

文章编号: 1672-8785(2013)02-0039-05

基于循环平移 Contourlet 变换的 红外小目标检测方法

李 静¹ 刘兴淼² 薛福来²

(1. 中国农业大学动物科技学院动物营养学国家重点实验室, 北京 100193;

2. 西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

摘 要: 分析了在有噪声和背景干扰情况下检测红外小目标的方法, 提出了一种将循环平移 Contourlet 变换去噪方法和自适应阈值分割方法相结合的红外小目标检测算法。该方法首先对原始图像进行循环平移阈值去噪, 再用原始图像减去去噪图像, 对得到的残差图像进行自适应阈值分割, 分离出少量的候选目标点, 最后利用目标运动的连续性和一致性检测出目标。分别用 Contourlet 变换法、小波变换法和本文提出的检测法对小目标进行了检测。仿真结果表明, 本文提出的检测方法能较精确地检测出序列图像中的红外小目标, 检测效果优于 Contourlet 变换法和小波变换法。

关键词: 小目标检测; 循环平移; Contourlet 变换; 图像去噪; 自适应阈值

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.02.07

Small Infrared Object Detection Method Based on Cycle Spinning Contourlet Transform

LI Jing¹, LIU Xing-miao², XUE Fu-lai²

(1. State Key Laboratory of Animal Nutrition, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: The methods for detecting small infrared targets in the case of noise and background interference are analyzed. A small infrared target detection algorithm which combines the cycle spinning contourlet transform with the adaptive threshold segmentation is proposed. Firstly, the method uses the cycle spinning to de-noise the original images. Secondly, it obtains the residual images by subtracting the de-noised image from the original image. Thirdly, it uses the adaptive threshold segmentation to segment the residual images so as to separate a few of candidate target points. Finally, it uses the continuity and consistency of target motion to detect the target. The simulation result shows that the proposed detection method can detect the small infrared targets in the sequential images precisely and it is more effective than the Contourlet transform and wavelet transform methods in detection.

Key words: small target detection; cycle spinning; contourlet transform; image de-noising; adaptive threshold

0 引言

当目标和成像系统距离较远时, 拍摄的红

外图像中目标仅为斑点大小。斑点通常包含一个到十几个像素, 传达目标的位置和灰度等信息, 但无目标形状、纹理、大小等结构信息。由于

收稿日期: 2012-11-22

作者简介: 李静(1984-), 女, 北京人, 硕士, 讲师, 研究方向为智能生物技术。

E-mail: king_zhanghao@163.com

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>

INFRARED (MONTHLY)/VOL.34, No.2, FEB 2013

各种噪声的影响, 图像中孤立点像素的灰度值可能大于目标像素的灰度值。因此目标极易被噪声淹没, 检测起来非常困难。目前国内外已有大量有关红外图像弱小目标检测的研究事例, 但至今仍没有成熟的解决方案。

对红外小目标进行单帧检测的常用方法有: 中值滤波器^[1]、匹配滤波器^[2]、小波变换、形态学滤波器^[3]等。各种滤波器虽然对背景起到一定的抑制作用, 但效果不够理想。二维小波是一维小波在水平、垂直和对角方向上的张量积, 在处理二维图像时也仅仅能在这三个方向进行分解。小波变换在有限方向的图像分析限制了它在红外小目标检测方面的应用。2002 年, Donoho 和 Vetterli 等人提出了 Contourlet 变换, 该法为解决二维或更高维奇异性提供了一种新的解决方法, 弥补了小波变换方向性不足的问题。Contourlet 变换在各个尺度上所能分解的方向可变, 可根据图像分析的要求进行多个方向上的分解, 因此存在较好的方向性和各向异性。吴文怡等^[4]就是对图像进行 Contourlet 变换, 利用 Contourlet 分解后子图像的特性抑制背景和去噪声, 最终实现对目标的检测的。但是 Contourlet 变换同小波变换一样缺乏平移不变性, 在图像处理中会引入人为的视觉魔像, 尤其是图像的边缘等高频细节部分, 伪 Gibbs 现象尤为明显。为此, 冯鹏等^[5]引入了一种循环平移的 Contourlet 变换去噪方法, 克服了传统 Contourlet 变换去噪方法会带来视觉魔像的缺点, 较好地保留了图像的细节部分。本文通过分析 Contourlet 变换高频系数, 应用循环平移 Contourlet 变换去噪方法和自适应阈值分割方法, 提出了一种有效的小目标检测算法。

1 Contourlet 变换

Contourlet 变换^[6]又称为塔形方向滤波器组。该变换法由 M.N.Do 在 2002 年提出, 具有多分辨率、多方向性的优点, 可以较好地展示图像的细节。它首先通过拉普拉斯金字塔变换对图像进行多尺度分解, 得到各个方向上的图像细

节, 接着利用方向滤波器组对各个方向上的图像细节分别进行合成, 得到各个图像细节的系数, 最后利用各个尺度、各个方向的系数得到原始图像的 Contourlet 变换系数。与临界采样小波相比, 拉普拉斯金字塔滤波器组仅仅在低通图像下采样。高维情况下的拉普拉斯金字塔分解仅在每层产生一个带通图像, 从而避免了临界小波存在的扰频现象。另外, Contourlet 变换利用二维方向滤波器对拉普拉斯金字塔分解出的各级高频分量进行分解, 可以在各个尺度上分解出 2^n 次方个方向子带, 从而克服了传统小波变换方向性不足的缺点, 实现了方向的灵活可变性。Contourlet 变换不仅保持了传统可分离小波变换的良好时域局部化的分析能力, 还具有良好的方向分析能力, 能反映图像不同分辨率下沿任意方向的变化情形。图 1 为 Contourlet 变换的流程图, 图 2 为 Contourlet 频域分解图。实际应用中, 方向数随尺度的增大而增多。

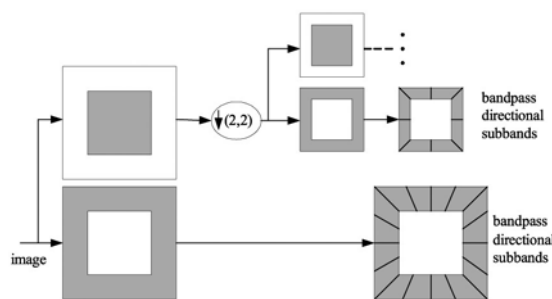


图 1 Contourlet 变换的流程图

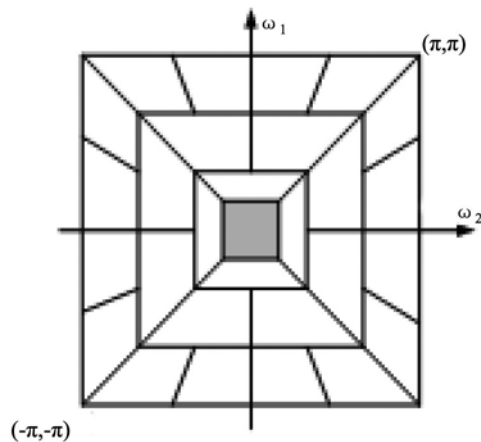


图 2 Contourlet 频域分解图

2 检测算法

同小波变换类似, 在 Contourlet 变换后, 所有的高频系数对噪声都有贡献。所以可把 Contourlet 变换高频系数分为两类: 第一类仅仅由噪声变换得到。其特点是幅值小、数目多。第二类由信号变换获得, 包含噪音的变换结果。其特点是幅值大、数目少。小目标信号的系数属于第一类系数^[7]。只要得到只包含第一类系数的图像, 对其进行阈值处理, 就可以得到包含小目标和部分噪声点的二值图像。再利用小目标运动的连续性和一致性去除噪声点, 就可检测出小目标。整个小目标检测的算法步骤如下:

(1) 对图像进行 L 个尺度的循环平移 Contourlet 去噪, 利用硬阈值去噪方法去除第一类高频系数, 再利用 Contourlet 重构得到去噪图像。

(2) 利用原始图像减去去噪后的图像, 得到只包含第一类高频系数的图像。

(3) 利用自适应阈值法对得到的差值图像进行阈值处理, 得到包含部分噪声点和小目标的二值图像。

(4) 利用小目标的连续性和运动轨迹的一致性对多帧二值图像进行处理, 检测出小目标。

2.1 循环平移 Contourlet 变换去噪

由于缺乏平移不变性, 传统的 Contourlet 变换分解系数与原始图像的系数间并不存在对应的平移关系。另外, 采用阈值去噪会在重构的图像中产生虚假成分, 尤其在图像奇异点附近会产生伪 Gibbs 现象, 交替出现较大的上下幅值震动。循环平移正是通过改变图像的排列次序改变奇异点在整个图像中的位置, 减少或消除振荡幅度, 从而改善重构质量的。循环平移的 Contourlet 变换去噪可以描述为: 首先对原始图像平移一定的距离, 再对其进行硬阈值 Contourlet 变换去噪, 然后通过反向平移, 恢复到原始图像一样的排列次序, 实现有效去噪。

当图像包含的纹理和边缘细节不多时, 使用上面的方法具有很好的去噪效果。但当图像中的细节较多时, 就会产生较多的奇异点, 会出

现如下矛盾: 当前的平移量对部分奇异点具有较好的去噪效果, 但对另外一部分奇异点的去噪效果较差。如何循环平移达到最佳的去噪效果, 得到较好的去噪图像, 已成为一个亟待解决的问题。本文在一定范围内对原始图像进行循环平移, 接着对整个区域内的结果进行叠加平均, 得到最佳的去噪图像。具体如下式所示:

$$F = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1, j=1}^{N_1 N_2} C_{-i, -j}(DNCT(C_{i, j}(s))) \quad (1)$$

式中, F 表示对含噪图像进行循环平移去噪后得到的图像, $DNCT$ 表示对二维图像进行 Contourlet 分解、去噪以及重构的过程, $C_{i, j}(s)$ 为循环算子, N_1, N_2 为图像沿水平及垂直方向的平移量。

2.2 自适应阈值分割

利用原始图像减去去噪后的图像, 得到只含第一类高频系数的残差图像, 然后选择合适的阈值二值化残差图像, 得到包含部分噪声点和小目标点的二值图像。此时, 阈值的选择至关重要, 阈值过大, 就会滤除小目标, 导致检测失败; 阈值过小, 就会引入过多的噪声点, 为小目标的确定带来困难。试凑法可以得到较好的阈值, 但该法在自动处理方面的应用有限。为了提高系统的自适应能力, 本文针对红外图像的特点采用了一种自适应阈值选取方法, 其表达式如下:

$$t = \alpha \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{i_{max}} - T_{ostu} \right) \quad (2)$$

式中, $I_{i_{max}}$ 为图像中最大的 i 个灰度值; N 取值为图像中总像素数的千分子一。 α 为调整系数, 一般取 $0.3 \sim 0.8$ 。 T_{ostu} 为最大类间方差阈值。红外图像中小目标的灰度值一般要高于背景的灰度值, $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{i_{max}}$ 可近似代表小目标灰度值, $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{i_{max}} - T_{ostu}$ 基本上反映了小目标与背景的灰度差, 因而能够将小目标从噪声的背景中分离出来。

2.3 目标检测

经过上述单帧图像阈值处理可以分割出一些目标点,但还无法将小目标准确分离出来。需要利用小目标在序列图像中运动的连续性和一致性将真正的小目标分离出来。首先对含有少量候选目标点的 3~5 帧序列图像进行相邻帧与运算,减少候选目标点,接着对序列图像进行最大合并累积,形成组合帧图像,并在组合帧图像上搜索目标轨迹。最后,利用目标轨迹检测出各帧小目标的精确位置。具体检测步骤如下^[8-10]:

(1) 对于单帧图像中的候选目标点,若在其相邻帧中对应的邻域内出现候选目标点,则保留该目标点,否则认为是噪声点并将其去除。

(2) 将序列图像中的剩余候选目标点叠加到组合帧图像中。如果多幅图像都在相同位置出现候选目标点,则将其灰度值累加,构成组合帧该点的灰度值。

(3) 在组合帧图像内,点目标运动会留下一段轨迹。假设短时间内目标的运动轨迹为直线。定义一个 $m \times n$ 的模板,模板在组合帧上移动。当模板移动到有目标的位置时,由于目标出现的连续性,必然有较多像素聚集于模板重叠的窗口内。窗口内像素的累加值大于阈值,从而得到目标运动的轨迹,把目标从噪声中检测出来。

(4) 将单帧图像与目标的轨迹图像相比较,得到单帧目标检测结果。

3 实验结果及分析

分别采用小波变换去噪、Contourlet 变换去噪和循环平移的 Contourlet 变换去噪对多帧红外小目标图像进行检测。在图像去噪过程中,常使用信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 进行检测效果对比, SNR 定义为

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_f^2}{MSE} \right) \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (r_{i,j} - f_{i,j})^2 \quad (4)$$

式中, $f_{i,j}$ 为原始图像各像素灰度值, $r_{i,j}$ 为去噪后各像素灰度值, σ_f^2 为原图像灰度值的方差, M 和 N 分别为图像的长度和宽度。

取序列图像中第 276 帧图像,分别采用三种方法对其进行了去噪处理。实验中 Contourlet 变换 LP 采用“9-7”金字塔滤波器,DFB 采用“pkva”方向滤波器进行二级 Contourlet 变换。循环平移 Contourlet 变换中,水平和垂直方向的平移量 $N_1 = N_2 = 2$ 。小波去噪采用二级小波变换。循环平移 Contourlet 变换去噪、Contourlet 变换去噪和小波变换去噪的 SNR 分别为: 26.3181 dB、24.8852 dB 和 21.1607 dB。图 3 为实际的红外图像,图 4 至图 6 为分别进行三种变换去噪后,通过自适应阈值分割得到的单帧小目标检测结果。其中调整系数 α 分别为 0.7、0.7 和 0.4。图 7 为本文算法检测的最终结果。

与其它两种变换方法相比,循环平移 Contourlet 变换的去噪效果更好,对第一类高频系数的去除更彻底。因此,在残差图像中包含更多小目标的信息量,小目标的特征更明显,更有利于后期小目标的检测。由单帧检测结果可以看出,

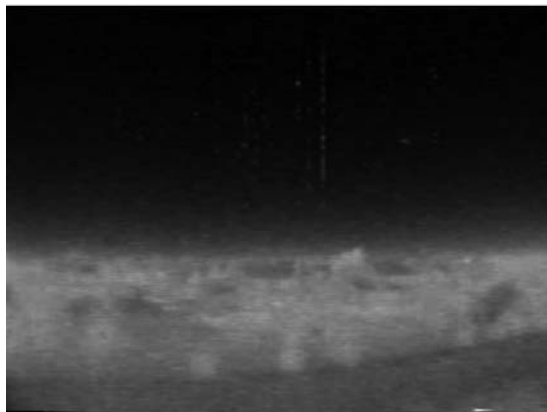


图 3 原始图像



图 4 经小波变换后的检测结果 ($\alpha = 0.4$)

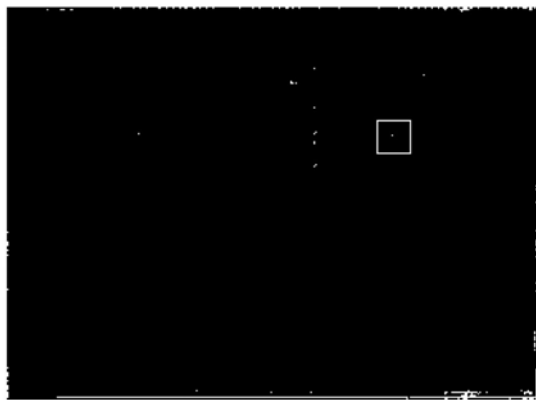
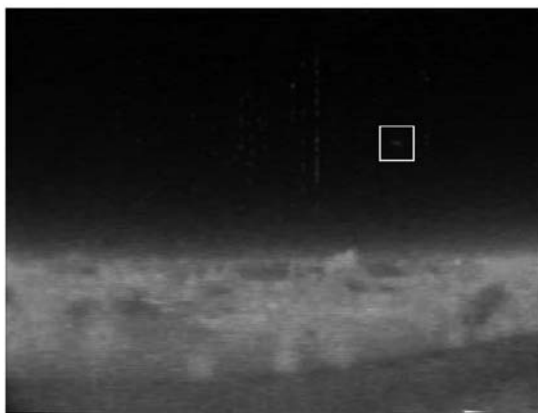
图5 经 Contourlet 变换后的检测结果 ($\alpha = 0.7$)图6 经本文算法处理后的检测结果 ($\alpha = 0.7$)

图7 最终检测结果

虽然 Contourlet 变换和小波变换可以较准确地找到目标的位置,但是检测结果中包含了大量的虚警点,图像边缘的“毛刺”现象比较严重。循环平移 Contourlet 变换不仅很好地利用了 Contourlet 变换的多尺度以及多方向性的特点,而且克服了 Contourlet 变换中缺乏平移不变性的缺点,得到的检测结果仅包含了少量的虚警点,图像边缘的“毛刺”现象也得到了改善,为下一步小目标

的检测打下了良好的基础。与 Contourlet 变换和小波变换相比,本文的算法更适用于红外小目标的检测。

4 结论

提出了一种基于循环平移 Contourlet 变换的红外小目标检测算法。通过对原始红外图像进行循环平移 Contourlet 变换去噪,用原始图像减去去噪后的图像,再利用自适应阈值分割方法得到候选目标点,最后利用目标运动的连续性和一致性实现小目标的检测。实验结果表明,本文提出的方法对红外小目标的检测效果优于一般的 Contourlet 变换法和小波变换法,但单帧检测结果中仍有少量“毛刺”。如何更好地去除此类“毛刺”,则需要作进一步研究。

参考文献

- [1] Barnett J. Statistical Analysis of Median Subtraction Filtering With Application to Point Target Detection in Infrared Backgrounds [C]. *SPIE*, 1989, **1050**:10.
- [2] Otazo J J, Tung E W, Parenti R R. Digital Filters For infrared Target Acquisition Sensors [C]. *SPIE*, 1980, **238**:78-90.
- [3] Tom V T, Peli T, Leung M. Morphology-based Algorithm for Point-target Detection in Infrared Backgrounds [C]. *SPIE* 1993, **1954**:2-11.
- [4] 吴文怡, 吴一全. 基于 Contourlet 变换的红外弱小目标检测方法 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1):136.
- [5] 冯鹏, 魏彪, 潘英俊, 金炜. 一种循环平移的 Contourlet 变换去噪新方法 [J]. *计算机仿真*, 2006, **23**(9):116-119.
- [6] Do M N, Vetterli M. Contourlets: a Directional Multiresolution Image Representation [C]. *IEEE Int. Conf on Image Processing Rochester*, 2002:357-360.
- [7] 王文龙, 韩保君, 张红萍. 一种海空背景下红外小目标检测新算法 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(3):725-728.
- [8] 于劲松, 万九卿, 高秀林. 红外图像弱小点目标检测技术研究 [J]. *兵工学报*, 2008, **29**(12):1518-1521.
- [9] 荣健, 申金娥, 钟晓春. 基于小波和 SVR 的红外弱小目标检测方法 [J]. *西南交通大学学报*, 2008, **43**(5):555-560.
- [10] 李燕苹, 谢维信, 裴继红. 基于小波变换的红外弱小目标检测新方法 [J]. *红外技术*, 2006, **28**(7):419-422.
- [11] 闫敬文, 屈小波. *超小波分析及应用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008:159-173.