

基于能量累积与顺序形态滤波的红外小目标检测

叶 斌 彭嘉雄

(华中科技大学图象识别与人工智能研究所, 图象信息处理与智能控制教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 针对红外序列图象中弱小目标的检测问题, 提出了基于能量累积与顺序形态滤波的小目标检测方法. 该方法通过设置一定大小的滑动窗口, 对窗口内的图象序列进行能量累积, 以达到去除图象中的随机噪声和提高目标的信噪比的目的. 其目标检测采用由粗到精 3 个步骤, 即首先利用顺序形态滤波抑制背景, 并通过提取目标广义边缘来实现目标的粗定位; 然后对可能存在目标的区域进行分割, 通过提取目标几何特征来完成精确定位; 最后利用序列图象中目标运动的连续性和轨迹的一致性来筛选出真正的目标. 实验结果表明, 该方法能有效地抑制背景和能提取目标广义边缘, 并能通过自适应地选择分割门限来完成红外小目标的定位和检测.

关键词 小目标检测 能量累积 顺序形态滤波 边缘检测 图象分割

中图法分类号: TP391.41 TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)03-0251-05

Small Target Detection Based on Energy Accumulation and Order Morphology Filtering in Infrared Image

YE Bin, PENG Jia-xiong

(State Key Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Because of the influence of nature meteorological condition, background environment and the structures of objectors, detection of weak and small objectors in infrared image is one of difficulties among image objector detection and identification. A new small target detection method based on energy accumulation and order morphology filtering is presented for solving detection of moving small target with low SNR in infrared image sequence. Accumulating the energy of the image sequence in the sliding window with a setting size can remove the random noise in order to increase SNR. Three steps of target detection from coarse to fine are adopted. First suppressing background and extracting generalized edge of targets by using order morphology filtering, determining the prime location of the targets, then segmenting the regions where there are possible targets, extracting the geometrical features. Finally filtrating the true targets according to the principle of moving continuity and trajectory consistency of moving target in the image sequences. The experiments show that this method can effectively suppress background and extract generalized edge of targets, adaptively choose threshold for segment, perform the location and detection of small targets in infrared image.

Keywords Small target detection, Energy accumulation, Order morphology filtering, Edge detection, Image segment

0 引 言

近年来, 由于红外热成像日益被广泛地应用于各种军事技术中, 如现代武器系统越来越重视通过

目标所产生的红外辐射来探测、识别攻击目标, 因而红外图象中的目标检测与识别显得尤为重要. 然而, 由于自然气象条件(天气、风速、风向、气温、太阳辐射等)、背景环境(天空、地表)以及目标结构等因素的影响, 红外图象中的弱小目标检测却是图象目标

检测与识别的一个难点。

现有方法大多是基于对目标本身特性进行分析的,其检测出的目标本身具有大小、方向、平移不变的特性。通过对目标特征的分析来实现目标的检测与识别,其前提条件是目标本身的特征已知或可估计。进行目标检测和识别,一种常用的方法是首先对目标进行图象分割,然后根据有关目标的知识,从分割的各连续区域块中,确定出真实目标,这类方法对大、中型目标是有效的,但对弱小目标检测,则存在很大困难,其原因是,第一、从热红外图象特性来看,由于热红外图象所反映的是目标及其场景的热辐射,由于其存在目标与周围场景的热交换以及空气对目标热辐射的散射和吸收作用,其与可见光图象相比,红外图象中,目标与背景的对比度低,边缘模糊,因而难以提取目标有效的轮廓信息;第二、从目标的特点来看,由于它与背景相比,面积要小得多,因而很难获得目标本身的灰度和纹理特征,并且由于背景噪声的干扰,目标往往被淹没在背景中,因此,检测弱小目标,必须寻找一种新的途径。

由于小目标的象元个数很少,在整个图象中所占的比例很小,其对背景的影响非常微弱,因此通过对整个图象进行分割来检测出红外弱小目标是困难的,但如果能检测出小目标的大概位置,并在其周围划出一个小的区域,然后在这个小区域内,对目标进行分割,则能很容易地检测、识别目标。另外,利用红外传感器等获得的小目标图象,背景中除了存在空间不相关的噪声外,主要是大面积缓慢变化的低频成分,例如飞机在云层中飞行,作为背景的云层本身灰度不仅变化缓慢,而且具有一定的相关性;而小目标灰度则较背景高,且与背景不相关,是图象中的孤立亮斑。由此可见,目标的灰度与其周围的背景有差异,由于这种差异能够通过目标的边缘很好地表示出来,因此,需要注意的是图象中那些灰度奇异点,因为这些点有可能是目标^[1],据此可以通过如下三步法来检测目标:第1步,进行背景抑制,以找到可能是目标的边缘点,并对其进行粗定位;第2步,在粗定位的基础上,利用目标与其周围背景(小的区域)的灰度差异来分割子图象,实现候选目标的精定位;第3步,利用序列图象中目标运动的连续性和轨迹的一致性,采用现有的许多成熟方法,例如光流场法、管道法、分层投票表决法等筛选出真正的目标。

以上3个步骤中,第1步是关键,因为它应保证

目标点在候选点中,另外,它还要保证虚假的目标点尽可能地少,这样才能不丢失目标,从而为第2步小目标的精确定位和检测创造良好条件,以便实现目标的快速定位、检测。本文采用的是基于顺序形态滤波的目标广义边缘提取方法来完成第1步的。

对于信噪比极低、背景为高斯白噪声的红外图象,可以利用多帧能量积累方法来提高信噪比和抑制噪声干扰,以提高检测能力。

1 能量累积

在红外图象数据中,人们感兴趣的目标往往被噪声或杂波所淹没,致使杂波和噪声充斥整帧图象,而由于这些噪声往往为有色噪声,且强度较大,以致被检测的目标几乎是不可见的,因此一般总是先经过预处理,使图象噪声变成白噪声,再在白噪声背景上进行目标检测。文中提出的检测算法,均适用于背景为白噪声的情况。

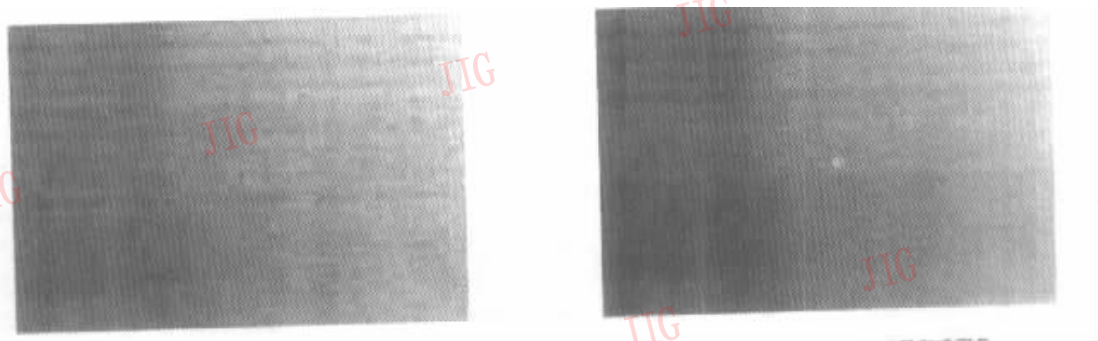
设红外图象序列为 $F_1, F_2, \dots, F_n$; 滑动窗口大小为 N , 则能量累积后第 m 帧图象为

$$F'_m = \frac{1}{N} \sum_{i=m-N+1}^m F_i$$

理论计算可以得出,能量累积后图象中每一点的信噪比提高了 $\sqrt{N}$ 倍。

图1(a)是P18小目标红外图象序列中的一帧。能量累积前,P18-017图象的平均灰度为49.616,均方差为5.401,最大灰度值为66.000,而目标的平均灰度为51.838,均方差为1.080,最大灰度值为53.000, $SNR=0.411$;图1(b)是P18-015~P18-017能量累积后图象,其平均灰度为50.115,均方差为5.226,最大灰度值为64.000,目标的平均灰度为55.419,均方差为1.519,最大灰度值为59.000, $SNR=1.014$ 。可以看到,信噪比由能量累积前的0.411增加到能量累积后的1.014,增加了近一倍多,目标增强效果是明显的,这也可从图象中看出。能量累积中,滑动窗口的大小应该合适,窗口过小,噪声去除不明显;窗口过大,又使小目标面积扩大,并使目标定位精度下降,而且窗口大小的选择要考虑图象质量。

这里要强调的一点是,多帧能量累积虽可提高检测能力,但对于背景中的固定干扰无能为力。



(a) P18-017 原图

(b) P18-015~P18-017 能量累积后图象

图1 能量累积前、后的红外小目标图象比较

2 顺序形态滤波及边缘提取

传统的数学形态学是建立在经典的 Minkowski 和差运算基础上的. 由于 Minkowski 运算, 实质上是一种极值运算, 因而不可避免会导致图象信息的丢失, 而顺序形态学 (Order Morphology) 是将“顺序统计学”的思想注入数学形态学中而发展起来的一般图象形态学^[2].

定义 1 设 $f(x, y)$ 为定义在两维离散空间 $Z^{(2)}$ 上的灰度图象, $0 \leq f(x, y) \leq M$; 结构元素 B 为 $Z^{(2)}$ 上的有限子集, $0 < \mu(B) = k < +\infty$ (测度 $\mu(\cdot)$ 为点计数), 设 $x = (x, y) \in Z^{(2)}$, $B = \{x_1, \dots, x_k\}$; $f(x)$ 在 B 上的 k 个值依次从小到大排列为

$$f(x'_1) \leq f(x'_2) \leq \dots \leq f(x'_k)$$

那么, $f(x)$ 在 B 上的 d 阶顺序量定义为

$$\text{ord}\{d; f|B\} = f(x'_d), d = 1, \dots, k \quad (1)$$

定义 2 采用与定义 1 一样的假设, 那么, 灰度图象 $f(x)$ 关于结构元素 B 的顺序形态变换 $f(p)B$ 定义为 $f(x)$ 在 $B_x (B_x = \{x - b : b \in B\})$ 上的 $(k-1)p+1$ 阶顺序量, 即

$$(f(p)B)(x) = \text{ord}\{(k-1)p+1; f|B_x\} \quad (2)$$

式中, $p = 0, \frac{1}{k-1}, \dots, 1$.

令

$$d = (k-1)p + 1$$

那么, 对应于百分位 $p = 0, \frac{1}{k-1}, \dots, 1; d = 1, 2, \dots, k$ (d 称为顺序形态变换的阶数).

定义 3 灰度图象的复合顺序形态变换

令

$$f(p, q)B = (f(p)B)(q)B, (p, q = 0, \frac{1}{k-1}, \dots, 1) \quad (3)$$

则将 $f(p, q)B$ 称为图象 f 关于结构元素 B 的二重对称混合顺序形态变换.

大家知道, 对于二值图象 X , 当结构元素 B 是十字五点阵时, 形态膨胀 $X \oplus B$ 在保持原有形态的情况下, 向外扩张了一个单元, 而 $X \oplus B - X$ 则提取出了 X 的外形; 形态腐蚀 $X \ominus B$ 在保持原有形态的情况下, 向内收缩了一个单元, $X - X \ominus B$ 则提取了 X 的内部形状^[3].

本文将灰度图象上的顺序形态滤波与上述二值图象的边缘提取方法结合起来, 从而提出了基于顺序滤波的边缘提取方法.

现将广义内边缘定义为

$$\partial f_p = f(p)B - f(p, 0)B \quad (4)$$

而将广义外边缘定义为

$$\partial f_p^* = f(p, 1)B - f(p)B \quad (5)$$

最后, 选择不同的百分位, 并采用以上定义的二种广义内、外边缘就可以实现不同目标的边缘检测.

3 检测方法

(1) 对于低信噪比红外序列图象, 应用能量累积方法消除随机噪声, 以提高图象信噪比.

(2) 设待检测红外图象为 I , 结构元素选为 B , 应用式 (4) 或式 (5) 来对图象进行百分位 $p = 0$ 的顺序形态滤波, 以提取目标广义边缘, 将得到的图象设为 I_e , 即

$$I_e = I(0)B - I(0, 0)B \quad (6)$$

$$I_e = I(0, 1)B - I(0)B \quad (7)$$

(3) 利用 Otsu 方法^[4](以最佳门限将图象灰度直方图分割成两部分,并使两部分的类间方差取最大值)在 I_e 图象上自适应地找出阈值,设为 T ,再用 T 对 I_e 进行分割,以得到红外小目标的广义边缘二值图象 I'_e ,即

$$I'_e(x,y)=\begin{cases}0 & I_e(x,y)<T \\ 1 & I_e(x,y)\geq T\end{cases}\quad (8)$$

(4) 首先对 I'_e 进行形态膨胀,结构元素选为 B ,并将目标可能断开的边缘点连成一体.设顺序形态滤波处理后得到的图象为 I_p ,即

$$I_p=I'_e\oplus B\quad (9)$$

然后计算 I_p 中各可能目标的几何中心 O_i ,
($i=1,\cdots,n$)

这样就完成了红外小目标的粗定位.

(5) 以 O_i 为中心,在各候选目标上开一个合适大小(本文选 7×7)窗口,对窗口内的子图象采用 Otsu 方法进行分割,得到目标的精确位置和几何特征(周长、面积等).

(6) 根据序列图象中目标运动的连续性和轨迹的一致性,而采用成熟的图象流法、分层投票表决法等方法最后筛选出真正的目标.

这里需要说明的是,在粗定位时,由于红外小目标的象元个数很少,在整个图象中所占的比例很小,因此,当采用百分位 $p=0$ 的顺序形态滤波来提取内、外广义边缘时,往往得到的是目标的一个边缘点.

4 计算机仿真

为了验证本方法的有效性,还进行了 3 组共计 600 帧红外小目标图象序列的检测实验,下面仅介绍其中的一个实验.实验图象序列是从外场实验录像带上取下的 200 帧云层中飞行小目标的红外图象,大小为 $240\times 352\text{pixels}$,经过裁剪后真正的红外图象大小为 $200\times 292\text{pixels}$.现选取其中的一幅作为例子,图 2(a)所示即为原始图象 I ,经能量累积增强后的图象见图 2(b).图 2(a)中背景的平均灰度为 49.835,标准差为 5.607;目标很小,其平均灰度为 57.269.大家知道,图象信噪比 $SNR=(s-m)/\sigma$,其中, s 为单帧图象中的目标平均灰度, m 、 σ 为单帧图象中背景平均灰度和标准差,图 2(a)的 SNR 是 1.325.实验中,结构元素选用的是十字五点阵.图 2(c)是采用顺序形态滤波对目标提取广义边缘、粗定位后的图象 I_p ;图 2(d)是对目标进行精定位、最后检测后的目标图象.

下面还给出了采用常规方法检测红外小目标的实验结果.从实验结果可以看到,虽然采用常规分割方法(Otsu)能将目标和较高灰度的背景都同时分割出来(图 2(e)),而常规的边缘提取方法(Sobel)则将目标和噪声的边缘也同时提取出来了(图 2(f)),但这两种方法都不能很好地抑制背景,这将给后面的检测工作带来很大的难度.

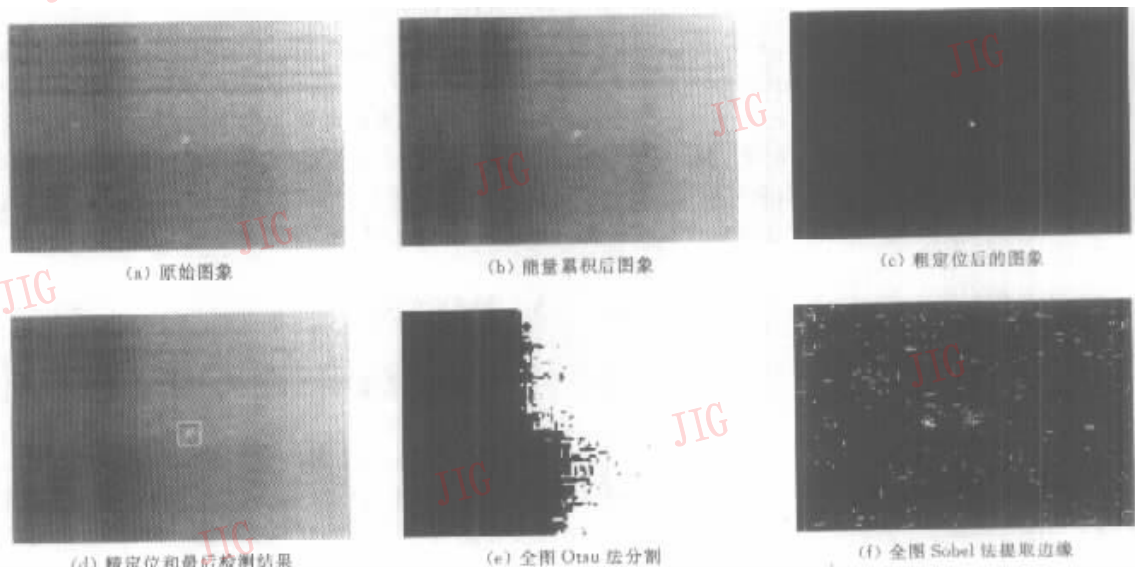


图 2 云层中飞行小目标红外图象目标检测计算机仿真

5 结 论

实验结果表明,本文提出的基于能量累积与顺序形态滤波用于检测小目标的方法,能有效地去除随机噪声、提高信噪比和抑制背景,进而完成小目标的检测工作.由于本方法是采用由粗到精的检测步骤,因而使运算速度大为提高,并且由于门限的选择是自适应的,因而对图象的对比度、目标的灰度变化不敏感,能实现多目标的检测.

参 考 文 献

- 1 彭嘉雄,周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. 电子学报, 1999, 27(12):47~51.
- 2 吴敏金. 图象形态学[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1991:224~235.
- 3 李介谷. 计算机视觉的理论和实践[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1991:104~126.

- 4 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogram [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1):62~66.

叶 斌 1969 年生,1998 年 3 月获西安电子科技大学自动控制学硕士,现为华中科技大学图象处理与模式识别研究所博士研究生.感兴趣的研究领域为图象的增强、分割与目标检测、识别、运动图象编码等.

彭嘉雄 1934 年生,教授,博士生导师,曾任国务院学位委员会、国家自然科学基金学科评审委员,现任中国图象图形学会常任理事、湖北省学位委学科评审委员等职.完成 863.409,国家自然科学基金等基金、部、委攻关课题等 39 项.在国内外发表论文 190 余篇,国外摘录收藏 82 篇,论文和教学获奖多次.