

基于热图像重建及增强的玻璃幕墙结构胶损伤区域识别方法*

陈玉明^{1,2} 林金帆³ 任则铭³ 陈俊皓³

(1.工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 510610 2.智能产品质量评价与可靠性保障技术工业和信息化部重点实验室, 广东 广州 510610 3.华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针对现有玻璃幕墙结构胶损伤热波检测技术存在热图像序列数据量大、有效信息占比少、分辨率低、噪声大等问题, 提出利用单列位置的数据重建、基于小波变换的图像重构、采用维纳滤波的图像增强和基于损伤区域识别规则的热波定位方法完成玻璃幕墙热图像序列的处理及损伤区域的识别。实验结果表明: 小波变换技术利用自适应阈值系数可有效降低热图像高频分量中噪声成分, 保留热图像特征; 维纳滤波采用 3×3 模板进一步平滑图像, 确保热图像中大部分重要信息; 损伤区域识别率达 93.7%。

关键词: 玻璃幕墙; 热图像重建; 热波检测; 小波变换; 损伤区域识别

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2021)02-0009-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2021.02.009

0 引言

玻璃幕墙由玻璃面板及其背面的支承结构通过结构胶粘合而成, 用于建筑外墙围护, 虽不具有承载作用, 但可以保护建筑内部结构, 为住户提供舒适的内部环境。玻璃幕墙工作环境变化波动大, 特别是高层玻璃幕墙, 风速增加工作载荷。长时间工作后, 玻璃幕墙胶接处可能产生损伤。一旦损伤严重, 会造成玻璃幕墙脱落或破碎, 对行人和公共环境造成恶劣影响。玻璃幕墙结构胶损伤区域识别通常采用人工目视法、敲击法和拉伸测试法。其中人工目视法和敲击法依据检测人员经验, 检测效率低、误差大; 拉伸测试法需破坏抽检区域, 取出结构胶进行拉伸实验测试结构胶性能。玻璃幕墙结构胶损伤区域识别亟需无损检测手段。

本文针对玻璃幕墙热波检测过程中的热图像序列时频域处理, 设计基于热图像重建及增强的玻璃幕墙结构胶损伤区域识别方法, 提出基于单点定位的数据重建算法、基于小波变换和维纳滤波的图像处理以及损伤区域识别规则, 达到降低图像噪点、增强特征细节和识别缺陷特征的目的, 从而提高热波检测的效率与准确度。

1 玻璃幕墙结构胶热波检测平台

玻璃幕墙结构胶热波检测平台主要由热像仪、扫描平台、线形光激励源和上位机等组成, 如图1所示。

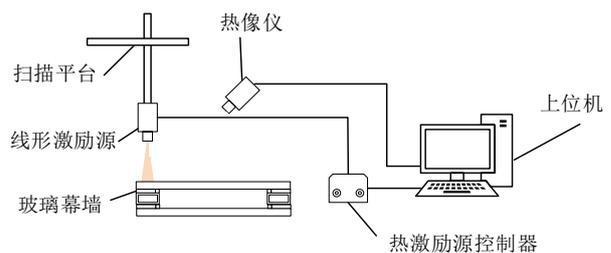


图1 玻璃幕墙结构胶热波检测平台

热像仪记录并存储红外辐射的分布情况, 输出热图像序列和相关实验数据。线形激励源选取一字型线形近红外激光器, 配合扫描平台实现对结构胶粘结区域的加热^[1]。上位机接收热像仪输出的热图像序列, 并对其进行图像处理, 包括热图像重建、热图像增强和损伤区域识别等。

玻璃幕墙结构胶损伤区域识别过程中, 线形近红外激光器发出的近红外激光到达玻璃表面, 其中少部分被玻璃吸收, 大部分透过玻璃到达结构胶表面并被结构胶吸收, 在粘结区域形成直射热波。假设热激励

* 基金项目: 广东省科技计划项目(2019B151502057、2019B010154002); 广州市科技计划项目(201902010024)。

能量均匀一致, 由于直射热波在结构胶中迅速衰减, 无法达到更深区域, 可将粘结区域中热波传播视为一维非稳态导热。当玻璃幕墙结构胶粘结区域存在损伤时, 直射热波会在损伤区域发生反射, 形成反射热波, 并在粘结区域不断反射直到衰减。对应的玻璃幕墙表面由于反射热波与直射热波的线性叠加产生更高温度^[2]。在热图像序列中, 由于反射热波的影响, 损伤区域温度峰值更高, 且峰值过后, 区域冷却曲线更加缓慢。用正常区域的温度曲线减去异常区域的温度曲线, 得到的温度差即为反射热波产生的温升, 积分后可得到反射产生的热值。热像仪产生的数据中包含独立的随机噪声, 正常区域的温度曲线减去异常区域的温度曲线可抵消随机噪声的影响, 提高检测精度, 也有利于提高损伤区域的识别精度。

2 热图像序列重建与增强方法

热像仪输出的玻璃幕墙表面热图 (SEQ 文件) 是一个基于时间顺序的热图像序列, 时空模型如图 2 所示, 其中 x 轴和 y 轴分别为热像仪扫描窗口中的横坐标和纵坐标, Δt 为热图像采集时间间隔, 记第 n 帧热图像为 T_n 。随着采集时间 t 的增加, 层层叠出热图像序列。

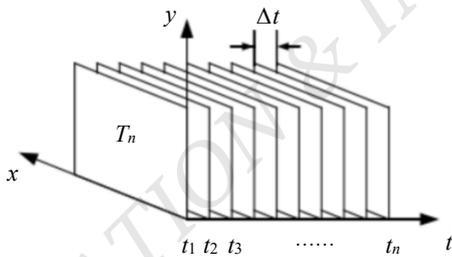


图 2 热图像序列时空模型

热图像序列具有分辨率低、噪声多等特性, 且在大多数情况下, 热像仪产生的空间噪声多于时间噪声。其空间噪声主要有背景噪声、光子噪声、热噪声、 $1/f$ 噪声、均匀性校正残留噪声和 A/D 转换噪声等^[3-5]。本文选用 Matlab2019 作为热图像序列处理软件, 处理过程主要分为图像预处理、图像重构、图像增强和损伤区域识别 4 个阶段。

2.1 基于单列像素点的多帧图像重建和小波变换的图像重构技术

在实验过程中, 玻璃幕墙结构胶粘结区域损伤检测是利用热像仪在固定的玻璃幕墙上方沿某一方向扫描, 可得到 240×320 像素大小的图像。假设扫描方向是从玻璃的右端开始, 查阅实验室三轴移动平台的机械参数可得转动轴每分钟转动 3 周, 每转一周平移 72 mm, 查阅热像仪参数可得帧速率为 60 Hz, 像素点为边长 0.1 mm 的正方形。热像仪移动速度计算公式为

$$v = \frac{3 \times 72}{60} = 3.6 \text{ mm/s} \quad (1)$$

$$v = \frac{3.6}{0.1} = 36 \text{ pixel/s} \quad (2)$$

经计算可知: 热像仪扫描速度为 3.6 mm/s, 每秒经过 36 个像素点, 共记录 60 次图像。即每记录一次热波图像, 热像仪移动 0.06 mm, 经过 0.6 个像素点。像素点为记录的最小尺度, 不可再分, 因此可每隔 5 帧图像进行采样, 此时热像仪经过 3 个像素点。记第 n 幅图像的像素点 $p_n(i, j)$ ($j > 3$) 的温度信息为 $t_n(i, j)$, 在第 $n+5$ 幅图像中, 对应的像素点应为 $p_{n+5}(i, j-3)$, 可以看出对应像素点的横坐标不发生变化, 即可取整列像素进行重建。由此可以重建玻璃幕墙单列位置的温度变化, 采样时间间隔为 1/14 s。

传统的傅立叶变换将时域信号转变为频域信号^[6], 但是基于时频关系的不确定性原理, 采用低通或高通滤波进行频域滤波处理时容易影响全局信号。因此, 傅立叶变换更适用于稳态信号。针对热波在玻璃幕墙中非稳态传播特性, 本文采用小波变换方法进行图像处理。小波变换通过小波基 $\varphi(t)$ 的平移、放大来构建待处理信号, 基于时间窗和频率窗即可得到不同频率和时空信息并加以调整。小波变换有连续和离散 2 类, 其中离散小波变换适用于图像处理, 通过观测窗函数在时域上逐步与信号做卷积运算。小波变换系数公式^[7]可表示为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi_{j,k}^*(t) dt = \langle f, \varphi_{j,k} \rangle \quad (3)$$

式中, $\varphi(t)$ 为小波基, 各种小波基可分为不同小波系, 各小波系适用范围不同, 主要区别在于支集长度、消失矩阶数、正则性和对称性等^[6]; $\varphi_{j,k}^*(t)$ 在小波变换中起着观测窗的作用, 其重构公式^[7]为

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k} \varphi_{j,k}(t) \quad (4)$$

式中 C 为常数。

二维矩阵的一层小波变换后, 小波变换系数在空间分布中分为 4 个部分^[8], 如图 3 所示。左上部分 (LL1) 为图像的低频成分, 为数据能量集中的频带; 左下部分 (LH1) 为图像纵向的高频信息, 包含纵向细节和噪声; 右上部分 (HL1) 为图像横向的高频信息, 包含横向细节和噪声; 右下部分 (HH1) 包含对角线高频信息及少量边缘信息。

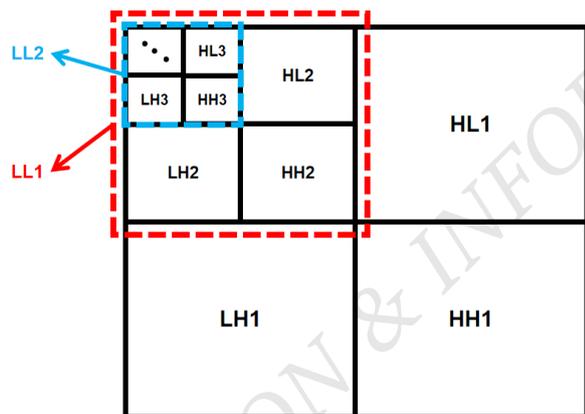


图 3 小波变换系数的空间分布

小波变换可进行多层分解, 多层小波分解是基于上一层小波分解产生的低频信号进行再分解, 如二层小波分解时将一层小波的低频成分 LL1 再分解为 LL2, LH2, HL2, HH2, 以此类推直到完成所需层数的小波分解。二维矩阵的小波变换去噪主要由二维信号的小波分解、对系数进行阈值化处理和二维小波的重构 3 部分组成。

2.2 基于维纳滤波的图像增强技术

在 Matlab 中, 利用 wiener 函数可实现自适应滤

波处理, 也称为维纳滤波。维纳滤波器的输出与期望值的差平方最小^[9], 因此也称为最小二乘滤波器。根据图像的局部方差做出估计, 当局部方差较大时, 该区域像素值不作较大改变, 保留高频信息; 当局部方差较小时, 模板内高频信号减弱, 信号趋于平缓^[10]。维纳滤波器根据 $M \times N$ 模板计算其局部均值和各像素方差如式(5)和式(6)所示。

$$\mu = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in \eta} a(n_1, n_2) \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in \eta} a^2(n_1, n_2) - \mu^2 \quad (6)$$

式中, η 是图像 A 中每个像素的 $M \times N$ 局部邻域。

使用这些估计值创建维纳滤波器, 如式(7)所示。

$$b(n_1, n_2) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} (a(n_1, n_2) - \mu) \quad (7)$$

式中, v^2 是噪声方差。如无噪声方差, 取默认值为所有像素方差均值。

$M \times N$ 模板影响输出结果。当 M, N 数值越大, 模板面积越大, 邻域对中心点像素的影响也更大, 去噪图像更加平滑。 M, N 数值不等时, 当 M 值较大时, 图像纵向滤波效果更强; 当 N 值更大时, 图像横向滤波效果更强。

2.3 基于损伤结构热波影响的损伤定位方法

预先得到正常 (无缺陷) 区域的温度-时间曲线为标准温度-时间曲线; 将重构、增强后的不同像素点与标准温度-时间曲线进行差分计算; 设定一个合适的阈值, 并将超过阈值的像素点标记, 得到的标记集即为含有损伤区域的像素点。

3 热图像序列重建与增强实验结果

本文搭建的玻璃幕墙结构胶红外热波检测平台实物图如图 4 所示, 包括 FLIR SC660 红外热像仪、808 nm 一字型线形近红外激光器、扫描平台及检测试样等。

将结构胶粘结区域有损伤的玻璃幕墙样品放置在热像仪下方，记录玻璃幕墙的缺陷位置（距离玻璃幕墙右端 135 mm~159 mm 处），确保扫描路径经过缺陷区域。得到的原始热图像序列如图 5 所示；基于单列像素点的多帧图像重建结果如图 6 所示；小波变换图像重构结果如图 7 所示。

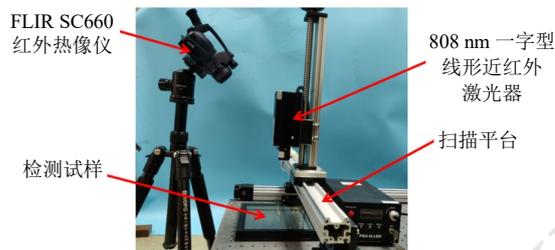


图 4 玻璃幕墙结构胶红外热波检测平台实物图

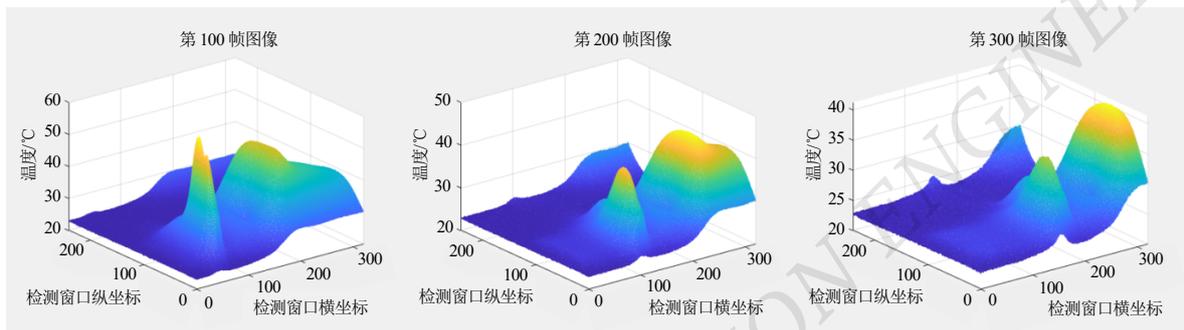


图 5 第 100, 200, 300 帧原始热图像序列

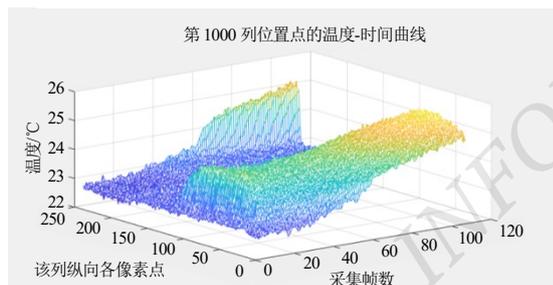


图 6 多帧图像重建结果

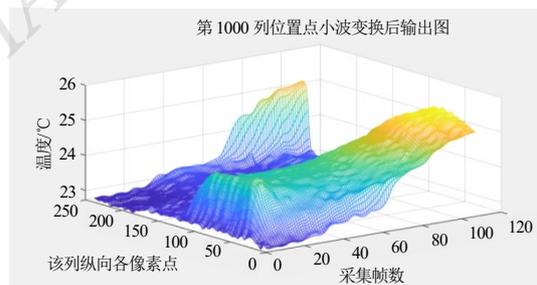


图 7 小波重构结果

图 6 中，多帧图像重建结果将动态变化的时序重建为单列位置的温度变化，可更直观地展现玻璃幕墙受热激励后的温度变化曲线，但在这个过程中产生大量噪点。图 7 中，小波变换图像重构完善了重建结果，包括分解、滤波和重构；在保留原有热波信息轮廓的同时去除大量噪声，保留众多特征点，因此小波变换包含图像重构和图像增强的双重效果。

基于维纳滤波的图像增强结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出：信号经过自适应滤波平滑处理后剧烈波动减少。时间上，热波变化幅度减少，同时 3×3 滤波模板保留了大部分重要信息，提高了损伤区

域的识别精度。

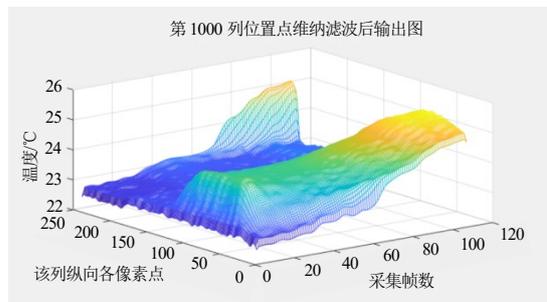


图 8 维纳滤波后热图像序列

缺陷识别先提取各列位置点的温度峰值-时间曲线，如图 9 所示。

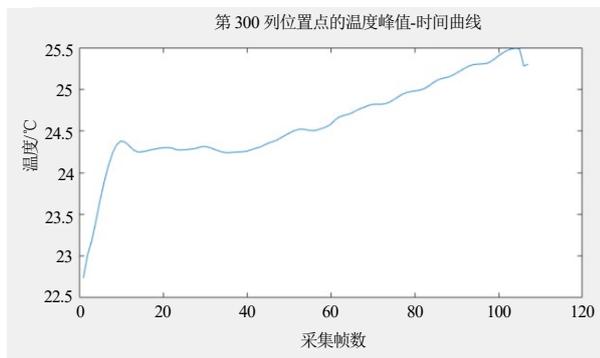


图9 第 300 列位置点温度峰值-时间曲线

由图9可以看出:受热激励源照射的位置在加热时有明显升温过程,冷却后升温。除了在加热时出现第一个温度峰值,还在8.5s时出现第二个温度峰值,这是因为热像仪检测的温度为玻璃幕墙表面温度,不能检测到玻璃幕墙深层结构。热激励源产生的热辐射只有少部分被玻璃表面吸收,更多的热辐射在结构胶粘结区域被吸收,因此在粘结区域产生高温点,一段时间后粘结区域的热量传递到玻璃表面,导致玻璃表面温度短暂下降后又回升,产生第二个温度峰值。第二个温度峰值与第一个温度峰值的形成原理不同,从曲线趋势也能够直观看出,热激励源直接照射的温升比粘结区域热传导产生的温升快得多,但粘结区域热传导的热量更多。

提取非缺陷区域的冷却温度曲线片段作为比对标准片段,如图10所示。

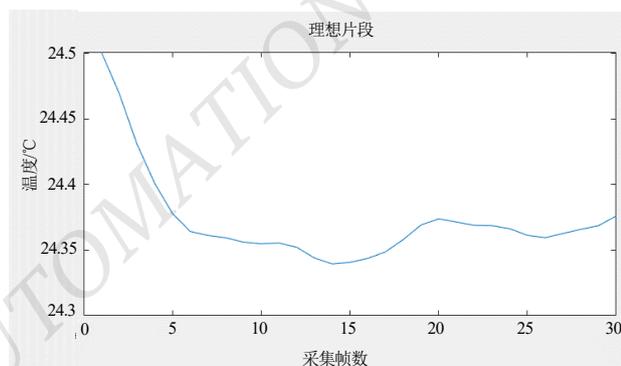


图10 无缺陷区域的降温统计片段

所有的待检测片段与标准片段作差分处理并累加所有差值,可得到不同的总差值。取阈值为5时,

校正后得到所有检测坏点位置(损伤区域):第1320列~1575列,即玻璃幕墙样品距离右端132mm~157.5mm的区域,与实验步骤第一步测量的位置135mm~159mm基本一致,损伤区域识别精度为93.7%。

4 结语

本文主要设计了玻璃幕墙热图像序列图像处理及损伤区域识别方法,提出了基于单点定位的重建算法、基于小波变换和维纳滤波的图像处理以及损伤区域识别规则,并在实验中取得与缺陷实际位置相匹配的实验结果。本文提出的热图像重建与增强技术思路能够准确识别玻璃幕墙结构胶损伤区域,为玻璃幕墙自动监测和损伤定位提供新的图像处理思路。

参考文献

- [1] 许维莹. 隐框玻璃幕墙胶接结构损伤热波检测技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [2] Hong Xiaobin, Lin Jinfan, Liu Yuan, et al. Active thermal sensing for bonding structure damage detection of hidden frame glass curtain wall[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3594.
- [3] 马宁,刘莎,李江勇. 红外热像仪的空间噪声和时间噪声分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(6): 717-721.
- [4] 张盈. 热成像系统的噪声[J]. 红外技术, 2003(2): 33-36, 40.
- [5] 邹前进,冯亮,汪亚. 红外图像空间噪声分析和预处理方法改进[J]. 应用光学, 2007(4): 426-430.
- [6] 黄苏雨. 基于小波变换的语音信号增强方法研究[D]. 南昌:南昌大学,2007.
- [7] 刘成龙. MATLAB 图像处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2017.
- [8] MOHD MRS, HERMAN SH, SHARIFF Z. Application of discrete wavelet transform in thermal infrared image processing [C]// 2016 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC). IEEE, 2017.
- [9] 胡品端,黎子晋,袁国淳. 基于同态滤波和维纳滤波的太阳耀斑去云处理对比研究[J]. 科技资讯, 2019, 17(14): 15-16, 18.
- [10] Mohammad Mahmudur Rahman Khan, Shadman Sakib, Rezoana Bente Arif, et al. Digital image restoration in Matlab: a case study on inverse and Wiener filtering [C]// 2018 International Conference on Innovation in Engineering and Technology. IEEE, 2018: 1-6.

Identification Method of Structural Adhesive Damage Area of Glass Curtain Wall Based on Thermal Image Reconstruction and Enhancement

Chen Yuming^{1,2} Lin Jinfan³ Ren Zeming³ Chen Junhao³

(1.The Fifth Institute of Electronics, Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China

2.Key Laboratory of MIIT for Intelligent Products Testing and Reliability, Guangzhou 510610, China

3.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Scanning thermal wave detection technology for structural glue damage of glass curtain walls detects damages from thermal images. The original thermal image sequence has the disadvantages of large amount of data, less effective information, low resolution, and large noise. In this paper, data reconstruction of single-row position, image reconstruction based on wavelet transform, image enhancement technology based on wiener filter and damage localization method based on heatwave effect of the damaged structure, are all proposed to complete the processing algorithm and damage identification function of hidden frame glass curtain wall. The experimental results show that the wavelet decomposition technology uses adaptive threshold coefficient to effectively reduce the noise component in the high-frequency component of the thermal image and retain the characteristics of the thermal image; Wiener filter uses 3×3 template to further smooth the image to ensure most of the important information, and the damage identification result reaches 93.7%, which can provide a new idea for automatic monitoring and damage location of curtain wall glass.

Key words: active thermal sensing; wavelet transfer; damage identification

作者简介:

陈玉明, 女, 1984 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 质量与可靠性。E-mail: 591006530@qq.com

~~~~~

(上接第 38 页)

## Location and Mapping System Based on YOLO v3 and Sensor Fusion

Chen Wenfeng Zhang Xuexi Cai Shuting Xiong Xiaoming

(School of Automation, Guangdong University Of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The existing thermal wave detection technology for structural adhesive damage of glass curtain wall has some problems, such as large amount of thermal image sequence data, less effective information, low resolution and large noise. The thermal image sequence of glass curtain wall is completed by using data reconstruction of single column position, image reconstruction based on wavelet transform, image enhancement based on Wiener filter and thermal wave location based on damage area recognition rule Column processing and damage area identification. The experimental results show that: the wavelet transform technology using adaptive threshold coefficient can effectively reduce the noise components in the high-frequency components of the thermal image and retain the characteristics of the thermal image; Wiener filter uses 3 × 3 template to further smooth the image to ensure most of the important information in the thermal image; the recognition rate of the damage area is 93.7%.

**Key words:** sensor fusion; object detection; dynamic object; location; multi view geometry

作者简介:

陈文峰, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 移动机器人定位和建图, 机器视觉。

张学习 (通信作者), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 控制理论与控制工程, 智能机器人及信息处理技术。

E-mail: zxxnet@gdut.edu.cn