

红外目标检测的自适应背景感知算法

余 农^{1,2}, 吴常泳¹, 汤心溢¹, 李范鸣¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 空军第一航空学院, 河南信阳 464000)

摘 要: 低信噪比检测技术是实现红外自动目标识别的基本前提, 其性能指标将直接决定系统的探测灵敏度和作用距离, 是反映红外低可观测目标识别能力至关重要的一项核心技术。自适应背景估计方法是实现这一目标的有效途径。本文在重点论述几种常用背景估计方法的基础上, 提出了形态滤波的优化改进算法。理论分析和实验测试表明: 该算法简化了形态变换关系, 优化了结构元构型, 促进了滤波质量和运算速度的双向提高; 既保持了形态滤波有效保护信号特性的操作特点, 又改善了原算法对杂波起伏不够敏感的固有缺陷, 使其自适应背景感知能力更强; 算法简洁紧凑, 操作效率高; 对复杂背景的低信噪比图像环境表现出良好的滤波性能和稳健的适应能力。

关键词: 红外技术; 图像分析; 目标检测; 形态滤波

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 02-0200-05

Adaptive Background Perception Algorithm for Infrared Target Detection

YU Nong^{1,2}, WU Chang-Yong¹, TANG Xin-yi¹, LI Fan-ming¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Air Force College of Aeronautical Technology, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: Detecting target with low signal to noise ratio is an fundamental technique used for automatic target recognition (ATR) in infrared imagery, and its performances make an ultimate impact on detection sensitivity and effective distance of a system. It is a leading key technique to indicate the ability of recognizing low-observable target in infrared imagery. Adaptive background estimation method is an efficient avenue to complete this task. On the basis of summarizing several current estimation means, a novel morphological filtering algorithm improved properly is proposed in this paper. Some theoretical analyses and experimental results show that this method is able to simplify operation of morphological conversion and to optimize formation of structuring elements. Consequently it can enhance the filtering result and accelerate the speed of operation as well. Moreover it is capable of preserving the property to protect signal characteristic and improving the inherent limitation not to be sensitive on fluctuation of noise and having better ability of adaptive background perception in morphological filtering algorithm. In conclusion this method is concise and efficient. It can provide good filtering results and robust adaptability to image targets with clutter background.

Key words: infrared (IR) technique; image analysis; target detection; morphological filters

1 引言

红外自动目标识别是当前智能化信息处理的前沿关键技术, 其研究势头十分活跃^[1-3]。总的说来, 各种应用算法主要是围绕特征法和光流法两个方面开展研究的。基于特征的方法利用了特征及位置的变化信息, 通常分为 3 步: 从图像序列中抽取显著特征; 在不同图像上寻找特征点的对应关系;

计算运动信息。目前看来, 特征法还存在着对噪声敏感的问题, 求解三维运动参数也含有一个需要先验知识才能确定其动量因子的选择问题。基于光流的方法借助了空间运动物体的被观测表面上像点运动的瞬时速度场, 并利用了物体可见表面的深度、曲率和取向的重要信息, 以及景物中物体与传感器系统之间的相对运动关系。其计算过程通常分为 2 步: 从图像序列的灰度变化中计算速度场; 利用约束条件从速度

场中推测运动参数和物体结构。正如文献[3]所指出的, 由于实际景物中的速度场不一定总是与图像中的直观速度场有唯一对应关系且速度场的偏导计算会加重噪声的影响, 因而光流法在实际应用中常常会暴露出稳定性不足的问题。

研究实践表明, 低信噪比检测技术是实现红外自动目标识别的重要基础和根本前提, 其性能指标将直接决定系统的探测灵敏度和发现距离, 是反映红外低可观测目标 (low-observable target) 识别能力至关重要的一项核心技术^[2-4]。远距离的红外点源目标因缺乏必要的形状、纹理和结构信息, 视特征尚不明显, 所以检测处理中在注重目标特性分析的同时, 还要侧重背景抑制的研究。实现这一目的的技术途径无外乎两条: 一是背景帧间对消处理; 二是自适应背景估计。利用相邻帧间图像数据进行差分对消处理, 往往对于静态视场的目标检测颇为有效, 但在红外运动目标的检测中将面临两项技术

收稿日期: 2004-03-01; 修回日期: 2004-07-05

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 10477019)

难题: 远距离的红外目标因机动性不强,易作为稳态背景而被消除;加之信噪比很低,淹没在起伏背景中的目标信号很难与差分处理后的残差噪声相区别。动态视场环境下的目标识别与跟踪处理将十分复杂,会涉及帧间稳像与图像配准以及速度场估算和运动误差补偿等一系列计算分析,甚至可能遇到某些不适定(病态)问题而一筹莫展。为此,自适应背景估计方法的研究则异常活跃,各种处理算法层出不穷,正成为红外目标检测技术的一大研究热点和重要发展趋势^[1,2]。

2 背景估计常用技术

自适应背景估计技术主要侧重于红外目标、背景的模式特征与时空分布参数的研究,通过空间滤波算法获得图像背景的起伏特性,并进行差分对消处理,能有效抑制背景杂波,改善目标/背景的信噪比,以达到提高检测率和降低虚警率的双重目的。这与人类视觉的对比感知原理相吻合^[5],而计算模型与生物系统不断融合的处理思想正是当前计算机视觉研究的重要发展方向,也是提高红外成像目标低信噪比检测技术的一条根本途径。

常用的背景估计方法主要包括线性预测估计、非线性均值滤波、模板卷积滤波和神经网络技术等^[2]。下面简要讨论前三种估计方法。

(1) 线性预测估计

基于红外图像目标-背景表征模型^[2],可将观测的图像函数表述如下:

$$f(x) = \begin{cases} z(x) + t(x) + w(x), & \text{有目标;} \\ z(x) + w(x), & \text{无目标。} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 表示视图图像, $z(x)$ 为背景图像, $t(x)$ 为目标图像, $w(x)$ 为混杂的图像噪声。

通过推导,可得到背景估计的线性预测数学表达式^[2,3]

$$\hat{z}(m, n) = \frac{L}{L-1} \left\{ \frac{E[f(m, n)f(m-i, n)]}{E[f(m-i, n)^2]} f(m-i, n) \right\} \quad (2)$$

其中, $f(m, n)$ 为数字图像灰度值, $\hat{z}(m, n)$ 为背景图像估计值, $E[\cdot]$ 是均值运算符。

(2) 非线性均值滤波

研究发现,将线性滤波器和非线性滤波器的优点结合起来,既可有效地抑制图像噪声,又能更好地保护图像结构信息。于是,便提出了非线性均值滤波器结构。通常,均值滤波器的输出表达式为

$$\hat{z}(m, n) = \frac{1}{L^2} \sum_{i=-L/2}^{L/2} \sum_{j=-L/2}^{L/2} f(m+i, n+j) \quad (3)$$

式中 L 是滤波窗口尺寸, $f(m+i, n+j)$ 是在中心像点 (m, n) 处行列偏移量为 (i, j) 的图像数据。

加权型均值滤波器则可表示为

$$\hat{z}(m, n) = \frac{\sum_{i=-L/2}^{L/2} \sum_{j=-L/2}^{L/2} h(m+i, n+j) f(m+i, n+j)}{\sum_{i=-L/2}^{L/2} \sum_{j=-L/2}^{L/2} h(m+i, n+j)} \quad (4)$$

式中 $h(m+i, n+j)$ 是中心 (m, n) 处偏移量为 (i, j) 的权值。

(3) 模板卷积滤波估计

(1) 自适应线性模板

远距离红外点源目标检测时,背景归一化处理可采用如下分布阵列进行 5×5 掩模^[6]

$$W = \begin{bmatrix} -0.3 & 0.125 & 0.3 & 0.125 & -0.3 \\ 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0.125 \\ 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \\ 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0.125 \\ -0.3 & 0.125 & 0.3 & 0.125 & -0.3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,该算子为封闭环状型且有明显的对称性,正、负权值交错排列,增强了对图像环境的自适应处理能力。

(2) 非线性 Robinson Guard 模板

远距离的红外目标检测,也可采用如下的 5×5 模板算子^[3]

$$G = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 \\ f_6 & 0 & 0 & 0 & f_7 \\ f_8 & 0 & 0 & 0 & f_9 \\ f_{10} & 0 & 0 & 0 & f_{11} \\ f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} & f_{16} \end{bmatrix} \quad \hat{z}(m, n) = \max\{f_i | 1 \leq i \leq 16\} \quad (6)$$

其中 G 表示模板阵列的取值分布, $f_i (1 \leq i \leq 16)$ 为滤波窗口内相应阵元上的图像函数值, $\hat{z}(m, n)$ 为窗口中心 (m, n) 的背景估计。

3 形态学背景感知方法

3.1 标准形态滤波算法

灰度图像所形成的视觉感受主要由光照亮度的明、暗变化所引起,其可视目标的显现无外乎两种情形:一是周围环境为暗背景时反衬出明亮的视觉目标;二是周围环境为亮背景时反衬出低暗的视觉目标。这也正好对应于视神经节细胞 (Ganglion cells, GC) 中的两种主要感受野模型^[5],见图 1 所示。这

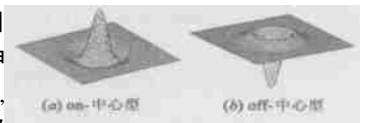


图 1 视神经节细胞的两种感受野模型

是形态滤波用于图像背景感知的生理学基础。

设输入图像 $F = \{f(x) | x \in P, P \in E^2\}$, $B = \{b(x, 0) | x \in S, S \in E^2\}$, 为扁平结构元素,其中 x 为图像平面空间坐标, $f(x)$ 为 x 点的图像灰度值。利用灰度形态学运算中的开、闭组合滤波对图像背景 $z(x)$ 的感知处理和目标特性(亮度反差) $d_{tag}(x)$ 的获取可描述如下:

$$\text{暗视背景(亮目标)} \quad \begin{cases} z_{dak}(x) = \min\{[(F \circ B) \cdot B](x), f(x)\} \\ d_{tag}(x) = f(x) - z_{dak}(x) \end{cases} \quad (7a)$$

$$\text{明视背景(暗目标)} \quad \begin{cases} z_{bn}(x) = \min\{[(F \cdot B) \circ B](x), f(x)\} \\ d_{tag}(x) = z_{bn}(x) - f(x) \end{cases} \quad (7b)$$

对于明、暗背景交织的混合物图像,其目标特性 $d_{tag}(x)$ 可

综合表示为

$$d_{tag}(x) = \max\{f(x) - z_{dak}(x), z_{bn}(x) - f(x)\} \quad (8)$$

式中 \circ 表示形态学的开运算, \bullet 表示形态学的闭运算.

3.2 形态滤波改进算法

通过分析不难发现,形态滤波运算表达式(7)可分解为形态变换和结构元选择两个基本问题.为改善滤波性能,可以从改进形态变换和优选结构元两方面加以研究.针对红外点源目标及云层背景的时空分布特性,通常可将式(7a)简化为

$$z_{cloud}(x) = (F^{\circ}B)(x) \quad (9)$$

形态变换规则一旦确定,则滤波性能就往往取决于结构元的选择.选择不同的结构元会导致运算对不同几何结构信息的分析和处理,即结构元决定着形态变换的目的和性质.在此,本文提出一种非凸型结构元(见图2(a)).圆形是平面域上唯一的各向同性结构,选用圆圈式结构元的优点是:具有旋转不变性,无需多个单向结构元进行组合滤波,可兼顾多向性结构要求;对非凸集(如空洞、非连通)目标结构不敏感;形态结构由常规的面阵改为特定的线状,压缩了数据滤波的遍历空间,可显著提高运算速率.

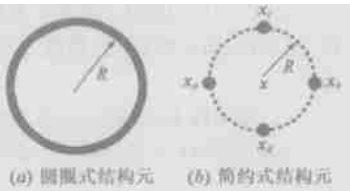


图2 形态滤波算法的结构元改型

考虑到数字图像大都采用方形网格空间,提取结构元中对滤波运算贡献最大的主要分量,于是圆圈式结构元就可简化为最靠近像点 x 的4个邻域点 x_a, x_b, x_c 和 x_d ,见图2(b).利用简约式结构元,还可进一步简化式(9)的运算关系.

$$\begin{aligned} z_{cloud}(x) &= (F^{\circ}B)(x) = \max_{x+m} \{ \min_{x-m} [f(x-m)] \\ &= \max\{\min[f(x_a - (0, R)), f(x_a + (0, R)), \\ &\quad f(x_a - (R, 0)), f(x_a + (R, 0))], \\ &\quad \min[f(x_b - (0, R)), f(x_b + (0, R)), f(x_b \\ &\quad - (R, 0)), f(x_b + (R, 0))]\}, \\ &\quad \min[f(x_c - (0, R)), f(x_c + (0, R)), f(x_c \\ &\quad - (R, 0)), f(x_c + (R, 0))]\}, \\ &\quad \min[f(x_d - (0, R)), f(x_d + (0, R)), f(x_d \\ &\quad - (R, 0)), f(x_d + (R, 0))]\} \end{aligned} \quad (10)$$

由于 $f(x) = f(x_a + (0, R)) = f(x_b - (0, R)) = f(x_c - (R, 0)) = f(x_d + (R, 0))$,且 $f(x_a - (R, 0)) = f(x_c - (0, R)) = f(x_{ac}), f(x_a + (R, 0)) = f(x_d - (0, R)) = f(x_{ad}), f(x_b - (R, 0)) = f(x_c + (0, R)) = f(x_{bc}), f(x_b + (R, 0)) = f(x_d + (0, R)) = f(x_{bd})$.所以

$$\begin{aligned} z_{cloud}(x) &= \max\{\min[f(x_a - (0, R)), f(x), f(x_{ac}), f(x_{ad})], \\ &\quad \min[f(x), f(x_b + (0, R)), f(x_{bc}), f(x_{bd})], \\ &\quad \min[f(x_{ac}), f(x_{bc}), f(x_c - (R, 0)), f(x)], \\ &\quad \min[f(x_{ad}), f(x_{bd}), f(x), f(x_d + (R, 0))]\} \end{aligned} \quad (11)$$

考虑到红外点源目标通常具有局域峰值特征^[3],即满足 $f(x) \geq f(x_a - (0, R)), f(x) \geq f(x_b + (0, R)), f(x) \geq f(x_c - (R, 0))$ 和 $f(x) \geq f(x_d + (R, 0))$.因此

$$\begin{aligned} z_{cloud}(x) &= \max\{\min[f(x_a - (0, R)), f(x_{ac}), f(x_{ad})], \\ &\quad \min[f(x_b + (0, R)), f(x_{bc}), f(x_{bd})], \\ &\quad \min[f(x_{ac}), f(x_{bc}), f(x_c - (R, 0))], \\ &\quad \min[f(x_{ad}), f(x_{bd}), f(x_d + (R, 0))]\} \end{aligned} \quad (12)$$

其二维图像滤波表达式为

$$\begin{aligned} z_{cloud}(x) &= \max\{\min[f(i, j - 2R), f(i - R, j - R), f(i + R, j - R)], \\ &\quad \min[f(i, j + 2R), f(i - R, j + R), f(i + R, j + R)], \\ &\quad \min[f(i - R, j - R), f(i - R, j + R), f(i - 2R, j)], \\ &\quad \min[f(i + R, j - R), f(i + R, j + R), f(i + 2R, j)]\} \end{aligned} \quad (13)$$

于是,结构元的优化构型如图3所示.推广运用式(13),并确保背景感知算法具有形态学开运算的非扩张性质.为此,提出如下的形态滤波改进算法:

$$\phi(f_0)(x) = \min_{x-m} \{ \max_{x+m} [f(x-m)], f(x) \} \quad (14)$$

理论上不难证明,改进的形态滤波算法(式(14))具有标准形态学开运算的许多相似性质,特别是收缩性、单调性和幂等性,即

$$\begin{cases} \phi(f_B)(x) \leq f(x) & \text{(收缩性)} \\ f(x) \leq g(x) \Rightarrow \phi(f_B)(x) \leq \phi(g_B)(x) & \text{(单调性)} \\ \phi[\phi(f_B)(x)] = \phi(f_B)(x) & \text{(幂等性)} \end{cases} \quad (15)$$

结构元作为一种特定的模板窗,在执行标准形态学开运算(式(9))时需对模板窗内的图像数据进行两次滑动滤波.式(14)和图3表明,两次滑动滤波可简化为近一次性的逻辑比较.同时,结构元由面阵改为线阵,再简化为特定的点阵(由

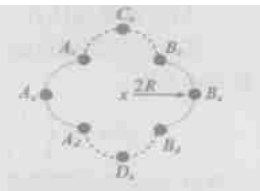


图3 结构元优化构型

4个三点花瓣式组成的梅花型,最大数据窗半径 $2R$ 调整空间尺度).这样,既简化了形态变换关系,又优化了结构元构型,将有力促进滤波质量和运算速率的双向提高.

4 背景估计实验测评

为了验证比较线性预测估计、非线性均值滤波、自适应线性模板卷积、非线性 Robinson Guard 模板运算、标准型形态学滤波和改进型形态学滤波等6种算法的实效性,在此采用真实红外图像数据进行如下的实验测评分析.

红外测试图像如图4(a)所示,图4(b)是其灰度函数在空间上的三维分布曲面.采用上述6种背景估计算法,选用大致相同的窗口尺寸,即前4种算法为 5×5 ,标准形态滤波用 $R = \sqrt{5}$ 的圆盘结构元,改进形态滤波的梅花构型 $R = \sqrt{5}$,其实验

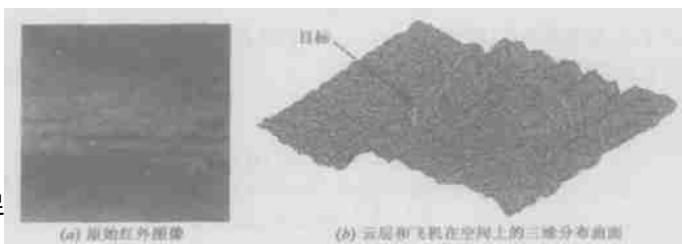


图4 测试用的红外图像数据

结果如图 5 所示. 为定量描述和表征原始图像和几种背景估计算法的响应特性, 对图 4(b) 的三维曲面进行纵向切割, 其纵剖面上各算法的分布曲线见图 5(b) ~ (f).

为正确评价 6 种滤波算法的有效性, 在此引入图像信噪比增益 (Signal Noise Improvement Ratio, SNIR) 概念, 其计算表达式定义为

$$SNIR = SNR_{out} / SNR_{in} \quad (16)$$

式中 SNR_{in} 和 SNR_{out} 分别表示背景抑制前和抑制后的图像信噪比.

由式 (16) 可知, 图像的输入信噪比 SNR_{in} 只取决于图像数据本身, 改善 SNIR 的关键在于背景估计算法, 因为它兼具双重功能: (1) 抑制杂波 (降低噪声), (2) 突出目标 (增强信号). 由图 5(a) 可以看出, 线性预测估计算法能较好地逼近云层背景的缓慢变化, 但不能自适应背景杂波的起伏波动. 图 5(b) 的非线性均值滤波算法对背景杂波的抑制效果优于图 5(a), 但对信号特性有些敏感. 图 5(c) 中自适应线性模板算法的杂波抑制效果更好, 却定位不够准确. 图 5(d) 的非线性 Robinson Guard 模板算法的杂波抑制效果最好, 但对目标特性造成的缺损也最严重. 这便是前 4 种算法在表 1 中 SNIR 指标偏低的主要原因. 从图 5(e) 可以看出, 标准形态滤波算法能够准确反映图像背景的缓变特性, 其最大优势在于对目标信号的起伏变化尚不敏感 (即目标特性对背景感知操作并不构成影响). 但是, 它对背景的处理还不够精细, 运算结果不能真实反映背景杂波的起伏特性. 由图 5(f) 则可看出, 改进的形态滤波算法对背景的自适应感知能力最强, 输出结果能真实贴切地反映图像背景的起伏变化规律. 它既改善了标准算法对杂波起伏不够敏感的固有缺陷, 又保持了原有算法有效保护信号特性的操作特点, 应用价值实在可观.

表 1 几种背景估计算法的性能测评

算法	线性预测估计	非线性均值滤波	自适应线性模板	非线性 Robinson Guard 模板	标准形态滤波	改进形态滤波
SNIR	2.431	2.576	2.853	2.807	2.936	3.241

5 检测实验

为进一步检验本文的形态滤波改进算法对于极低信噪比红外目标的检测性能, 选用 $SNR = 1.25$ 的真实红外图像进行测试, 如图 6(a) 所示. 它由天空云层、地物杂波和远距离的空中运动目标构成, 为复杂背景和动态环境下的典型红外图像. 检测结果见图 6(b). 可以看到, 滤波结果能够自适应图像背景的起伏变化, 既有助于抑制背景杂波, 也有利于微弱目标的检测与发现, 为突破 $SNR < 1.4$ 的极低信噪比目标探测^[1,3] 提供了可探索的研究方法.

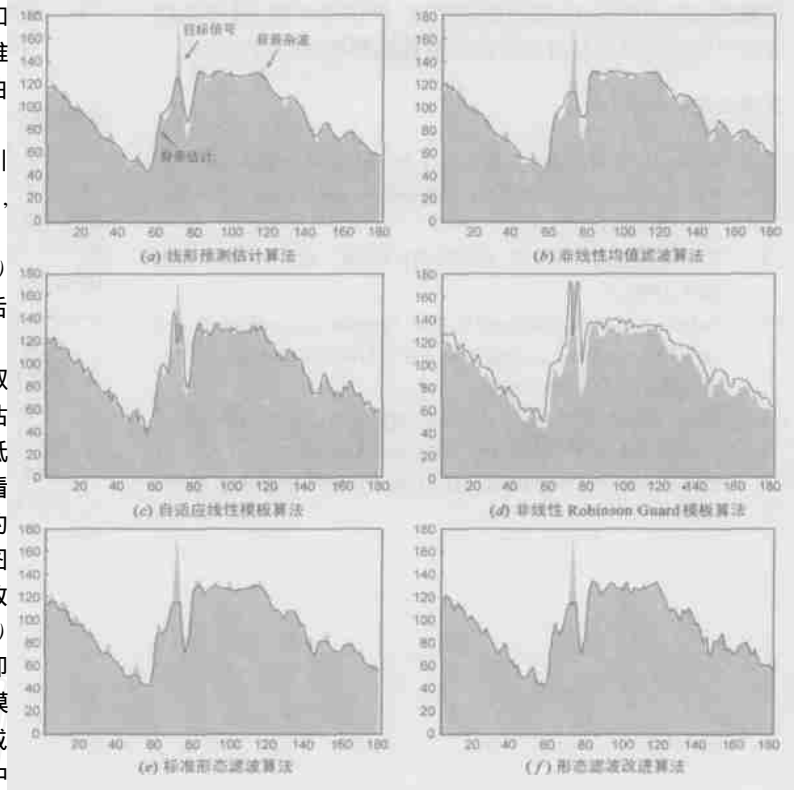


图 5 几种背景估计算法的实验结果

6 结束语

以复杂的动态图像环境作为处理对象的红外自动目标识别, 属当前智能化信息处理的前沿热点领域, 其关键技术之一就是低信噪比目标检测算法的研究. 自适应背景估计方法将成为实现这一目标的有效途径. 本文提出的形态滤波改进算法, 通过理论分析和实验检测表明: 简化了形态变换关系, 优化了结构元构型, 促进了滤波质量和运算速度的双向提高; 保持了形态滤波算法有效保护信号特性的操作特点, 并改善了它对杂波起伏不够敏感的固有缺陷, 使其自适应

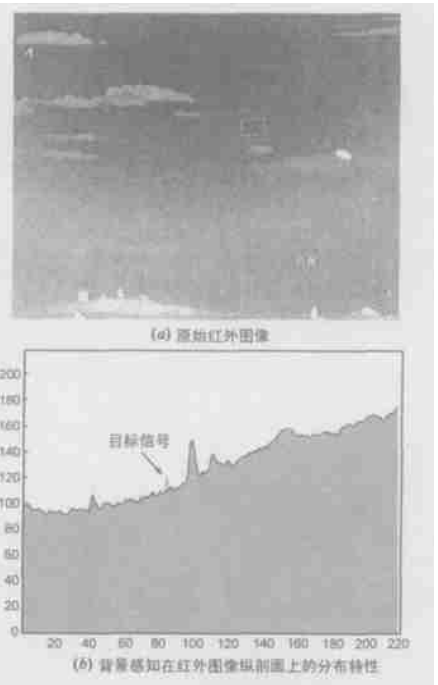


图 6 低信噪比红外图像目标的检测实验

背景感知能力更强; 算法简洁紧凑,操作效率高.对复杂环境的低信噪比目标具有良好的检测性能和稳健的适应能力.

参考文献:

- [1] Cafer C E, Silverman J, Mooney J M. Optimization of point target tracking filters[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(1): 15 - 25.
- [2] 李智勇, 沈振康, 杨卫平. 动态图像分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [3] Fechner T, Hach R, Rockinger O, et al. Detection and tracking of small targets in aerial image sequences and unknown sensor motion[J]. SPIE, 1998, 3374: 259 - 266.
- [4] 余农, 吴常泳, 李范鸣. 自动目标检测的形态学神经网络与模拟退火学习算法[J]. 中国科学, 2003, 33(6): 505 - 521.
- [5] 杨雄里. 视觉的神经机制[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996.

- [6] 杨卫平, 沈振康. 起伏背景下的自适应门限检测方法[J]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(2): 120 - 124.

作者简介:

余农 男, 1961年9月出生于重庆, 2000年在国防科技大学ATR国家重点实验室获工学博士学位, 现为副教授, 在站博士后, 研究方向为航空电子技术和红外光电图象处理, 已获国家部委级科技进步奖8项, 合作出版论著5部, 在国际, 国内期刊及学术会议上发表论文100多篇, 其中20余篇进入SCI和EI等国际著名检索. E-mail: laoyunong@263.net.

吴常泳 男, 1942年出生于浙江宁波市, 现为研究员, 博士生导师, 研究方向为红外光电技术.

汤心溢 男, 1970年出生于江苏宜兴市, 现为研究员, 博士生导师, 研究方向为红外光电技术.

李范鸣 男, 1969年出生于上海市, 现为研究员, 在职博士研究生, 研究方向为红外光电技术.

www.cnki.net