

基于顶帽变换的红外图像模糊边缘检测算法

耿亮¹, 李东兴¹, 杜钦君², 郭春彬¹, 任菡¹, 李爱军¹

(1.山东理工大学机械工程学院 山东 淄博 255049; 2.山东理工大学电气与电子工程学院 山东 淄博 255049)

摘要: 红外成像技术广泛应用航空航天、国家防卫、农业工程及医学工程等各个领域, 红外图像边缘信息的获取具有重要意义。提出了改进的图像模糊边缘检测算法, 首先改变隶属度函数, 简化运算量和缩短处理时间。其次, 在选取分割阈值过程中引用基于顶帽变换的自适应方法求取不同图像的阈值, 使得分割更加准确。实验结果表明, 本算法可以保留红外图像更多的低灰度边缘信息, 且较传统的 Pal-King 算法减少了运算时间, 可应用于红外目标探测以及红外目标识别等领域。

关键词: 红外图像; 模糊边缘检测; 顶帽变换; 红外目标探测; 红外目标识别

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)03-0229-05

A Fuzzy Edge Detection Algorithm Based on Top-hat Transform for the Infrared Images

GENG Liang¹, LI Dong-xing¹, DU Qin-jun², GUO Chun-bin¹, REN Han¹, LI Ai-jun¹

(1.School of mechanical engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2.School of electrical and electronic engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: With the infrared imaging technology is widely used in the fields of aeronautics and astronautics, the national defense fields, the agriculture engineering and medical engineering fields and so on, the infrared image edge information obtaining is of great significance. An improved image fuzzy edge detection algorithm is proposed in this paper. First, membership functions are redefined to simplify computation and decrease processing time. Secondly, the top-hat transform is used in the selection of segmentation threshold instead of the provisions threshold in the traditional algorithm. The traditional threshold value is improved in order to make the segmentation more accurate. The experimental results show that the lower infrared image gray edge information is preserved via proposed algorithm in this paper. The detecting results are more accurate. The run time is decreased obviously than the traditional Pal - king algorithm. The algorithm in this paper can be used in the fields of infrared target detection and recognition.

Key words: infrared image, fuzzy edges detection, top-hat transform, infrared target detection, infrared target recognition

0 引言

随着红外技术的不断发展, 红外成像技术广泛应用于目标检测及火控^[1]、光学遥感和夜间导航等民用领域中^[2], 同时也应用在精确制导、敌机侦测等军事领域^[3]。其较强的抗干扰性能以及不易受光线强弱影响的特点, 是红外技术在上述领域应用的优势。但是, 红外图像在采集过程中同样会受到脉冲噪声等因素的影响, 因此, 需要合适的边缘检测算法来获得图像

中的重要信息^[4]。

传统的边缘检测算法, 如 Sobel 算子、Canny 算子等, 由于在图像像素邻域产生的响应较宽, 定位精度不高, 不能准确地提取红外图像中所包含的重要边缘信息^[5]。20世纪80年代中期, Pal Sankar K. 和 King. Robert A. 在边缘检测算法中首次引入了模糊数学的概念, 即传统的 Pal-King 算法^[6]。由于图像的边缘信息通常存在模糊性, Pal-King 算法通过一一映射变换将图像像素从空间域转化到模糊域, 在模糊域

收稿日期: 2014-11-01; 修订日期: 2014-12-16。

作者简介: 耿亮(1990-), 男, 硕士研究生, 山东德州人。主要研究方向为机器视觉与模式识别。

通讯作者: 李东兴(1962-), 男, 山东省潍坊人, 副教授, 工学博士, 硕士生导师, 主要研究领域为成像探测与导引。E-mail: lidongxing_1@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金, 编号: 61175090; 山东省自然科学基金, 编号: ZR2014EL024; 山东省高校科技计划, 编号: J14LN76。

内采用模糊增强算子进行增强运算，然后通过逆变换将图像从模糊域映射回空间域，对增强后的图像采用“min”或“max”算子进行提取边缘，获得图像的边缘信息^[7]。引入模糊思想可使得该算法较传统的边缘检测算法具有更好的抑噪及边缘检测效果^[8]。但是在提取红外图像边缘时，该算法在空间域向模糊域转换过程中，映射变换的隶属度函数复杂^[9]，运算量大，处理时间长^[10]；其次，传统 Pal-King 算法在模糊域增强过程中会自动将低灰度信息抑制而造成红外图像低灰度边缘信息的损失^[11]；最后该算法在模糊增强阶段对所有的图像都选取 0.5 为分割阈值，不能满足所有红外图像对重要信息的获取^[12]。近几年来国内外学者对 Pal-King 算法进行改进，提出了基于模糊集的边缘检测算法^[13]，基于直觉模糊熵的边缘检测算法^[14]等改进算法，但在红外图像中效果不理想。

针对传统 Pal-King 算法的不足，本文提出了一种改进的边缘模糊检测算法，首先通过重新定义隶属度函数，简化运算，缩短处理时间，并使函数值域限制在[0,1]内，避免了低灰度边缘被强置为 0；其次，在选取分割阈值（渡越点）时，引入了一种基于顶帽变换思想的自适应阈值分割方法^[15]，对不同红外图像的阈值自适应选取，保留了图像的重要边缘信息。

1 Pal-King 算法

1.1 Pal-King 算法基本原理

模糊边缘检测的理论是建立在模糊特征域的，在空间域，一个 $M \times N$ 、具有 L 级灰度的二维图像 X 通过隶属度函数 P 转换到模糊特征域后，用一个模糊矩阵 Y 表示图像，表示为：

$$Y = \bigcup_{i=1}^M \bigcup_{j=1}^N P(i,j) / X(i,j) \quad i=1,2,\cdots,M; j=1,2,\cdots,N \quad (1)$$

式中： $P(i,j)/X(i,j)$ 表示图像 X 中像素点 $X(i,j)$ 相对于某个特定灰度级 $X(m,n)$ 的隶属度 $P(i,j)$ ，隶属度函数 P 为：

$$P(i,j) = G(X) = \left[1 + \frac{L-1-X(i,j)}{F_d} \right]^{-F_e} \quad (2)$$

式中： F_e 和 F_d 分别为大于 0 的指数模糊化因子和分母模糊化因子。通常取 $F_e=2$ ，当 $G(X(i,j))=G(I_c)=0.5$ 时，称 I_c 为渡越点（分割阈值），通常选取 0.5 为渡越点，对大多数图像均可以使用。 F_d 由 F_e 和 I_c 决定：

$$F_d = \left[\frac{L-1-I_c}{2^{\frac{1}{F_e}} - 1} \right] \quad (3)$$

I_c 根据经验或灰度直方图确定^[7]。

在模糊域对图像进行边缘增强：

$$P' = T_r(P) \quad (4)$$

$$T_r(P(i,j)) = \begin{cases} 2P(i,j)^2 & (0 < P(i,j) \leq 0.5) \\ 1 - 2(1-P(i,j))^2 & (0.5 < P(i,j) \leq 1) \end{cases} \quad (5)$$

式中： P' 表示在模糊域增强的图像； r 表示在模糊域增强的次数。

在模糊域增强后，对 P' 进行逆变换，得到模糊增强后的空间域图像 $X'(i,j)$ ：

$$X'(i,j) = G^{-1}(P'(i,j)) = P_{\max} + F_d [1 - (P'(i,j))^{\frac{1}{F_e}}] \quad (6)$$

采用 Nakagawa 和 Rosen Field 提出的“min”或“max”算子进行提取边缘，得到的边缘矩阵 E_{edge} 为：

$$E_{\text{edge}} = [X''(i,j)]_{M \times N} \quad (7)$$

$$X''(i,j) = |X'(i,j) - \min\{X'(a,b)\}| \quad (8)$$

或

$$X''(i,j) = |X'(i,j) - \max\{X'(a,b)\}| \quad (9)$$

式中： X'' 表示提取边缘后的图像； $(a,b) \in W$ ， W 是以像素 (i,j) 为中心的 3×3 窗口。

1.2 Pal-King 算法应用于红外图像中存在的缺点

在易受脉冲噪声影响的红外图像低灰度边缘提取中，Pal-King 算法的不足之处主要体现在隶属度函数及阈值选取两个方面。

隶属度函数计算复杂，处理时间长，通过隶属度函数转换后，由于 F_d 和 F_e 受不同图像影响， F_d 小于 1 且 F_e 不为偶数时，由式(2)可以得出：

$$P(i,j) = \left[1 + \frac{L-1-X(i,j)}{F_d} \right]^{-F_e} \quad (10)$$

在区间 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 上，矩阵 P 的值域为 $[-\infty, 1]$ 。当 $P(i,j) < 0$ 时，有 $P'(i,j) = 2 \times P(i,j)^2 < P(i,j)$ ，将 $P'(i,j)$ 代入式(6)，求得 $X'(i,j) < 0$ ，由于图像中的像素最小值一定大于 0，传统算法将小于 0 的值强置为 0，造成低灰度边缘的损失。

渡越点 I_c 通常取定值 0.5，实际中不同的图像目标与背景的分割阈值不同，特别在易受脉冲噪声影响的红外图像中，使用 0.5 作为渡越点不能获得准确地边缘信息。

2 模糊边缘检测算法的改进

2.1 定义隶属度函数

针对传统的隶属度运算公式过于复杂且最小值小于 0 的不足，重新定义隶属度函数如下：

$$G(t) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha t)} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i / X_{\text{mid}} \quad (12)$$

式中: α 为图像的模糊指数; X_i 为图像任意一点灰度值; X_{mid} 为图像灰度值的中值。随机取图像中 k 个点计算其灰度平均值与最大灰度值的比为 α 。

$$E(m,n) = G(X(m,n)) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(X(m,n)))} \quad (13)$$

式中: $X(m,n)$ 表示空间域 $m \times n$, 灰度级为 L 的二维图像; $E(m,n)$ 表示转换到模糊特征域的图像。

图 1 表示由定义的隶属度函数, 将图像从空间域转换到模糊域的变换曲线。

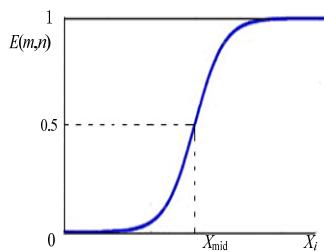


图 1 空间域转换到模糊域的变换曲线

Fig.1 The transformation curve from spatial domain to the fuzzy domain

如图 1, 横轴表示图像在空间域的灰度值, 纵轴表示经过隶属度函数转换到模糊特征域的值, 由图可知, 值域收敛于区间 $[0,1]$, 保证了低灰度信息不置为 0, 同时简化了运算量, 缩短了处理时间。

2.2 基于顶帽变换的自适应阈值分割

由于不同图像中的目标和背景是不同的, 因此分割阈值(渡越点)也应不同, 通过对不同图像进行多次实验, 大多数图像目标与背景的分割阈值在 0.5~0.9 之间, 所以传统的模糊边缘检测算法把所有图像的阈值都选取为 0.5 是不合理的, 本文提出了一种基于顶帽变换的自适应阈值分割方法。

对模糊域图像进行顶帽变换处理:

$$g(m,n) = E(m,n) - (E(m,n) \circ B) \quad (14)$$

式中: $g(m,n)$ 表示模糊域中顶帽变换后的图像; \circ 为开运算符号; B 为结构元素。顶帽变换增强了原图像的对比度。

利用 Canny 算子能够对图像像素不同位置做不同加权的特性对图像进行边缘检测, 在增大检测范围的同时降低了边缘灰度的模糊程度。

计算原图像中对应边缘点灰度值的均值, 以此均值作为分割阈值, 表示为:

$$\mu_c = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k g_i \quad (15)$$

式中: k 为检测到边缘点的个数; μ_c 为最后的分割阈值。

2.3 模糊增强处理及边缘提取

模糊域增强, 定义:

$$\mu'(m,n) = T_r(g(m,n)) \quad (16)$$

式中: μ' 表示模糊域增强后的图像; r 表示在模糊域增强的次数, 增强次数一般不大于 3。

$$\mu'(m,n) = T_r(g(m,n)) = \begin{cases} \mu_c - \sqrt{(\mu_c^2 - g^2(m,n))} & 0 \leq g(m,n) \leq \mu_c \\ \mu_c + \sqrt{(1-\mu_c)^2 - (1-g^2(m,n))^2} & \mu_c \leq g(m,n) \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

变换增强了大于渡越点的 $g(m,n)$ 的边缘, 同时削弱了小于渡越点的 $g(m,n)$ 的边缘, 随着增强次数的增加, 图像边缘增强效果会越来越明显, 当 $r \rightarrow \infty$ 时, 最终将产生二值图像。

通过逆变换将图像由模糊域转换到空间域:

$$X'(m,n) = G^{-1}(\mu'(m,n)) = \frac{1}{-\alpha} \ln \left(\frac{1}{\mu'(m,n)} - 1 \right) \quad (18)$$

式中: X' 表示转换到空间域的图像。使用“min”或“max”算子, 提取边缘。

3 实验

分别对灰度图像及红外图像进行实验, 以均方误差 MSE (Mean Squared Error) 作为评价指标:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i,j) - x'(i,j)]^2}{M \times N} \quad (19)$$

3.1 实验一: 灰度图像

图 2(a)、图 3(a) 为同一幅原始图像, 图 2(b) 为用传统 Pal-King 算法通过模糊域增强后的图像, 图 2(c) 是使用传统的 Pal-King 算法对图 2(b) 进行边缘提取后的图像。图 3(b) 为使用本文算法通过模糊域增强得到的图像, 图 3(c) 为本文算法对图 3(b) 进行边缘提取后的图像。图 4(a) 为传统算法得到的灰度直方图, 图 4(b) 为改进算法得到的灰度直方图, 由图 4(a) 与图 4(b), 改进算法保留了图像更多的低灰度信息。

3.2 实验二: 红外图像

图 5(a)、图 6(a) 为同一幅红外探测图像, 图 5(b) 为用传统 Pal-King 算法通过模糊域增强后的图像, 图 5(c) 是使用传统的 Pal-King 算法对图 5(b) 进行边缘提取后的图像。图 6(b) 为使用本文算法通过模糊域增强得到的图像, 图 6(c) 为本文算法对图 6(b) 进行边缘提取后的图像。图 7(a) 为传统算法得到的灰度直方图, 图 7(b) 为改进算法得到的灰度直方图, 由图 7(a) 与图 7(b), 改进算法保留了红外图像更多的低灰度信息。

图 2(c)、图 3(c)、图 5(c) 和图 6(c) 的 MSE 值, 如表 1 所示。

多幅图像处理时间,结果如表2所示。表中, n 为处理次数,表内数据为对5幅不同图像进行边缘提取所用时间。

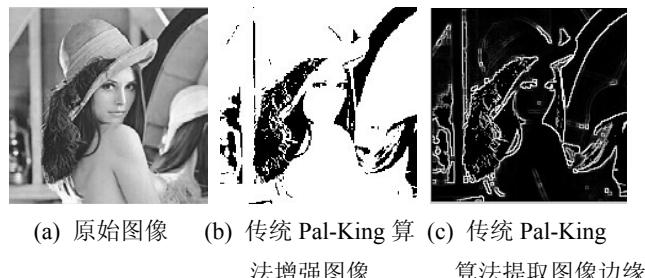


图2 传统 Pal-King 算法提取图像边缘

Fig.2 Extract the image edge by the traditional Pal-King algorithm



图3 改进模糊边缘检测算法提取图像边缘

Fig.3 Extract the image edge by the improve algorithm

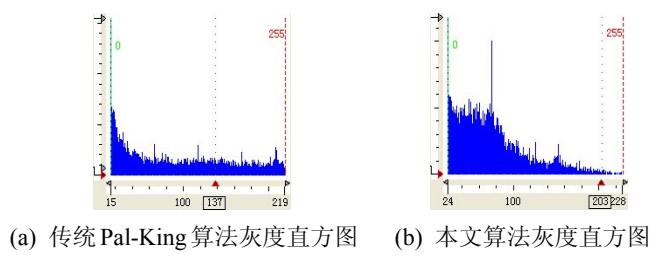


图4 两种算法的灰度直方图

Fig.4 The gray histogram of the algorithm

表1 两种算法MSE值

Table 1 The MSE values of the algorithms

处理方法	灰度图像	红外图像
传统算法	201.351	176.35
改进算法	74.83	42.55



图5 传统 Pal-King 算法提取红外图像边缘

Fig.5 Extract infrared image edge by the Pal-King algorithm



图6 本文算法提取红外图像边缘

Fig.6 Extract infrared image edge by the improve algorithm

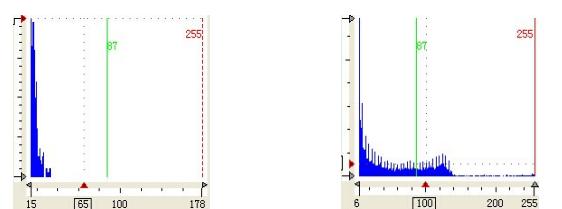


图7 传统算法与改进算法提取边缘灰度直方图

Fig.7 The gray histogram of the algorithm

表2 两种算法处理时间比较

Table 2 The processing time of the algorithm

n	1	2	3	4	5	平均时间
传统算法	10.37 s	10.35 s	10.32 s	11.34 s	10.34 s	10.544 s
改进算法	5.93 s	5.14 s	5.15 s	5.16 s	5.56 s	5.388 s

3.3 实验三: 本文改进算法在红外目标探测中的应用

由图8所示,改进算法在红外目标探测中可以准确提取出重要目标边缘信息,可以应用于红外目标探测以及红外目标识别等领域。



图8 本文改进边缘提取算法在红外目标探测领域的应用

Fig.8 The application of the improve algorithm in the infrared target detection

4 结论

传统的 Pal-King 算法隶属度函数复杂, 提取图像边缘信息所用时间长, 将红外图像由空间域向模糊特征域转换过程中, 自动将转换值小于 0 所对应的图像低灰度信息置 0, 从而造成图像低灰度信息丢失; 同时, 渡越点取 0.5, 不适用于易受脉冲噪声影响的红外图像。本文提出了一种基于顶帽变换的模糊边缘检测算法, 通过重新定义隶属度函数, 有效地保留了红外图像的低灰度边缘信息, 节省了处理时间。同时, 本文算法将顶帽变换思想用于自适应确定渡越点, 使图像分割更加准确。实验结果表明, 改进算法可以保留更多的低灰度边缘信息, 节省了运行时间, 并可以应用于红外目标探测以及红外目标识别等领域。

参考文献:

- [1] 杨华, 凌永顺, 陈昌明, 等. 美国反导系统红外探测、跟踪和识别技术分析[J]. 红外技术, 2001, 23(4):1-3,11.
- [2] A. Rogalski. Competitive technologies for third generation infrared photon detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2006, 14(1): 87-101.
- [3] 范晋祥, 张渊, 王社阳. 红外成像制导导弹自动目标识别应用现状分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 778-781.
- [4] Tamalika Chaira. A rank ordered filter for medical image edge enhancement and detection using intuitionistic fuzzy set[J]. *Applied Soft Computing*, 2012, 12(4): 1259-1266.
- [5] 许宏科, 秦严严, 陈会茹. 一种基于改进 Canny 的边缘检测算法[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 210-214.
- [6] Pal Sankar K, King Robert A. On edge detection of X-ray-images using fuzzy sets[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1983, 5(1): 69-77.
- [7] Pal Sankar K, King Robert A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1981, 11(7): 494-501.
- [8] Ranita Biswas, Jaya Sil. An improved Canny edge detection algorithm based on type-2 fuzzy sets[J]. *Procedia Technology*, 2012, 4: 820-824.
- [9] Bustince H, Pagola M, Barrenechea E, et al. Ignorance functions. An application to calculation of the threshold in prostate ultrasound images[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2010, 161(1): 20-36.
- [10] Kim Dong-Su, Lee Wang-Heon, In-So Kweon. Automatic edge detection using 3×3 ideal binary pixel patterns and fuzzy-based edge thresholding[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2004, 25(1): 101-106.
- [11] 周明辉, 廖春艳, 任兆玉, 等. 表面增强拉曼光谱生物成像技术及其应用[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 633-642.
- [12] 夏清, 陈亚凯, 张振鑫, 等. 基于 Laplace 算子和灰色理论的热红外影像边缘检测[J]. 红外技术, 2014, 36(5): 377-380.
- [13] 史卉萍, 耿国华, 周明全, 等. 基于模糊集的图像增强[J]. 微计算机信息, 2008, 24(8-3): 291-292, 254.
- [14] 孔韦韦, 雷英杰. 基于直觉模糊熵的红外图像预处理方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(8): 1484-1491.
- [15] 姜桃, 赵春江, 陈明, 等. 自适应图像模糊增强快速算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(19): 213-214, 223.