

红外点目标检测的小波变换方法研究*

过润秋¹ 李大鹏¹ 林晓春²

(1 西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071)

(2 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘要 在对红外图像目标特性及背景特性分析的基础上,提出了基于小波变换高频子图像处理算法及基于小波变换的区域相关算法,着重解决当目标距离成像系统较远时的点目标检测问题.实验结果表明:将区域相关算法和图像局部区域阈值的自适应滤波检测技术相结合,可显著提高红外点目标检测概率,实现较远距离的点目标检测.

关键词 红外图像;目标检测;小波变换算法

中图分类号 TN219;TP751 **文献标识码** A

0 引言

在红外图像中,由于小目标在距离远呈现点状,无明显形状信息,因此在成像平面上信息量极少(只占几个像素点)^[1].远距离的红外成像目标通常隐藏在高度结构化的背景杂波中,目标信号的幅值相对于背景杂波和噪声很弱,具有很低的信噪比.它的这种空间特性使得传统的利用目标大小、形状以及特征的图像处理技术无法得以应用.因此,较远距离成像的点目标检测问题是近年来红外图像检测与处理研究的热点和难点^[2].由于点目标的检测是判断图像中的孤立奇异点,小波变换成为近年来对时变信号处理的有利工具,它突破了传统的信号分析手段——傅里叶变换的限制,实现了对信号时频分析和多分辨率的分析^[3].

本文主要研究利用小波变换的 Mallat 快速算法对较远距离红外成像的点目标检测.1989年 Mallat 在多分辨率分析的基础上,给出了计算小波系数的快速递推的 Mallat 算法^[4].该方法主要是利用多分辨率分析(MRA)中空间塔式分解的多分辨率特性,将小波系数计算与滤波器技术相结合,构造了一个计算小波系数的塔式分解算法,大大简化了小波系数的计算,因而为小波理论的应用提供了捷径^[5].

本文在对红外图像目标特性及背景特性分析的基础上,对目标的小波物理特性的研究,给出了基于小波变换图像处理的不同实现方法.利用小波和图像局部阈值的自适应检测算法相结合,取得了红外图像点目标检测较好效果.

1 小波变换的 Mallat 方法

本文主要采用 Mallat 小波变换方法实现红外图像的处理. Mallat 提出了小波变换的快速分解与重构算法,构造了两个一维滤波器实现对二维图像的快速小波分解,再利用两个一维重构滤波器实现图像的重构.引入无穷矩阵 $H_r = (H_{k_1, m_1})$, $H_c = (H_{k_2, m_2})$, $G_r = (G_{k_1, m_1})$, $G_c = (G_{k_2, m_2})$. 其中 $H_{k, m} = h_{k-2m}$, $G_{k, m} = g_{k-2m}$, H 和 G 为两个一维镜像滤波算子,其下标 r 和 c 分别表示对矩阵的行操作和列操作,则 Mallat 算法在 $j-1$ 尺度中可表示为

$$\begin{cases} C_j = H_r H_c C_{j-1} \\ D_j^1 = H_r G_c C_{j-1} \\ D_j^2 = G_r H_c C_{j-1} \\ D_j^3 = G_r G_c C_{j-1} \end{cases} \quad (j=0, -1, \dots, -J) \quad (1)$$

与式(1)相对应的二维图像的 Mallat 重构算法为

$$C_{j-1} = H_r^* H_c^* C_j + H_r^* G_c^* D_j^1 + G_r^* H_c^* D_j^2 + G_r^* G_c^* D_j^3 \quad (j = -J, -J+1, \dots, -1) \quad (2)$$

式中 H^* , G^* 分别为 H 和 G 的共轭转置矩阵. 在小波变换中,图像分解成逼近图像和细节图像之‘和’.算子 $H_c H_r$ 相当于二维低通滤波器,因此 C_j 是 C_{j-1} 的低频成分.当原始图像 $f(x, y)$ 分解成 C_j , D_j^1 , D_j^2 和 D_j^3 时, C_j 是原始图像在 2^{-j} 分辨率上的近似(“逼近图像”), D_j^e ($e = 1, 2, 3$) 则代表这种近似的误差(即图像的高频部分或“细节图像”部分), D_j^1 对应于垂直方向上的高频成分,即水平的边缘信息, D_j^2 对应于水平方向上的高频成分,即垂直的边缘信息, D_j^3 则对应对角方向上的高频成分. Mallat 小波分解及重构算法把任何二维图像 $f(x, y) \in L^2(R)$ 都可分解为分辨率为 2^{-N} 下 $f(x, y)$ 的低频部分和分辨率为 2^{-j} ($-1 \leq j \leq N$) 下 $f(x, y)$ 的高频部分,并且,可以由以上各部分完全重构原始图像.

*陕西省自然科学基金(编号:2002F13)资助项目
Tel:029-88201660 Email:yhao@xidian.edu.cn
收稿日期:2003-05-16

2 基于小波变换的高频子图像处理算法

小波变换对信号奇异点非常敏感,因而对突变信号的分析尤为有效,它已成功的应用于边缘检测和时变信号的检测. 点目标红外图像是由背景和噪声以及点信号的叠加组成. 背景信号和噪声以及点信号的光滑度是不一样的,即它们的奇异性是不同的,根据信号奇异性的性质,奇异性不同的信号的小波变换在不同的变换尺度下,其小波变换的局部模极大值的变化规律是不同的. 单帧红外图像点目标检测的整个算法由三部分组成:红外图像预处理,目标识别,目标分割并标注.

为了检测和识别红外序列图像中的运动目标,必须对红外图像进行预处理,即提取出可能目标,尽量减少图像中噪声点,为下一步运动目标识别作好充分的准备. 我们所关心的像素点是那些灰度奇异点,只有这些点才可能是目标点,其中也包括强噪声干扰,这些信号主要包含高频分量. 红外图像是热辐射图像,对温度极为敏感,温度场是非线性分布的,但同一行的温度差很小,并且相邻行间有很强的相关性. 我们将红外图像的像素灰度减上一行或同一行的灰度值的均值,将有效的抑制大气温度场的非线性分布、大的云团和大部分地物,进行增强对比度的处理可更大地提高图像的信噪比. 实验表明,通过上述处理,图像中只有为数不多的可能目标点,达到了红外小目标图像预处理的效果.

红外背景呈现大面积的连续分布状态,在图像灰度空间上具有较大的相关性^[6],而目标的红外辐射与其周围背景的辐射强度无关,且一般高于背景的辐射强度. 因此,可以认为背景处在图像的低频部分,目标处在图像的高频部分,因此可以利用小波变换将红外图像低频部分和高频部分相分离,然后对各高频分量进行分析,可以将目标检测出来. 这种基于小波变换的高频子图像处理算法如下:

1) 确定小波变换的尺度. 这里使用二进小波变换,考虑到红外点目标通常占有很少像素,所以仅做一次分解.

2) 对图像进行小波分解,得到小波系数子图像 LL, HL, LH 和 HH 四个部分. 设小波分解后得到的高频图像为 $f_{i,j}(x,y)$, $i=1,2,3$, 分别表示高频分量 HL, LH 和 HH 部分.

3) 对同一层的高频图像进行分割处理,将高频子图像中的背景噪声近似看作是高斯白噪声,使用局部门限法对目标和背景进行分割.

阈值可设定为一个灰度值,它可区分目标信号

与非目标信号的分界点. 如果将阈值设定为固定值,认为高于阈值的点是目标点,低于阈值的点是非目标点. 由于某些图像局部区域灰度较集中,从而使得漏检(非目标点判为目标点)的概率大为增加. 与固定阈值比较,自适应阈值克服了以上的缺点. 其基本思想是如果一个点和其一个领域内的点的均值比较,如果他们的差大于我们设定的一个值,便把它判为目标点,否则不是.

设当前的检测点是 $f_{i,j}(x,y)$, 阈值均值为 $T_1 = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in S} f_{i,j}(x,y)$, 其中 S 是 $f_{i,j}(x,y)$ 点的一个领域, N 是领域内的点的个数. 判断 $|f_{i,j}(x,y) - T_1| > T_2$ 是否成立 ($T_2 = \lambda \text{var}(f_{i,j})$ 是根据虚警率可调的阈值). 如果成立 $r_{i,j}(x,y) = 1$, 否则置零,直到满足要求为止. 组合统一层的二值化图像为 $d_j(x,y) = r_{1,j}(x,y) + r_{2,j}(x,y) + r_{3,j}(x,y)$. 根据检测的目标个数,结合一定的虚警率和检测概率,调整固定设定值,重复直到处理完整个图像为止.

我们采用了自适应滤波的方法,根据一定的虚警率,对不同的图像都可确定合适的方差系数和域值. 由于此方法灵活地考虑了图像本身的幅度变化,所以既降低了虚警率,又保证了较高的检测概率. 一般来说,自适应算法的性能比固定阈值算法的性能优越,但是它是以计算复杂度为代价.

4) 将自适应滤波后的垂直高频和水平高频组合,然后在组合图像中用模板进行搜索,模板的大小取 5×5 的单位矩阵,累积和最大的区域被认为是目标所在的区域,确定中心点,然后在原始图像中标出目标.

本文采用实测的红外图像序列进行测试,背景中存在红外云团. 实验序列的技术参量为:

- a) 小目标尺寸为 2 ~ 4 像素, 红外图像尺寸为 128×128 像素;
- b) 红外图像中存在小目标,偶尔出现目标丢失,目标作近似匀速直线运动;
- c) 小目标在图像中运动速度为 0 ~ 2 像素/帧;
- d) 图像中信噪比约为 2, 背景中存在起伏及红外云团.

当实验中选用 Daubechies 正交小波时,高频分量统计特性结果如表 1 所示.

表 1 高频分量统计特性 ($a=5$)

高频分量	均值	标准方差
LH	0.0060	0.0135
HL	-0.0022	0.0102
HH	-1.5797e-004	0.0088

图 1(a) 是原始图像. 图 1(b) 是对原图像对比度增强后的图像, 我们可发现目标位于云层中. 利

用图像非线性校正得到图1(c),抑制了大部分云层.从表1的高频分量统计特性中,我们发现图1(c)小波变换后的高频子图像 HL, LH 分量在目标处出现了大幅度的振荡,在其他位置作零值附近极小范围内的波动,由于 HH 部分在整个图像作杂乱无章的振荡,故仅对 LH 和 HL 两部分进行处理.检测到的点目标位置坐标为: $PI = 62, PJ = 112$. 由于目标轨迹的连续性,因此相邻两帧的目标位置是接近的,而虚警点位置具有随机性,这样我们可以用多帧检测的方法进一步剔除虚警点.

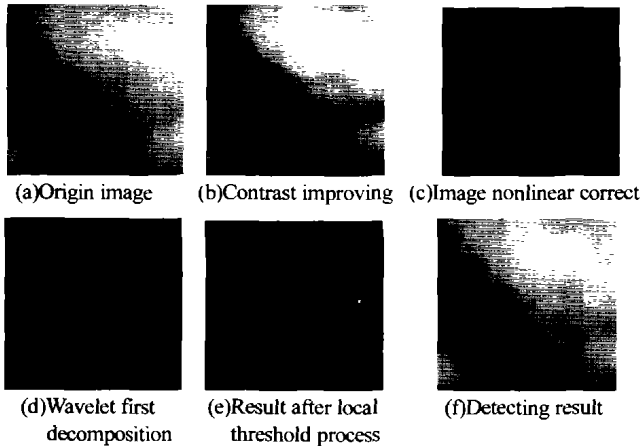


图1 基于小波变换的高频子图像处理算法

Fig. 1 High-frequency sub-image process algorithm based on wavelet transform

3 基于小波变换的区域相关算法

进一步小波变换区域相关算法的效果,该算法是利用原始图像在小波变换和不同尺度变化中,信号和噪声表现出的不同特性来提取背景信号,进而利用原图和背景信号的差图检测出目标点信号,完成红外点目标的检测.此算法涉及到信号奇异性的一些理论和自适应阈值的算法概念.小波变换将全部时频空间划分为大小不同的一系列子空间,小波变换的系数反映了在相关空间上的能量强弱.对一般的加强高斯白噪声,其能量均匀散布在时频空间各处,表现为幅值的杂散系数.对于图像中有较多能量,较大面积的低频区(一般为背景),它们的能量在时空域的粗分辨率下的低频空间上积累起来.图像的边缘,强奇异点等信号,它们含有较多的频率分量,因而在相邻的频率子空间的相应位置处,都存在有较强相关性.

从分析可以看出,小波分析对信号进行了多层次、多角度的特征提取,不同的图像信息,在小波分析的不同级数的系数域上,表现出不同的分布特征,基于小波的图像滤波就是基于这样的前提展开思路的.这样一副空域图像就按照这样的塔式分解投影到不同的尺度空间中,我们便可以按照背景信号和

噪声在相邻的子带间所表现出的不同相关性这一特点来进行背景信号、噪声的分析.

多尺度相关滤波算法如下:设 $W(m, n)$ 为 m 尺度上的信号的离散子波变换系数,取相邻尺度的变换值进行相关计算.定义相关值为 $Corr2(m, n)$,噪声在各尺度的方差为 δ_m .算法有两个重要步骤,其一是计算相关量 $Corr2(m, n)$,并做能量归一化,然后直接与 $W(m, n)$ 相关值来决定变换值 $W(m, n)$ 的取舍,其二,以噪声在各尺度上的方差作为终止叠代的标准.

整个算法流程可表示为:

1) 求各尺度与相邻尺度的 $Corr2(m, n)$, 相关量 $Corr2(m, n) = W(m, n) \cdot W(m+1, n)$, 并求噪声在各尺度的方差 δ_m .

2) 归一化 $Corr2(m, n)$ 到 $W(m, n)$ 的能量上去,归一化后的相关值定义为 $NewCorr2(m, n)$, $NewCorr2(m, n) = Corr2(m, n) \sqrt{PW(m)/Pcorr2(m)}$.

其中 $PW(m) = \sum_n W(m, n)^2$, $Pcorr2(m) = \sum_n Corr2(m, n)^2$

3) 比较归一化相关值 $NewCorr2(m, n)$ 与 $W(m, n)$ 大小,若 $|NewCorr2(m, n)| > |W(m, n)|$,则认为 n 点处的小波变换值是由背景边缘引起的.将 $W(m, n)$ 赋给另一缓冲区 $Wf(m, n)$ 的相应位置,并将 $W(m, n)$ 置零, $Corr2(m, n)$ 置零;否则,就认为 $W(m, n)$ 是由噪声引起的,将 $W(m, n)$ 保留,记未被置零的点的总数为 num .

4) 设 $W(m, n)$ 中保留的变换点主要是由噪声引起的(与实际是符合的),那么,定义尺度 m 上噪声标准方差为 δ_m^* ,且 $\delta_m^* = MAD/0.6745$ (由 Donohor 和 Johnstone 提出^[7]),其中 MAD 是 $HH_i (i=1, 2, 3)$ 子带小波系数幅度的中值.若 $\delta_m^* < \delta_m$,则认为仍有图像边缘没有找到,返回2),重复2), 3)步,直到 $\delta_m^* > \delta_m$.

可见,上述算法的核心是通过比较 $W(m, n)$ 与 $NewCorr2(m, n)$ 的绝对值的大小来抽取信号图像的边缘信息,并以噪声方差 δ_m 作为一个域值来终止叠代过程.

通过对变换的前几级采用多尺度滤波法,将可能的噪声点和点目标去除(点目标由于其在相关性上的表现趋同于噪声,因而滤波算法同样消隐了点目标)而将大面积的低频背景和边缘信息在变换的各级保留了下来,这样,再经过小波的反变换,就可以得到保留背景信息及其边缘的预处理图像.进一步将原图与得到的处理的图像进行相差,可以将背景抑制,从而得到只包含点目标和噪声的图像.接下来,可再进行的就是将目标分割并标注出来,即目

标的检识^[8]. 目标检识包括两部分,一是自适应阈值法,进行点目标和噪声分离,残差图中,目标得到了增强,同时背景受到了有效的抑制;二是目标的标

注. 实验图像是云层中运动的红外小目标的图像序列,图像大小为 128×128 ,目标的信噪比小于 2. 图 2 完全反映了上述过程,可以看出其结果是理想的.

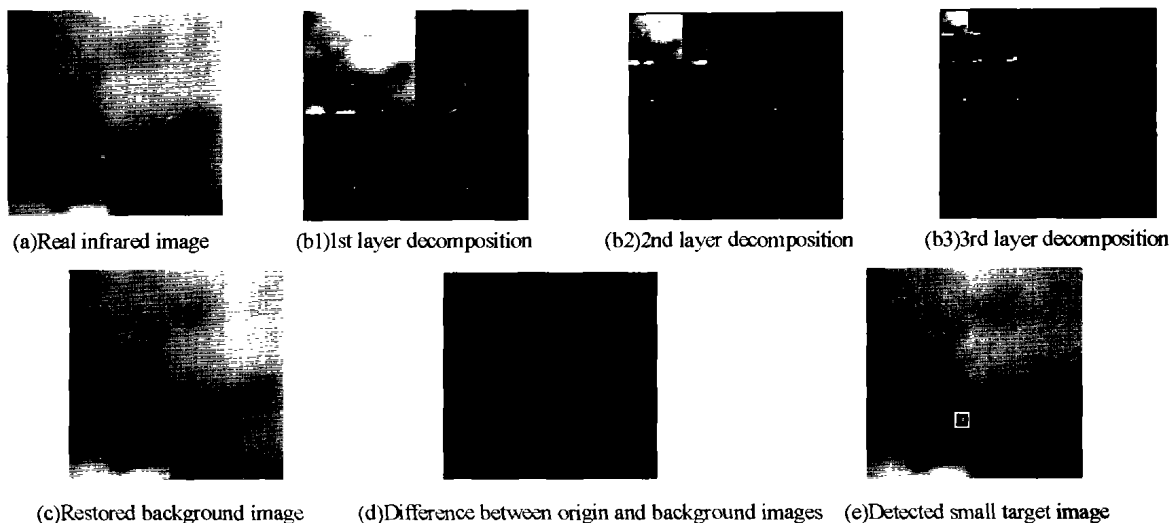


图 2 红外图像及区域相关算法处理结果

Fig. 2 Results of infrared image and zone relative method

4 结论

本文研究了距离较远的点目标检测和处理方法. 根据点目标红外特征图像和小波物理特性,利用小波和图像局部阈值的自适应检测算法相结合,取得了点目标检测较好效果和较高的检测率(本文用 20 帧图像,正确检测出 17 帧. 相应仅用小波变换的高频子图像处理算法时,仅正确检测 13 帧). 比较可见:利用二维小波变换来提取点目标信号不仅是可行的,而且不需要图像的平稳和较大的信噪比. 同时,如果利用小目标帧间信息还可获得更高的检测率. 这些结果在目标多帧确认以及目标跟踪中将具有重要的作用.

参考文献

- 1 张弘. 低信噪比下抖动的红外弱小目标的实时检测. *激光与红外*, 2001, **31**(4): 225 ~ 227
Zhang H. *Laser and Infrared Technology*, 2001, **31**(4): 225 ~ 227
- 2 Charlene E C, Jerry Siliverman. Optimization of point target tracking filters. *IEEE Transactions on Aerospace and*

Electronic Systems, 2000, **36**(1): 15 ~ 25

- 3 Mallat S G. Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7): 674-693
- 4 Mallat S G. *A Wavelet Tour of Signal Processing*, San Diego: Academic Press, 1998. 302 ~ 310
- 5 [美]崔锦泰著,陈正兴译. 小波分析导论. 西安:西安交通大学出版社, 1995. 1 ~ 60
Charles K. Chui. *Introduction to Wavelet Analysis*. Xi'an Publishing Company of Xi'an Jiaotong Uni. 1995. 1 ~ 60
- 6 王程. 野外复杂背景下红外图像的目标检测. *红外与激光工程*, 2000, **29**(1): 5 ~ 8
Wang C. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, **29**(1): 5 ~ 8
- 7 Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage. *Biometrika*, 1994, **81**(6): 425 ~ 455
- 8 郑文龙,张涌,汤心溢,等. 复杂背景下红外小目标实时识别方法研究. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(6): 433 ~ 436
Zheng W L, Zhang Y, Tang X Y, et al. *J of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **20**(6): 433 ~ 43

Research on Wavelet Transform Methods in Infrared Small Target Detection

Guo Runqiu¹, Li Dapeng¹, Lin Xiaochun²

¹ School of Electronic Mechanical Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071

² School of Technical Physics, Xidian Univ., Xi'an 710071

Received date: 2003-05-16

Abstract Based on the analysis of the property of target and background, an approach of point targets detection using wavelet transform algorithm of high frequency processing and wavelet correlation algorithm is presented. The technology of point target detection in infrared image sequences will be stressed when the target is far from the infrared image sensor. The experiment results have proved that the combination of wavelet correlation algorithm and part adaptive threshold can improve obviously the probability of the point target detection, and implement detection of point target who is far from the infrared image.

Keywords Infrared image; Target detection; Wavelet transform algorithm

Guo Runqiu was born in 1960. Now she is a professor of electric mechanical engineering school of Xidian University. Her interesting fields are in automatic control technology and method, intelligent control, as well as signal measurement and process.