

红外成像制导二维斜分最大熵分割的快速实现

乔立永¹, 徐立新¹, 高敏²

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 军械工程学院 导弹工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 针对红外成像制导复杂背景下低对比度红外图像的分割问题, 提出了一种新的基于 Kapur 最大熵阈值判别式的二维斜分快速递归推算法, 并采用逐步逼近的粗细搜索策略, 减少阈值搜索区域, 在可能的阈值范围内逐点寻找最佳阈值。通过对算法的复杂度进行分析, 并对实际获取的红外图像进行分割实验表明, Kapur 最大熵阈值判别式更加适合于低对比度红外图像分割, 提出的二维斜分快速算法所需的运行时间和存储单元均少于现有的二维直分或斜分最大熵分割快速递归推算法, 运行时间约为原始算法的 14%, 分割结果的噪点更少, 边界更加细致完整, 适用性更强, 满足红外成像制导系统工程实用化要求。

关键词: 红外制导; 二维斜分; 最大熵; 快速算法

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1691-09

Fast maximum entropy thresholding based on two-dimensional histogram oblique segmentation in infrared imaging guidance

Qiao Liyong¹, Xu Lixin¹, Gao Min²

(1. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Missile Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: To deal with the low contrast infrared images in complex background for infrared imaging guidance, a new fast recursive method based on Kapur's maximum entropy threshold discriminant was presented, coarse-fine searching strategy with successive approximation was adopted to reduce the threshold searching area, and the best threshold was searched by pixel in the possible area. The analysis of the methods' complexity and the segmentation experiments of the real infrared images show that, Kapur's maximum entropy threshold discriminant is more suitable for low contrast infrared images' segmentation, the running time and memory cell needed by the presented method are all less than existing fast maximum entropy threshold recursive methods based on two-dimensional histogram vertical or oblique segmentation, the running time is about 14% of the original method. In the result image, the noise is less, the boundary is more elaborate and complete, the applicability is stronger. The presented method meets the engineering practical requirement of the infrared imaging guidance system.

Key words: infrared guidance; two-dimensional oblique segmentation; maximum entropy; fast algorithm

收稿日期: 2012-11-10; 修订日期: 2012-12-15

基金项目: 军队科研资助项目

作者简介: 乔立永(1982-), 男, 博士生, 主要从事红外成像制导自动目标识别与跟踪方面的研究。Email: lile-116@163.com

导师简介: 徐立新(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事模式识别、复杂系统方面的研究。Email: lxxu@bit.edu.cn

0 引言

在红外成像目标识别和跟踪算法中,图像分割的关键和难点问题。红外图像中灰度值分布的不同,是将目标区域从背景中分离开来,或者是将目标及反映了红外探测器接收到的场景中(包括目标和背景)其相类似的物体与背景分离开来,决定特征提取的不同物体热辐射的差异。由于目标(如坦克、直升机准确性,是红外成像制导系统实现目标识别和跟踪和卡车等)的热辐射通常高于背景,选取合适的灰度阈值即可将红外图像中的潜在目标完整地分割出来。相比于其他的图像分割算法,阈值法计算简单,运算效率高,所需的数据存储空间低,是红外图像分割最基本和应用最广泛的一种方法。

由于战场环境复杂,目标灰度和背景灰度大量交错,各种灰度成分变化剧烈,以及探测器噪声、放大器噪声和背景辐射噪声等干扰的影响,导致红外图像整体灰度分布低且较集中,对比度和信噪比低、纹理特征不明显,存在边缘缺失和偏移的现象,目标检测难度高。同时,由于红外成像制导系统实时性和数据存储容量的限制,要求图像处理算法实现简单、复杂度低、抗干扰能力强、目标检测精度高。

目前红外成像制导中常用的阈值分割方法主要有最大类间方差法(Otsu法)^[1-2]、最大熵法^[3]等。Otsu法对目标大小敏感,当目标和背景像素比例相差较大时,分割效果很差。为此,众多学者针对Otsu法的缺点提出了许多改进算法^[1,4]。由Kapur等^[5]提出的一维最大熵法对图像中像素比例不同的目标均能产生较好的分割结果,但抗噪性较差。Abutaleb和Brink分别提出了基于灰度-邻域平均灰度二维直方图直分的最大熵分割算法^[6-7],提高了算法的抗噪能力,但同时计算量按指数增长,耗时太长,难以实用。为了解决这个问题,有关学者提出了多种快速算法,以及基于微粒群优化等优化算法的快速寻优方法。采用优化算法快速搜索阈值,如果参数设置不当,可能导致陷入局部最优解、收敛速度慢等问题,且算法的适用性差,复杂度较高,硬件实现困难。龚坚等^[8]和张毅军等^[9]分别提出了二维直分最大熵阈值分割的快速递推算法,相比于原始算法,计算时间大幅减少。吴一全等^[10]基于Brink提出的最大熵阈值判

式^[7],提出了一种二维直方图斜分最大熵分割快速算法,将取值域分为两段分别考虑计算,利用划分斜线与二维直方图形成的直角三角形累加计算背景(或目标)的概率和熵,获得递推计算公式,增加了算法的复杂度。

二维直方图区域斜分法^[10],错分的子区域明显要比区域直分法少很多,可使得分割后的图像区域内部更均匀、边界形状更准确,抵抗噪声更稳健。基于此,文中提出了一种新的二维直方图区域斜分最大熵阈值分割递推算法,在整个取值域上,利用不同斜线上各点的概率之和与熵之和,递推计算背景的概率和熵,简化了算法,并采用Kapur等提出的最大熵阈值判别式^[5]确定最佳阈值,对复杂背景下低对比度红外图像获得了较好的分割效果。同时,采用逐步逼近的粗细搜索策略,缩小阈值搜索区域,进一步降低了运行时间,减少了所需的存储单元,满足红外成像制导系统工程实用化要求。

1 二维直方图区域直分与斜分

1.1 二维灰度直方图

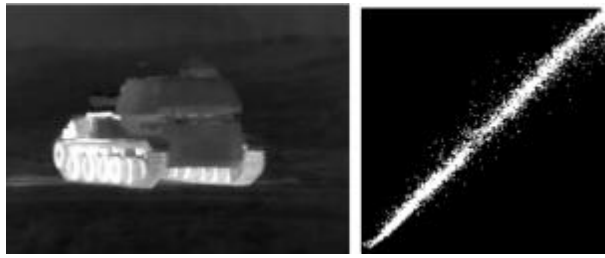
图像的二维直方图是由灰度-邻域平均灰度确定的像素概率直方图。设数字图像 $I=[f(x,y)]_{M \times N}$,灰度级为 $0,1,\dots,L-1$, $f(x,y)$ 表示图像坐标 (x,y) 处像素点的灰度值, $g(x,y)$ 表示邻域平滑图像坐标 (x,y) 处像素点的灰度值,邻域平滑图像通常采用8-邻域均值滤波模板获取。 $r(i,j)$ 表示 $f(x,y)=i,g(x,y)=i$ 灰度级点对出现的频次($0 \leq r_{ij} \leq M \times N$),则图像的二维归一化概率直方图 $\{p(i,j)\}$ 可表示为:

$$p(i,j)=r(i,j)/(M \times N), i,j=0,1,\dots,L-1 \quad (1)$$

显然 $0 \leq p(i,j) \leq 1$,且 $\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p(i,j)=1$ 。图1(a)中坦克红外图像的二维灰度直方图如图1(b)所示。

1.2 二维直方图区域直分

二维直方图区域直分是根据阈值向量 (t,s) ,采用分别与两坐标轴平行的相互垂直的十字线,将图1(b)所示的整个二维直方图划分为图1(c)所示的4个矩形区域,假设图像的亮(暗)元素属于目标(背景)。由于二维直方图中对应目标和背景内部区域像素点的灰度值与该像素点邻域平均灰度值近似,而对应目标和背景边缘的像素点,以及图像中噪点的灰度值与该像素点邻域平均灰度值有较大差异,则区域0

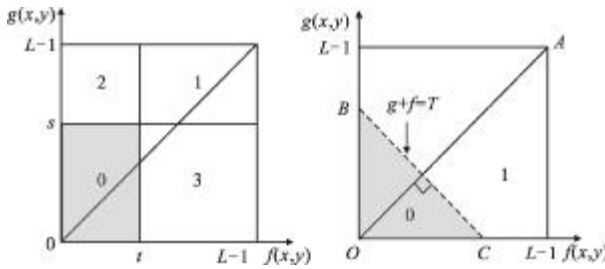


(a) 坦克红外图像

(b) 二维直方图

(a) Tank infrared image

(b) Two-dimensional histogram



(c) 二维垂直分割

(d) 二维直方图区域斜分

(c) Two-dimensional vertical segmentation

(d) Two-dimensional oblique segmentation

图 1 坦克红外图像及其二维直方图

Fig.1 Tank infrared image and its two-dimensional histogram

表示背景,区域 1 表示目标,而区域 2 和 3 表示边缘像素和噪点。由于边缘像素和噪点占有的比例较小,通常假设区域 2 和 3 的概率之和为 0。根据二维直方图区域直分法获取阈值化图像 $ImageB(x, y)$ 的方式为:

$$ImageB(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) \leq t \text{ 且 } g(x, y) \leq s \\ 1, & f(x, y) > t \text{ 且 } g(x, y) > s \end{cases} \quad (2)$$

二维直方图直分法在分割图像时,忽略了图 1(c) 中区域 2 和 3 中的边缘像素,以及区域 2 和 3 中的部分目标和背景内部区域像素,与实际不符,导致分割结果不够准确。

1.3 二维直方图区域斜分

如图 1(d)所示,二维直方图区域斜分^[10]是采用与主对角线 OA 垂直的斜线 BC ,将图 1(b)所示的整个二维直方图划分为背景和两个区域,斜线的左下区域对应背景,右上区域对应目标,斜线的方程为 $g+f=T$ (T 为阈值, $0 \leq T \leq 2L-2$)。按灰度与邻域平均灰度的和对图像 $f(x, y)$ 进行阈值分割,二维阈值化图像 $ImageB(x, y)$ 的获取方式为:

$$ImageB(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) + g(x, y) \leq T \\ 1, & f(x, y) + g(x, y) > T \end{cases} \quad (3)$$

二维斜分法错分的子区域比直分法要少很多,目标(或背景)的内部和边缘像素都没有错分,因噪点引起的错分也有所减少,具体可参考有关文献^[10],在此不再赘述。二维斜分法更加准确的区域划分,使得分割结果的内部区域均匀、边界形状准确,具有更强的抗噪性。

2 二维直方图斜分的最大熵分割快速算法

2.1 减少阈值搜索区域

斜线 $g+f=T$ (T 为阈值, $0 \leq T \leq 2L-2$) 将二维直方图分为背景和两个区域,根据 1.3 节二维直方图区域斜分的定义,背景区域由判别式 $f(x, y) + g(x, y) \leq T$ 限定,目标区域由判别式 $f(x, y) + g(x, y) > T$ 限定,则背景的概率 $P_B(T)$ 和熵 $h_B(T)$,以及目标的概率 $P_O(T)$ 和熵 $h_O(T)$ 的计算公式分别为:

$$P_B(T) = \sum_{i+j \leq T} p(i, j), 0 \leq i, j \leq T \quad (4)$$

$$P_O(T) = 1 - P_B(T) \quad (5)$$

$$h_B(T) = \sum_{i+j \leq T} p(i, j) \log(p(i, j)), 0 \leq i, j \leq T \quad (6)$$

$$h_O(T) = h_{LL} - h_B(T) \quad (7)$$

其中, $h_{LL} = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j) \log(p(i, j))$ 为二维直方图的总熵。

背景和目标的 Shannon 熵分别为:

$$H_B(T) = \log(P_B(T)) + \frac{h_B(T)}{P_B(T)} \quad (8)$$

$$H_O(T) = \log(P_O(T)) + \frac{h_O(T)}{P_O(T)} \quad (9)$$

选择的最佳阈值为:

$$T^* = \arg \max_{0 \leq T \leq 2L-2} \{H_B(T) + H_O(T)\} \quad (10)$$

实际上,对每个 T 值 ($0 \leq T \leq 2L-2$) 分别计算背景和目标的 Shannon 熵 $H_B(T)$ 和 $H_O(T)$ 是没有必要的,可以设法减少阈值搜索区域,避免不必要的对数、除法运算和循环次数,降低算法的运算量,减少运行时间。

设 $L=256$, 则灰度与邻域平均灰度的和 T 的取值范围为 $\{0, 510\}$, 将 511 灰度级均匀分为 16 段,第 1 段至第 15 段均包含 32 个灰度级,第 16 段包含 31 个灰度级,选定这 16 段作为粗搜索区域,对每个分段只取中值(即 $T=16+k \times 32, k=0, 1, 2, \dots, 15$), 分别

计算背景和目标的 Shannon 熵 $H_B(T)$ 和 $H_O(T)$, 根据判别式 $T' = \arg \max_{T=16+k \times 32} \{H_B(T) + H_O(T)\}$ 确定候选分割阈值 T' , 大幅减少搜索范围, 降低了运算量和所需的存储单元。

在不同分段的中值点上, 背景的概率 $P_B(T)$ 和熵 $h_B(T)$, 以及目标的概率 $P_O(T)$ 和熵 $h_O(T)$ 的计算公式分别为:

$$P_B(T) = \sum_{0 \leq t \leq T} P(t) \quad (11)$$

$$P_O(T) = 1 - P_B(T) \quad (12)$$

$$h_B(T) = \sum_{0 \leq t \leq T} h(t) \quad (13)$$

$$h_O(T) = h_{LL} - h_B(T) \quad (14)$$

其中, $T = 16 + k \times 32, k = 0, 1, 2, \dots, 15$; $P(t)$ 和 $h(t)$ 分别为不同斜线上各点的概率之和与熵之和, 即

$$P(t) = \sum_{i+j=t} p(i, j) \quad (15)$$

$$h(t) = - \sum_{i+j=t} p(i, j) \log(p(i, j)), 0 \leq t \leq 2L - 2 \quad (16)$$

2.2 利用递推公式确定最佳阈值

确定候选分割阈值后, 以 T' 为中心, 分别向 T 的下限和上限方向扩展 32 个灰度级, 即 $T' - 31 \leq T \leq T' + 31$, 并在此范围内逐点计算背景和目标的 Shannon 熵 $H_B(T)$ 和 $H_O(T)$ 。在计算背景的概率 $P_B(T)$ 和熵 $h_B(T)$ 时, 可以利用递推公式计算, 进一步减少计算量。

$$P_B(T) = P_B(T-1) + P(T) \quad (17)$$

$$P_O(T) = 1 - P_B(T) \quad (18)$$

$$h_B(T) = h_B(T-1) + h(T) \quad (19)$$

$$h_O(T) = h_{LL} - h_B(T) \quad (20)$$

其中, $T' - 32 \leq T \leq T' + 32$ 。

3 算法的复杂度分析

借鉴吴成茂等^[11]提出的二维直分最大熵阈值法复杂度的分析方法, 将文中算法与二维直分最大熵分割快速递推算法^[11]、吴一全等^[10]提出的二维斜分最大熵阈值法的复杂度进行对比。

假设图像的灰度级个数为 L (最小灰度级为 0, 最大灰度级为 $L-1$), 则二维斜分阈值 T 的取值范围是 $0 \leq T \leq 2L-2$, 进行 1 次浮点自然对数所需要时间 t_1

秒, 进行 1 次浮点除法或乘法运算需要时间 t_2 秒, 进行 1 次浮点加法或减法运算需要时间 t_3 秒, 通常 t_1 远远大于 t_2 和 t_3 , t_2 是 t_3 的至少 2 倍以上。以目前红外成像导引头常用的 TMS320C64X 系列定点 DSP 为例, 根据 TI 公司提供的定点 DSP 实现浮点对数运算通用指导手册^[12], 对数运算利用泰勒公式展开进行计算, 假定取泰勒展开式的前 5 项, 则实现 1 次对数运算需要进行 4 次加法、14 次乘法和 4 次除法运算。假设 $t_2 = 2t_3$, 则 $t_1 = 40t_3$ 。

假设图像的尺寸为 $M \times N$, 则计算二维直方图需要的时间为 $MN \times (3t_3 + t_2)$ 秒; 需要的双精度存储单元为 L^2 个。

斜线 $g+f=T$ (T 为阈值, $0 \leq T \leq 2L-2$) 将二维直方图分为背景和背景两个区域, 计算不同斜线上各点的概率之和与熵之和需要的时间分别为 $L^2 t_3$ 秒和 $L^2(t_1 + t_2 + t_3)$ 秒, 需要的双精度存储单元均为 $2L-1$ 个。

从计算二维直方图开始统计, 二维直分最大熵分割快速递推算法^[11]需要的时间为 $(3MN + 9L^2)t_3 + (MN + 4L^2)t_2 + 4L^2 t_1$ 秒, 需要的双精度存储单元为 $5L^2 + 2$ 个。

吴一全等^[10]提出的二维斜分最大熵阈值法的复杂度分析: 计算背景区域的概率 $P_B(T)$ 和熵 $h_B(T)$ 需要的时间均为 $(2L-1)t_3$ 秒, 需要的双精度存储单元均为 $2L-1$ 个; 计算目标区域的概率 $P_O(T)$ 和熵 $h_O(T)$ 需要的时间均为 $(2L-1)t_3$ 秒, 需要的双精度存储单元均为 $2L-1$ 个; 计算 1 次阈值表达式需要的时间为 $(2t_1 + 2t_2 + 3t_3)$ 秒, 搜寻最佳阈值 T^* 的范围是 $0 \leq T \leq 2L-2$, 则计算阈值表达式需要的时间为 $(2L-1)(2t_1 + 2t_2 + 3t_3)$ 秒, 采用逐次比较法需要的双精度存储单元为 2 个。因此, 从计算二维直方图开始统计, 算法需要的时间总共为 $MN \times (3t_3 + t_2) + L^2 t_3 + L^2(t_1 + t_2 + t_3) + 4(2L-1)t_3 + (2L-1)(2t_1 + 2t_2 + 3t_3)$ 秒, 即 $(3MN + 2L^2 + 14L - 7)t_3 + (MN + L^2 + 4L - 2)t_2 + (L^2 + 4L - 2)t_1$ 秒; 需要的双精度存储单元总共为 $L^2 + 2(2L-1) + 2(2L-1) + 2(2L-1) + 2$ 个, 即 $L^2 + 12L - 4$ 个。

文中算法的复杂度分析分为两个阶段, 第一阶段确定候选分割阈值 T' , 减少阈值搜索区域; 第二阶段利用递推公式确定最佳阈值。第一阶段: 如前所述, 二维斜分阈值 T 的取值范围是 $0 \leq T \leq 2L-2$, 将 T 的取值域每隔 32 个灰度级进行分段, 分段的总数为 $(2L/32)$ 。在不同分段的中值点上, 计算背景区域的概率 $P_B(T)$ 和熵 $h_B(T)$ 需要的时间均为 $L^2 t_3 / 16$ 秒, 需要的

双精度存储单元均为 $L/16$ 个;计算目标区域的概率 $P_o(T)$ 和熵 $h_o(T)$ 需要的时间均为 $Lt_3/16$ 秒,需要的双精度存储单元均为 $L/16$ 个;计算阈值表达式需要的时间为 $(L/16)(2t_1+2t_2+3t_3)$ 秒,采用逐次比较法确定候选分割阈值 T' 需要的双精度存储单元为 2 个。第一阶段需要的时间总共为 $(L^2/8+5L/16)t_3+(L/8)t_2+(L/8)t_1$ 秒,需要的双精度存储单元总共为 $(L/8)+2$ 个。第二阶段:在取值范围 $T'-31 \leq T \leq T'+32$ 内,利用递推公式确定最佳阈值。计算背景区域的概率 $P_b(T)$ 和熵 $h_b(T)$ 需要的时间均为 $64t_3$ 秒,需要的双精度存储单元均为 64 个;计算目标区域的概率 $P_o(T)$ 和熵 $h_o(T)$ 需要的时间均为 $64t_3$ 秒,需要的双精度存储单元均为 64 个;计算阈值表达式需要的时间为 $64(2t_1+2t_2+3t_3)$ 秒,采用逐次比较法需要的双精度存储单元为 2 个。第二阶段需要的时间总共为 $448t_3+128t_2+128t_1$ 秒,需要的双精度存储单元总共为 258 个。

因此,从计算二维直方图开始统计,文中算法需要的时间总共为 $MN \times (3t_3+t_2)+L^2t_3+L^2(t_1+t_2+t_3)+(L^2/8+5L/16)t_3+(L/8)t_2+(L/8)t_1+448t_3+128t_2+128t_1$ 秒,即 $(3MN+17L^2/8+5L/16+448)t_3+(MN+L^2+L/8+128)t_2+(L^2+L/8+128)t_1$ 秒;需要的双精度存储单元总共为 $L^2+2(2L-1)+(L/8)+2+258$ 个,即 $L^2+(33/8)L+258$ 个。

相比于二维直分最大熵分割快速递推算法^[11],文中算法需要的时间减少 $(55L^2/8-5L/16-448)t_3+(3L^2-L/8-128)t_2+(3L^2-L/8-128)t_1$ 秒,需要的双精度存储单元减少 $(4L^2-33L/8-256)$ 个。假设 $L=256$,则文中算法需要的时间减少 $7915\ 056t_3$ 秒,需要的双精度存储单元减少 260 832 个。

相比于吴一全等^[10]提出的二维斜分最大熵阈值法,文中算法需要的时间减少 $(-L^2/8+219L/16-445)t_3+(31L/8-130)t_2+(31L/8-130)t_1$ 秒,需要的双精度存储单元减少 $(63L/8-262)$ 个。假设 $L=256$,则文中算法需要的时间减少 $31\ 061t_3$ 秒,需要的双精度存储单元减少 1754 个。

4 实验结果和分析

利用文中提出的二维直方图斜分最大熵分割快速算法对大量实际获取的红外图像进行了分割实验。限于篇幅,选取 5 组实际获取的红外图片,将文中所提算法与其他二维熵算法、二维最大类间方差

法(即 Otsu 算法)和二维最小类方差法(即 MCVT 算法)进行对比实验。吴一全等采用了 Brink^[7]提出的最佳阈值判别式 $T^* = \arg \max_{0 \leq T \leq 2L-2} \{ \min_{0 \leq T \leq 2L-2} \{ H_o(T), H_b(T) \} \}$,而 Abutaleb 等提出的二维直方图直分最大熵分割算法^[6]和文中算法均采用 Kapur 等^[5]提出的最佳阈值判别式 $T' = \arg \max_{0 \leq T \leq 2L-2} \{ H_b(T) + H_o(T) \}$,为便于叙述,将 Brink 提出的二维直方图直分最大熵分割算法^[7]、Abutaleb 等提出的二维直方图直分最大熵分割算法^[6]、刘健庄等提出的二维直方图直分 Otsu 算法^[13]、聂方彦等提出的二维直方图直分 MCVT 算法^[13]、吴一全等提出的二维直方图斜分最大熵分割快速算法^[10]与文中算法分别简称为 2DVerE1、2DVerE2、2DOtsu、2DMCVT、2DOblE1 和 2DOblE2。实验计算机的基本性能为 Intel Core i3 370 2.40 GHz, 2 GB 内存,编程语言为 Matlab 7.2。

选取的 5 组红外图像,分别如图 2-6(a)所示,相应算法获取的最佳分割阈值如表 1 所示。分析比较图 2-6(b)所示相应红外图像的一维直方图可以发现,实际获取的红外图像整体灰度分布低且较集中,目标和背景分布区分很不明显,对比度低,且图 3-6(a)所示红外图像的噪声干扰比较严重。

表 1 红外测试图像的分割阈值

Tab.1 Thresholds of the tested infrared images

Method	Tank infrared image	Pedestrian infrared image	Truck infrared image	Tank infrared image in the woods	Tank speckle infrared image
2DVerE1	(226,228)	(141,137)	(143,142)	(172,172)	(218,220)
2DVerE2	(94,93)	(142,138)	(99,99)	(160,160)	(158,157)
2DOtsu	(120,122)	(115,112)	(65,66)	(89,93)	(111,111)
2DMCVT	(187,194)	(14,19)	(56,59)	(78,79)	(103,103)
2DOblE1	446	276	277	339	435
2DOblE2	185	278	200	318	314

图 2(a)所示为在开阔砂石场地、近距离拍摄的坦克红外图像,目标和背景像素比例相差较小,信噪比较高。2DVerE2、2DOtsu 和文中算法均能将目标较好地分割出来,2DMCVT 效果要差一些。基于 Kapur 最大熵阈值判别式的 2DVerE2 和文中算法的分割结果最完整。基于 Brink 最大熵阈值判别式的 2DVerE1

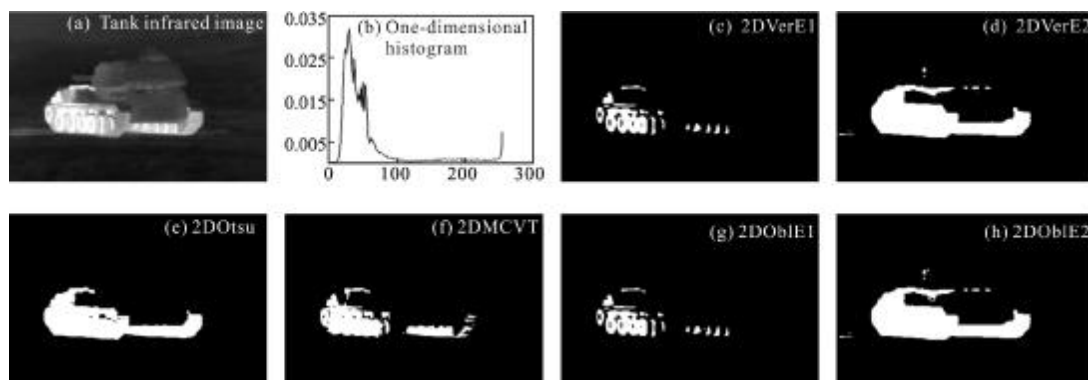


图 2 坦克红外图像分割结果

Fig.2 Segmentation result of the tank infrared image

和 2DOblE1 的分割效果最差, 仅分割出较小比例的目标像素, 缺失严重。

图 3(a)所示为白天在 8 层楼顶拍摄的校园内多个行人红外图像^[14], 目标和背景像素比例相差较大, 受噪声干扰严重, 图像中的路灯、树木和轿车存在类似人体的红外辐射特征。2DVerE1、2DVerE2、

2DOblE1 和文中算法均能将目标或潜在目标完整地分割出来, 基于二维直方图斜分的 2DOblE1 和文中算法分割结果中的噪点较少, 对行人目标的进一步识别可通过连续的序列帧进行检测。2DOtsu 分割结果中的噪点较多, 2DMCVT 未能提取出目标, 算法失效。

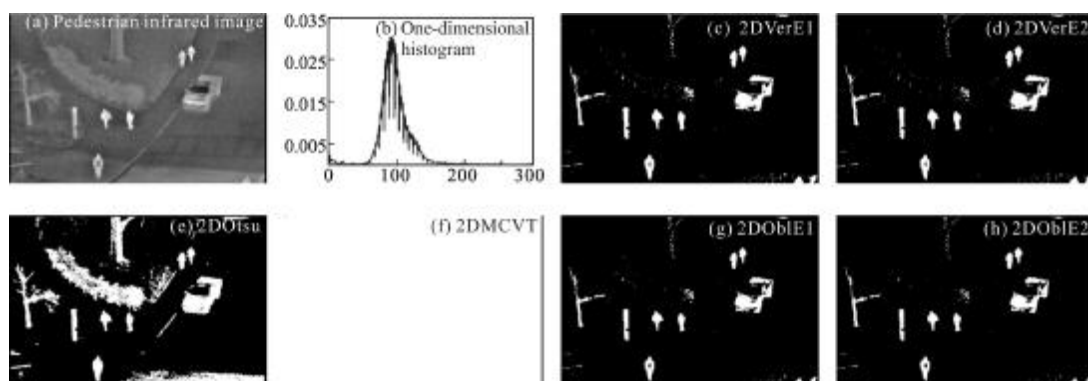


图 3 行人红外图像分割结果

Fig.3 Segmentation result of the pedestrian infrared image

图 4(a)所示为在野外空旷砂石场地、夜间拍摄的卡车红外图像, 拍摄距离大约 1 500 m。图 5(a)所示为美国空军实验室拍摄的前视红外图像序列, 攻击目标如图中十字箭头所示坦克, 背景为丛林和砂石场地。图 4~5(a)中目标和背景像素比例相差较大, 受噪声干扰严重, 且目标和背景的红外辐射特征类似, 灰度分布相互交叉, 与图 2~3(a)相比, 目标与背景的对比度更小。基于 Kapur 最大熵阈值判别式的 2DVerE2 和文中算法均能将目标完整地分割出来,

且文中算法分割结果的边界更加细致完整, 噪点更少, 而 2DVerE2 分割结果的边界则比较粗糙, 这在分割卡车红外图像时, 对比更加明显。基于 Brink 最大熵阈值判别式的 2DVerE1 和 2DOblE1 仅分割出部分目标。2DOtsu 和 2DMCVT 由于自身算法的本质缺陷, 在分割图像时倾向于像素比例大的部分, 因此都没有将目标分割出来, 而是将很大比例的背景像素错分为目标像素。

图 6(a)所示为 M60 坦克红外图像序列, 由美国

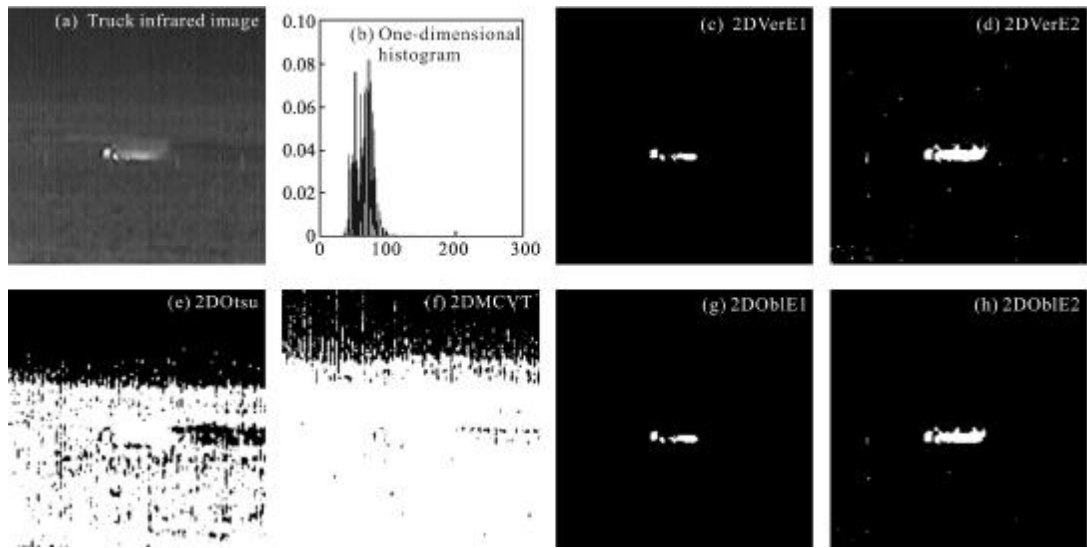


图 4 卡车红外图像分割结果

Fig.4 Segmentation result of the truck infrared image

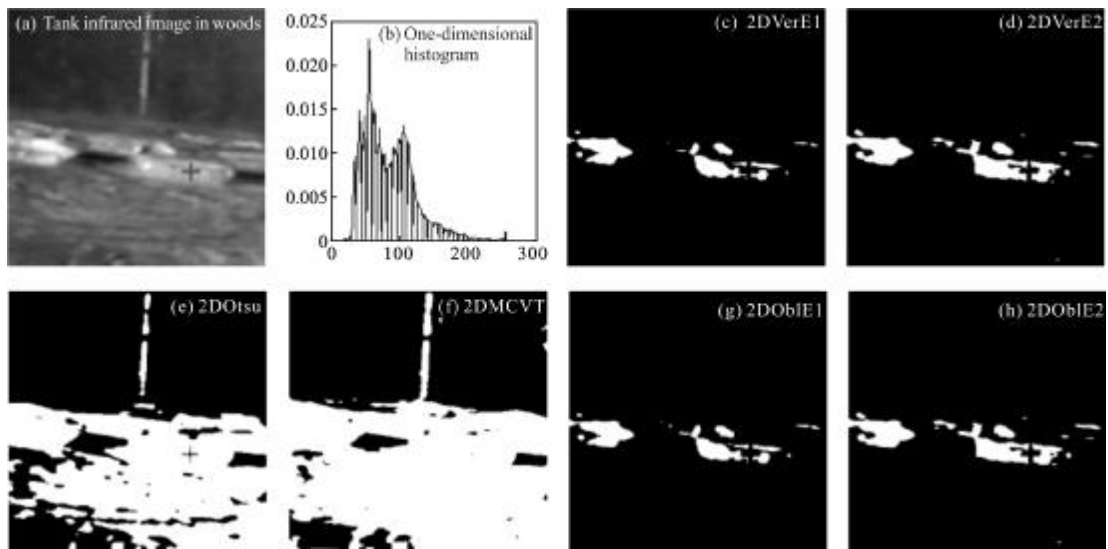


图 5 丛林坦克红外图像分割结果

Fig.5 Segmentation result of the tank infrared image in the woods

陆军实验室利用导弹进行模拟攻击飞行中的前视红外装置拍摄,背景为空旷砂石场地,由于当前帧图像中距离目标较远,目标在图像中呈斑状或团块状,目标与背景的像素比例差别悬殊。相比于利用 Brink 最大熵阈值判别式的 2DVerE1 和 2DOblE1 的分割结果,利用 Kapur 最大熵阈值判别式的 2DVerE2 和文中算法的分割结果更加完整。2DOtsu 和 2DMCVT 仍然出现过分割倾向,算法失效。

综合比较 2DVerE1、2DVerE2、2DOtsu、2DMCVT、2DOblE1 和文中算法对图 2~6(a)所示红外图像的分割结果,可以看出,基于方差分析的 2DOtsu 和 2DMCVT 算法对于目标和背景像素比例相差较小的红外图像,分割结果较好,如图 2(e)~(f)所示,而对于目标和背景像素比例相差较大的红外图像,分割结果较差,如图 3(e)~(f)、4(e)~(f)、5(e)~(f)和 6(e)~(f)所示。基于二维直方图斜分的 2DOblE1 和文中算法

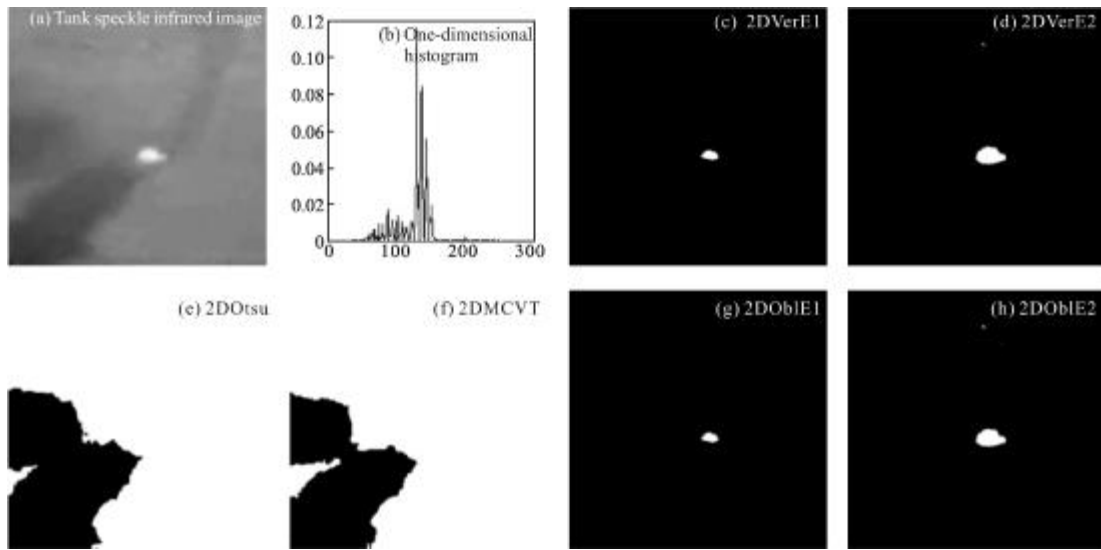


图 6 坦克斑状红外图像分割结果

Fig.6 Segmentation result of tank speckle infrared image

具有较强的抗噪性,如图 3(g)~(h)和 4(g)~(h)所示。基于 Brink 最大熵阈值判别式的 2DVerE1 和 2DOblE1 的分割结果不完整,目标区域像素缺失严重,对于目标和背景像素比例差别较小的红外图像表现更为明显,如图 2(c)和图 2(g)所示。基于 Kapur 最大熵阈值判别式的 2DVerE2 和文中算法无论对于目标和背景像素比例相差较小的红外图像,还是相差较大的红外图像,均能将目标完整地分割出来,且文中算法分割结果的边界噪点更少,更加清晰完整,具有更强的抗噪性,如图 2~6(d)和 2~6(h)所示。

表 2 所示分别为龚坚等^[9]和张毅军等^[9]提出的二维直方图区域直分最大熵阈值分割快速算法、二维直方图区域斜分最大熵原始算法、吴一全等^[10]提出

的二维直方图区域斜分最大熵阈值分割快速算法和文中算法的运算时间,为准确起见,所有结果均为运行 10 次的平均值。为便于叙述,将 5 种二维最大熵阈值分割算法分别简称为 Method1、Method2、Method3、Method4 和 Method5。

对比 5 种最大熵阈值分割算法的运行时间,可以看出,文中提出的二维斜分最大熵分割快速算法相比于吴一全等^[10]提出的快速算法,运行时间进一步降低,约为 0.10 s,相当于二维斜分最大熵分割原始算法运行时间的 14%,约为龚坚等^[9]提出的二维直分最大熵分割快速算法运行时间的 67%,约为张毅军等^[9]提出的二维直分最大熵分割快速算法运行时间的 71%。

表 2 5 种二维最大熵分割算法的运算时间 s

Tab.2 Running time s of five two dimensional maximum entropy thresholding methods

Method	Tank infrared image	Pedestrian infrared image	Truck infrared image	Tank infrared image in the woods	Tank speckle infrared image
Method1	0.168 192	0.165 917	0.141 94	0.161 92	0.160 276
Method2	0.147 898	0.150 961	0.138 893	0.156 324	0.153 331
Method3	0.799 569	0.838 419	0.703 078	0.712 748	0.701 499
Method4	0.121 065	0.118 371	0.105 565	0.120 869	0.122 005
Method5	0.109 304	0.108 006	0.093 371	0.109 854	0.111 697

5 结 论

文中基于 Kapur 最大熵阈值判别式,提出了一种新的二维直方图区域斜分最大熵分割快速递推算法,并采用逐步逼近的粗细搜索策略,减少阈值搜索区域,首先粗略搜寻可能的分割阈值,然后在可能的阈值范围内利用递推公式逐点计算,寻找最佳阈值,对复杂背景下红外图像取得了较好的分割效果。通过对算法的复杂度进行分析,文中算法需要的运行时间和存储单元均少于现有的二维直分或斜分最大熵分割快速递推算法。通过对实际获取的红外图像进行分割实验表明,相比于基于方差分析的分割方

法和基于 Brink 最大熵阈值判别式的分割方法, Kapur 最大熵阈值判别式更加适合于低对比度红外图像的分割, 对图像中像素比例不同的目标均能产生较好的分割结果, 相比于二维直分最大熵分割快速递推算法, 文中提出的二维斜分最大熵分割快速算法的运行时间更少, 分割结果的边界噪点更少, 更加清晰完整, 具有更强的抗噪性, 满足红外成像制导系统工程实用化要求。

参考文献:

- [1] Wang Hongbo, Zhuang Zhihong, Zhang Qingtai, et al. Infrared image segmentation algorithm in imaging guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3): 234-238. (in Chinese)
王宏波, 庄志洪, 张清泰, 等. 成像制导中的红外图像分割算法[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(3): 234-238.
- [2] Li Lijuan, Huang Shike, Liu Ke. Aimpoint selection method of airplane target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 123-126. (in Chinese)
李丽娟, 黄士科, 刘珂. 一种飞机目标的瞄准点选择方法[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 123-126.
- [3] Li Hansong, Lu Chuanyun. Detecting for infrared ship small targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 495-498. (in Chinese)
李寒松, 鲁传运. 红外舰船小目标的检测 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(4): 495-498.
- [4] Zhang Fang, Wang Yuehuan. Fast IR ship segmentation guided by salient features detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(6): 603-606. (in Chinese)
张芳, 王岳环. 基于显著特征引导的红外舰船目标快速分割方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(6): 603-606.
- [5] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. *Computer Vision and Image Processing*, 1985, 29(3): 273-285.
- [6] Abutaleb A S. Automatic thresholding of gray-level pictures using two-dimensional entropy[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 1989, 47(1): 22-32.
- [7] Brink A D. Thresholding of digital images using two-dimensional entropies[J]. *Pattern Recogn*, 1992, 25(8): 803-808.
- [8] Gong Jian, Li Liyuan, Cheng Weinan. A fast two-dimensional entropic thresholding method [J]. *Journal of Southeast University*, 1996, 26(4): 31-36. (in Chinese)
龚坚, 李立源, 陈维南. 二维熵阈值分割的快速算法[J]. *东南大学学报*, 1996, 26(4): 31-36.
- [9] Zhang Yijun, Wu Xuejing, Xia Liangzheng. A fast recurring algorithm for two-dimensional entropic thresholding for image segmentation [J]. *PR & AI*, 1997, 10 (3): 259-264. (in Chinese)
张毅军, 吴雪箐, 夏良正. 二维图像阈值分割的快速递推算法[J]. *模式识别与人工智能*, 1997, 10(3): 259-264.
- [10] Wu Yiquan, Pan Jie, Wu Wenyi. Maximum entropy image thresholding based on two-dimensional histogram oblique segmentation[J]. *PR & AI*, 2009, 22(1): 162-168. (in Chinese)
吴一全, 潘喆, 吴文怡. 二维直方图区域斜分的最大熵阈值分割算法[J]. *模式识别与人工智能*, 2009, 22(1): 162-168.
- [11] Wu Chengmao, Tian Xiaoping, Tan Tieniu. Modification of two-dimensional entropic thresholding method and its fast algorithm[J]. *PR & AI*, 2010, 23(1): 127-136. (in Chinese)
吴成茂, 田小平, 谭铁牛. 二维熵阈值法的修改及其快速迭代算法[J]. *模式识别与人工智能*, 2010, 23(1): 127-136.
- [12] Texas I. General guide to implement logarithmic and exponential operations on fixed-point DSP [EB/OL]. <http://www.ti.com.cn>, 2012-07-23.
- [13] Nie Fangyan, Gao Chao, Guo Yongcai. Fast gray-level image segmentation based on two-dimensional minimum class variance recursion and differential evolution [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, 22(11): 1867-1873. (in Chinese)
聂方彦, 高潮, 郭永彩. 灰度图像二维最小类方差递推及差分演化的快速分割[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(11): 1867-1873.
- [14] Davis J, Keck M. IEEE OTCBVS WS series bench[EB/OL]. <http://www.cse.ohio-state.edu/OTCBVS-BENCH/Data/01/download.html>, 2012.