

基于融合技术的小波变换的弹孔检测算法

罗杰, 张之明, 付凯城, 陈毅雨
(武警工程大学信息工程系, 西安 710086)

摘要: 针对差影法弹孔目标检测存在过检、漏检、易受噪声干扰和对成像条件要求高等问题, 提出了一种基于融合技术的小波变换的弹孔目标检测算法。在小波域中, 对低频和高频子图像分别采用不同的融合规则修正弹孔目标的小波变换系数, 加大目标的小波变换系数, 减小或者置0非目标的小波变换系数, 再分别进行模板大法和小波降噪处理, 最终经小波逆变换后得到只包含弹孔目标的图像。实验结果表明, 该算法用于弹孔目标检测, 不仅克服了差影法存在的易受干扰的问题, 而且弹孔边缘清晰、连续, 提高了弹孔检测的准确性和精确性。

关键词: 目标检测; 小波变换; 图像融合; 小波降噪; 融合规则

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)09-0019-05

Bullet Holes Detection Algorithm Based on Wavelet Transform Using Fusion Rules

LUO Jie, ZHANG Zhi-ming, FU Kai-cheng, CHEN Yi-yu
(Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: The bullet holes detection using image difference technology has the problems of over-detection, leak-detection, being sensitive to noise interference and harsh request for imaging condition. A bullet hole object detection method based on wavelet transform using fusion rules was proposed to overcome the limitations. In the wavelet domain, different fusion rules were applied to the low-frequency and the high-frequency sub-images to revise the wavelet transform coefficients, for increasing the object coefficients while decreasing or resetting the non-object coefficients. Then, it used the maximum points to the low-frequency coefficient and reduced the noise of high-frequency coefficients. The final bullet holes images were obtained through invert wavelet transform. Experimental results show that: the method can overcome the shortcomings of the image difference method, obtain images of bullet holes with clear edge, and improve the veracity and precision of the bullet holes detection.

Key words: object detection; wavelet transform; image fusion; image denoising; fusion rule

0 引言

弹孔识别是基于图像处理的自动报靶系统中的关键步骤, 它是目标检测研究的一类重点问题, 即在复杂背景下检测目标^[1-2]。目前已有的弹孔检测算法大致分为3类: 1) 基于弹孔灰度特征的识别方法, 根据弹孔区域灰度特性, 采用差影检测、数学形态学运算、阈值分割等方法提取弹孔目标^[3-5], 这类方法适用于背

景简单且与弹孔目标灰度特征差异大的情况, 当图像中背景与弹孔对比度较低时, 由于弹孔特征不显著, 加上噪声的影响, 采用该类方法往往得不到理想的结果; 2) 基于模板匹配的方法, 模板匹配识别弹孔算法利用系统预存的弹孔模板对靶图像进行模板匹配, 这种方法适用于检测具有明显特征的目标^[6], 对于孤立弹孔识别效果较好, 但是由于弹孔形状和大小不规律, 需要准备大量的弹孔模板^[5]; 3) 基于训练和学习的识别方法, 即以不同环境下的弹孔图片和非弹孔图片为样本进行训练, 生成级联分类器, 最后用训练好的分类器进行模式匹配, 识别出弹孔^[6], 采用这种方法的优点在于不依赖弹孔的先验知识和参数模型, 可避免不精确和不完整的知识造成的错误, 扩大了检测的范围, 但是识

收稿日期: 2015-12-24

修回日期: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61402529); 陕西省自然科学基金研究计划资助项目(2015JQ6266)

作者简介: 罗杰(1992—), 男, 河南周口人, 硕士生, 研究方向为图像处理。

别效果受限于训练的样本图片范围,而且训练需要大量时间。

现有弹孔检测方法,对靶纸图像以及弹孔的成像条件要求很高,极易出现误检或者漏检的情况,而且检测得到的弹孔目标的边缘模糊、不连续,严重影响了识别的精确性和准确性。因此,本文提出了一种基于融合技术的小波变换的弹孔目标检测算法,利用小波变换尺度、多分辨率分析特点处理图像^[7-9],在抑制噪声的基础上得到了边缘连续、清晰的目标图像,增加了目标定位的精确度。

1 算法基础

1.1 基于区域的融合规则

融合规则的选择是图像融合算法的关键,融合规则一般分为基于像素的融合规则和基于区域的融合规则^[10-11]。根据实际应用,本文采用“基于区域”的融合规则。以分解后各层小波系数计算区域特性量测值,区域均值的计算方法如下所述。

区域均值为

$$E_j^\varepsilon(n, m) = \frac{1}{L \times K} \sum_{n' \in L, m' \in K} f_j^\varepsilon(n + n', m + m') \quad (1)$$

式中:低频带时, $\varepsilon = 1$, 高频带时, $\varepsilon = 1, 2, 3$, 分别表示水平、垂直和对角 3 个方向; j 表示分辨率; $E_j^\varepsilon(n, m)$ 表示分辨率 j 上、 ε 方向上, 以 (n, m) 为中心位置的局部区域均值; L, K 表示局部区域的大小 (3×3 或 5×5); f_j^ε 为在 j 分辨率下、 ε 方向上的小波系数。

1.2 基于小波变换的多尺度边缘处理(模极大值方法)

设二维平滑函数 $\theta(u, v)$ 满足 $\theta(u, v) \geq 0$, $\iint_{R^2} \theta(u, v) dudv = 1$, $\lim_{u, v \rightarrow \pm\infty} \theta(u, v) = 0$, 记

$$\theta_2(u, v) = \frac{1}{2^{2j}} \theta\left(\frac{u}{2^j}, \frac{v}{2^j}\right) \quad (2)$$

则对任意的 $f(u, v) \in L^2(R^2)$, $(f * \theta_2)(u, v)$ 表示 $f(u, v)$ 经 $\theta_2(u, v)$ 平滑后的图像, 在尺度 2^j 下, 梯度矢量的模为

$$Mf(2^j, u, v) = \sqrt{|W^1 f(2^j, u, v)|^2 + |W^2 f(2^j, u, v)|^2} \quad (3)$$

梯度方向与水平方向的 u 的夹角(相角或幅角)为

$$Af(2^j, u, v) = \arctan\left(\frac{W^2 f(2^j, u, v)}{W^1 f(2^j, u, v)}\right) \quad (4)$$

1.3 基于小波变换的高频子图像降噪算法

二维图像经小波变换后, 噪声和图像的细节信息分别集中于高频区域中幅值较小的小波系数和幅值较大的小波系数。根据这个特点, 采用一种自适应的针对小波变换高频区域的降噪算法。对不同的的小波系数, 乘以与自身小波系数绝对值相关的且值小于等于

1 的降噪因子, 该因子随着小波系数值的增大而指数减小。具体的实现过程为

$$F(x, y) = \begin{cases} w(x, y) & |w(x, y)| \geq 3\sigma \\ 0 & |w(x, y)| \leq a \\ w(x, y)k & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $w(x, y)$ 为图像小波分解后的高频系数; $F(x, y)$ 为降噪后的小波系数; σ, a 分别是不同的小波分解层, 不同方向上高频小波系数的方差和均值。该算法能够针对不同的小波分解层、不同的高频小波系数乘以一个降噪因子, 使得在去除图像噪声的同时, 保留一些有用的细节信息。

2 弹孔识别算法

不同尺度上的小波变换都提供了原图像一定的边缘信息, 将图像小波变换这个特点应用于弹孔目标的检测时, 在大尺度下, 确定弹着点的大致边缘, 在小尺度下, 进一步精确定位弹孔边缘。

小波变换虽然能够抑制图像中大部分的噪声, 但是图像中目标的真实边缘往往与许多噪声点混杂在一起, 特别是小波分解后的高频区域的 HH 区域受到噪声的影响比较严重, 导致检测到的目标图像的边缘细节信息受干扰大、边缘模糊、不连续。本文在进行小波逆变换之前, 对低频进行形态学滤波, 对高频区域进行小波降噪和模极大值处理, 再进行小波逆变换, 有效抑制高频噪声, 得到清晰、连续的目标边缘。

基于以上理论, 弹孔目标检测算法的基本思路如下: 首先对二维图像进行 N 层小波分解, 将图像分为 $3N$ 个包含图像细节信息对应图像的目标边缘的高频带和一个包含图像全局信息的低频带; 然后对低频部分的目标区域进行粗判断, 结合高频部分目标区域进行细判断, 根据低高频部分判断的结果, 加大图像目标的小波变换的系数, 将非目标变换系数减小或者置 0; 然后对高频子图像的小波系数进行小波降噪, 利用模极大值方法提取弹孔边缘, 最后对处理过的子图像做小波逆变换, 得到只包含弹孔目标的检测图像。在抑制噪声的基础上得到边缘连续、清晰的目标图像, 增加了目标定位的精确度, 图 1 所示为算法的流程。

算法的具体思路如下所述。

1) 对不存在弹孔目标和包含弹孔目标的两幅图像分别进行小波分解, 建立相应的小波分解数据。

2) 在小波分解的各层, 对两幅图像对应区域不同频带的小波分解的系数进行融合判断, 融合规则采用局部领域法, 领域窗口大小为 3×3 , 以领域均值作为研究特性量, 来改善存在弹孔目标图像区域的小波变换系数, 突显弹孔目标的边缘和位置。具体融合规则

分为低频部分融合规则和高频部分融合规则。

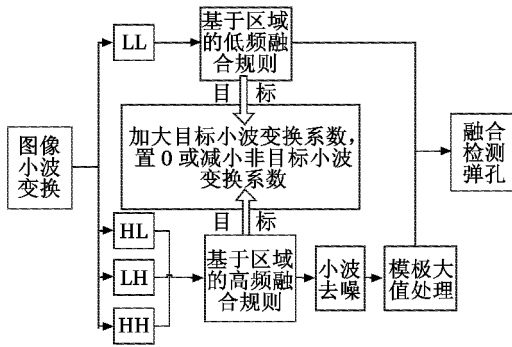


图1 目标检测算法流程

Fig.1 Flow chart of object detection algorithm

低频部分融合规则:由于低频部分包含了图像的全局信息,是小波变换重构的基础,因此,对于这部分主要是突出弹孔目标边缘的连续性。低频部分,计算两幅图像变换后的小波系数的领域均值和全局均值,如果对应领域的均值之差的绝对值小于等于全局均值之差的绝对值,表示该领域内不存在目标信息,则对存在弹孔目标的图像对应的变换系数置0;否则,表示当前系数为目标系数,用领域最大值修正存在弹孔目标的图像变换系数。

高频部分融合规则:首先依据对应的低频信息进行判断,如果低频系数为0,表示伪边缘,将存在弹孔目标图像的相应的各个高频系数置0;否则,分别获取不存在目标图像在对应领域小波变换系数在各个高频系数的领域均值和包含目标图像在对应领域中心的高频系数值,再进行如下判断:在对应的各高频,如果均满足该高频系数大于某一个阈值而以该高频系数位置为中心的领域均值却小于该阈值,则该系数为目标变换系数,保持不变;否则系数置0。

整体的融合规则的流程如图2所示。

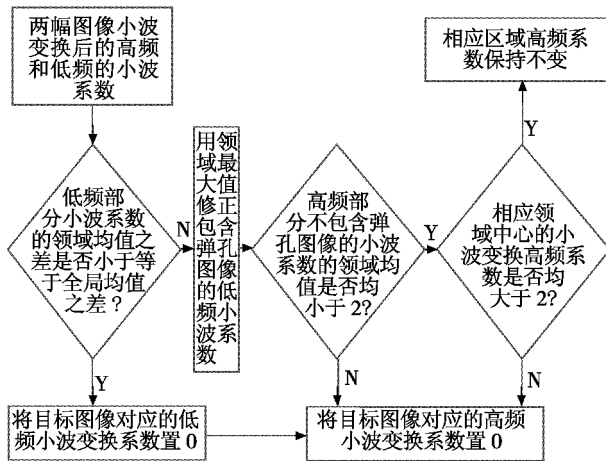


图2 算法融合规则的流程

Fig.2 Flow chart of this algorithm's fusion rules

3) 对高低频子图像进行降噪:对小波分解的低频图像采用形态学滤波,对高频图像采用上述描述的小波降噪算法进行降噪处理。

4) 利用上述模板大值方法对经过小波去噪后的高频子图像提取边缘信息,并进行融合。

利用式(2)、式(3)分别计算3个方向的高频子图像 LH,HL 和 HH 子图像中小波变换的模的局部极大值点,这些点也称为小波变换模极大(点),即图像 $f(u,v)$ 在尺度 2^j 下的边缘点,从而得到了相应的边缘图像 G_{LH}, G_{HL} 和 G_{HH} ,然后将边缘图像对应的小波系数按照加权平均融合算子进行融合,即

$$D_H(i,j) = \omega_{LH} * D_{LH}(i,j) + \omega_{HL} * D_{HL}(i,j) + \omega_{HH} * D_{HH}(i,j) \quad (6)$$

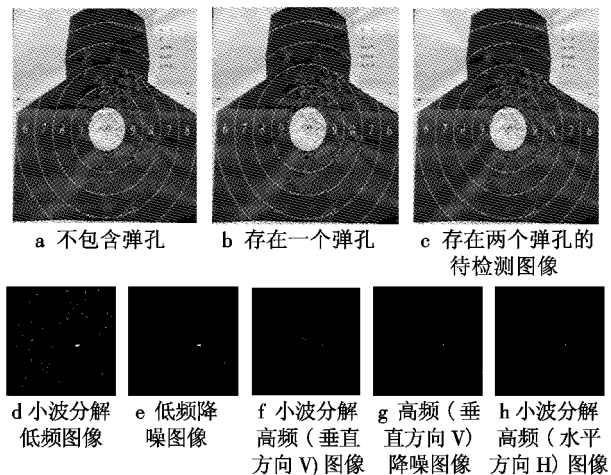
式中: $D_{LH}(i,j), D_{HL}, D_{HH}$ 表示高频子图像的小波系数; $D_H(i,j)$ 表示融合后的小波系数; ω 对应各方向高频子图像的权重,权重之和为1。

5) 弹孔目标图像重构。将3个方向的高频融合子图像作为小波重构时3个方向的高频子图像,与处理后的低频子图像进行小波逆变换,重构得到融合后图像。

由于图像信息融合时,需要处理的数据量非常大,因此算法在设计时,为了减少弹孔目标检测识别的时间,提高算法的实时性,在重构图像时,丢弃不包含目标的前一幅图像,只对存在目标图像的小波变换进行逆变换恢复图像,大大提高了算法的效率。

3 实验结果与分析

为了验证算法的有效性和准确性,针对多幅尺寸为256级的灰度图像进行了差影算法和本文算法的对比实验。在具体实验中,选用Harr小波对图像进行变换和逆变换,分解层数为1层。分析经过小波变换后图像的高频系数发现,在本实验中,高频部分融合规则中的判断阈值采用2最为合适。实验中算法各步骤的中间处理结果及弹孔最终检测结果如图3所示。



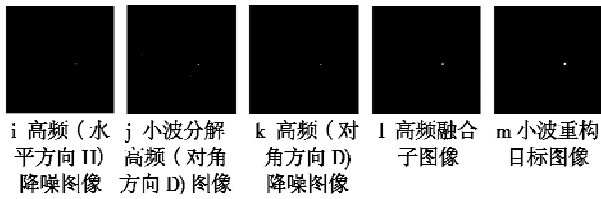


图 3 弹孔识别结果图

Fig. 3 Object detection image using our algorithm

图 3 分别给出了改进的小波变换融合检测弹孔算法中各关键步骤的处理结果及算法最终的弹孔识别结果。从图中可以看出:经过低频、高频融合规则处理得到的小波分解高、低频子图像虽然去除了大部分的目标无关点,但分别不同程度地存在少量背景干扰噪声点,如图 3d、图 3f、图 3h、图 3j,分别对小波分解子图像进行形态学滤波和小波降噪后,明显减少了噪声点对弹孔目标的影响,如图 3e、图 3g、图 3i、图 3k,最后将 3 个方向的高频子图像的融合结果(图 3l)作为小波逆变换时高频部分的源图像,小波重构后得到了非常清晰的弹孔目标图像(图 3m)。因此,基于融合技术小波变换的目标检测算法在准确性和精确性方面有了很大的提高。

从图 3 可以看出,利用本文算法进行检测得到的弹孔边缘细节信息丰富,边界定位较高,为了验证算法的精确性,比较了实验中经过区域重心计算得到的目标重心坐标与实际测量的重心坐标(图像分辨率为 256 × 256),比较的结果如表 1 所示。

表 1 弹孔中心位置比较表

Table 1 The barycentre coordinate of experimental and real bullet hole

融合检测图像	检测值/像素	实际测量值/像素
图 3a、图 3b	163, 137	163, 136
图 3h、图 3e	159, 139	158, 140

表 1 中的数据显示,本文算法得到的目标弹孔重心坐标的实验检测值与实际测量值最大相差不超过 2 个像素,表明了算法检测得到的弹孔重心精确度高、目标位置定位准确。

为了验证本文算法的检测效果,将弹孔识别结果分别与采用差影法、单高斯背景建模、混合高斯背景建模得到的检测结果进行对比,结果如图 4 所示。

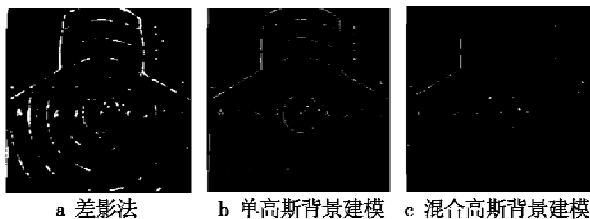


图 4 其他目标检测算法的弹孔识别图

Fig. 4 Object detection image using other algorithms

由图 4 可以看出,差影法检测对靶环轮廓的抑制效果很差,识别的结果中除弹孔外还包含大量的轮廓点和其他背景噪声;背景建模方法虽然很大程度上克服了差影法对靶环线的减除效果差的问题(混合高斯背景建模法检测效果优于单高斯背景建模法),但同样对噪声点的抑制效果差,存在大量过检的与弹孔特性相似的伪弹孔点。由于靶纸的较多噪声点的干扰,加上射击中靶纸的晃动和前后两幅图片之间配准的差异等现实问题,在使用差影法和高斯背景建模识别弹孔时会造成极大影响,严重干扰弹孔检测,识别效果非常不理想。相比之下,图 3 中采用改进的小波变换融合弹孔检测算法利用小波变换多尺度、多分辨率的特点,在多个频段上对子图像进行处理,则能有效地解决弹孔检测中面临的问题,克服差影法和高斯背景建模的缺陷,在检测时成功地将目标与背景以及噪声点的灰度差异增大到极易分割的程度,抑制了大量的噪声,丰富弹孔边缘信息,增加了弹孔位置识别的准确度,取得较为理想的识别结果。

基于小波变换的融合检测算法使用 Matlab 小波工具箱中的函数,算法运行时间主要集中在小波分解和重建过程,而对不同频率上小波系数的处理并未占用大量时间,算法时间复杂度为 $O(N * L)$ 。表 2 所示为对比试验中算法所需要的时间。

表 2 算法运行时间

Table 2 The performance period of different algorithms

算法	平均计算时间/s
差影法	0.06
单高斯背景建模	2.01
混合高斯背景建模	3.41
本文算法	0.92

由表中数据可知,本文算法的运行时间略高于差影法,但是低于单高斯背景建模法和混合高斯背景建模法。

4 结论

针对复杂背景下检测弹孔目标的问题,本文采用基于融合技术的小波变换的目标检测算法,先利用小波变换把图像分解到不同频率段上,结合小波变换的特点,在不同频率上采用不同的融合规则和处理方法,加大图像目标小波变换的系数,将非目标变换系数置 0,然后再进行小波逆变换,从而达到只检测弹孔目标的目的。实验结果证明了该算法的有效性和可行性,与差影检测算法、高斯背景建模算法相比较,本文算法用于弹孔检测,不仅克服了成像条件差的问题,抑制了噪声,而且检测到的弹孔的边缘更加清晰、连续,提高了弹孔目标检测的准确性和精确性。

参考文献

- [1] JIANG H, WANG J J, GONG Y H, et. al. Online multi-target tracking with unified handling of complex scenarios [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(11):3464-3477.
- [2] DU B, ZHANG L P. Target detection based on a dynamic subspace[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(1):344-358.
- [3] 张旭光, 孙巍, 韩广良, 等. 一种弹孔自动识别算法的研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6):747-753. (ZHANG X G, SUN W, HAN G L, et. al. An automatic recognition algorithm for bullet holes[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(6):747-753.)
- [4] 邵亚非, 张利, 吴国威. 一种基于模型的军用靶图序列弹孔检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(11):1075-1078. (SHAO Y F, ZHANG L, WU G W. A model based detection algorithm for sequential target holes [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(11):1075-1078.)
- [5] YE C L, MI H. The technology of image processing used in automatic target-scoring system [C]//Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 2011:349-352.
- [6] 秦斌, 殷晓露, 禹世杰. 实弹射击报靶系统的图像校正[J]. 现代电子技术, 2014, 37(14):109-113. (QIN B, YIN X L, YU S J. Image correction of wireless ultrasound read-out system for shooting practice [J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(14):109-113.)
- [7] 高颖, 王阿敏, 王凤华, 等. 改进的小波变换算法在图像融合中的应用[J]. 激光技术, 2013, 37(5):690-695. (GAO Y, WANG A M, WANG F H, et al. Application of improved wavelet transform algorithm in image fusion[J]. Laser Technology, 2013, 37(5):690-695.)
- [8] EL-TAWEEL G S, HELMY A K. Image fusion scheme based on modified dual pulse coupled neural network[J]. IET Image Process, 2013, 7(5):407-414.
- [9] BHATNAGAR G, WU Q M J, LIU Z. Directive contrast based multimodal medical image fusion in NSCT domain[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(5):1014-1024.
- [10] 孙延奎. 小波变换与图像、图形处理技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2012. (SUN Y K. Wavelet transform and image processing technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.)
- [11] 余汪洋, 陈祥光, 董守龙, 等. 基于小波变换的图像融合算法研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(12):1262-1266. (YU W Y, CHEN X G, DONG S L, et al. The research of image fusion algorithm based on wavelet transform[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(12):1262-1266.)
- (上接第10页)
- [7] 赵真明, 孟正大. 基于加权 A* 算法的服务性机器人路径规划[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(s1):205-207. (ZHAO Z M, MENG Z D. Path planning of service robot based on adding-weight A* algorithm [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(s1):205-207.)
- [8] 周小镜. 基于改进 A* 算法的游戏地图寻径的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011. (ZHOU X J. Research of routing in the game map based on improved A* algorithm [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.)
- [9] 许至杰. 迁移学习理论和算法研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012. (XU Z J. Research about the theories and algorithms of transfer learning [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.)
- [10] 段奕明. 蜂群算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014. (DUAN Y M. Research on bee colony algorithm [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.)
- [11] 邓顺平, 张艳军, 刘会平. 一种基于威胁势场的 A 星路径规划算法[J]. 科技视界, 2014(3):6. (DENG S P, ZHANG Y J, LIU H P. Path planning based on threat potential field and A* algorithm [J]. Science & Technology Vision, 2014(3):6.)
- [12] 陈圣群, 滕忠坚, 洪亲, 等. A* 算法在车辆导航系统中的应用研究[J]. 微计算机信息, 2008, 33:269-270. (CHEN S Q, TENG Z J, HONG Q, et al. Applied research of A-star algorithm in traffic navigational system [J]. Microcomputer Information, 2008, 33:269-270.)

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅