

## 基于标准差梯度的模糊边缘检测算法

孙伟,王志坚

(中国电子科技集团公司第十四研究所,江苏南京 210013)

**摘要:**红外图像的边缘检测是图像处理领域的难题之一。结合红外图像的特点,将最小误差原理推广到模糊域进而应用到红外图像的边缘检测上,提出了一种基于标准差梯度的红外图像模糊边缘检测算法。首先提出了一种基于标准差的梯度算子,将图像中潜在的边缘区域很好地区分出来;而后引入模糊最小误差阈值算法,根据此算法自适应提取了标准差梯度图像中的最优阈值,从而实现了红外图像的目标边缘检测。与传统的基于梯度的红外图像边缘检测算法进行对比实验,结果表明,该算法用于红外图像边缘检测能获得更好的效果。

**关键词:**边缘检测; 红外图像; 模糊概率; 图像分割

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)04-0454-05

## Fuzzy edge detection based on standard deviation gradient

SUN Wei, WANG Zhi-jian

(No.14 Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** Infrared image edge detection is one of the difficult problems in image processing. Based on the characteristics of infrared image, the minimum error thresholding algorithm is extended to the fuzzy domain and applied to the infrared image edge detection. The fuzzy edge detection algorithm for infrared image based on standard deviation is proposed. Firstly, a gradient operator based on local standard deviation is performed and potential edge regions are well separated. Secondly, a fuzzy minimum error thresholding algorithm is introduced to find a fuzzy thresholding of the gradient image, which partitions the gradient image into edge region and non-edge region. The experiment is conducted on various infrared images and the results show that the proposed approach has better performance than some classical edge detection methods based on gradient.

**Key words:** Edge detection; Infrared image; Fuzzy probability; Image segmentation

### 0 引言

边缘检测是图像处理和分析中非常重要的过程。在图像分析中,梯度算子经常用于图像的边缘检测。

近年来,模糊技术已广泛用于图像的边缘检测<sup>[1-7]</sup>。Cheung 等人在模糊均值算法与传统差分滤波器基础上引入了一类新的差分滤波器 FOM-DF<sup>[4]</sup>,他们提出的算法在噪声环境下能有效地工作。Kuo 等人则提出

收稿日期:2004-09-10; 修订日期:2004-10-30

作者简介:孙伟(1977-),男,江苏南京人,博士,主要从事信息融合、数字图像处理、多媒体数据库方面的研究。

了一种模糊 Sobel 边缘检测算法<sup>[5]</sup>。

由于探测器本身固有的特性,红外图像与一般的自然背景图像相比,普遍存在目标与背景对比度较差、目标的边缘模糊和噪声较大等特点。Kittler 和 Illingworth 等人在假设目标与背景服从正态分布的基础上提出了一种最小误差阈值选择算法<sup>[6]</sup>。本文将上述算法推广到模糊域并应用于红外图像边缘检测中提出了一种新的基于标准差梯度的红外图像目标边缘检测算法。对不同红外目标图像的边缘检测结果表明,本算法比传统的基于梯度的边缘检测算法具有更好的效果。

### 1 模糊概率及最小误差原理

#### 1.1 图像的模糊概率描述

设图像  $X$  有  $L$  级灰度,直方图为  $h_k, k=0,1,\dots,L-1$ 。 $p$  为各级灰度出现的概率,则  $p_k = p(\{k\}) = h_k$ ,模糊集  $\tilde{A} = \sum_{k=0}^{L-1} \frac{\mu_{\tilde{A}}(k)}{h_k}$  表示图像  $X$  中的某个目标,隶属函数  $\mu_{\tilde{A}}(k)$  表明灰度  $k$  对  $\tilde{A}$  的隶属程度,通过简单计算可得,图像  $X$  中出现  $\tilde{A}$  的概率为:

$$p(\tilde{A}) = \sum_{k=0}^{L-1} \mu_{\tilde{A}}(k) h_k \quad (1)$$

#### 1.2 最小误差原理<sup>[8]</sup>

假设图像  $X$  由目标和背景两部分组成。目标与背景的概率分布均服从正态分布,均值与方差分别为  $(m_1, \sigma_1^2), (m_2, \sigma_2^2)$ 。目标与背景的先验概率为  $P_1, P_2$ , 反映目标与背景概率分布的直方图如下式:

$$h_k = h(k) = \frac{P_1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{k-m_1}{\sigma_1} \right]^2} + \frac{P_2}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{k-m_2}{\sigma_2} \right]^2} \quad (2)$$

给定阈值  $T$ , 则  $T$  将图像分为两个像素群体 (pixel population), 目标群体 (OP) 与背景群体 (BP)。OP~ $N(m_1(T), \sigma_1^2(T))$ , BP~ $N(m_2(T), \sigma_2^2(T))$ 。相应的参数分别为:

$$P_i(T) = \sum_{k=a}^b h_k \quad (3)$$

$$m_i(T) = \left[ \sum_{k=a}^b k h_k \right] / P_i(T) \quad (4)$$

$$\sigma_i^2(T) = \left[ \sum_{k=a}^b \{k - m_i(T)\}^2 h_k \right] / P_i(T) \quad (5)$$

$$a = \begin{cases} 0 & i=1 \\ T+1 & i=2 \end{cases} \quad (6)$$

$$b = \begin{cases} T & i=1 \\ L-1 & i=2 \end{cases} \quad (7)$$

误差函数  $J(T)$  定义为:

$$J(T) = 1 + 2[P_1(T) \log \sigma_1(T) + P_2(T) \log \sigma_2(T)] - 2[P_1(T) \log P_1(T) + P_2(T) \log P_2(T)] \quad (8)$$

最优化阈值  $T_{opt}$  满足:

$$T_{opt} = \arg \min_T [J(T)] \quad (9)$$

## 2 基于标准梯度的模糊边缘检测算法

### 2.1 标准差梯度算法

在图像  $X$  中,标准差反映了局部区域的对比度变化<sup>[9]</sup>。考虑红外图像的特点,根据局部标准差来求图像的梯度  $G$ 。假设  $x_{ij}$  为图像  $X$  中  $(i,j)$  位置处像素的灰度值,图像大小为  $M \times N$ ,  $W$  为以  $(i,j)$  为中心、大小为  $d \times d$  的窗口,  $d$  为奇数且  $d > 1$ 。 $W$  看成为图像的局部区域来计算其局部标准差  $v_{ij}$ 。

位置  $(x,y)$  处的局部标准差  $v_{ij}$  为:

$$v_{ij} = \sqrt{\frac{1}{d^2} \sum_{p=i-\frac{d-1}{2}}^{i+\frac{d-1}{2}} \sum_{q=j-\frac{d-1}{2}}^{j+\frac{d-1}{2}} (x_{pq} - m_{ij})^2} \quad (10)$$

这里,  $0 \leq i, p \leq M-1, 0 \leq j, q \leq N-1$ 。

$m_{ij}$  为窗口  $W$  所有像素灰度的平均值, 由下式计算可得:

$$m_{ij} = \frac{1}{d^2} \sum_{p=i-\frac{d-1}{2}}^{i+\frac{d-1}{2}} \sum_{q=j-\frac{d-1}{2}}^{j+\frac{d-1}{2}} x_{pq} \quad (11)$$

由公式(10)、(11)可求得图像的梯度图像  $G$ , 其在位置  $(x,y)$  处的像素值  $g_{ij}$  为:

$$g_{ij} = \text{Gradient}(X) = v_{ij} \quad (12)$$

这里  $0 \leq i \leq M-1, 0 \leq j \leq N-1$ 。

局部标准差  $v_{ij}$  反映了图像灰度局部的对比度变化程度。在标准差大的地方, 图像灰度起伏变化显著, 出现图像边缘的机会较大; 在标准差小的地方, 图像灰度变化缓慢, 出现图像边缘的机会较小。所以可以根据图像的局部标准差把图像潜在的边缘区域很好地区分开。由于局部标准差是窗口内多像素点共同的贡献, 对于单点噪声不敏感, 所以, 标准差本身具有一定的滤波效果。与传统的梯度算子相比, 公式(10)中用像素的平均值  $m_{ij}$  代替了像素点  $x_{ij}$  本身。显然这样对孤立的边缘点不敏感, 而且易造成被测边缘的移位。考虑到红外图像边缘模糊的特点, 可以忽略边缘移位误差的影响。

在公式(10)、(11)中窗口  $d$  的尺寸会影响局部标准差的计算。 $d$  应足够大从而使像素标准差的计算充分考虑到局部信息的变化, 而且  $d$  越大, 越能增加平滑效果, 对噪声就越不敏感。但是窗口  $d$  的尺寸也不能很大, 因为局部区域的平滑同时也屏蔽了局部区域的突变。另外, 大的窗口尺寸也会带来更多的计算时间。所以, 这里选择  $d=5$  来计算局部标准差。

## 2.2 模糊最小误差阈值算法

### 2.2.1 算法描述

设梯度图像  $G$  有  $L$  级灰度, 直方图为  $h_k, k=0, 1, \dots, L-1$ 。图像边缘检测的目的就是把梯度图像区域分成边缘区域 ( $D_e$ ) 与非边缘区域 ( $D_s$ )。对于给定的阈值  $T$ , 公式(3)给出了边缘区域与非边缘区域先验概率。这里文中提出了一种模糊最小误差阈值算法。 $D_e$  的隶属函数为  $\mu_e(k; a, b)$ 、 $D_s$  的隶属函数为  $\mu_s(k; a, b)$ , 分别表示灰度  $k$  对  $D_e$  和  $D_s$  的隶属程度。 $\mu_e(k; a, b) + \mu_s(k; a, b) = 1, k=0, 1, \dots, L-1, a < b$ , 如图 1 所示。

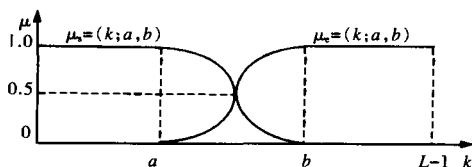


图 1 边缘区域与非边缘区域的隶属函数

Fig.1 Membership functions of edge region and smooth region

这里  $\mu_e(k; a, b)$  为 S 型函数,  $\mu_s(k; a, b)$  为 Z 型函

数。具体的函数形式为:

$$\mu_s(k; a, b) = \begin{cases} 1 & 0 \leq k \leq a \\ 1 - 2 \left( \frac{k-a}{b-a} \right)^2 & a \leq k \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left( \frac{k-b}{b-a} \right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq k \leq b \\ 0 & b \leq k \leq L-1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_e(k; a, b) = 1 - \mu_s(k; a, b) \quad (14)$$

实际上, 隶属函数  $\mu_e(k; a, b)$  与  $\mu_s(k; a, b)$  表示的是梯度图像中的每个像素被划分到边缘区域和非边缘区域的条件概率。对灰度  $k$  而言, 有以下公式成立:

$$\mu_s(k) = p_{s|k} \quad \mu_e(k) = p_{e|k} \quad (15)$$

对于给定参数  $(a, b)$ , 则  $(a, b)$  将图像分为两个像素群体, 边缘群体 (EP) 与非边缘群体 (SP)。假设  $EP \sim N(m_1(a, b), \sigma_1^2(a, b))$ ,  $SP \sim N(m_2(a, b), \sigma_2^2(a, b))$ 。边缘群体与非边缘群体的概率分别为  $P_e, P_s$ 。反映目标与背景概率分布的直方图如下式:

$$h_k = h(k) = \frac{P_e}{\sqrt{2\pi} \sigma_1(a, b)} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{k-m_1(a, b)}{\sigma_1(a, b)} \right)^2} + \frac{P_s}{\sqrt{2\pi} \sigma_2(a, b)} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{k-m_2(a, b)}{\sigma_2(a, b)} \right)^2} \quad (16)$$

相应的参数分别为:

$$P_{s(i)}(a, b) = \sum_{k=0}^{L-1} \mu_{s(i)}(k; a, b) h_k \quad (17)$$

$$m_{s(i)}(a, b) = \frac{\left[ \sum_{k=0}^{L-1} k \mu_{s(i)}(k; a, b) h_k \right]}{P_{s(i)}(a, b)} \quad (18)$$

$$\sigma_{s(i)}^2(a, b) = \frac{\left[ \sum_{k=0}^{L-1} \{k - m_{s(i)}(a, b)\}^2 \mu_{s(i)}(k; a, b) h_k \right]}{P_{s(i)}(a, b)} \quad (19)$$

$$s(i) = \begin{cases} e & i=1 \\ s & i=1 \end{cases} \quad (20)$$

误差函数  $J(a, b)$  定义为:

$$J(a,b)=1+2[P_e(a,b)\log\sigma_e(a,b)+P_s(a,b)\log\sigma_s(a,b)]-2[P_e(a,b)\log P_e(a,b)+P_s(a,b)\log P_s(a,b)] \quad (21)$$

2.2.2 与最小误差算法比较

分别比较公式(3)与公式(17)、公式(4)与公式(18)、公式(5)与公式(19)可见,公式(3)、公式(4)和公式(5)分别是公式(17)、公式(18)与公式(19)在参数  $b=a+1$  时隶属函数为公式(22)、公式(23)的特殊情形,即:

$$\mu_s(k;a,b)=\begin{cases} 1 & 0 \leq k \leq a \\ 0 & b \leq k \leq L-1 \end{cases} \quad (22)$$

$$\mu_e(k;a,b)=1-\mu_s(k;a,b) \quad (23)$$

因此说,最小误差算法是本文方法的特例,本文方法是最小误差算法在模糊集上的推广。考虑到红外图像边缘模糊的特点以及噪声的影响,简单地把某一像素归为边缘区域或非边缘区域都是不恰当的。所以本文考虑根据模糊最小误差算法来选取最优阈值。

2.3 最小模糊误差准则

在边缘检测中,寻求参数  $(a,b)$  以得到梯度图像中最佳的边缘曲线。因而这里选择最小分类误差所对应的参数值,即  $a_{opt}, b_{opt}$  满足下式:

$$(a_{opt}, b_{opt}) = \arg \min_{a,b} [J(a,b)] \quad (24)$$

由公式(21)可以得到最优化参数  $(a_{opt}, b_{opt})$ ,进而可得到最佳阈值  $T$ :

$$T = \frac{a_{opt} + b_{opt}}{2} \quad (25)$$

式中  $[\cdot]$  表示取整运算。

2.4 边缘检测<sup>[10]</sup>

设最终的边缘图像为  $E$ ,则可得位置  $(i,j)$  处  $e_{ij}$  为:

$$e_{ij} = \begin{cases} 200 & \text{如果 } g_{ij} \geq T \\ 0 & \text{如果 } g_{ij} \leq T \end{cases} \quad (26)$$

3 实验结果及结论

图 2、图 3 给出了两幅红外图像的边缘检测比较

结果,其中(a)为原始图像,(b)、(c)分别为一般的梯度算子加类间方差分割结果及本文算法的边缘检测结果。图 2 为战舰图像,图像大小为  $191 \times 191$ ,隶属函数参数对  $(a,b)=(2,20)$ ,用本算法求得图像阈值为 11;图 3 为桥梁目标图像,图像大小为  $205 \times 166$ ,隶属函数参数对  $(a,b)=(5,26)$ ,用本算法求得图像阈值为 15。

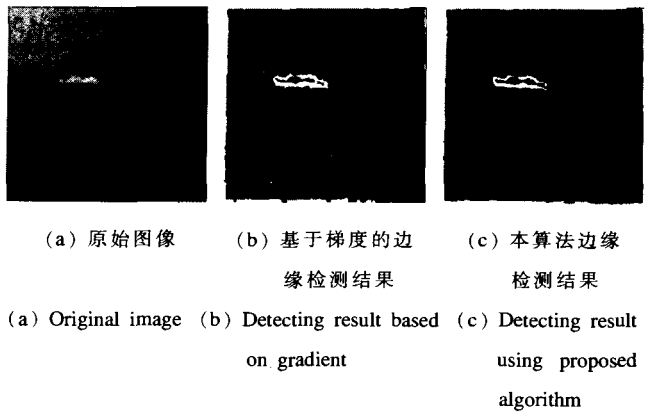


图2 红外舰船目标边缘检测结果

Fig.2 Results of ship target edge detection in infrared image

从图 2 的边缘检测比较结果来看,(a)中的战舰航行在海面上,(b)中的基于一般的梯度算子能较好地检测出战舰主体的边缘,但受噪声的影响较大。而(c)中的边缘检测结果明显优于(b),不仅战舰的边缘被很好地检测出来,而且噪声影响也受到很大的抑制。

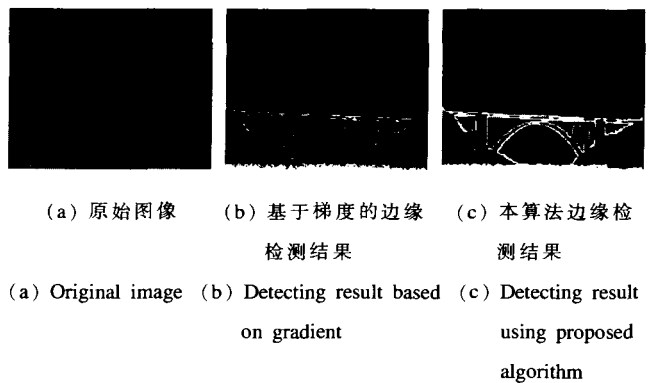


图 3 红外桥梁目标边缘检测结果

Fig.3 Results of bridge edge detection in infrared image

从图 3 的边缘检测比较结果来看,(b)虽然较好地检测出红外桥梁目标主体边缘,但由于受噪声的影响,出现了边缘断点和过检测的情况。而在(c)中噪

声影响得到了很好的抑制,桥梁目标的边缘被很好地检测出来。

对背景单一的目标图像而言,根据本算法选取一个全局阈值来分割目标是适当的,如图 2、图 3 所示。而对于背景比较复杂的目标图像来说,单凭一个全局阈值可能无法取得满意的分割效果,因此,背景较复杂的红外目标的边缘检测算法是以后研究的重点。

红外图像边缘检测是图像处理领域的难题之一。结合红外图像的特点,本文提出了一种基于红外图像边缘检测算法。实验结果表明,与传统的方法相比,该算法具有更好的效果。

#### 参考文献:

- [1] Bezdek J C, Chandrasekhar R, Attikiouzel Y. A geometric approach to edge detection [J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems, 1998, 6 (1): 52-75.
- [2] Ho K H L. FEDGE - fuzzy edge detection by fuzzy categorization and classification of edges [A]. In: International Joint Conference on Artificial Intelligence Workshop [C]. Canada: Montreal, 1995. 182-196.
- [3] Russo F. FIRE operators for image processing [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 103 (2): 265-275.
- [4] Cheung K F, Chan W K. Fuzzy one - mean algorithm for edge detection [A]. IEEE International Conference on Fuzzy Systems [C]. Japan: Yokohama, 1995. 2039-2044.
- [5] Kuo Y H, Lee C S, Liu C C. A new fuzzy edge detection method for image enhancement [A]. IEEE International Conference on Fuzzy Systems [C]. Spain: Barcelona, 1997. 1069-1074.
- [6] JIN Li-zuo, XIA Liang-zheng. A new definition of fuzzy partition entropy and its application to image segmentation [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves (金立左, 夏良正. 模糊划分熵的新定义及其在图像分割中的应用. 红外与毫米波学报), 2000, 19 (3): 219-223.
- [7] ZHANG Hong-qun, ZHANG Xue, XIAO Wang-xin. Adaptive thresholds edge detection for image based on wavelet transform [J]. Infrared and Laser Engineering (张宏群, 张雪, 肖旺新. 小波变换地自适应阈值图像边缘检测方法. 红外与激光工程), 2003, 32 (1): 32-36.
- [8] Kittler J, Illingworth J. Minimum error thresholding [J]. Pattern Recognition, 1986, 19 (1): 41-47.
- [9] Gonzalez R C, Wintz P. Digital image processing [M]. MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- [10] Sun W, Xia L Z. A new fuzzy edge detection algorithm [J]. Journal of Southeast University, 2003, 19 (3): 132-136.
- [1] Bezdek J C, Chandrasekhar R, Attikiouzel Y. A geometric approach to edge detection [J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems, 1998, 6 (1): 52-75.
- [2] Ho K H L. FEDGE - fuzzy edge detection by fuzzy categorization and classification of edges [A]. In: International Joint Conference on Artificial Intelligence Workshop [C]. Canada: Montreal, 1995. 182-196.
- [3] Russo F. FIRE operators for image processing [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 103 (2): 267-271.
- [2] REN Guo-guang, HUANG Yu-nian. The present status and future of the tactical laser weapons [J]. Laser & Infrared (任国光, 黄裕年. 战术高能激光武器的发展现状和未来. 激光与红外), 2002, 32 (4): 211-217.
- [3] Ajer H, Landrs S, Rustad G, et al. Efficient diode-laser side-pumped TEM<sub>00</sub> mode Nd:YAG laser [J]. Optics Letters, 1992, 17 (24): 1785-1787.
- [4] Burnham R, Hays A D. High-power diode-array-pumped frequency-doubled CW Nd:YAG laser [J]. Optics Letters, 1989, 14: 27-29.
- [5] Xie Wen-jie, Tam Siu-chung, Lam Yee-loy. Simple method to calculate the radial energy and temperature distributions in diode-pumped solid state laser rods [J]. Opt Eng, 2001, 40 (8): 1568-1572.
- [6] Larry R Marshall, Kaz A, Burnham R L. Highly efficient TEM<sub>00</sub> operation of transversely diode-pumped Nd:YAG lasers [J]. Optics Letters, 1992, 17 (3): 186-188.
- [7] Gu Jian-hui, Tam Siu-chung, Lam Yee-loy, et al. Pump uniformity study of a side-pumped DPSS laser [A]. SPIE [C]. 2001, 4267: 89-95.
- [8] Walter Koehner, SUN Wen. State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press (W 克希耐尔, 孙文. 固体激光工程. 北京: 科学出版社), 2002. 324-330.
- [9] MAO Shao-qing, HUANG Tao, WEN Zhong-yi, et al. Calculation and analyze of homogeneity of diode side pumped solid laser [J]. Laser Technology (毛少卿, 黄涛, 温中一, 等. 半导体侧面泵浦固体激光器均匀性的计算和分析. 激光技术), 1997, 21 (3): 185-188.
- [10] WANG Jian-hua, ZHAI Gang, JIN Feng, et al. Pump uniformity study of solid-state laser rods directly side pumped by laser diode [J]. Laser Technology (王建华, 翟刚, 金锋, 等. LD 直接侧面泵浦棒状介质的光场研究. 激光技术), 2004, 28 (1): 36-38, 41.
- [11] LIANG Quan-ting. Physical Optics [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press (梁铨廷. 物理光学. 杭州: 浙江大学出版社), 1997. 30-33.

(上接第 426 页)

辉, 谭胜. 高能激光武器的发展和应用前景. 红外与激光工程, 2002, 31 (3): 267-271.