive binary edge of the millimeter wave detection[ J ]. *Opto-Electronic Eng.* 2004 , 31( 12 ) 61-63.( in Chinese )
- [ 12 ] ACCAME M ,De NATABLE F G B. Edge detection by point classification of Canny filtered images[ J ]. *Signal Process.* , 1997 60( 1 ) :11-22.
- [ 13 ] 刘循,游志胜.多尺度形态学图像边缘检测方法[ J ]. 光电工程,2003 30( 3 ) 56-58.
- LIU X ,YOU ZH SH. An image edge detection method based on multi-scale morphology[ J ]. *Opto-Electronic Eng.* , 2003 30( 3 ) 56-58.( in Chinese )
- [ 14 ] 赵春江,施文康,邓勇.新的梯度边缘检测方法[ J ]. 光电工程,2005 32( 4 ) 86-88.
- ZHAO CH J ,SHI W K ,DENG Y. A new gradient edge detection method[ J ]. *Opto-Electronic Eng.* 2005 32( 4 ) 86-88.( in Chinese )
- [ 15 ] LI Y S ,YOUNG T Y ,MAGERL J A. Subpixel edge detection and estimation with a microprocessor-controlled line scan camera[ J ]. *IEEE T. Indus. Electr.* ,1988 35( 1 ) :105-112.
- [ 16 ] 姜凌涛,陈笠.应用 Marr 算子实现线阵 CCD 边缘高分辨率定位[ J ]. 光电工程,1996 23( 1 ) 23-28.
- JIANG L T ,CHEN L. Marr operator applications to achieve the edge of high-resolution CCD linear array positioning[ J ]. *Opto-Electronic Eng.* ,1996 23( 1 ) 23-28.( in Chinese )
- [ 17 ] 俞巧云,邢晓正,胡红专,等.直线拟合方法在一维图像边缘检测中的应用[ J ]. 光电工程,2001 28( 6 ) 56-58 65.
- YU Q Y ,XING X ZH ,HU H ZH *et al.*. The straight-line method of fitting in the one-dimensional edge detection[ J ]. *Opto-Electronic Eng.* 2001 28( 6 ) 56-58 65.( in Chinese )
- [ 18 ] 刘奋飞,赵辉,陶卫.改进的直线拟合线阵 CCD 图像边缘检测方法[ J ]. 光电工程,2005 32( 3 ) 40-43.
- LIU F F ,ZHAO H ,TAO W. Improved fitting a straight line linear array CCD image edge detection method[ J ]. *Opto-Electronic Eng.* 2005 32( 3 ) 40-43.( in Chinese )
- [ 19 ] 顾茂松,杨小冈,缪栋,等.自适应边缘检测方法的研究[ J ]. 计算机工程,2007 33( 5 ) :185-186 ,196.
- GU M S ,YANG X G ,LIAO D *et al.*. Research on approach of adaptive edge detection[ J ]. *Computer Eng.* 2007 33 ( 5 ) :185-186 ,196.( in Chinese )
- [ 20 ] 张永贤,陈梅.一种阈值自动设定的小波变换边缘检测方法[ J ]. 微计算机信息,2007 23( 1-3 ) 286-287 308.
- ZHANG Y X ,CHEN M. A thresholding automatic setting method for edge detection based on wavelet transform[ J ]. *Microcomputer Info.* 2007 23( 1-3 ) 286-287.( in Chinese )
- [ 21 ] MALLAT S ,HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets[ J ]. *IEEE T. Inform. Theory* ,1992 38 ( 2 ) 617-643.

- [ 22 ] MALLAT S ,ZHONG S. Characterization of signals from multiscale edges[ J ]. *IEEE T. Pattern Anal.* ,1992 ,14( 7 ) :710-732.
- [ 23 ] 田岩岩 ,齐国清. 基于小波变换模极大值的边缘检测方法[ J ]. 大连海事大学学报 2007 ,33( 1 ) :102-106.  
TIAN Y Y ,QI G Q. Based on the wavelet transform modulus maxima edge detection methods[ J ]. *J. Dalian Maritime University* 2007 ,33( 1 ) :102-106.( in Chinese )
- [ 24 ] 张宇伟 ,王耀明 ,蒋慧钧. 一种结合 Sobel 算子和小波变换的图像边缘检测方法[ J ]. 计算机应用与软件 2007 ,24( 4 ) :133-134 ,161.  
ZHANG Y W ,WANG Y M ,JIANG H J. A combination of Sobel operator and the wavelet edge detection methods[ J ]. *Comput. Appl. Soft.* 2007 ,24( 4 ) :133-134 ,161.( in Chinese )
- [ 25 ] 张晓明 ,蒋大真 ,卢宋林. 一个启发式的图像边缘检测方法[ J ]. 核技术 ,1996 ,19( 1 ) :35-40  
ZHANG X M ,JIANG D ZH ,LU S L. Edge of a heuristic detection method[ J ]. *Nuclear Tech.* ,1996 ,19( 1 ) :35-40.( in Chinese )
- [ 26 ] 福塞恩 ,庞斯. 计算机视觉 :一种现代的方法( 影印版 ) [ M ]. 北京 :清华大学出版社 2004.  
FORSYTH D A. PONCE J. *Computer Vision :A Modern Approach* [ M ]. Beijing :Tsinghua University Press 2004.
- [ 27 ] 竺子民. 光电图像处理 [ M ]. 武汉 :华中科技大学出版社 2000.  
ZHU Z M. *Photoelectric Image Processing* [ M ]. Wuhan :Huazhong University of Science and Technology Press 2000.( in Chinese )
- [ 28 ] 王俊一 ,王乘 ,孙涛. 小波变换阈值选取的博弈与图像边缘点检测[ J ]. 微机发展 2005 ,15( 4 ) :87-89.  
WANG J Y ,WANG CH ,SUN T. Wavelet transform threshold selection of the game and edge detection[ J ]. *Computer Tech. Dev.* 2005 ,15( 4 ) :87-89.( in Chinese )

作者简介 陈 娟( 1964— ) ,女 ,吉林长春人 ,教授 ,主要从事光电跟踪技术的研究。E-mail :chenj@ciomp. ac. cn

## 《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton , John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备)、微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械)、信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- \* 美国工程索引 EI 核心期刊
- \* 中国精品科技期刊
- \* 中文核心期刊
- \* 百种中国杰出学术期刊

主管单位 :中国科学院

主办单位 :中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址 :长春市东南湖大路 3888 号

邮编 :130033

电话 :0431-86176855

传真 :0431-84613409

电邮 :gxjmg@sina.com

网址 :http://www.eope.net

定价 50.00/册