

基于剪切波变换和邻域差分的小目标检测算法

熊上导, 易 凡, 何 超, 严赵军
(武汉大学 物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出了一种基于剪切波变换的背景预测算法用于红外小目标的检测。对原始图像进行剪切波变换, 获得原始图像的多尺度和方向的细节特征。然后, 对低频子带进行中值滤波, 去除残留目标。对高频子带, 根据其均方误差来调整权重系数, 抑制目标和噪声。将反变换后得到的背景预测图像和原始图像进行差分, 采用一种基于双窗口的邻域差分方法进行分割, 最终实现目标检测。与小波变换法和双边滤波法比较, 基于剪切波变换的方法对小目标的检测有较好的效果。
关键词: 小目标检测; 红外图像; 剪切波变换; 背景预测; 邻域差分
中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2015)01-0025-04

Small Target Detection Algorithm Based on Shearlet Transform
and Neighborhood Difference

XIONG Shang-dao, YI Fan, HE Chao, YAN Zhao-jun
(School of Physics Science and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new algorithm based on shearlet transform is proposed for the detection of small target. The original image is decomposed by shearlet transform to obtain the original image details characteristics of multi-scale and multi-direction. Then, the low frequency subband is filtered by median filter to remove residual target. The weight coefficient of the high frequency subbands is adjusted according to the mean square error to suppress target and noise. The background prediction obtained by inverse shearlet transform is subtracted from an original image. Neighborhood Difference segmentation was used in the result image, in which target objects can be detected. The results demonstrate that the proposed method is more efficient than the bilateral filter.
Key words: small target detection, infrared image, shearlet transform, background prediction, neighborhood difference

0 引言

小目标检测在计算机视觉、雷达跟踪、红外制导等研究领域有着极其重要的地位。但由于被探测目标距离较远, 系统噪声和背景杂波干扰较强, 小目标在成像平面上只占有少量像素, 且常常淹没在背景之中, 对比度极低。因此小目标精确和实时的检测一直是相关领域的热点和难点。

近年来小目标检测技术有了很大的发展, 通过预测背景检测小目标的方法主要有光流法^[1]、数学形态学^[2]、双边滤波^[3]等。双边滤波预测背景的方法结合了图像的空间邻近度和像素相似度, 但在信噪比较低时, 背景的起伏边缘会引起虚警, 降低检测概率。小波变换^[4]通过伸缩和平移等运算对图像进行多尺度的

细化分析, 在时频两域都具有良好的分辨能力和算法鲁棒性, 在小目标检测中取得了很多成果。但小波变换只能捕捉有限的方向信息, 使得分解的子带不能充分表示背景细节。

与双边滤波和小波变换不同, 剪切波变换对图像的表示具有更良好的局部化特性和很强的方向敏感性, 本文提出一种基于剪切波变换的小目标检测算法, 利用剪切波变换具有的方向敏感性, 使用最小均方误差调整剪切波子带权重来预测背景, 然后将原始图像和背景估计图像差分来检测出小目标。结果证明, 该方法相较于小波变换法和双边滤波法, 在复杂背景下检测性能有所提升。

1 剪切波变换和多尺度分析

收稿日期: 2014-07-02; 修订日期: 2014-11-06。
作者简介: 熊上导 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、红外小目标。
基金项目: 国家地面智能集成观测及业务软件项目, 编号: GYHY201006049。

函数 $f \in L^2(R^2)$ 的剪切波变换定义为^[5]:

$$SH(a, s, t) = \langle f, \Psi \rangle \tag{1}$$

其中,

$$\Psi_{a,s,t}(x) = a^{-3/4} \Psi(A_a^{-1} B_s^{-1}(x-t)) \tag{2}$$

为剪切波函数, $a \in R^+$ 为尺度参数, $s \in R$ 为剪切参数, $t \in R^2$ 为平移参数. $A_a = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a^{1/2} \end{pmatrix}$ 为各向异性的膨胀矩阵, $B_s = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 为剪切矩阵.在实际应用中, 常取 $A_a = A_0 = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$, $B_s = B_0 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $t \in Z^2$. 剪切波通过一个基本函数 Ψ 的伸缩、平移和剪切变换来构造, 与小波变换的经典概念联系起来的同时增强了生成函数对几何特征的敏感性.

函数 Ψ 在剪切波系统中起着至关重要的作用, Guo 和 Easley 等人对如何构造函数 Ψ 进行了研究^[6-7], 并给出了构造方法.

- $\Psi^{(0)} \in L^2(R^2)$ 满足下列条件:
- 对于任意 $\xi = (\xi_1, \xi_2) \in \hat{R}$, $\xi_1 \neq 0$, $\hat{\psi}^{(0)}(\xi) = \hat{\psi}^{(0)}(\xi_1, \xi_2) = \hat{\psi}_1(\xi_1) \hat{\psi}_2(\xi_2 / \xi_1)$, 其中 $\hat{\psi}^{(0)}$ 为 $\Psi^{(0)}$ 的傅立叶变换;
 - Ψ_1 为连续小波, $\hat{\psi}_1 \in C^\infty(R)$, $\text{supp } \hat{\psi}_1 \in [-1/2, -1/16] \cup [1/16, 1/2]$;
 - $\hat{\psi}_2$ 为 Bump 函数, $\hat{\psi}_2 \in C^\infty(R)$ 且 $\text{supp } \hat{\psi}_2 \in [-1, 1]$, 在区间 $(-1, 1)$ 上, $\Psi_2 > 0$ 且 $\|\Psi_2\| = 1$.
- 函数 $\{\hat{\psi}^{(0)}(\xi A_0^{-j} B_0^{-l})\}$ 形成 $D_0 = \{(\xi_1, \xi_2) \in R^2: |\xi_1| \geq 1/8, |\xi_2/\xi_1| \leq 1\}$ 的一个剖分, 如图 1(a)所示.

$$\{\psi_{j,l,k}^{(0)} = 2^{\frac{3j}{2}} \psi^{(0)}(B_0^l A_0^j x - k): j \geq 0, -2^j \leq l \leq 2^j - 1, k \in Z^2\} \tag{3}$$

是 $L^2(D_0)^V = \{f \in L^2(R^2): \text{supp } \hat{f} \subset D_0\}$ 的一个 Parseval 框架. 每个元素 $\hat{\psi}_{j,l,k}$ 支撑在梯形对上, 近似的大小为 $2^{2j} \times 2^j$, 方向沿着斜率 $l2^{-j}$ 的直线. 如图 1(b)所示.

同理, 令 $A_1 = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}$, $B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$, 可以构造一个 $L^2(D_1)^V$ 的 Parseval 框架, 其中 D_1 是垂直锥面 $D_1 = \{(\xi_1, \xi_2) \in R^2: |\xi_2| \geq 1/8, |\xi_1/\xi_2| \leq 1\}$.

令 $\hat{\psi}^{(1)}(\xi) = \hat{\psi}^{(1)}(\xi_1, \xi_2) = \hat{\psi}_1(\xi_2) \hat{\psi}_2(\xi_1 / \xi_2)$, $\hat{\psi}_1$ 和 $\hat{\psi}_2$ 定义如上, 则集合:

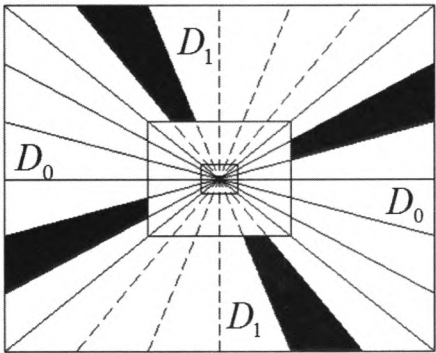
$$\{\psi_{j,l,k}^{(1)} = 2^{\frac{3j}{2}} \psi^{(1)}(B_1^l A_1^j x - k): j \geq 0, -2^j \leq l \leq 2^j - 1, k \in Z^2\} \tag{4}$$

是 $L^2(D_1)^V$ 的一个 Parseval 框架.

2 算法的实现

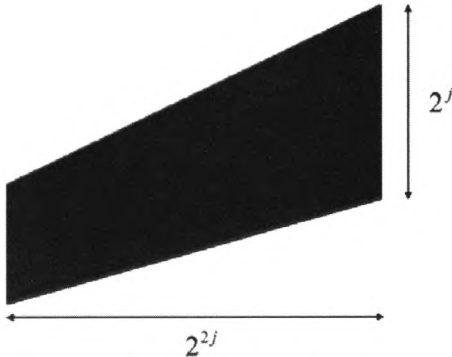
2.1 算法流程

如图 2 所示, 输入图像先经过剪切波变换分解, 产生了一系列多层次的分解子带系数, 剪切波系数反映了图像的频率和方向信息. 根据均方误差来调整剪切波系数以预测背景, 得到的背景预测图像和输入图像差分, 最后使用基于双窗口的邻域差分方法对残差图像进行分割, 检测出小目标.



(a)剪切波频域剖分图

(a) Frequency decomposition of shearlet



(b)剪切波的频率支撑

(b) Frequency support of shearlet

图 1 剪切波频率的特性 Fig.1 Frequency characteristics of shearlet

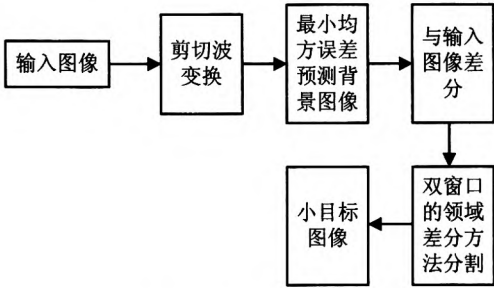


图2 本文算法流程图

Fig.2 Schematic diagram of algorithm

2.2 剪切波变换

使用剪切波对图像进行分解的过程主要有2个步骤^[8]:

- 1) 用剪切矩阵 B_0 或 B_1 将原始图像映射到不同的方向上, 得到原始图像的多方向剪切图像。
- 2) 对剪切变换后得到的各方向子带进行各向异性的小波变换。

在第一步中, 只使用 B_0 或 B_1 对图像进行剪切变换, 可以得到 $2^{(l+1)}+1$ 个方向子带, 同时使用 B_0 和 B_1 时, 可以得到 $2^{(l+2)}+2$ 个方向子带。对图像进行剪切波变换的流程如图3所示。

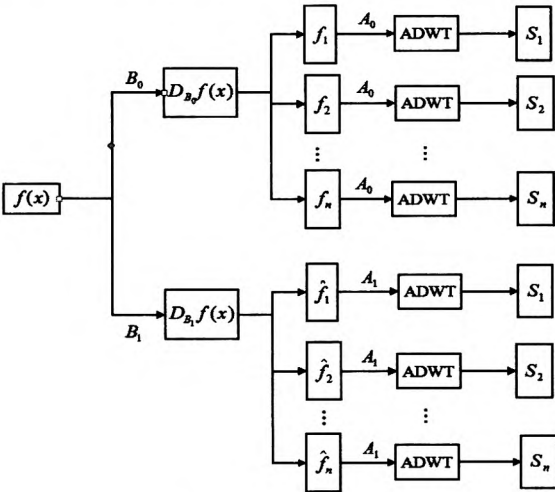


图3 剪切波分解流程

Fig.3 Schematic diagram of shearlet transformation

2.3 最小均方误差预测图像

对原始图像进行剪切波变换后, 可以得到一系列不同方向和频率的子带图像。其中低频部分主要包含背景和少量残留目标, 高频部分包含背景边缘、目标和随机噪声。对低频部分进行中值滤波, 去除残留的目标对预测背景的影响。对高频部分系数进行加权处理, 来抑制目标和随机噪声。最后对结果进行反变换, 得到背景预测图像。

通过求最小均方误差的方法来确定高频部分系

数的权重, 设第 i 个子带系数矩阵为 H_i , 权重为 w_i , 均方误差之和为:

$$\sigma^2 = D \left(\sum_i^n w_i H_i \right) = \sum_i^n w_i^2 \sigma_i^2 \tag{5}$$

式中: σ_i 为各子带的均方误差。权重系数应满足以下公式:

$$\sum_i^n w_i = n \tag{6}$$

使用拉格朗日数乘法求解上式, 可知当 w_i 满足下式时, 均方误差之和最小。

$$w_i = (n / \sigma_i^2) / \sum_i^n \sigma_i^2 \tag{7}$$

2.4 分割

将原始图像与背景预测图像进行差分得到残差图像。此时目标明显增强, 背景得到很好的抑制, 但还有少量的起伏的背景边缘残留。这种残留的背景边缘有较强的灰度和梯度, 在分割时容易引起虚警。这里提出一种基于双窗口的邻域差分滤波器分割目标。

这个邻域差分滤波器由两个滤波窗口 u 和 v 构成, 窗口 u 的大小为 $N \times N$, 取值为小目标的大小。窗口 v 的大小为 $M \times M$, $M = N + 2$ 。如图4所示, 其中 w 代表整个图像, 窗口 v 为包含小目标在内的背景区域, 窗口 u 为小目标区域。

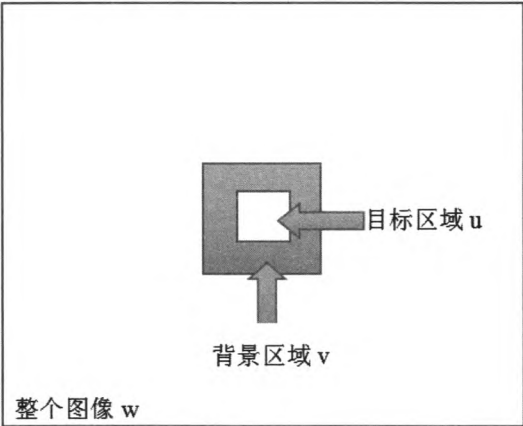


图4 邻域差分滤波器示意图

Fig.4 Schematic diagram of neighborhood difference filter

对窗口 u 内的像素进行均值滤波, 得到窗口 u 内的平均灰度 m :

$$m(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j \in u} I(i, j) \tag{8}$$

然后计算 m 与窗口 $(v-u)$ 中像素点的绝对差值:

$$a_{i,j} = |m - I_{i,j}|, \quad i, j \in (v-u) \tag{9}$$

将 $\{a_{i,j}\}$ 值按升序排列得到 $\{r_k\}$, r_k 表示邻域内第 k

小的绝对差值。将 $2M$ 个最小差值 r_k 累加, 得到:

$$R(x,y)=\sum_{k=1}^{2M}r_k$$

(10)

$R(x,y)$ 表示了窗口 u 内的像素点与周围背景的相似程度。将窗口 v 在整个图像上移动, 如果窗口 u 内的像素为背景部分, 由于背景的相似性和连续性, $R(x,y)$ 的值近似于 0。如果窗口 u 内的像素为边缘部分, 虽然边缘与邻域部分存在较大的灰度差, 但在某些方向具有连续性, 因此取部分最小差值累加的 $R(x,y)$ 值很小。当窗口 u 内的像素为目标时, 增强后的小目标与邻域像素有较大的差别, $R(x,y)$ 的值较大。因此按下式对目标进行判别。

$$f(x,y)=\begin{cases}1, & R(x,y)>\lambda\sigma \\ 0, & R(x,y)\leq\lambda\sigma\end{cases}$$

(11)

式中: σ 为残差图像的标准差。 λ 为阈值系数, 一般取为 2~6。

3 处理结果与分析

本文采用了基于剪切波变换的背景预测方法来检测小目标, 通过 Matlab 软件对一共两组总共 70 幅红外小目标图像进行了处理, 图 5 显示了其中两类红

外小目标图像的检测结果, 图 4(a)为原始图像; 图 4(b)是残差图像, 小目标得到明显增强。图 4(b)为分割后的结果。由图可见, 该方法能有效地从单帧图像中检测出小目标。

阈值分割前的信噪比增强程度是评价算法性能的一个衡量标准。引入 2 个评价参数来比较不同算法的性能。

信噪比:

$$SNR=(G_t-G_b)/\sigma$$

(12)

式中: G_t 为目标局部区域的最大灰度值; G_b 为局部区域的像素灰度平均值; σ 为局部区域的像素灰度标准差。

信噪比增益:

$$GSNR=SNR_{out}/SNR_{in}$$

(13)

式中: SNR_{out} 为处理后输出图像的信噪比; SNR_{in} 为输入图像信噪比。

表 1 为分别采用小波变换、双边滤波和本文所用方法对红外图像处理的结果。从表中可知, 3 种方法都可以提高目标的信噪比, 但本文所用方法效果优于另外 2 种方法, 拥有更好的检测效果。

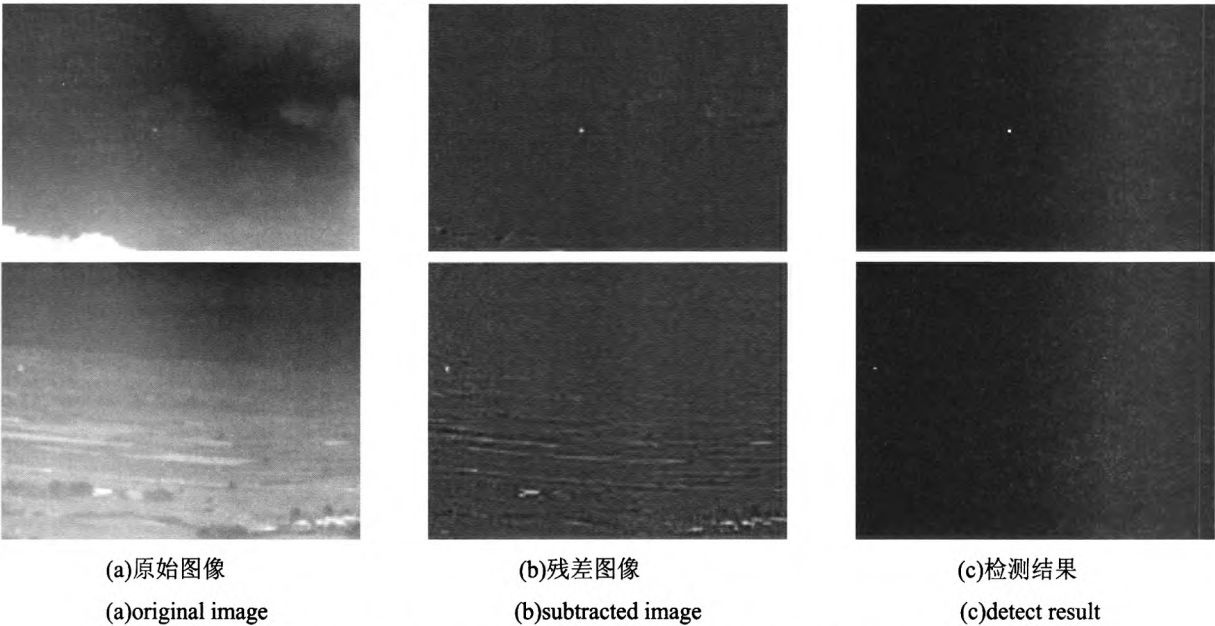


图5 图像处理结果

Fig.5 Image processing results

表1 不同方法的 SNR 和 GSNR 比较

Table 1 Performance comparison of different methods

方法\图片	第一幅		第二幅	
	SNR _{out}	GSNR	SNR _{out}	GSNR
双边滤波	26.43	17.27	11.73	7.02
小波变换	32.00	20.91	12.25	7.33
本文方法	35.74	23.36	14.52	8.70

4 结论

本文提出的基于剪切波变换的红外小目标检测算法, 利用剪切波变换良好的局部化特性和方向敏感性分解原始图像, 分解子带包含大量背景边缘信息。根据均方误差来调整剪切波系数以预测背景, 将背景预测图像和原始图像差分以增强信噪比, 然后使用基
(下转第 33 页)

- [4] Land E H . Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural image[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1983, **80**(16): 5163-5169.
- [5] 刘斌, 金伟其, 王玲雪, 等. 基于空域和频域处理的红外图像细节增强算法[J]. *红外技术*, 2011, **33**(8): 477-482.
- [6] 李宏, 向遥, 张卫, 等. 基于直方图映射和分层的图像迁移算法研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2007, **28**(6): 1110-1114.
- [7] 简耀波. 红外图像处理中的关键算法研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2009: 1-16.
- [8] 蒋立辉, 李宁, 成向阳, 等. 基于一种新的同态滤波算法的散斑噪声压缩[J]. *激光与红外*, 2000, **30**(1): 11-14
- [9] 王冬梅, 路敬祎, 王秀芳. 基于 Matlab 的同态滤波算法的研究[J]. *科学技术与工程*, 2010, **10**(26): 62-65.
- [10] Agaian S S, Panetta K A, Grigoryan A. Transform- based image enhancement algorithms with performance measure[J]. *IEEE Trans. Imag. Proc.*, 2001, **10**(3): 367-382.
- [11] 夏清, 胡振琪, 位蓓蕾, 等. 一种新的红外热像仪图像边缘检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(1): 319-322.
- [12] Diallo M S, Schmitt D R . Noise reduction in interferometric fringe patterns with mean curvature diffusion[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(4): 819-831.
- [13] 孙海江, 王延杰, 刘伟宁. 基于自适应平台阈值和拉普拉斯变换的红外图像增强[J]. *中国光学*, 2011, **4**(5): 474-479.

(上接第 28 页)

于双窗口的邻域差分方法分割目标, 最终有效检测到小目标。处理结果表明, 本文所给出的算法在背景预测方面具有一定的优势, 可以获得相对较高的信噪比, 在红外图像小目标检测中能得到准确有效的检测结果。

参考文献:

- [1] 张飞, 李承芳, 史丽娜, 等. 复杂背景下运动点目标的检测算法[J]. *光学技术*, 2005, **31**(1): 55-57.
- [2] 方义强, 樊祥, 程正东, 等. 基于数学形态学的红外小目标跟踪研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2012, **32**(2): 15-18.
- [3] 曾雅琼, 陈钱. 基于改进的双边滤波的单帧红外弱小目标背景抑制[J]. *红外技术*, 2011, **33**(9): 537-540.
- [4] 侯洁, 辛云宏. 基于小波变换与图像增强技术的红外小目标检测[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(6): 683-688.
- [5] Kutyniok G, Labate D. Resolution of the wavefront set using continuous shearlets[J]. *Transactions of the American Mathematical Society*, 2009, **361**(5): 2719-2754.
- [6] Guo K, Labate D. Optimally sparse multidimensional representation using shearlets[J]. *SIAM journal on mathematical analysis*, 2007, **39**(1): 298-318.
- [7] Easley G, Labate D, Lim W Q. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2008, **25**(1): 25-46.
- [8] Lim W Q. The discrete shearlet transform: A new directional transform and compactly supported shearlet frames[J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2010, **19**(5): 1166-1180.