

复合材料红外热波检测图像处理及投影标注技术

丁超, 金珂, 王少鑫, 穆全全, 宣丽, 李大禹

引用本文:

丁超, 金珂, 王少鑫, 等. 复合材料红外热波检测图像处理及投影标注技术[J]. 液晶与显示, 2021, 36(11): 1545–1553.

DING Chao, JIN Ke, WANG Shao-xin, et al. Image processing and projection annotation technology of composite material infrared thermal wave inspection[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(11): 1545–1553.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0043>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于相位测量偏折术的反射表面缺陷检测

Detection of reflective surface defects based on phase measuring deflectometry

液晶与显示. 2020, 35(12): 1315–1322 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203512.1315>

同轴超短焦距折反式投影系统设计

Design of coaxial short focal length catadioptric projection system

液晶与显示. 2015(5): 864–871 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0864>

一种基于FPGA的视频几何校正系统设计方案

Design of video geometric calibration system based on FPGA

液晶与显示. 2015(3): 459–466 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153003.0459>

基于深度学习的木材表面缺陷图像检测

Image detection of wood surface defects based on deep learning

液晶与显示. 2019, 34(9): 879–887 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193409.0879>

基于图像融合的木板表面缺陷检测研究

Wood surface defect detection based on image fusion

液晶与显示. 2016, 31(9): 882–888 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163109.0882>

文章编号:1007-2780(2021)11-1545-09

复合材料红外热波检测图像处理及 投影标注技术

丁 超^{1,2}, 金 珂³, 王少鑫¹, 穆全全¹, 宣 丽¹, 李大禹^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 航天材料及工艺研究所, 北京 100071)

摘要:为实现对复合材料内部缺陷进行无损检测并对缺陷位置进行准确标记,本文提出了红外热波检测投影标注方法。利用红外热像仪获得闪光灯脉冲激励下样品的红外图像序列,并通过时间采样优化的脉冲相位算法进行处理,增强缺陷的检测效果,再通过自动阈值对缺陷位置进行提取并由投影仪将提取结果投射到样品表面。针对投影仪与热像仪视角差异等因素引起的图像畸变问题,本文提出了一种可见-红外相机辅助标定方法,通过辅助相机对投影仪进行标定,建立投影仪与热像仪的空间坐标关系,对缺陷提取结果进行畸变矫正,提高缺陷标记的精确度。实验结果表明,该缺陷检测及标记方法对不同大小缺陷的面积标记误差在 10% 以内,中心标记误差在 3 mm 以内,可以对材料内部缺陷进行较为精确的标记。

关键词:无损检测;脉冲相位法;阈值分割;投影变换;投影仪标定

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0043

Image processing and projection annotation technology of composite material infrared thermal wave inspection

DING Chao^{1,2}, JIN Ke³, WANG Shao-xin¹, MU Quan-quan¹, XUAN Li¹, LI Da-yu^{1*}(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;**2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;**3. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100071, China)*

Abstract: In order to realize the non-destructive inspection of the internal defects of composite materials and the accurate marking of the defect positions, this paper proposes a projection labeling method for infrared thermal wave detection. This system uses thermal imaging camera to obtain the infrared image sequence of the sample under the flashlight's pulse excitation, and processes it by the pulse

收稿日期:2021-02-08; **修订日期:**2021-03-23.

基金项目:航天材料及工艺研究所研究课题(No.2018220002000290)

Supported by Research Topic of Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology(No. 2018220002000290)

* 通信联系人, E-mail: lidayu@ciomp.ac.cn

phase thermography optimized by sampling time to enhance the detection effect of the defect, and then uses the automatic threshold to extract the defect position and project the extraction results onto the sample surface through a projector. To solve the problem of image distortion caused by factors such as the viewing angle difference between the projector and the thermal imager, this paper proposes a visible-infrared camera-assisted calibration method. The auxiliary camera is used to calibrate the projector and establish the spatial coordinate relationship between the projector and the thermal imager to correct the distortion of the defect extraction results and improve the accuracy of defect marking. The measurement experiment results show that the defect non-destructive testing and marking method can mark the area of different size defects within 10%, and the center mark errors are within 3 mm, which can accurately mark the internal defects of the material.

Key words: non-destructive testing; pulse phase method; threshold segmentation; projection transformation; projector calibration

1 引言

碳纤维复合材料是近年来迅速发展的一类新型材料,具有强度大、质量轻、耐高温等优越性能,在航空航天、船舶、汽车等领域应用广泛^[1]。碳纤维材料是由碳纤维和高性能树脂基体复合而成的碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)^[2],在生产、加工及使用过程中,CFRP 板内部易产生脱粘、裂纹等缺陷,这些缺陷会严重影响材料质量和性能,降低使用寿命^[3]。对于材料内部的缺陷,需要在不破坏其结构完整性的前提下进行探测。

红外成像无损检测技术是基于红外辐射原理,通过记录被检测物体表面的温度场变化,来判断材料内部结构的不连续所引起的热量传递差别,实现对内部缺陷进行判断的无损检测方法^[4]。它相比于常规无损检测方法具有非接触、灵敏度高、结果直观可靠的优势,特别适用于复合材料的无损检测。目前许多学者对基于红外成像的材料内部缺陷检测及可视化进行过研究,英国学者 D. P. Almond 提出了红外热波检测中确定缺陷大小的方法,需要在三维空间中考虑热扩散对缺陷边缘的影响^[5]。郭兴旺等采用奇异值分解法对红外图像序列进行处理和增强,消除了加热不均效应,有效提高图像的信噪比^[6]。汪子君等提出了基于鲁棒 Otsu 的缺陷分割算法,提高了红外无损检测缺陷分割的准确性和鲁棒性^[7]。

传统的红外热波检测的工作主要集中在红外图像处理方面。在实际的工程应用中,往往需要

将缺陷位置在实物上进行标记,而从红外图像中提取出的内部缺陷位置只能显示在屏幕上,很难将结果及时与被测样件的实际缺陷位置进行联系。如果操作人员需要在被检测样件上标记缺陷区域,就必须在屏幕和样件之间反复确认,效率低下且容易出错。因此,实现无损检测数据的自动标记是非常有必要的。方法是在测试数据和测试结构之间建立一个可视化的链接。

本文提出基于热像仪-投影仪系统的脉冲激励红外无损检测及标记方法。利用红外热像仪获得脉冲激励下人工缺陷碳纤维样品的红外图像序列,并利用采样时间优化后的脉冲相位算法对图像序列进行处理,增强缺陷的检测效果。再通过自动阈值对缺陷区域进行提取,并将提取结果经投影仪投射到被测样品上进行标记。由于热像仪投影仪间的视角差异、镜头误差等因素,投影到样品上的图像存在畸变,从而使标记结果产生较大误差。借助辅助相机对热像仪及投影仪进行标定^[8],利用所得的内外参数矩阵对缺陷提取结果进行变换,可以对畸变进行有效修正。经验证,该方法可以实现对缺陷位置较为准确的标注。

2 红外热波图像的缺陷分割

要实现缺陷位置的准确标注,需要进行两项工作:缺陷提取和缺陷投影。首先是对缺陷轮廓的提取,即对红外图像中的缺陷进行分割。

红外热波图像的目标分割由于其特殊性,相比于一般的图像分割存在不少难点,主要包括:红外成像为热源成像,图像目标及边界较为模糊;目

标成像面积较小时,红外信号强度较弱,目标分割要在低信噪比条件下进行^[9];碳纤维材料表面的纹理会对缺陷边缘的分割产生影响。红外热波图像处理可分为单帧图像处理和多帧图像处理。单帧红外图像反映的只是样品表面某时刻的温度分布,没有充分反映不同时刻的温度分布情况,因此基于单帧图像的处理效果一般较差。红外图像序列则包含更丰富的缺陷信息,在进行红外热波图像的目标分割前,先对图像序列进行处理,可以获得更全面的缺陷信息,增强微弱缺陷的显示效果。

脉冲相位法(Pulse Phase Thermography, PPT)是一种用于处理脉冲激励红外热波图像序列的算法^[10]。脉冲激励热波包含很多不同频率的成分,而脉冲相位法可以通过傅里叶变换,对样品的频谱响应进行分析。其原理是采集脉冲热激励下样品表面温度分布随时间变化的图像序列,将图像序列中每个像素点 (x, y) 对应的温度-时间信号 $T(k)(k=1, 2, \dots, N)$ 进行离散傅里叶变

换,得到频域信号:

$$F(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} T(k) \exp\left(\frac{-j2\pi f k}{N}\right) = R(n) + jI(n) \quad (1)$$

对实部和虚部进行处理,可获得每个像素点傅里叶变换后的幅值谱和相位谱:

$$\begin{cases} A(n) = \sqrt{R^2(n) + I^2(n)} \\ \Phi(n) = \arctan \frac{I(n)}{R(n)} \end{cases} \quad (2)$$

对红外图像序列中的每个像素点均进行上述计算,得到图像的幅值图谱和相位图谱。由于时域信号为实数值, N 个时间数据存在 $N/2$ 个独立的频率数据。离散频率为:

$$f_n = \frac{n}{N\Delta t} \quad (3)$$

其中, Δt 为相邻两幅热图像的时间间隔, $n=0, 1, 2, \dots, N/2$ 。图 1 为红外图像序列表面温度信号的傅里叶变换示意图。

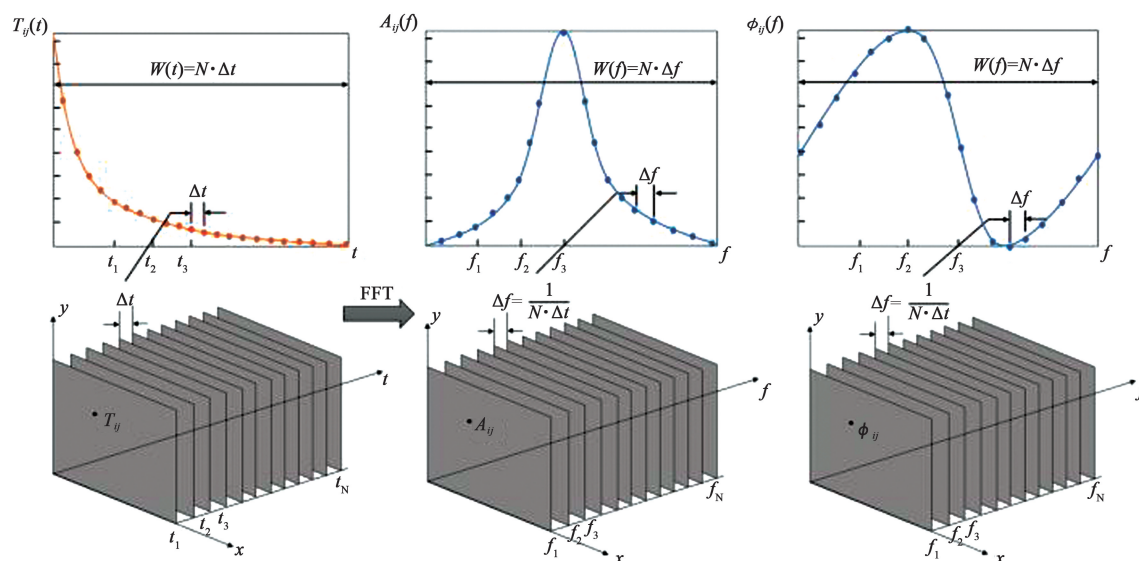


图 1 表面温度信号傅里叶变换分析示意图

Fig.1 Schematic diagram of Fourier transform analysis of surface temperature signal

实验中,脉冲激励时间为 5 ms,脉冲能量为 6 000 J。采用 FLIR X6530sc 热像仪采集红外图像,热像仪焦距为 12 mm,像元尺寸 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,采样频率为 100 Hz,采样时间为 15 s。为对缺陷提取结果进行准确评价,检测对象为一块矩形碳纤维复合材料,并在平板背面制造 6 个不同大小盲孔模拟内部缺陷。

同一热扩散系数和缺陷深度的材料,对脉冲

热流不同频率的下响应敏感程度不同^[11]。不同采样时间的图像序列进行脉冲相位处理后的效果也不同。以信噪比作为处理效果的评价标准,其定义为:

$$\text{SNR} = \frac{|F_D - F_S|}{\sigma_F^S} \quad (4)$$

其中: F_D 为脉冲相位处理后缺陷区域平均灰度值, F_S 为非缺陷区域平均灰度值, σ_F^S 为无缺陷

区域像素值标准差。不同采样时间下图像序列处理后的信噪比分布如图 2 所示。其中横轴表示所选图像序列的图片数量,纵轴表示处理的第一张图像在整个图像序列中的位置。每个格的色温表示该位置的信噪比。

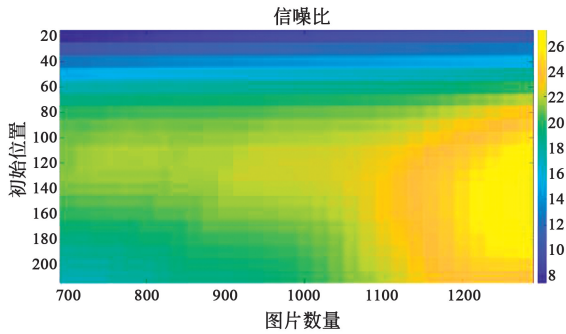
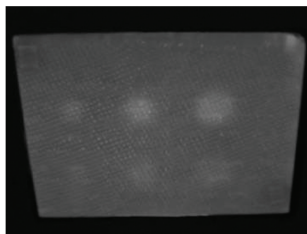


图 2 处理后图像的信噪比分布

Fig.2 SNR distribution of the processed images

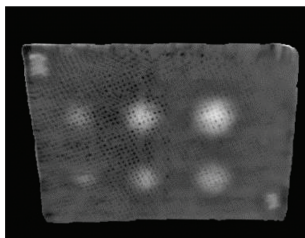
当参与脉冲相位处理的图像序列初始位置为第 150 帧,数量为 1 300 帧,即采样时间为 1.5~14.5 s 时,处理结果拥有最佳信噪比。如图 3 所示,采用该图像序列进行脉冲相位处理后的相位图效果好于传统脉冲相位算法,缺陷与非缺陷区域的对比度显著提高,缺陷边界也更加清晰,面积较小的缺陷也能有效显示,有利于对缺陷边界的准确分割。

为对缺陷区域的位置信息进行定量化分析,需要对缺陷进行提取。本文主要提取的缺陷信息



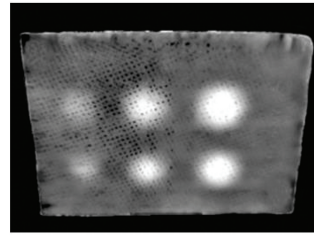
(a)原始红外图像

(a)Original infrared image



(b) 传统脉冲相位法相位图

(b) Phase diagram of traditional pulse phase method



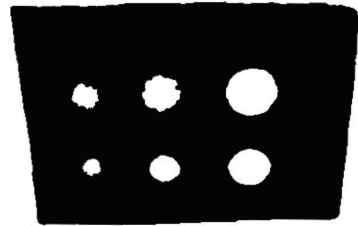
(c) 优化后脉冲相位法相位图

(c) Phase diagram of optimized pulse phase method

图 3 脉冲相位法处理前后图像对比

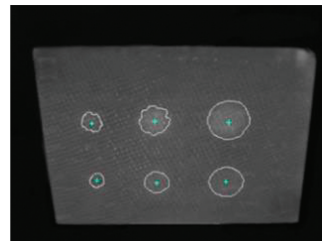
Fig. 3 Image comparison before and after pulse phase method processing

为中心和轮廓。由于缺陷区域与背景主要在灰度上存在差异,故采用 Otsu 阈值分割法进行缺陷提取。以进行阈值处理后分离的像素类之间的类间方差最大作为阈值选取准则,阈值之上和之下的像素分别作为目标和背景,生成二值图像。如图 4(a)所示。在二值图中可以得到缺陷轮廓和质心位置,缺陷的提取结果如图 4(b)所示。



(a) 阈值分割后的二值图

(a) Binary image after threshold segmentation



(b) 缺陷轮廓与质心

(b) Contour and centroid of defects

图 4 缺陷位置提取结果

Fig.4 Defect location extraction

3 缺陷位置标注

无损检测结果的可视化需要通过投影装置实现。实验装置如图 5 所示。作为激励源的闪光灯

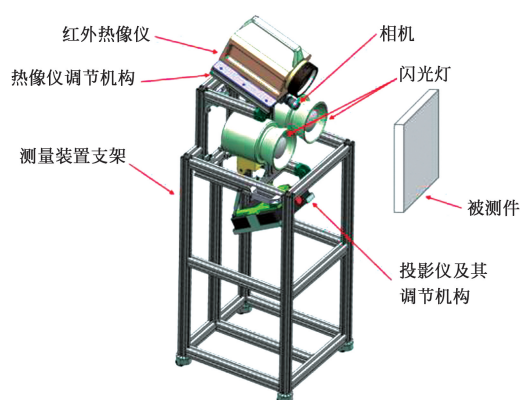


图 5 红外无损检测及投影装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of infrared non-destructive testing and projection device

并排放置且正对被测样件,以保证样件表面得到均匀且充分的加热,热像仪位于闪光灯正上方,投影仪位于闪光灯正下方。为保证样件位于热像仪

视场中心,热像仪需倾斜一定角度。同时,投影仪也需要倾斜一定角度保证缺陷能够投影到样件表面。

投影仪与热像仪存在视角差异,导致前面提取的缺陷轮廓投影到样品表面时发生形变,使标注存在较大误差。需要利用投影变换对形变进行校正。

3.1 热像仪与投影仪的坐标变换

当检测装置与被测样件距离固定时,热像仪和投影仪的倾斜角度也是固定的。被测样件竖直放置,以中心投影的方式建立成像模型^[12],以被测样件长宽方向为 X 轴和 Y 轴,垂直该平面方向为 Z 轴,建立世界坐标系。 $X_p Y_p Z_p O_p$ 为热像仪坐标系, $X_c Y_c Z_c O_c$ 为投影仪坐标系, $X_w Y_w Z_w O_w$ 为被测样件所在平面的世界坐标系。

根据成像模型,物点在世界坐标系下齐次坐标与其对应像点在图像像素坐标系下齐次坐标的变换关系为:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/du & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dv & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{T} \\ 0^T \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{T} \\ 0^T \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

变换关系由内参数矩阵和外参数矩阵组成。 $\mathbf{T}$ 为 3×1 的平移矩阵, $\mathbf{R}$ 为 3×3 的旋转矩阵, $\mathbf{O}^T$ 为 3×1 的零矩阵的转置,构成外参数矩阵。 f_x, f_y 分别表示沿图像平面 X 轴和 Y 轴方向的焦距,单位为 mm。 (u_0, v_0) 表示图像物理坐标系的原点在像素坐标系中的坐标,单位为像素(px)。 du, dv 分别是单位像素在 x 轴和 y 轴上的尺寸,单位为 mm/px。以 f_u, f_v 代替 f_x/du 和 f_y/dv ,构成内参数矩阵。 Z_c 为比例系数。

$$\text{令 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A} \text{ 为热像仪的内参数}$$

矩阵,式(5)可简写为:

$$Z_{c1} \mathbf{I}_1 = \mathbf{A}_1 [\mathbf{R}_1 \mathbf{T}_1] P_w, \quad (6)$$

其中: $\mathbf{I}_1$ 为热像仪像素坐标系下某点坐标, P_w 为其对应物点在世界坐标系下坐标。 $\mathbf{A}_1$ 为热像仪内参数矩阵。 $\mathbf{R}_1, \mathbf{T}_1$ 组成热像仪外参数矩阵。

投影仪将图像投影到世界坐标系下被测样件所在平面,相当于逆向的相机^[13],因此其数学模型与相机模型相同。投影仪的图像像素坐标 $\mathbf{I}_2$

与世界坐标 P_w 的转换关系可写为:

$$Z_{c2} \mathbf{I}_2 = \mathbf{K}_2 [\mathbf{R}_2 \mathbf{T}_2] P_w, \quad (7)$$

其中: $\mathbf{K}_2$ 为投影仪内参数矩阵, $\mathbf{R}_2, \mathbf{T}_2$ 组成投影仪外参数矩阵。为保证缺陷投影的准确,投影仪和热像仪的物点坐标 P_w 相同,对式(6)、(7)消去 P_w ,可以得到投影仪图像的像素坐标与热像仪图像的像素坐标间的变换关系:

$$\mathbf{I}_2 = \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \mathbf{K}_2 [\mathbf{R}_2 \mathbf{T}_2] [\mathbf{R}_1 \mathbf{T}_1]^{-1} \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{I}_1 = \mathbf{H} \mathbf{I}_1, \quad (8)$$

$\mathbf{H}$ 为投影仪像素坐标到热像仪像素坐标的投影变换矩阵。缺陷提取结果经过该变换,再经投影仪投射到被测样件上,理论上可以准确标注缺陷位置。变换过程如图 6 所示。

3.2 可见-红外相机辅助标定法

投影仪图像像素坐标到热像仪图像像素坐标的变换需要投影仪和热像仪的内外参数矩阵,通过标定可以得到内外参数。

镜头在加工、装配过程中往往存在误差,自身也存在几何像差,标定过程中需要考虑畸变影

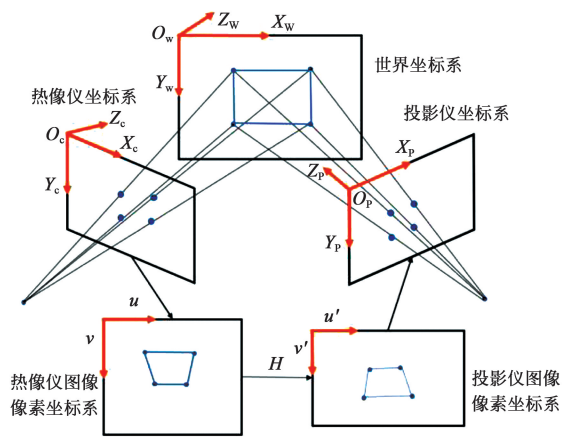


图 6 投影变换流程

Fig.6 Projection transformation process

响^[14]。常见的畸变包括径向畸变 k_1, k_2 和切向畸变 p_1, p_2 , 若实际成像点在图像物理坐标系下坐标为 $p'(x', y')$, 理想成像点为 $p(x, y)$, 则畸变修正公式为:

$$\begin{cases} x' = x + \delta_x \\ y' = y + \delta_y \end{cases}, \quad (9)$$

其中: δ_x 和 δ_y 为畸变值, 其计算为:

$$\begin{aligned} \delta_x &= k_1 x(x^2 + y^2) + k_2 x(x^2 + y^2) + \\ & p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2xy, \\ \delta_y &= k_1 y(x^2 + y^2) + k_2 y(x^2 + y^2) + \\ & p_2(3x^2 + y^2) + 2p_1xy. \end{aligned} \quad (10)$$

标定过程中得到畸变参数 k_1, k_2, p_1, p_2, u, v 方向的尺度因子 f_u, f_v , 图像主点坐标 (u_0, v_0) , 以及热像仪坐标系到投影仪坐标系的旋转矩阵与平移矩阵。对于热像仪, 可以利用张正友标定法^[12]进行标定。但投影仪作为投影器件, 无法通过拍摄图像得到物平面二维图像坐标与对应点三维世界坐标之间的对应关系。利用辅助相机可以建立投影仪与标定板间的坐标对应关系, 在热像仪下方固定一工业相机作为辅助标定工具, 如图 5 所示。

以 10×7 的黑白棋盘图案作为标定板, 每个棋盘格边长 27.7 mm。将棋盘图案粘贴于白色背景板上, 投影仪同样将棋盘格图案投射到该背景板, 用于建立像机图像与投影图像间的对应关系, 且可以保证投影平面与标定板平面位于同一平面。

以标定板棋盘格左上角的角点为坐标原点, XY 平面与标定板平面重合, Z 轴与标定板

平面垂直, 可建立标定板的世界坐标系。不同位姿下的标定板相对于相机同样存在旋转矩阵 R_i 和平移矩阵 T_i , 若相机的内参矩阵为 A , 则标定板世界坐标与相机的图像像素坐标的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \end{bmatrix} = [R_i \ T_i]^{-1} A^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

若相机已标定, 即内外参数矩阵已知, 依据该转换关系, 可以实现对投影仪投影图像世界坐标的提取。利用相机对投影仪进行标定的具体过程如下:

(1) 按图 5 所示固定好相机与投影仪。投影仪将黑白棋盘图案投射到标定板所在背景板上, 相机拍摄此时的标定板及投影图案的图像。

(2) 改变背景板位姿(包括进行红外图像采集时样品的位姿, 以得到该位置下投影仪的外参数矩阵), 重复上述步骤, 拍摄 10 组图像。

(3) 对相机拍摄图像中标定板和投影图案棋盘格的角点进行精确提取, 如图 7 所示。由标定板的角点坐标, 利用张正友标定法^[15]对相机进行标定, 并根据式(11)结合已标定的相机参数计算投影图案提取的角点像素坐标对应的世界坐标, 进而实现对投影仪的标定。

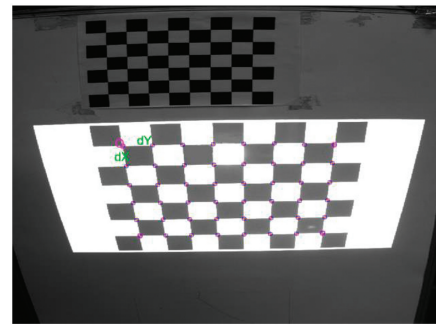


图 7 标定板特征点提取

Fig.7 Feature point extraction of calibration plate

按图 5 所示模型搭建该标定系统, 投影仪型号为 XGIMI NEW Z6X, 可投影图像的最大分辨率为 1920×1080 像素。相机型号为 DAHENG MER-503_36U3M, 焦距 7 mm, 可拍摄图像最大分辨率为 2448×2048 像素, 像元尺寸 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ 。标定所得参数见表 1。

其中 f_u, f_v, u_0, v_0 单位均为像素(px), k_1 、

k_2 、 p_1 、 p_2 为无量纲。进行红外图像采集时样品位姿下热像仪坐标系到投影仪坐标系的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -0.013\ 5 & 0.996\ 3 & 0.084\ 4 \\ 0.915\ 0 & -0.021\ 7 & 0.402\ 8 \\ 0.403\ 2 & 0.082\ 7 & -0.911\ 4 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

平移矩阵为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -229.235\ 1 \\ -376.880\ 8 \\ 751.555\ 2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

表 1 相机、投影仪和热像仪标定参数

Tab.1 Calibration parameters of camera, projector and thermal imager

	辅助相机参数	投影仪参数	热像仪参数
f_u	2021.3	3 498.6	8 06.5
f_v	1 985.1	3 124.1	795.2
u_0	1 212.6	1 040.9	329.1
v_0	1 016.5	545.1	253.2
k_1	-0.385 0	0.395 1	-0.210 2
k_2	0.162 2	-0.091 7	0.120 6
p_1	-0.013 7	-0.021 3	-0.011 7
p_2	0.001 4	0.019 9	0.004 2

旋转矩阵各元素无量纲,平移矩阵各元素单位为 mm。利用标定相机所得内外参数矩阵,将棋盘图案的特征点转换到世界坐标系,再通过投影仪内外参数矩阵转换到投影仪的图像像素坐标系,并与预先设定的棋盘图案特征点坐标相减,以

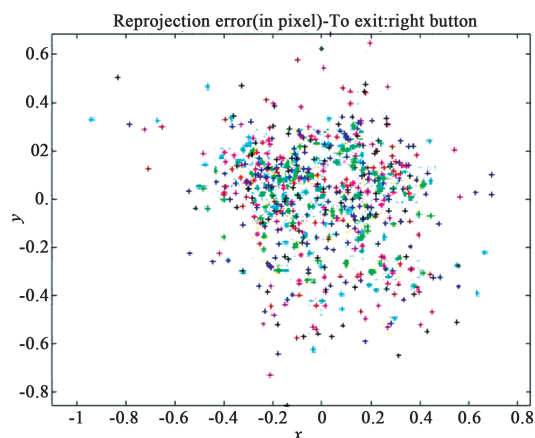


图 8 投影仪重投影误差

Fig.8 Reprojection error of projector

相减值的均值作为投影仪标定精度的评价方法^[16]。结果如图 8 所示,在 x 方向和 y 方向误差均小于 1 个像素,该标定方法精度较高。

3.3 缺陷提取结果的投影

利用标定所得的热像仪和投影仪内外参数矩阵,可以得到投影仪像素坐标与热像仪像素坐标间的投影变换关系。将热像仪采集的图像进行缺陷提取和投影变换,并通过投影仪投射到样品表面。热像仪采集的样品红外图像如图 9 所示,投影仪投影图像如图 10 所示。

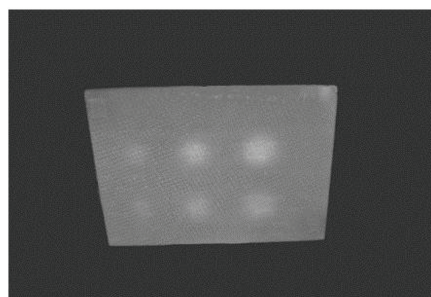


图 9 热像仪采集红外图像

Fig.9 Infrared image collected by thermal imaging camera

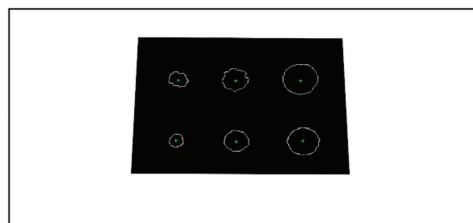


图 10 投影仪投影图像

Fig.10 Image projected by the projector

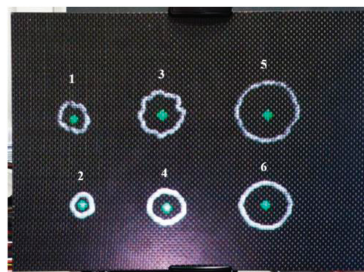


图 11 缺陷投影结果

Fig.11 Defect projection result

缺陷在样品上的标注结果如图 11 所示。以样品左上角为原点,水平方向为 X 轴,竖直方向

为 Y 轴建立坐标系,对投影结果进行定位。投影缺陷位置与实际位置对比见表 2。

可以看出本文提出的红外图像处理及投影标注方法对于不同大小的缺陷,中心标注误差在 3 mm 以内,面积标注误差在 10% 以内。主要误差来源为:(1) 标定板的制作不够精确,本文的标定板是直接打印出来贴在背景平板上,对角点提

取的精度有影响。同时,环境因素如拍摄环境周围光照及外界引起的震动等都会对标定和投影结果产生影响。(2) 热像仪采集的红外图像中,样品表面纹理也会对缺陷边缘的提取产生影响。通过选用精确度更高的标定板、改善拍摄环境以及对缺陷提取算法进一步优化,可以提升缺陷位置标注精确度。

表 2 缺陷投影位置与实际位置对比

Tab.2 Comparison of defect's projection position and actual position

	缺陷中心位置/mm	投影中心位置/mm	误差/mm	缺陷面积/mm ²	投影面积/mm ²	相对误差/%
缺陷 1	(46.0,75.0)	(44.6,77.6)	3.0	379.9	414.9	9.1
缺陷 2	(46.0,140.0)	(48.9,139.8)	2.9	254.3	258.5	1.7
缺陷 3	(110.0,75.0)	(108.7,74.2)	1.5	907.5	966.6	6.5
缺陷 4	(110.0,140.0)	(111.1,141.0)	1.5	706.5	718.3	1.7
缺陷 5	(181.0,75.0)	(183.5,75.4)	2.5	1 519.8	1 659.6	9.2
缺陷 6	(181.0,140.0)	(182.1,139.2)	1.4	1 133.5	1 157.5	2.1

4 结 论

本文针对红外热波检测中缺陷提取结果难以及时在被测样件上进行标注的问题,提出了基于热像仪-投影仪系统的脉冲激励红外无损检测及投影标记方法。对脉冲相位法的采样时间进行优化,提高处理后缺陷区域的对比度和边界清晰度。利用自动阈值对处理结果进行分割,提取缺陷边

缘和中心位置。针对投影仪与热像仪视角差异等因素引起的畸变问题,提出了可见-红外相机辅助标定方法,利用辅助相机对热像仪-投影仪系统进行标定,并用所得内外参数矩阵对缺陷提取结果进行变换,矫正图像畸变。经测量,缺陷中心标注误差在 3 mm 以内,面积标注误差在 10% 以内。经一次标定后,如果热像仪、投影仪与被测样品的相对位置不变,则标定的内外参数仍适用,可直接对其他样品进行缺陷标注,复用性较高。

参 考 文 献:

[1] 张晓虎,孟宇,张炜. 碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J]. 纤维复合材料,2004,21(1):50-53,58.
ZHANG X H, MENG Y, ZHANG W. The state of the art and trend of carbon fiber reinforced composites [J]. *Fiber Composites*, 2004, 21(1): 50-53, 58. (in Chinese)

[2] 赵渠森.先进复合材料及其应用[J]. 航空制造技术,2002(10):22-27,34.
ZHAO Q S. Advanced composite and its application [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2002(10): 22-27, 34. (in Chinese)

[3] 顾轶卓,张佐光,李敏,等. 复合材料变厚度板热压成型缺陷类型与成因实验研究[J]. 复合材料学报,2008,25(2): 41-46.
GU Y Z, ZHANG Z G, LI M, *et al.* Experimental study on type and cause of defects in variable thickness composite laminates during hot pressing process [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(2): 41-46. (in Chinese)

[4] 何嘉武,张超省,冯辅周,等. 红外热波无损检测技术的研究现状及应用[J]. 振动与冲击,2010,29(S):293-296.
HE J W, ZHANG C S, FENG F Z, *et al.* Research & application of infrared thermal wave nondestructive detection technology [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(S): 293-296. (in Chinese)

- [5] ALMOND D P, LAU S K. Edge effects and a method of defect sizing for transient thermography [J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(25): 3369-3371.
- [6] 郭兴旺,高功臣,吕珍霞. 基于奇异值分解的红外热图像序列处理[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(8): 937-940.
- GUO X W, GAO G C, LÜ Z X. Infrared image sequence processing based on singular value decomposition [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(8): 937-940. (in Chinese)
- [7] 汪子君,邱俨睿,杨宏霄,等. 基于鲁棒 Otsu 的红外无损检测缺陷分割算法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 0204004.
- WANG Z J, QIU Y R, YANG H X, *et al.* Algorithm for defect segmentation in infrared nondestructive testing based on robust Otsu [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0204004. (in Chinese)
- [8] 徐芳,刘晶红,王宣. 基于标定的 CCD 图像畸变校正方法研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 633-640.
- XU F, LIU J H, WANG X. Distortion correction method for CCD image based on calibration [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 633-640. (in Chinese)
- [9] 张坤华,王敬儒,张启衡. 复杂背景下扩展目标的分割算法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(3): 233-237.
- ZHANG K H, WANG J R, ZHANG Q H. Segmentation of extended target in complex environment [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 21(3): 233-237. (in Chinese)
- [10] 田裕鹏. 红外辐射成像无损检测关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- TIAN Y P. Research on key technologies of infrared radiation imaging non-destructive testing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [11] 陶胜杰,杨正伟,田干,等. 红外脉冲相位热像检测效率提高方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0504005.
- TAO S J, YANG Z W, TIAN G, *et al.* Method for improving detection efficiency using infrared pulse phase thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0504005. (in Chinese)
- [12] 周前飞,刘晶红,居波,等. 面阵 CCD 航空相机斜视图像的几何校正[J]. 液晶与显示, 2015, 30(3): 505-513.
- ZHOU Q F, LIU J H, JU B, *et al.* Geometric correction of oblique images for array CCD aerial cameras [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(3): 505-513. (in Chinese)
- [13] KIMURA M, MOCHIMARU M, KANADE T. Projector calibration using arbitrary planes and calibrated camera [C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2007: 1-2.
- [14] 葛宝臻,李晓洁,邱实. 基于共面点直接线性变换的摄像机畸变校正[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 488-494.
- GE B Z, LI X J, QIU S. Camera lens distortion correction based on coplanar point direct liner transformation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 488-494. (in Chinese)
- [15] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [16] 姜雨彤,杨进华,刘钊,等. 双目 CCD 测距系统的高精度标定[J]. 计算机工程, 2013, 39(7): 228-232.
- JIANG Y T, YANG J H, LIU Z, *et al.* High precision calibration of binocular CCD ranging system [J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(7): 228-232. (in Chinese)

作者简介:



丁 超(1995—),男,天津人,硕士研究生,2018 年于南开大学获得学士学位,主要从事红外无损检测方面的研究。E-mail: 2746356552@qq.com



李大禹(1979—),男,吉林长春人,副研究员,2007 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究获得博士学位,主要从事智能光学与计算成像的研究。E-mail: lidayu@ciomp.ac.cn