

基于小波互能量交叉的复杂背景中 红外小目标检测方法*

史泽林, 魏颖, 黄莎白

(中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

[摘要] 研究复杂背景下红外图像小目标检测问题, 提出一种基于小波分析互能量交叉处理的目标检测方法。通过定义水平、垂直方向上的小波互能量交叉函数, 在两上方向上有效地增强目标、抑制背景干扰。采用一种简单有效的局部直方图统计方法进行目标粗分割, 综合两个方向目标粗检测结果通过能量最大判决进行目标定位, 并采用双窗不相似度量检测目标尺寸。实验结果表明, 该方法对地面背景、海面背景的红外弱小目标检测具有一定的普遍适用性, 具有单帧检测率高、实现速度快的特点。

[关键词] 图像检测; 目标检测; 小波分析; 互能量交叉; 直方图统计

[中图分类号] TJ 765. 3 **[文献标识码]** A

Wavelet Analysis Based and Mutual Energy Combination Method Detection Algorithm for Infrared Small Target in Complex Background

SHI Ze-lin, WEI Ying, HU ANG Sha-bai

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

Abstract: The small target detection method of infrared imagery in complex background of sea and sky in studied, and an algorithm based on wavelet analysis and mutual energy combination is presented. Wavelet Mutual Energy Combination (WMEC) functions are defined in horizontal and vertical directions. Targets are enhanced and disturbances of background are weakened efficiently by WMEC processing at the two directions. Targets are coarsely segmented with thresholds which are set automatically by a method of part gray histogram analysis. Results of coarse segmentation in the two directions are integrated, and targets are located by means of maximum energy judgment. The size of targets is decided by comparing the dissimilarity between a couple of windows. Experiment results indicate that the method can be appropriate in both kinds background of land and sea. It is with high correct detection ratio from a single image, and high speed to realize.

Key words: image recognition; target detection; wavelet multi-scale analysis; WMEC; gray histogram analysis

1 引 言

红外图像小目标检测是精确制导过程中的一个关键技术和难点问题。对于呈现为小斑块的红外目标而言, 比背景所占面积小得多、对比度较低、边缘模糊、无纹理特征、尺寸及形状变化不定; 对于复杂背景而言, 地面背景中的树木、草丛、道路, 海面背景中的海浪、云层等, 与目标交叠在一起, 无法直接从灰度、尺寸和形状上区别

于目标。这些使得从红外图像中进行自动目标检测难度较大。一些单纯从分析目标特性出发的传统检测方法, 如灰度统计阈值分割、几何及运动特性分析等, 很难取得较好的检测效果。

文中提出一种基于小波互能量交叉的复杂背景中红外小目标自动检测方法, 定义了小波互能量交叉函数, 利用小波分解具有的方向滤波性, 分别在水平和垂直方向上进行能量互交叉, 以在不同方向上进行背景抑制突出人造目标, 对

* 收稿日期: 2003-05-26

基金项目: 中国科学院国防科技创新项目资助(CXJJ-65)

作者简介: 史泽林(1965—), 男, 江苏宜兴人, 研究员, 博士研究生, 主要从事图像处理、模式识别等方面的研究工作。

小波互能量交叉图像采用一种局部直方图统计方法进行粗分割,综合两个方向目标粗分割图像并作最大能量判决上进行目标定位,并采用双窗口不相似度量来检测目标尺寸。实验表明本方法取得较好的检测结果。

2 小波多尺度分解及互能量交叉

多尺度小波分析在空间域和频率域同时具有良好的局部化性质,小波分解过程可以看作是将信号分解到不同频段的连续逼近过程,而信号经过具有不同频带的带通滤波器滤波后,其在不同频段的特性能够被充分表现出来。

2.1 小波域方向分解

由 Mallat 算法^[1,2],二维图像信号的小波域方向分解是将其分层分解为低频图像和一系列不同方向的高频图像,采用一维小波高通和低通分解滤波器,分别沿图像 $f(x, y)$ 的行和列与高通 G 或低通滤波器 H 卷积运算,可以表示为:

$$\begin{aligned}
 A_{j+1}(x, y) &= (G(x) * A_j(x, y)) * G(y) \\
 D_{j+1}^h(x, y) &= (H(x) * A_j(x, y)) * G(y) \\
 D_{j+1}^v(x, y) &= (G(x) * A_j(x, y)) * H(y) \\
 D_{j+1}^{45}(x, y) &= (G(x) * A_j(x, y)) * G(y)
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $A_{j+1}(x, y)$ 由图像 $A_j(x, y)$ 分别经过水平和垂直方向的低通滤波器,代表在尺度 2^{j+1} 上的低频分量; $D_{j+1}^v(x, y)$ 由 $A_j(x, y)$ 分别经过水平方向的高通滤波器和垂直方向的低通滤波器,在其中包含着沿垂直方向缓慢变化而沿水平方向迅速变化的分量,因此 $D_{j+1}^v(x, y)$ 代表在尺度 2^{j+1} 上的垂直分量。同理, $D_{j+1}^h(x, y)$ 代表在尺度 2^{j+1} 上的水平分量,而 $D_{j+1}^{45}(x, y)$ 代表在尺度 2^{j+1} 上的 45° 对角线方向分量。图像 $f(x, y)$ 经过小波分解之后,就被表示成一系列不同尺度下的子图像 $\{A_j, D_j^h, D_j^v, D_j^{45} | j \geq 0\}$, 其中的每一子图都包含着特定的尺度和方向信息。

图像进行小波分解后各尺度空间的高频分量,可以反映出图像中在不同方向的突变部分。如对于一幅具有方向性的纹理图像,由于纹理的组织结构不同,其在不同尺度和不同频率分量中有不同的表现,利用小波多尺度分析理论,可将不同方向纹理表现的特征区分开。

2.2 互能量交叉

对于处于复杂自然背景中的人造小目标如汽车、坦克、舰船等,在红外图像中呈现为一小亮

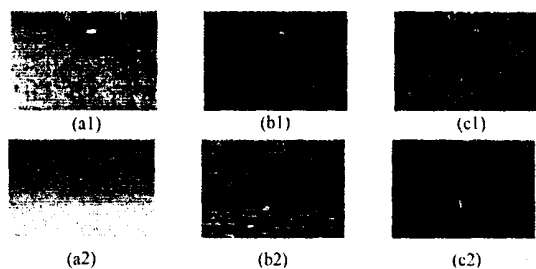
斑,其在垂直方向和水平方向同时具有较大的突变,而图像中的自然背景如树木、草丛、道路、海浪和云层只具有单一方向性。定义如下的小波互能量交叉函数:

$$D^h = \hat{u} D_j^h \hat{u} \times \hat{u} D_{j+1}^h \hat{u} \quad (2)$$

$$D^v = \hat{u} D_j^v \hat{u} \times \hat{u} D_{j+1}^v \hat{u} \quad (3)$$

D^h, D^v 分别为求得的原图像的水平、垂直方向的小波互能量交叉图像, $j = 1, 2, \dots, n$ 表示进行 n 次小波分解。

对高频分量图像作能量两层或多层间的交叉处理,可以达到抑制噪声增强目标的作用,这样作的主要原因有:一是小波分解把噪声分散到各个频率通道,而噪声在各频率通道之间是互不相关的^[3],在互交叉处理过程中,不相关的噪声得到抑制;二是小目标在水平和垂直方向的各尺度空间都表现为较大的突变,而且在同一方向上各尺度之间是相关的,互能量交叉的结果,使得小目标在同一方向上的突变得以增强;三是背景灰度变化缓慢部分如大面积的亮带,在小波分解的各高频分量和互能量交叉图像中得以消除。两幅红外图像的水平、垂直方向互能量交叉图像如图 1。



(a1)(a2)分别为地面、海面背景红外图像;
(b1)(c1)(b2)(c2)分别为(a1)(a2)在水平、垂直方向的互能量交叉图像

图 1 两幅红外图像的互能量交叉图像

3 目标检测算法

算法框图如图 2。得到原图像水平、垂直方

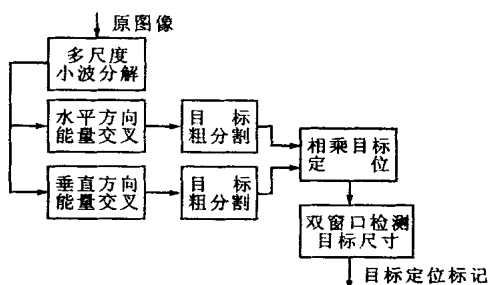


图 2 目标检测算法框图

向的互能量交叉图像后,对目标进行粗分割,对两个方向的目标粗分割图像相乘,再经过滤波之后采用最大能量判决法进行目标定位,采用双窗口结构比较内外窗口的灰度差异来检测目标尺寸。

3.1 目标粗分割

在水平、垂直方向的互能量交叉图像上,采用阈值分割法进行目标粗分割,其中阈值的设置是实现目标正确分割的关键。常用的类间最大差法(Ostu)采用穷尽法求得最优阈值,需要的计算时间较长,而且在小目标情况下,分割性能迅速下降。采用一种高效快速的局部直方图统计方法自动设置阈值。

互能量交叉图像是由小波分解的高频分量得到的,而且目标的突变部分得到增强,目标在互能量交叉灰度图像中表现为很亮的部分,即灰度值较大。被检测的小目标在图像中只占很小的面积,如在 288×384 像素的图像中,目标大小不超过 20×20 像素,即目标在图像中所占面积不会超过 1%。

从最高灰度级开始,依次统计灰度直方图并做面积累计,直到面积累计值大于或等于目标所占面积即 1%,此时的灰度级即为所求的阈值。设 $g(x, y)$ 表示互能量交叉图像,像素数目为 M ,采用 256 个灰度级表示为 $G = \{0, 1, \dots, i, \dots, 255\}$,灰度级为 i 的像素个数为 m_i ,则灰度级为 i 的出现概率 p_i 为:

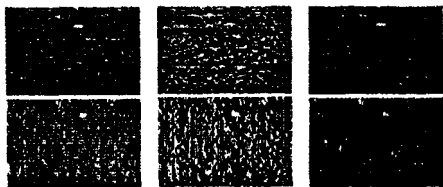
$$p_i = m_i / M \quad (4)$$

阈值 t 可以用下式求得:

$$t = \left\{ t \hat{u} \sum_{i=255}^t p_i \geq 0.01 \right\} \quad (5)$$

互能量交叉图像在阈值 t 上的分割结果为:

$$g_t(x, y) \begin{cases} g(x, y) & g(x, y) \geq t \\ 0 & g(x, y) \leq t \end{cases} \quad (6)$$



(a) 互能量交叉图像; (b) 为采用 Ostu 法分割结果;
(c) 为采用本文方法分割结果

(a) 互能量交叉图像; (b) 为采用 Ostu 法分割结果;
(c) 为采用文中方法分割结果。

图 3 局部直方图统计法与 Ostu 法目标分割结果对比
由上述分析可知,局部直方图统计法比

Ostu 法运算量大大减少,它们分割结果对比如图 3,可以看出在小目标情况下,其目标分割效果也大大优于 Ostu 法。

3.2 目标定位

对水平、垂直方向互能量交叉图像采用局部直方图统计进行目标粗定位得到的图像中,低于阈值的背景像素值为 0,高于阈值的像素值被保留为原来值。对两个方向上目标粗分割图像做相乘运算,背景干扰得到进一步滤除。在得到的相乘结果图像 $h(x, y)$ 上,设一 $N \times N$ 的滑动窗口,移动窗口,计算窗口内所有像素灰度的平均值,找到灰度平均最大值对应像素位置即为目标位置。即:

$$E = \frac{1}{M \times N} \sum_{i,j \in (M \times N)} \hat{u}h(i, j) \hat{u} \quad (7)$$

E 取最大值对应的点为目标位置。此时背景干扰在图像中表现为高频部分、目标为低频部分,而这个过程相当于一个均值低通滤波过程,具有增强目标、抑制背景干扰的作用。

3.3 双窗口不相似度量

采用双窗口不相似度量^[3,4]确定目标大小,如图 4。外窗口 Y 尺寸的大小与目标可能的最大尺寸对应,内窗口 X 大小可变,定义如下的不相似度量函数:

$$\Delta E_{\max} = \max \left\{ \Delta E \hat{u} \Delta E = \frac{1}{N} \sum_{Y(i,j) \in Y} \hat{u}f(i, j) \hat{u} - \frac{1}{N} \sum_{X(i,j) \in X} \hat{u}f(i, j) \hat{u} \right\} \quad (8)$$

N_x, N_y 分别表示内外窗口中包含的像素个数。以检测到的目标位置 (i, j) 为中心,当内外窗口分别包含背景与目标时,函数 ΔE_{\max} 为较大值;而同时包含目标时,函数 ΔE_{\max} 为较小值。当 ΔE_{\max} 为最小值时的内窗口 X 的大小作为目标的大小。

4 实验及结果

采用上述目标检测方法对多幅地面、海面背景红外图像作了实验,图像大小为 288×384 ,目标大小为 $3 \times 3 \sim 20 \times 20$ 范围内,图像信噪比较低。其中两幅图像如图 1 中(a1)(a2)所示。地面目标为坦克模型,背景为草地、树丛,背景中存在大面积缓慢变化的不均匀亮带;海面目标为远距离航行的舰船,背景为云层、海浪。

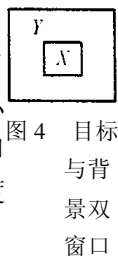
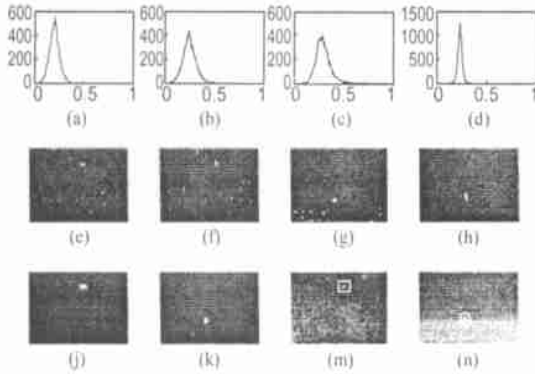


图 4 目标与背景双窗口

表 1 小波滤波器系数

n	- 3	- 2	- 1	0
H	0. 0000	0. 0625	0. 2500	0. 3750
G	- 0. 00008	- 0. 01643	- 0. 10872	- 0. 59261
n	1	2	3	4
H	0. 2500	0. 0625	0. 0000	0. 0000
G	0. 59261	0. 10872	0. 01643	0. 00008



(a)-(d) 分别为图 1 中 (b1)(c1)(b2)(c2) 图像直方图;
 (e)-(h) 分别为图 1 中 (b1)(c1)(b2)(c2) 目标粗分割结果;
 (j)(k) 分别为图 1(a1)(a2) 目标检测结果; (m)(n) 为在原图像上标记目标。

图 5 红外图像小目标检测实验结果

采用三次样条小波作三次分解, 小波滤波器系数^[5]如表 1, 一幅地面背景和海面背景的红外小目标检测实验结果如图 5。对于地面背景目标检测, 该方法效果很好, 单帧检测准确率很高。海面背景的单帧检测准确率比地面背景略低, 出现

(上接第 54 页)

误检的情况发生在目标尺寸小于 5×5 、且海杂波的影响较为严重时。对所作实验的图像, 该方法总的单帧检测率可达 95% 以上。

5 结论

该检测方法对地面背景、海面背景红外图像目标检测有一定的普遍适用性, 能从单帧图像很好地检测定位红外弱小目标。小波分解后经过两个方向的互能量交叉处理, 有效地增强了目标、抑制了背景干扰, 目标分割中阈值的选取运算简单。该算法检测速度快, 有利于硬件实现, 是一种有效的复杂背景下红外小目标检测方法。

[参 考 文 献]

[1] S. Mallat and W. Hwang. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Trans. Information Theory, 1992, 38: 617- 643.
 [2] S. Mallat. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation [J]. IEEE Trans. PAMI, 1989, 11: 674- 693.
 [3] 汪国友, 王岳环, 张天序. 红外小目标检测的快速并行算法[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(3).
 [4] 装立力. 小波变换在海面目标自动检测中的应用[D]. 中科院沈阳自动化所硕士学位论文, 2002.
 [5] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[参 考 文 献]

[1] 郝柏林. 从抛物线谈起- 混沌动力学引论[M]. 上海. 上海科技教育出版社, 1993.
 [2] Shihua Chen, Jinhu Lu. Synchronization of an uncerertain unified chaotic system via adaptive control[J]. Chao, Solitons and Fractals. 2002, 1; 643- 647.
 [3] Wang C, Ge SS. Adaptive synchronization of uncertain chaotic system via backstepping design [J]. Chao, Solitons and Fractals. 2001; 12: 1199 - 1206.
 [4] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of

systems and its application to modeling and control [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, 15(1); 116- 132.
 [5] H, T shi buchi, M, Nii, Fuzzy regression analysis by neural networks with non - symmetric fuzzy number weights, Proc, Internet [J]. Conf on neural Network, Vol, 2, 1996, pp. 1191- 1196.
 [6] 孙增圻, 徐红兵. 基于 T-S 模型的模糊神经网络 [J]. 清华大学学报, 1997, 37(3), 76- 80.
 [7] 李翔, 陈增强. 混沌机制在 T-S 模型的模糊神经网络的系统辨识研究 [J]. 控制与决策. 2001. 16(4). 504- 506.
 [8] R. J. S. Jang, C. - T. Sun, Neuro- fuzzy modeling and control [J]. Proc. of the IEEE 83(3) (1995) 378- 406.
 [9] L. X. Wang, J. M. Mendel, Generating fuzzy rules by learning form example, IEEE Trans [J]. Systems Man Cybernet. 22960 (1992) 1414 - 11427.