

文章编号:1007-2780(2011)04-0555-06

改进的红外弱小目标检测方法

靳永亮^{1,2}, 王延杰¹, 丁南南^{1,2}, 李静宇^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: guangjisuojin@163. com;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 为了进一步提高红外弱小目标检测的准确性和实时性, 针对红外图像的特点利用修正的 Top-Hat 算子对目标图像进行背景抑制以提高目标检测概率。根据已有的先验知识构造属性集, 把灰度直方图限定在感兴趣区域, 减少背景和噪声的干扰。利用改进的 OTSU 算法进行图像分割以检测目标。为了提高分割算法运算速度, 把快速递推算法推广应用到了本文算法中。实验选取了不同类型的红外图像, 将本文算法和其他文献中算法的分割结果进行了比较。实验结果表明, 本文算法具有更好的分割效果, 目标分割准确, 运算速度提高了 60% 以上。属性直方图可以针对具体问题, 利用已有的先验知识灵活构造, 具有较好的通用性。

关 键 词: 红外弱小目标检测; 修正 Top-Ha 算子; 二维属性直方图; 改进 OTSU 算法; 图像分割

中图分类号: TN911. 73

文献标识码: A

DOI: 10. 3788/YJYXS20112604. 0555

Improved Method for Small Infrared Target Detection

JIN Yong-liang^{1,2}, WANG Yan-jie¹, DING Nan-nan^{1,2}, LI Jing-yu^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China, E-mail: guangjisuojin@163. com;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to further improve the accuracy and real-time performance of small infrared target detection, a new improved method is proposed. First, aiming at the characters of the infrared image, the improved Top-Hat filter is used to restrain background for the purpose of increasing the target detection probability. Second, the bound set is constructed to limit the gray level histogram to region of interest for reducing the interference of background and noise. Then target detection is achieved by image segmentation using improved OTSU algorithm. Furthermore, the fast recurring algorithm is applied to proposed algorithm for accelerating the running speed of the segmentation algorithm. Different types of infrared images are selected to compare the results of purposed algorithm and the other two algorithms in references. Experiment results show that proposed algorithm has better performance than the other two markedly. Object segmentation is more accurate and running speed is accelerated by more than 60%. Finally, the bound histogram can be constructed aiming at concrete problem, based on gained prior knowledge, so it has better generality.

Key words: infrared small target detection; improved To-Hat; 2D bound histogram; improved OTSU algorithm; image segmentation

收稿日期: 2010-03-10; 修订日期: 2011-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60902067)

作者简介: 靳永亮(1984—), 男, 河南濮阳人, 博士研究生, 主要从事数字图像处理和虚拟场景设计等方面的研究。

1 引 言

由于大气辐射对红外传感器的影响,红外图像中包含有严重的起伏背景,同时由于成像距离远,目标在图像中占的比例较小,由于目标信号较弱小,而噪声和背景干扰较大,使得目标信号淹没其中难于分辨,即表现为低信噪比弱小目标。由于弱小目标缺乏形状、纹理等特征信息,使得许多常规的检测方法在这种情况下都会失效。

针对复杂背景下红外低对比度弱小目标检测面临的问题,许多学者进行了很多的研究并提出了不同的解决方案。文献[1]提出了使用自适应形态学 Top-Hat 算子进行背景抑制,利用改进的自适应门限算法分割检测目标。文献[2]提出了在海天背景下利用背景预测和原图差分提取目标,使用 Top-Hat 变换对目标提取后的图像进行波浪噪声滤除,自适应进行阈值分割检测目标。文献[3]提出利用 Top-Hat 变换进行背景抑制,进而对黑白 Top-Hat 滤波之后的图像求并集,使用自适应阈值分割检测目标。文献[4]提出利用神经元训练优化形态滤波结构元素修正的 Top-Hat 算子进行红外弱小目标检测。经验证,修正的 Top-Hat 算子比经典 Top-Hat 算子滤波性能更好,然而使用神经网络算法优化结构元素选取虽然可以取得较好的实验结果,但算法复杂,较难应用于实时系统。

本文利用滤波性能更好的修正的 Top-Hat 算子对图像进行形态学滤波抑制背景和噪声,然后利用基于属性直方图的改进 OTSU 算法进行图像分割,对于残留的杂散噪声使用多尺度形态学滤波算法进行去除,最终检测出目标。经验证,本文算法具有较好的检测性能和稳健抵抗噪声能力,实时性较好,适用于复杂背景下实时进行红外弱小目标的检测。

2 灰度形态学滤波算法

灰度形态滤波算法是针对一系列灰度图像,设原始灰度图像 F ,结构元素为 B ,则 F 关于 B 的膨胀和腐蚀运算分别定义如下:

$$F \oplus B = \max[f(x-i, y-j) + B(i, j)] \quad (1)$$

$$F \ominus B = \min[f(x+i, y+j) - B(i, j)] \quad (2)$$

其中 $(x, y), (i, j)$ 分别表示像素在图像和结构元素中的坐标点, $\oplus$ 表示膨胀运算, $\ominus$ 表示腐蚀运

算。 F 关于结构元素 B 的形态开和形态闭运算分别定义如下:

$$F \circ B = (F \ominus B) \oplus B \quad (3)$$

$$F \bullet B = (F \oplus B) \ominus B \quad (4)$$

其中 $\circ$ 表示形态开运算, $\bullet$ 表示形态闭运算。

在此基础上使用不同的开闭元素按组合定义了开 Top-Hat 运算和闭 Top-Hat 运算:

$$\text{OTH}(x, y) = (F - F \circ B)(x, y) \quad (5)$$

$$\text{CTH}(x, y) = (F \bullet B - F)(x, y) \quad (6)$$

Top-Hat 算子具有高通滤波的某些特性,开 Top-Hat 算子能检测出图像中的峰,闭 Top-Hat 算子能检测出图像中的谷。形态学 Top-Hat 算子可以非常有效地识别出各种背景下的点目标,但对于有强背景噪声干扰的点目标图像,传统的 Top-Hat 形态学滤波算子对其抑制能力显得力不从心。为此,有学者提出了修正的 Top-Hat 形态学滤波算子。修正 Top-Hat 形态学滤波器结构元素由两部分嵌套而成:内部结构元素 B_i (大小为 $n \times n$) 和外部结构元素 B_o (大小为 $m \times m$), 即 $B_i \subseteq B_o$ 。定义边缘结构元素为 $A = B_o - B_i$, 在此基础上定义修正的 Top-Hat 算子为

$$\text{TH}(x, y) = (F - (F \ominus A) \oplus B_i)(x, y) \quad (7)$$

实验验证修正 Top-Hat 形态学滤波器可以更好地抑制噪声的影响。

3 二维属性直方图

设一幅大小为 $M \times N$, 灰度等级为 L 的图像 I , 图像所有像素视为论域 $I = \{(x, y) | 0 \leq x \leq M-1, 0 \leq y \leq N-1\}$, 其中 (x, y) 表示像素。设 Q 为论域上具有某种属性的集合, $(x, y) \in Q$ 表示像素具有某种属性。仿照传统二维直方图的建立方法,二维属性直方图定义为 $p_Q(i, j) - i, j$ (或 $N_Q(i, j) - i, j$) 形成的离散曲线, $p_Q(i, j)$ 表示具有属性 Q 且灰度为 i , 邻域灰度为 j 的点出现的概率。设定图像 I 中具有某种属性的像素的个数为 N_Q , $n_Q(i, j)$ 表示具有某种属性且灰度值为 i , 邻域灰度值为 j 的像素对出现的频次, 则^[5-6]:

$$p_Q(i, j) = n_Q(i, j) / N_Q \quad (8)$$

设定 L_1, L_3 为属性集限定范围内灰度值的最小值和最大值, L_2, L_4 为属性集限定范围内邻域灰度均值的最小值和最大值。通常有 $0 \leq L_1, L_2, L_3, L_4 \leq L-1$, 则相应的属性直方图是 $(L_3 - L_1 + 1) \times (L_4 - L_2 + 1)$ 的矩阵, 如图 1 所示, 并且由式

(8)可得到^[5-6]：

$$\sum_{L_1 \leq i \leq L_3} \sum_{L_2 \leq j \leq L_4} p_Q(i,j) = 1 \quad (9)$$

从某种意义上讲，二维属性直方图(图 1)是一种残缺的直方图，它仅仅考虑了图像中具有某种属性的像素。针对具体问题，利用已有的先验知识舍弃传统二维直方图中一些干扰成分或具体问题无关的成分，可以在一定程度上降低基于二维直方图的图像处理方法的复杂性，使计算量大大幅减少，算法实时性大幅提高。对于同一幅图像，不同的属性集对应不同的二维属性直方图；因此，同一幅图像可以对应多个二维属性直方图，这一点与通常意义的二维直方图不同。使用时可以根据需要通过构造不同的属性集得到不同的二维属性直方图，使用更加灵活。图 2 为选定的一幅红

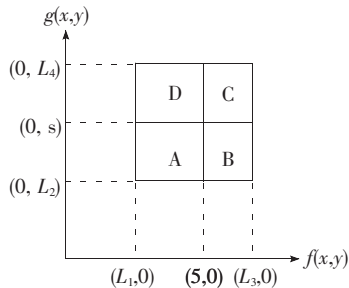


图 1 属性直方图示意图

Fig. 1 Bound histogram sketch



图 2 原图

Fig. 2 Original image

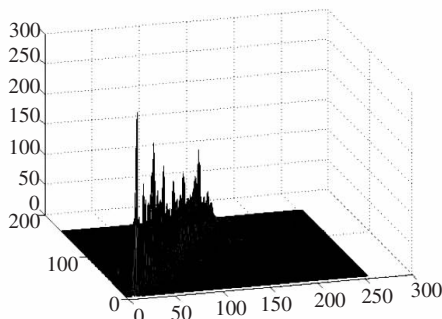


图 3 二维直方图

Fig. 3 2D histogram

外图片，图 3 为图像的二维直方图，图 4 为使用图像的灰度均值作为属性集划分条件所对应的二维属性直方图。

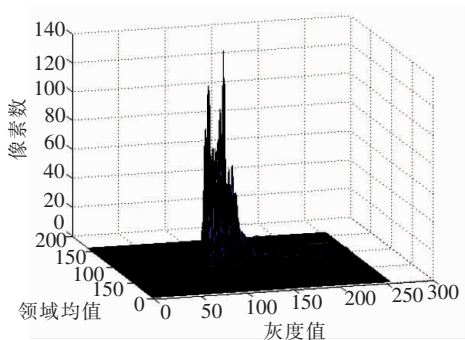


图 4 二维属性直方图

Fig. 4 2D bound histogram

4 改进的 OTSU 算法

大量实验表明，最大类间平均离差法能较好地保留图像细节，但是抵抗噪声能力较差；而基于最大类间方差的二维 OTSU 算法，能够较好地抑制图像噪声，但在图像细节保留上不及前者。本文结合两者在抵抗噪声和保留图像细节方面的优点，提出了基于二维属性直方图的改进二维 OTSU 算法。

最大类间方差法定义类间离散测度函数为：

$$\begin{aligned} t_r s_B(t,s) &= \omega_o(t,s) \{ [\mu_{oi}(t,s) - \mu T_i]^2 + \\ &[\mu_{oj}(t,s) - \mu T_j]^2 \} + \omega_b(t,s) \{ [\mu_{bi}(t,s) - \mu T_i]^2 + \\ &[\mu_{bj}(t,s) - \mu T_j]^2 \} = \{ [\mu T_i \omega_o(t,s) - \mu_{oi}(t,s)]^2 + \\ &\mu T_j \omega_o(t,s) - \mu_{oj}(t,s) \}^2 / \omega_o(t,s) [1 - \omega_o(t,s)] \end{aligned} \quad (10)$$

最大类间平均离差法定义的离散测度函数为：

$$\begin{aligned} d(t,s) &= \omega_b(t,s) [|\mu_{oi}(t,s) - \mu T_i| + |\mu_{oj}(t,s) - \mu T_j|] + \\ &\omega_b(t,s) [|\mu_{bi}(t,s) - \mu T_i| + |\mu_{bj}(t,s) - \mu T_j|] = \\ &2 [|\mu_{oi}(t,s) - \mu T_i \times \omega_o(t,s)| + \\ &|\mu_{oj}(t,s) - \mu T_j \times \omega_o(t,s)|] \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\omega_o(t,s)$, $\omega_b(t,s)$ 分别表示目标和背景的分布概率， $\mu_o(t,s)$, $\mu_b(t,s)$ 分别表示目标和背景的均值矢量。 μT 表示二维直方图的总体均值矢量。

$$\omega_b(t,s) = \sum_{L_1 \leq i \leq t} \sum_{L_2 \leq j \leq s} p_Q(i,j) \quad (12)$$

$$\omega_o(t,s) = \sum_{t+1 \leq i \leq L_3} \sum_{s+1 \leq j \leq L_4} p_Q(i,j) = 1 - \omega_b(t,s) \quad (13)$$

$$\mu_o(t,s) = [\mu_{oi}(t,s), \mu_{oj}(t,s)]^T = \left[\frac{\sum_{t+1 \leq i \leq L_3} \sum_{s+1 \leq j \leq L_4} i \times p_Q(i,j)}{\omega_b(t,s)}, \frac{\sum_{t+1 \leq i \leq L_3} \sum_{s+1 \leq j \leq L_4} j \times p_Q(i,j)}{\omega_b(t,s)} \right]^T \quad (14)$$

$$\mu_b(t,s) = (\mu_{bi}(t,s), \mu_{bj}(t,s))^T = \left[\frac{\sum_{L_1 \leq i \leq t} \sum_{L_2 \leq j \leq s} i \times p_Q(i,j)}{\omega_b(t,s)}, \frac{\sum_{L_1 \leq i \leq t} \sum_{L_2 \leq j \leq s} j \times p_Q(i,j)}{\omega_b(t,s)} \right]^T \quad (15)$$

$$\mu'_b(t,s) = \omega_b(t,s) \times [\mu_{bi}(t,s), \mu_{bj}(t,s)]^T \quad (16)$$

$$\mu'_o(t,s) = \omega_o(t,s) \times [\mu_{oi}(t,s), \mu_{oj}(t,s)]^T \quad (17)$$

$$\mu T = (\mu T_i, \mu T_j)^T = \left[\sum_{L_1 \leq i \leq L_3} \sum_{L_2 \leq j \leq L_4} i \times p_Q(i,j), \sum_{L_1 \leq i \leq L_3} \sum_{L_2 \leq j \leq L_4} j \times p_Q(i,j) \right]^T \quad (18)$$

由公式可见,类间平均离差法和类间方差法在推导上近似,使用的参数也是一致的,两者结合计算时只需要计算同样的参数值,不会额外增加计算复杂度。鉴于两者之间的近似和图像分割的侧重不同,结合两种离散测度函数,推出改进的二维 OTSU 算法的离散测度函数为:

$$M(t,s) = m_0 \times d(t,s) + m_1 \times \sqrt{t_r s_B(t,s)} \quad (19)$$

式中 m_0 和 m_1 为加权系数,且满足 $m_0 + m_1 = 1$ 。当 M 最大时,取得最佳分割阈值即:

$$(t^*, s^*) = \text{Arg} \max_{L_1 \leq i \leq L_3, L_2 \leq j \leq L_4} \{M(t,s)\} \quad (20)$$

加权系数可根据实际的需要按照图像分割的目的调整,在突出图像细节和抑制图像噪声之间进行协调以达到满意的分割效果,使用文献中的快速递推算法进行参数的计算,提高算法的实时性。

5 实验结果

为了验证本文算法的有效性,实验选取了不同类型的 2 幅红外图像——红外单目标图像(207×213)和红外多小目标图像(296×287)进行处理并对各种算法的分割结果进行了比较。二维直方图邻域窗口大小选择为 3×3 ,形态学滤波尺度不小于目标尺寸。实验验证内部结构元和外部结构元尺寸相差较大时,滤波效果较差,实验中红外单目标图像形态滤波参数选择为 $B_i = 3, B_o = 4$; 红外多

目标图像 $B_i = 3, B_o = 5$ 。综合考虑图像的抗噪性能和保留细节能力,分割算法的权重因子 $m_0 = 0.35, m_1 = 0.65$ 。在 Pentium 双核 CPU、主频 2.60 和内存 2G 的硬件环境下,使用 VC6.0 进行测试,并把文献[7]算法(算法 1)和文献[8]算法(算法 2)的运行结果和本文算法(算法 3)的分割结果及算法运行时间进行比较。

通常一幅包含目标的红外场景图像 $f(x,y)$ 可以描述为:

$$f(x,y) = t(x,y) + b(x,y) + n(x,y) \quad (21)$$

式中 $f(x,y)$ 表示红外场景图像, $t(x,y)$ 表示目标图像, $b(x,y)$ 表示背景图像, $n(x,y)$ 表示噪声图像。图像分割的目的是从目标背景噪声混杂的图像中提取出感兴趣的目标区域。红外图像中目标比周围背景有较突出的亮度特征,背景中由于各处辐射强度的差异呈现为明暗交错的现象,背景和噪声往往和目标交叠在一起形成杂波干扰使图像的信噪比较低,这样就导致红外目标很容易淹没在背景中无法分割。

基于传统的直方图的算法对图像大小很敏感,当目标和背景在图像中占的比例相差较大时,分割效果很差。构造属性集的目的是利用已有的对红外图像的先验知识,设定阈值把直方图限定在真正感兴趣的区域,以最大程度地减少背景和噪声对于目标的干扰,达到正确分割出目标的目的。红外图像中目标的亮度较大,背景中存在大片灰度变化缓慢的区域,图像中感兴趣区域主要分布在灰度值较高的区域,构造属性集时保留灰度值较高的区域,减少背景灰度较低的区域干扰。属性集表示为:

$$\begin{aligned} Q = \{ (x,y) \mid G_{th} \leq f(x,y) \leq L-1, \\ G_{th} \leq g(x,y) \leq L-1, 0 \leq x \leq M-1, \\ 0 \leq y \leq N-1, 0 \leq G_{th} \leq L-1 \} \end{aligned} \quad (22)$$

其中 $f(x,y)$ 表示 (x,y) 处的像素灰度值, $g(x,y)$ 表示像素 (x,y) 处的邻域平均灰度均值, G_{th} 表示属性直方图的阈值。由于红外图片中目标的面积远远小于背景面积,背景对于图像分割的影响远大于目标的影响,为了减少背景的干扰, G_{th} 选取不小于图像灰度均值的灰度值作为属性集的阈值, $G_{th} = G_{avr} + C \times (G_{max} - G_{avr})$, G_{avr} 为图像灰度均值, G_{max} 为灰度最大值, C 为权值。实验中单目标图像中背景灰度值较均匀,目标和背景的对比较度较小,目标为孤立弱小亮点。多目标图像背景

灰度变化缓慢,目标和背景对比度较小。单目标 C 取 0.2,多目标 C 取 0.1。

图 5 为红外单目标图像原图,图 6 为使用修正 Top-Hat 算子进行背景抑制后的红外单目标图像,图 7 为本文算法和文献算法的分割结果。图 8 为红外多小目标图像原图,图 9 为使用选定的参数进行背景抑制后的红外多目标图像,图 10 为 3 种算法进行图像分割后的运算结果。其分割

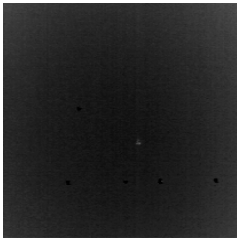


图 5 单目标图像
Fig. 5 Single-target image

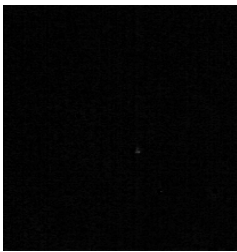


图 6 单目标背景抑制图像
Fig. 6 Background suppression result of single-target image

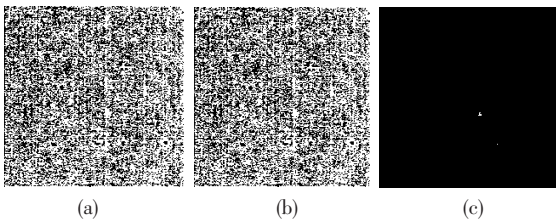


图 7 红外单目标图像的分割结果。(a)算法 1;(b)算法 2;(c)算法 3。
Fig. 7 Segmentation results of infrared single-target image. (a)Algorithm 1;(b)Algorithm 2;(c) Algorithm 3.

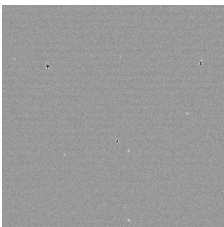


图 8 多小目标原图
Fig. 8 Multi-target image



图 9 多小目标背景抑制图像
Fig. 9 Background suppression result of multi-target image

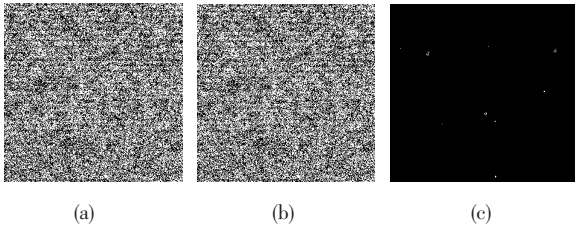


图 10 红外多小目标图像的分割结果。(a)算法 1;(b)算法 2;(c)算法 3。
Fig. 10 Segmentation results of infrared multi-target image. (a) Algorithm 1; (b) Algorithm 2; (c) Algorithm 3.

阈值如表 1 所示,表 2 列出了相应的在不同算法下的运行时间。

表 1 图像分割阈值

Table 1 Threshold of image segmentation			
图像	算法 1	算法 2	本文算法
单目标	(5,11)	(5,6)	(36,43)
多小目标	(43,51)	(35,35)	(46,41)

表 2 图像分割的运行时间(ms)

Table 2 Processing time spent in image segmentation			
图像	算法 1	算法 2	本文算法
单目标	7.96	9.94	3.355
多小目标	10.32	12.34	6.32

通过实验比较不难发现,本文算法的分割效果要明显优于文献中的算法,对于单目标图像,本文算法能较好地分割出目标,边缘准确清楚;多目标图像中本文算法对小目标基本实现正确分割,无噪声干扰,而文献中的算法分割结果目标淹没在背景中无法正确分割。从运算时间分析,由于文献中都使用了快速递推算法,运算时间较原始算法运算时间大大减少,本文算法由于使用了二

维属性直方图,较传统的二维直方图方法运算量更小,算法的实时性更高,运算速度较文献算法提高了 60%以上。

6 结 论

利用修正的 Top-Hat 算子对红外图像进行了背景抑制以增大图像的信噪比,提高了目标检测的准确率。针对传统直方图包含图像的全局信息,如果目标在整幅图像中占的比例较少时图像分割效果不理想的问题,利用已有的先验知识构造属性集把直方图限定在感兴趣的区域,减少背景和噪声的干扰使算法复杂性降低且分割结果更加准确。结合最大类间平均离差法抗噪性能好和

最大类间方差法保留细节能力强的特点,提出了基于二维属性直方图的改进 OTSU 算法,利用改进的 OTSU 算法作为阈值分割的准则在属性直方图上搜索最佳分割阈值进行图像分割。实验选取红外单目标和多目标图像,通过对本文算法和文献[7-8]算法的分割结果进行比较发现,本文算法的分割效果明显优于文献算法,目标分割更加准确。另外,由于使用了快速递推算法,同时属性直方图简化了运算,算法运算速度提高了 60%以上。本文算法在某种具有先验知识的场合具有通用性,对于具体问题,可以根据不同的分割目的灵活构造属性集以满足不同的需要。

参 考 文 献:

- [1] 许开宇,冯德瀛.海空背景下红外弱小目标检测方法[J].哈尔滨工程大学学报,2009,30(9):996-1000.
- [2] 曾明,李建勋.基于自适应形态学 Top-Hat 滤波器的红外弱小目标检测方法[J].上海交通大学学报,2006,40(1):90-93.
- [3] 周洪武,朱兆达,吴一全,等.基于 TOP-HAT 算子滤波器算子的红外弱小目标检测算法[J].南京航空航天大学学报,2007,39(2):213-216.
- [4] 孙小炜,李言俊,陈义.复杂背景条件下的红外运动小目标检测算法[J].2007,29(8):439-442.
- [5] 郭海涛,王连玉,田坦,等.利用二维属性直方图的 Otsu 自动阈值分割方法[J].光电子·激光,2005,16(6):739-742.
- [6] 郭海涛,田坦,王连玉,等.利用二维属性直方图的最大熵的图像分割方法[J].光学学报,2006,26(4):506-509.
- [7] 汪海洋,潘德炉,夏德琛.二维 Otsu 自适应阈值选取算法的快速实现[J].自动化学报,2007,33(9):968-971.
- [8] 吴一全,潘喆.2 维最大类间平均离差阈值选取快速递推算法[J].中国图像图形学报,2009,14(3):471-476.