

文章编号: 1002-0411(2004) 01-0107-05

基于小波和形态学的自然地面背景红外目标检测方法

温佩芝, 史泽林, 于海斌

(中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 本文采用小波变换和形态 Top-Hat 滤波相结合的方法抑制红外图像的混合噪声及大面积的背景干扰, 减少图像模糊和增强目标; 通过选择适当的结构元素进行系列形态组合运算, 去掉虚警点而获得少量候选目标; 搜索局部极大值并确定阈值, 分离出真正的目标. 实验结果表明, 该方法能有效检测和分割出低信噪比复杂自然背景红外图像中的目标. *

关键词: 红外目标; 小波变换; 形态学; 目标检测; 图像分割

中图分类号: TP

文献标识码:

A Method for Detecting IR Target in Natural Background Based on Wavelet Transform and Morphology

WEN Pei-zhi, SHI Ze-lin, YU Hai-bin

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: A approach proposed in this paper combines wavelet transform with morphology Top-Hat filter to suppress the mixed noise and the large scale clutter caused by background in the infrared images. This process can decrease the blur of the images and enhance the targets. Then, proper structuring elements are selected to execute serial morphology operations to discard most false alarms, through which a few potential small targets can be obtained. Eventually, the real target can be segmented through searching maximal grayscale and assigning a threshold. The experimental results show that the method can effectively detect and segment the target in a low SNR infrared image with the complicated nature background.

Keywords: IR target; wavelet transform; morphology; target detection; image segmentation

1 引言 (Introduction)

红外探测系统接受地面场景的辐射照度包括目标、背景和干扰的热辐射以及它们的相互反射和对太阳辐射的反射. 地面背景对探测器的辐射照度主要决定于自身热辐射和地面对太阳红外辐射的反射. 自然界地表是非常复杂的, 影响其温度分布和红外辐射特性的因素很多, 如地表的起伏、土壤类型、植被类型等^[1]. 因此对于复杂背景中红外目标的探测和识别, 是空对地自动寻的末制导系统需要解决的一个难题.

利用红外传感器等获取目标图像时, 由于目标红外辐射强度与其周围邻域背景的辐射强度不相关, 而且一般都高于其邻域背景的辐射强度, 因此目标可看作图像中孤立的亮斑, 而背景在空间上往往

呈大面积的连续分布状态, 在红外辐射的强度上也呈渐变过渡状态, 所以它们在红外图像中的灰度空间分布上具有较大的相关性. 但是由于红外图像反映的是热辐射差, 对温度极为敏感, 加之空气对热辐射的散射和吸收作用, 使红外图像同时兼有较强的 高斯黑白噪声、脉冲噪声和非随机噪声^[2], 目标与背景的对比度低, 纹理边缘模糊等. 尤其是在强的阳光照射下, 复杂地面中的一些树丛、石块等会形成较强的红外辐射, 使背景噪声具有不定形性, 信号和噪声的频谱时常发生交叠. 此时, 一般的基于空域滤波或灰度阈值的方法^[3] 因很难将目标和较强背景干扰区别开来而失效. 又因为在战争条件下, 导引头上的摄像机和地面目标都在作随机运动, 运动信息无法预知和估计, 这使得许多主要依据预先估计及假设运动信息的方法^[2] 无法使用. 文献[4]的方法则

* 收稿日期: 2003-05-18
基金项目: 中国科学院国防科技创新基金资助项目(CXJJ-65)

需事先建立目标和背景模型,这对复杂多变的背景而言效果不佳.文献[5]采用基于区域增长和神经网络的方法分割和识别目标,因计算量较大而难以实际应用.总之,对于复杂地面背景低信噪比红外图像的目标检测,关键在于如何有效地抑制背景,提高单帧图像的检测率.

本文提出的方法只需要对目标形状有大致的了解,而不需对图像特征作具体分析.首先运用小波变换的方法去除红外图像中的混合噪声,提高对比度和增强目标.然后利用形态 Top-Hat 算子对抑制大面积连续分布的背景,提取高亮度区的目标和少量强噪声.最后通过选择合适的结构元素对图像分别进行系列组合形态运算,除去大部分虚警点而获得少数目标候选点,搜索各局部极大值并确定阈值,即可有效地分离出真正的目标.

2 小波变换的基本概念^[6] (Basic concept of wavelet transform)

基本小波函数 $\Psi(x)$ 是一个具有零均值且持续时间有限的振荡波形,其傅里叶变换 $\Psi(\omega)$ 具有带通性质,也称为母小波.

小波基是由一个基本小波 $\Psi(x)$ 经过伸缩和平移产生的一簇函数:

$$\Psi_{ab}(t) = (a)^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

式中, a 为伸缩因子, b 为平移因子. $\Psi(x)$ 经过平移和伸缩变换后,即可以生成不同的频率成分.其二进制离散化形式为:

$$\Psi_{m,n}(x) = 2^{-\frac{m}{2}} \Psi(2^m x - n), \quad (m, n \text{ 为实数}) \quad (2)$$

小波变换的含义就是将基本小波(即母小波) $\Psi(x)$ 函数作位移 b 后,再在不同尺度 a 下与待分析信号 $x(t)$ 作内积.也就是说,小波变换的基本思想是将原始信号通过伸缩及平移后,分解为一系列具有不同空间分辨率、不同频率和不同方向特性的子带信号.这些子带信号具有良好的时域、频域局部特性,可以用来表示原始信号的局部特征,进而实现对信号时间、频率的局部化分析,以克服傅里叶变换在分析非平稳的复杂图像时所存在的局限性.

根据 Mallat 提出的离散二进小波变换的快速算法,小波分解过程可以用正交镜像数字滤波器 H (低通)和 G (高通)滤波来实现对原始图像进行逐层分解.设 H 和 G 的脉冲响应分别为 $h(n)$ 和 $g(n)$,则它们的关系为:

$$g(n) = (-1)^n h(1-n) \quad (3)$$

低通滤波器的输出称为逼近,高通滤波器的输出称为细节.数字滤波器系数和所采用的小波形状有关.分解获得的逼近图像可以进一步分解为新的逼近和细节信号,即构成更高级的分解,而且该分解过程是可逆的,由任一级分解的逼近和细节均可以重构原始信号.

3 数学形态学的基本运算^[7] (Basic operation of mathematical morphology)

数学形态学是一种非线性滤波方法,它首先被用来处理二值图像,后来引用到灰度图像处理^[8].它的基本思想是用一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状,去除不相干的结构,以达到图像分析和识别的目的.形态学的应用可以简化图像数据,易于用并行处理方法和硬件实现.

数学形态学的基本运算有四个:膨胀、腐蚀、开运算和闭运算.基于这些基本运算可以推导和组合成各种数学形态学实用算法.设 $f(x, y)$ 为输入图像, $b(x, y)$ 为结构元素,其中, (x, y) 为图像平面空间的坐标点, f 为 (x, y) 点的图像灰度值, b 为 (x, y) 点的结构函数值, D_f 和 D_b 分别是函数 f 和 b 的定义域.

3.1 腐蚀和膨胀

腐蚀是数学形态学最基本的运算,用结构元素 $b(x, y)$ 对输入图像 F 进行灰度腐蚀,记为 $f \ominus b$,其定义为:

$$(f \ominus b)(s, t) = \min\{f(s+x, t+y) - b(x, y) \mid (s+x), (t+y) \in D_f; (x, y) \in D_b\} \quad (4)$$

膨胀是腐蚀运算的对偶运算(逆运算),是数学形态学的第二个基本运算,记为 $f \oplus b$,其定义为:

$$(f \oplus b)(s, t) = \max\{f(s-x, t-y) + b(x, y) \mid (s-x), (t-y) \in D_f; (x, y) \in D_b\} \quad (5)$$

腐蚀运算可以消除小于结构元素的明亮区域,从而有效地去除孤立噪声点和边界上不平滑的凸出部分.膨胀是将与目标物体接触的所有背景点合并到物体中的过程,可填补空洞和形成连通域以及填平图像边界上不平滑的凹陷部分.

3.2 开运算和闭运算

形态滤波开启和闭合运算用腐蚀与膨胀运算的级联来定义,即:

F 和 B 的开运算记为:

$$(f \circ b)(x, y) = [(f \ominus b) \dot{\vee} b](x, y) \quad (6)$$

f 和 b 的闭运算记为:

$$(f \bullet b)(x, y) = [(f \dot{\vee} b) \ominus b](x, y) \quad (7)$$

开运算是先对图像进行腐蚀运算再进行膨胀运算,能去掉图像中的孤立区域和毛刺,利用它可以消除形状小于结构元素的正峰值,根据目标和噪声的特点,选择适应的结构元,就能剔除目标和噪声,而将背景保留下来.闭运算是先对图像进行膨胀运算再进行腐蚀运算,可以填充物体内的细小空洞,连接邻近物体和平滑物体边界.

3.3 Top-Hat 形态滤波

Top-Hat 变换算子,记为 $hat(f)$, 定义为:

$$hat(f) = f - (f \circ b) \quad (8)$$

可见 Top-Hat 运算是原始图像信号与其开运算后的信号之差,所以经 Top-Hat 变换处理后的图像能抑制平缓变化的背景和不相关结构信息,提取出形状类似于结构元素的孤立目标和噪声,即可以检

测出图像信号中的灰度峰值,因此 Top-Hat 算子具有高滤波的特性.

4 预处理和背景抑制(Pre-processing and background suppressing)

图像预处理的目的是滤除噪声、抑制背景和增强目标,是复杂自然背景低信噪比红外目标检测和分割的关键所在.

目前最常用的图像空间去噪方法是均值滤波器和中值滤波器,它们分别是线性滤波器和非线性滤波器的代表,针对不同的噪声源,均值滤波器主要用来抑制高斯噪声,而中值滤波器主要用来抑制脉冲噪声,但是面对红外图像中高斯噪声和脉冲噪声组成的混合噪声时,二者皆无法达到很好的效果.为此我们提出了利用小波变换的方法抑制混合噪声、利用形态 Top-Hat 滤波方法抑制背景干扰的方法对红外图像进行预处理,并对各种图像预处理方法进行了试验比较,如图 1 所示.

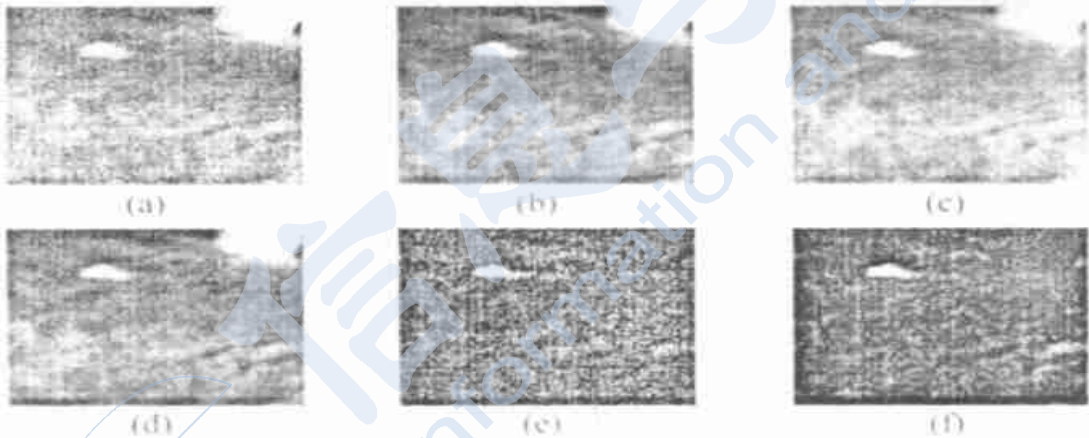


图 1 红外图像预处理方法比较

(a) 原红外图像; (b) 均值滤波; (c) 中值滤波; (d) 小波去噪处理; (e) Top-hat 滤波; (f) 小波去噪后再进行 Top-hat 滤波

Fig. 1 The comparison of IR image pre-processing methods

4.1 小波变换的去噪原理

传统的基于时域和频域的图像降噪方法利用噪声和信号在频域上分布的不同进行降噪,即信号主要分布在低频区域,而噪声主要分布在高频区域,但同时图像的细节也分布在高频区域.所以,图像降噪处理中的一个矛盾问题是如何在抑制噪声和保留图像细节上保持平衡,传统的低通滤波方法将图像的高频成分滤除,虽然能够达到降低噪声的效果,但破坏了图像细节.利用小波分析的理论,可以构造一种既能够降低图像噪声又能够保持图像高频信息的方法.

对一幅含有噪声的红外图像来说,图像的轮廓主要体现在逼近部分,而随机噪声和图像的高频信息主要包含在细节部分.细节信号中的小波系数可分成两类,一类只由噪声变换得到,其小波系数幅值小,数量较多;另一类由信号的高频细节变换得来,对应的小波系数幅值大,数目较少.根据这个特点,可以利用小波系数幅值上的差异来降低噪声,对信号的小波分解的细节系数设置一个域值,大于域值的系数保留,而小于域值的则去掉,然后由逼近信号和经域值处理后的细节信号重构图像,这样既可以去除大部分噪声,又较好地保留了图像的细节.本文

根据红外图像噪声的特点,采用具有紧支集的正交小波基 Sym 对图像进行二次小波分解,由 Donoho 算法自适应确定阈值,对图像进行降噪处理,结果如图 1(d)所示.与均值滤波和中值滤波结果进行了对比,可见,小波变换方法在抑制红外图像的混合噪声、减少图像模糊、提高目标对比度等方面的综合效果最好.

4.2 背景抑制

对于地面目标检测,复杂背景的背景抑制非常重要.形态 Top-Hat 滤波方法.巧妙地结合了目标空间形状和灰度信息,通过提取红外图像中形状类似于结构元素的灰度峰值来分离出孤立目标和部分强噪声,因此能有效地抑制不相关的以及大面积连续分布的地面背景干扰,但它对随机高频噪声干扰的抑制较差,见图 1(e).经大量试验比较可知,我们提出的先对红外图像进行小波降噪处理,然后进行开 Top-Hat 变换的预处理算法,在抑制混合噪声和大面积复杂背景干扰的同时又较好地保护目标方面,取得了最佳的效果,如图 1(f)所示.

5 目标检测和分割算法(Target detection and segmentation algorithm)

(1)对单帧低信噪比地面复杂自然背景红外图像,运用小波变换方法抑制混合噪声,减轻图像模糊,提高图像对比度,增强目标;

(2)根据目标的大致形状特点,选择一个适当的圆形结构元素 b_1 ,对图像进行开 Top-Hat 形态滤波,抑制平缓变化的背景和去除不相关的杂波干扰,提取出形状类似于结构元素的孤立目标和背景噪声;

(3)根据残留的目标和背景干扰的特点,挑选合适的结构元素 b_2 ,对图像进行开运算,除去小于 b_2 的细小物体干扰,并在纤细处分离物体和平滑较大物体边界;

(4)选择一个适当的结构元素 b_3 ,对图像进行闭运算,进一步消除孤立噪声,连接邻近物体和平滑物体边界,获得少量的候选目标;

(5)搜索图像的各局部极大值和最大值,然后确定阈值并分割目标.由于经上述方法处理后,图像的灰度级大大减少,而且差异较大,使得目标分割阈值 T 的选择比较容易和简单^[8].

6 实验结果(The experimental results)

采用本文提出的目标检测和分割方法对实际拍摄的红外图像进行实验原始红外图像是用 8~12 μm 红外摄像机拍摄的草地上的坦克模型,背景为杂草、丘林、树木、石块等,经适当裁剪为 300 \times 220 的实验图像,图像中包含单一目标,且目标大小在 3 \times 3~50 \times 50 像素之间.对任意挑选的 70 帧红外图像进行仿真实验,结果全部能够正确分割和检测出目标.部分实验结果如图 2 所示.

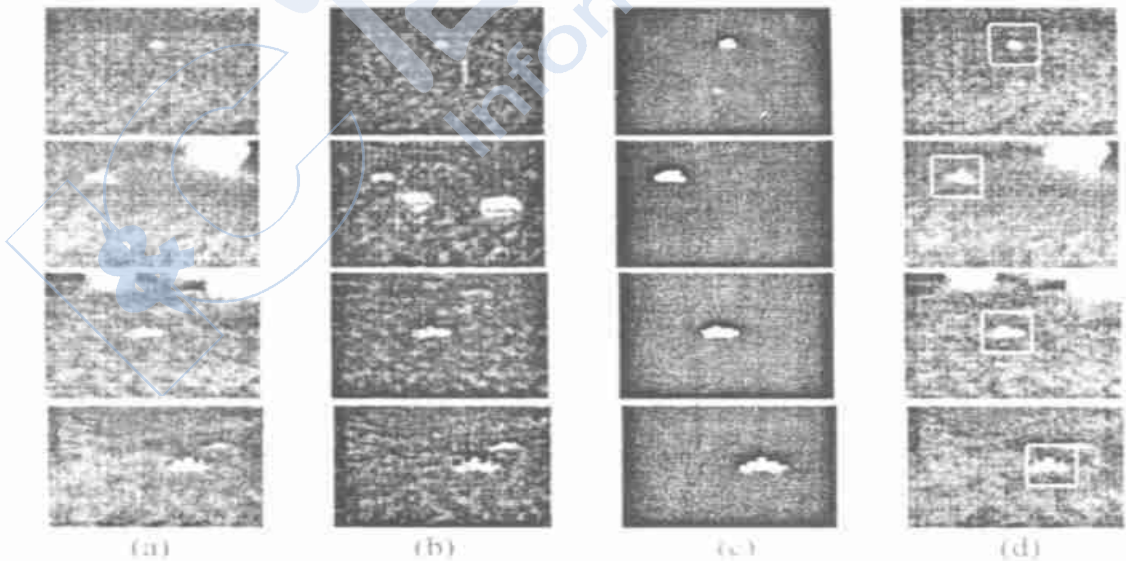


图 2 复杂地面红外目标检测算法实验结果

(a) 红外原始图像;(b) 预处理结果;(c) 分割出的候选目标(二值图像);(d) 最后检测的目标

Fig. 2 The experimental results of detection for IR target on complex ground

7 结束语(Conclusion)

本文提出的地面自然背景中红外图像目标自动检测方法主要是针对单帧图像进行全视场处理. 小波变换较好地抑制了红外图像的混合噪声, 形态学的引入则很好地解决了复杂背景下目标分割的难题. 实验结果表明, 该算法具有较强的抗扰性能和背景抑制能力, 检测精度高. 但是由于结构元素的形状和尺寸对该算法的检测结果有较大的影响, 对不同类型的背景和图像需要选择适当的结构元素, 为提高算法的应用范围, 我们将进一步探讨自适应形态学的方法.

参 考 文 献(References)

- [1] 韩玉阁, 宣益明. 目标与背景的红外辐射特性研究及应用 [J]. 红外技术, 2002, 24(4): 16~ 19.
- [2] 刘其真, 姚 剑, 孙 薇, 等. 红外成像运动目标识别与跟踪方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(2): 27~ 33.
- [3] 付小宁, 殷世民, 吴志鹏, 等. 红外图像的动态域值分割 [J]. 光电工程, 2002, 29(6): 57~ 60.

(上接第 92 页)

RBF 算法可以对脱硫过程进行及时识别和控制, 对该钢铁公司脱硫处理生产过程具有指导作用. 应当指出, 在聚类、权值递推和遗传优化这几个方面的处理还有不完善之处, 还需要更有效的改进, 以提高网络得到全局最优解的概率.

参 考 文 献(References)

- [1] 黄道鑫. 提钒炼钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [2] 陈念贻, 张未铭. 模式识别—人工神经网络在钢铁冶金中的应用 [J]. 钢铁, 1994, 29(10): 68~ 71.
- [3] 陶 钧, 等. 基于遗传算法和径向神经网络的转炉炼钢模型 [J]. 系统仿真学报, 2000, 12(3): 241~ 244.
- [4] Robert J S, Jamsex J C, *et al.* Approximation of nonlinear sys-

- [4] 桑 农, 张天序. 结合背景抑制技术的 FLIR 图像分割 [J]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(5): 369~ 374.
- [5] Correia B, Dinis J, Davies R. Automatic detection and recognition of stationary motorized vehicles in infrared Images [J]. SPIE, 1999, 3718: 140~ 150.
- [6] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] 崔 屹. 图象处理与分析—数学形态学方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [8] Vincent L. Morphological grayscale reconstruction in image analysis: applications and efficient algorithms [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, 2(2): 176~ 201.

作者简介

温佩芝(1963-), 女, 博士生. 研究领域为红外图像自动目标识别, 图像图形处理, 模式识别, 自动控制理论等.

史泽林(1965-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域为自动目标检测, 目标匹配跟踪, 模式识别, 图像图形处理等.

于海斌(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 国际 ISA 高级会员. 研究领域为实时系统, 分布式控制系统理论, 图像图形处理, 模式识别等.

tens with radial basis function neural networks [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2001, 19(4): 1~ 14.

- [5] Zakeriya U, Cuneyt G, *et al.* Analysis of input-output clustering for determining centers of RBFN [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2000, 16(4): 851~ 857.
- [6] 陈国良, 等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [7] 柴 杰, 等. RBF 神经网络的逼近能力及其算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(3): 310~ 315.
- [8] 王永骥, 涂 健. 神经网络控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

作者简介

王华秋(1975-), 男, 博士生. 研究领域为神经网络, 计算智能, 数据挖掘和知识发现.