

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518448

复合材料铺丝表面激光中心线快速提取算法<sup>\*</sup>刘 创<sup>1</sup> 王立忠<sup>1,2</sup> 陈 香<sup>3</sup> 王金红<sup>3</sup> 梁 晋<sup>2</sup>

(1.新疆大学机械工程学院 乌鲁木齐 830046; 2.西安交通大学机械工程学院 西安 710049;

3.中国航空发动机集团有限公司四川燃气涡轮研究院 成都 610000)

**摘 要:** 针对碳纤维增强树脂基复合材料丝束铺层表面缺陷检测中,线结构光图像存在高亮噪声区域和细微间隙处光条纹中心难以提取等问题,提出一种自适应快速线结构光中心提取算法。首先通过图像预处理和光条 ROI 提取降低图像复杂度;其次利用轮廓跟踪算法剔除高亮噪声并确定光条纹边界;最后采用 8 阶滤波卷积算子提取骨架点,结合法向质心法计算亚像素中心坐标。通过对多张铺层缺陷线结构光图像进行处理,本文算法重建缺陷点云精度最优,提取 50 幅图像中心线仅需 5.36 s,在极端光照下算法提取中心线的标准差仅为 0.38 pixel。实验结果表明本文算法在高亮噪声和复杂缺陷干扰下仍能准确提取光条纹中心,兼具高精度、高效率 and 鲁棒性,为复合材料铺层缺陷的自动化检测提供了可靠技术支撑。

**关键词:** 复合材料;线结构光;法向质心法;中心提取

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.2

Rapid laser centerline extraction algorithm for  
composite tow placement surfaceLiu Chuang<sup>1</sup> Wang Lizhong<sup>1,2</sup> Chen Xiang<sup>3</sup> Wang Jinhong<sup>3</sup> Liang Jin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** For surface defect detection of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tow placement, where line-structured light images suffer from high-intensity noise regions and difficulties in extracting light stripe centers at fine gaps, this paper proposes an adaptive fast line-structured light center extraction algorithm. The method first reduces image complexity through preprocessing and light stripe ROI extraction. Subsequently, a contour tracking algorithm eliminates high-intensity noise and determines light stripe boundaries. Finally, an 8th-order filter convolution operator extracts skeleton points, combined with a normal centroid method to calculate sub-pixel center coordinates. When processing multiple defective tow placement images, our algorithm achieves optimal point cloud reconstruction accuracy. It requires only 5.36 s to extract center lines from 50 images, with a standard deviation of merely 0.38 pixel under extreme lighting conditions. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm maintains accurate light stripe center extraction despite high-intensity noise and complex defect interference, exhibiting high precision, efficiency, and robustness. This provides reliable technical support for automated defect detection in composite material layup processes.

**Keywords:** composite materials; line-structured light; normal centroid method; central extraction

## 0 引 言

由工业相机和高精度激光发射器组成的单目线结构光扫描设备是以三角测量法为原理<sup>[1-3]</sup>,具有非接触性、高精

度、速度快、实时性强、轻便小巧等特点。在检测自动铺丝机铺放碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)丝束过程中出现的诸如间隙、重叠、搭接、扭转、褶皱、缺丝等表面缺陷中有着广泛的应用<sup>[4]</sup>。单目线

收稿日期:2025-03-26

<sup>\*</sup> 基金项目:中国航发涡轮院稳定支持项目(GJCZ-0202-04, GJCZ-0103-04)资助

结构光设备可以挂载于铺丝设备上,随着铺丝头铺放复合材料的过程中实现实时采集铺层表面轮廓信息。由于在实际工业生产中,存在铺丝工况复杂,铺层表面多样化的情况<sup>[5]</sup>,为提升缺陷检测系统的识别率和识别速度,工业相机需要同时采集复材表面二维信息和经过线结构光调制后的三维信息,但是因为线结构光测量设备装载在铺丝机铺丝头处,随着铺丝头在模具表面进行高速运动,为防止采集到的铺层表面图像出现运动模糊,导致细微缺陷处光条纹信息缺失,铺层表面二维信息不精确,需要降低曝光时间同时增加环境光源提高图像对比度。由于铺层复合材料本身反射特性,在面对铺丝头上持续运行的热塑丝束加热灯及环境光源照明时,可能导致相机传感器捕捉获得部分高亮反射噪声,如何从图像中剥离出复材表面二维信息并提高光条中心提取精度和效率是进行铺层表面实时缺陷检测的关键。

国内外学者面向线结构光条纹中心提取算法进行了广泛地研究,经典的基于传统图像处理方法的线结构光条纹中心提取算法有骨架细化法、灰度重心法、极值法、方向模板法和 Steger 算法等。研究者在以上算法的基础上也提出了许多改进算法,李伟明等<sup>[6]</sup>提出利用阈值轮廓跟踪法结合灰度重心算法实现对光条中心提取速度的提升,但当图像背景复杂致使阈值选取不佳时算法会对噪声区域进行无效提取。Jian 等<sup>[7]</sup>提出借助帧差法,前后分别采集背景图像和光条图像利用减法做差得到无干扰的光条图像,随后采用灰度重心法计算光条纹中心,这类方法适用于背景变化不明显的场景,面向高速运动的铺丝过程难以实现光条图像的掩膜计算。Xu 等<sup>[8]</sup>用 Sigmoid-Gaussian 函数拟合激光条纹中心,并借助卡尔曼滤波方法建立光条感兴趣区域(region of interest, ROI)追踪模型,在前一帧光条 ROI 的基础上预测后一帧图像中待处理的 ROI,进而实现连续多帧光条中心提取效率的提升,但是该算法主要针对汽车表面轮廓提取,不适用于对精度有严格要求的复材铺层表面。此外,随着深度学习技术的广泛应用,一些学者开始探索将深度学习神经网络应用于光条纹中心提取任务中, Yang 等<sup>[9]</sup>提出了一种结合 Faster R-CNN 网络和 U-net 网络对图像中光条所占区域进行提取并实现图像分割去噪,再使用 Hessian 矩阵提取光条中心的方法,不过当提取算法在使用通用 CPU 计算时,难以满足实时性要求。Du 等<sup>[10]</sup>提出一种借助 Stripe-Segmentor 网络提取结构光条纹 ROI 利用梯度法获得条纹中心法线方向,结合双三次线性插值加权的灰度质心法实现光条纹中心亚像素坐标的提取,但是该算法主要面对的情况是图像中无背景光源,主要亮度信息为光条纹经过调制后的三维信息。

虽然研究者们针对不同线结构光在二维图像中所在区域情况设计出许多优化提取算法,但是这些算法应用于实际铺丝工业现场,面向铺放过程中采集到的多维信息图像,无法特定地针对采集到的复材表面二维图像进行适应性调

整分割并实现高速的光条纹中心线提取,不适用于高时效性的铺层缺陷重建检测。本文研究了复材表面光条纹图像的灰度值分布特点,提出如下方法:

首先对 coms 相机所采集到的复材表面光条纹图像依次进行中值滤波、高斯滤波、自适应阈值分割和基于 RANSAC 算法的光条边界拟合算法等操作,获得复材图像表面光条的 ROI。再采用轮廓跟踪算法获得光条轮廓范围,将光条轮廓区域与 8 阶滤波器进行卷积计算,基于卷积计算结果,将拟合出滤波值过零点的单方向亚像素坐标值作为光条骨架点。使用最小二乘法拟合直线求得光条骨架点的法线方向,在法线方向上取多个亚像素坐标点,对这些坐标点进行双线性插值拟合求取对应的灰度值,针对法线方向所得亚像素数据采用质心法求出光条纹中心点的双亚像素坐标值,最终提取出精确的线结构光条中心坐标。

## 1 图像预处理

本文采用的自适应线结构光条中心提取优化算法的详细流程如图 1 所示。

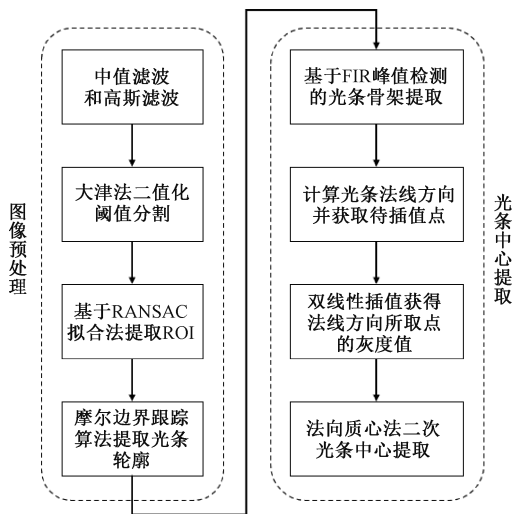


图 1 流程图

Fig. 1 Flowchart

### 1.1 线结构光光条特征

在理想情况下,激光束经鲍威尔棱镜折射后投出的线结构光光条截面光强分布呈现明显高斯分布特点,如图 2 所示。通过观察采集到的复材表面缺陷图像(如图 3)可发现:当线结构光均匀高亮打在复材铺层表面时,线结构光光条会在表面形成一条均匀纤细的类直线光条。因为复合材料丝带的厚度仅为 0.1~0.3 mm 之间,当线结构光直射在铺层表面诸如间隙、重叠、缺丝等具有高度差的缺陷时,图像中拍摄得到的光条纹线段会出现滑移或断线。由于图像中同时包含有线结构光光条信息和复合材料铺层表面二维信息数据,且 coms 和 ccd 相机传感器像素阵列存在有限填充因子的限制影响,会导致实际采集获得的光条纹横截面

灰度值分布如图 4 所示。以图像中某列为横截面,光条附近区域的横截面像素值呈现类高斯分布的情况,越靠近光条纹中心处,图像的灰度值梯度变化越明显。

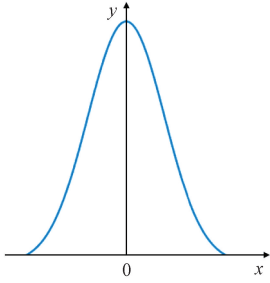


图 2 高斯曲线图

Fig. 2 Gaussian distribution curve plot



图 3 复材表面缺陷图像

Fig. 3 Composite surface defects image

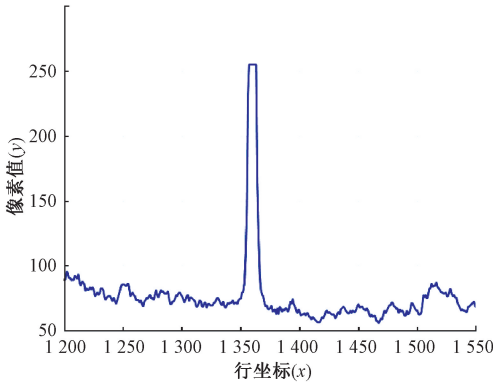


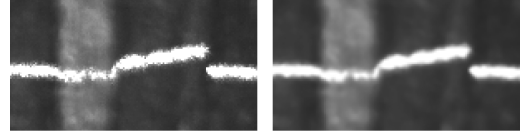
图 4 线结构光条附近灰度值曲线

Fig. 4 Grayscale intensity profile near line-structured light stripes

## 1.2 图像去噪及二值化

在自动铺丝设备(automated fiber placement, AFP)运行过程中,由于相机成像、图像长距离传输、现场光照变化及铺放设备晃动等因素,导致采集到的二维图像通常伴有多种噪声。这些噪声一般表现为椒盐噪声和高斯噪声,而噪声的存在会极大地影响相机成像质量。常用的图像滤波处理方法包括:均值滤波、中值滤波、高斯滤波、双边滤波、低通滤波等<sup>[11]</sup>,其中中值滤波和高斯滤波对椒盐噪声和高斯噪声具有明显的抑制作用。故对采集到的二维图像

进行滤波处理,减少噪声的影响,使图像平滑并消除光条纹边缘毛刺,有助于后续阈值分割和光条轮廓的提取。原始图像如图 5(a)所示,图像滤波处理结果如图 5(b)所示。



(a) 原始图像 (a) Original image  
(b) 滤波图像 (b) Filtered image

图 5 图像滤波前后对比

Fig. 5 Comparison of images before and after filtering

对滤波后的二维图像进行阈值分割,通过大津法<sup>[12]</sup>(即最大类间方差法)计算出最佳分割阈值,该算法按照图像本身的灰度特性,将图像分为前景及背景两个部分,当前景与背景之间的类间方差最大时,表明构成图像的两块部分差别最大,此时选取图像中使前后背景间类间方差最大的灰度值作为分割阈值,便可实现图像的二值化,将图像中前景信息与背景信息分割开来。其基本思想可以概括如下:

对于一幅灰度图像  $f(u, v)$ ,该图像共计有  $N(N = u \times v)$  个像素,且图像灰度值范围在  $f_{\min} \leq f(u, v) \leq f_{\max}$  ( $f_{\min} \geq 0, f_{\max} \leq 255$ ) 间,定义此时图像中灰度值为  $i$  的像素个数为  $n_i$ ,则有:

$$N = n_{f_{\min}} + \dots + n_{f_{\max}} = \sum_{i=f_{\min}}^{f_{\max}} n_i \quad (1)$$

图像总体像素的平均灰度值可表示为:

$$\mu = \frac{\sum_{i=f_{\min}}^{f_{\max}} i \times n_i}{N} \quad (2)$$

假设阈值为  $T$  ( $T \in [0 \sim 255]$ ),通过这个阈值可以将图像分割为  $C_1$  和  $C_2$  两个部分。

$$C_1 = \{f_1(u, v) \mid f_{\min} \leq f(u, v) \leq T\} \quad (3)$$

$$C_2 = \{f_2(u, v) \mid T \leq f(u, v) \leq f_{\max}\} \quad (4)$$

此时  $C_1$  部分占图像像素总体的分布概率为  $P_1$ ,平均灰度值为  $\mu_1$ ,  $C_2$  部分占图像像素总体的分布概率为  $P_2$ ,平均灰度值为  $\mu_2$ ,类间方差记作  $\sigma^2$ 。

$$P_1 = \sum_{i=f_{\min}}^T P_i \quad (5)$$

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=f_{\min}}^T i \times n_i}{\sum_{i=f_{\min}}^T n_i} \quad (6)$$

$$P_2 = 1 - P_1 \quad (7)$$

$$\mu_2 = \frac{\sum_{i=T}^{f_{\max}} i \times n_i}{\sum_{i=T}^{f_{\max}} n_i} \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \frac{(\mu p_1 - \mu_1)^2}{p_1 p_2} \quad (9)$$

$$T^* = \arg \max_{f_{\min} \leq T \leq f_{\max}} \sigma^2 \quad (10)$$

通过运用遍历法,找到一个最优分割阈值  $T^*$ ,最大化

$C_1$  和  $C_2$  两个部分的类间方差,使得  $C_1$  和  $C_2$  之间的差异达到最大化,从而实现良好的图像分割效果。分割结果如图 6 所示。

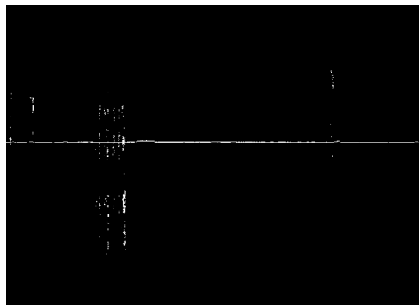


图 6 阈值分割图

Fig. 6 Thresholded image

### 1.3 基于 RANSAC 算法的光条 ROI 获取

因为复合材料表面存在一定的高反光区域,反射高光经过镜头传入传感器表面使得图像中存在高亮噪声区域,即使经过一系列图像处理,也不能保证阈值分割后的线激光条纹图像中不含有任何干扰噪声区域。图 6 经过滤波去噪和阈值分割后的图像中仍存在较明显的高亮噪声区域,且明显可以看出线结构光光条区域在整幅图像中所占的比例较小,为了提高运算效率,需要缩小运算范围,提取光条的 ROI。为实现自适应的 ROI 获取,采用直线拟合条纹上下边界的方法来提取光条的 ROI 区域。最小二乘法是最常用的直线拟合方法,其拟合速度快,但是极易受噪声点影响<sup>[13]</sup>。为了在含有高亮噪声区域的预处理后图像中能有效地提取光条纹上下边界范围,本文采用 RANSAC 算法(即随机抽样一致性算法)进行直线拟合。

RANSAC 算法是一种从数据集中估计最优数学模型参数的算法,RANSAC 算法的核心思想是将待拟合的数据集划分成局内点  $S_{in}$  和局外点  $S_{out}$ ,分别存储符合和不符合参数模型的数据。每次在数据集中抽取少量数据点进行模型拟合,根据模型容差值  $Sigma$  和数据点到模型的距离值  $d$  来确定局内点和局外点,然后进行不断迭代随机抽取数据点继续进行模型拟合,再次判断局内点和局外点。在达到预先设定的迭代次数  $T$  后,从候选模型中寻找使得局内点数目最多的模型作为最佳拟合模型。

遍历二值图像,从第 0 列开始每隔一定列像素间隔,自顶向下扫描,定位当前列方向上首个像素值为 255 的位置并记录保存,随后,继续向下追踪连续的 255 像素,直到遇到非 255 像素或列尾,记录下该连续段的最后一个 255 像素的位置,直到遍历完当前图像的最后一列,将上边界特征点集合记为  $s_1$ ,下边界特征点集合记为  $s_2$ 。使用上边界特征点集合  $s_1$  拟合直线的步骤如下:

步骤 1)从待拟合点集  $s_1$  中随机抽取 2 个特征点 A 和 B,根据 A、B 点的坐标确定直线  $l$  方程  $y=ax+b$ ;

步骤 2)计算除去 A、B 两点后的待拟合点集中的其余

点到直线  $l$  的距离  $d$ ;

步骤 3)根据设定的模型容差值  $Sigma$  与点到直线的距离值  $d$  进行大小判断,如果  $d < Sigma$  则判定该点为局内点;

步骤 4)局内点  $S_{in}+1$ ;

步骤 5)循环执行步骤 1)~4),将每次新拟合产生的直线模型与当前的直线模型进行比较,以局内点数量  $S_{in}$  的大小为标准,判断拟合模型的优劣,舍弃拟合效果不好的模型,保留拟合效果好的模型为当前直线模型,直到达到最大迭代次数。

下边界直线拟合的方法同上边界拟合方法一致。将拟合得到的两条直线所约束出的光条区域向四周扩展 50 个像素值作为后续处理的感兴趣区域,能够更大程度上保留光条纹的特征,处理所得光条 ROI 如图 7 所示。

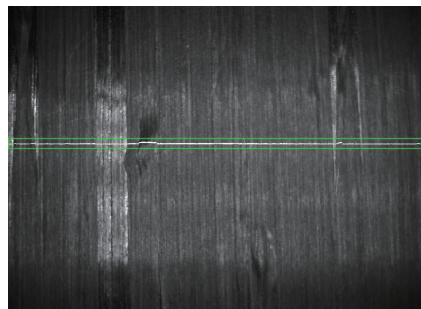


图 7 光条 ROI

Fig. 7 Light stripe region of interest

## 2 光条中心提取

### 2.1 摩尔轮廓跟踪算法

已经获得的感兴趣区域内仍包含有少量高亮噪声块,为了更精确的定位光条纹所在区域,采用轮廓跟踪方式,提取出光条轮廓所在区域,获得准确的光条上下边缘灰度值明显变化位置。摩尔轮廓跟踪算法<sup>[14]</sup>的核心思想如图 8 所示。

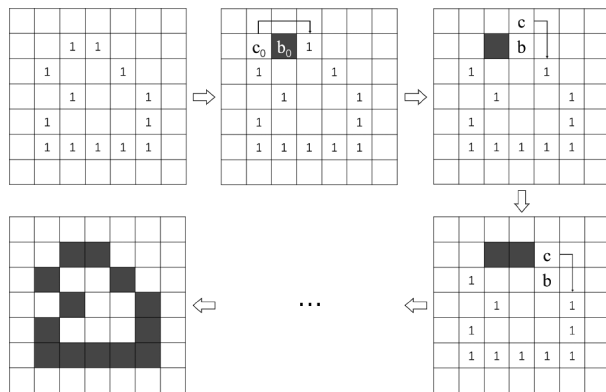


图 8 摩尔跟踪算法示意图

Fig. 8 Schematic diagram of moore tracking algorithm



步骤 1) 从待提取的二值图像左上角开始, 由左到右自上而下搜索第一个像素值为 1 的位置作为搜索起点  $b_0$ , 令  $c_0$  表示为  $b_0$  左边的邻点, 显然  $c_0$  总是像素值为 0 的背景点。从  $b_0$  的八邻点之一  $c_0$  开始顺时针搜索  $b_0$  除  $c_0$  外所有的八邻点。令  $b_1$  表示  $b_0$  周围第一个像素值为 1 的邻点, 将搜索到  $b_1$  的前一个邻点 (即从  $b_1$  开始逆时针旋转  $45^\circ$ ) 设为  $c_1$ 。存储  $b_0$  的位置;

步骤 2) 令  $b = b_0, c = c_0$ ;

步骤 3) 从  $c$  开始顺时针搜索  $b$  的八邻点, 令  $b$  的 8 个邻点分别表示为  $n_1, n_2, \dots, n_8$ 。将找到的第一个像素值为 1 的邻点表示为  $n_k$ ;

步骤 4) 令  $b = n_k, c = n_k - 1$ ;

步骤 5) 重复步骤 3) 和 4), 直到  $b = b_0$  时算法停止搜索, 找到的  $b$  个点序列就是该轮廓所有边界点的集合。

针对摩尔轮廓跟踪算法所得到的所有轮廓进行过滤处理, 因为线结构光条轮廓是狭窄细长形状, 所以对所有轮廓的面积和长宽比选取合适的阈值进行分割, 实现对噪声区域的剔除获得精确的光条轮廓区域。

## 2.2 基于 FIR 峰值检测的光条中心点提取算法

该方法原理是利用极值处导数为零的性质, 针对经过滤波后所得到的结果进行处理, 取滤波结果两侧正负值连线过零点为光条中心点, 如图 9 所示。

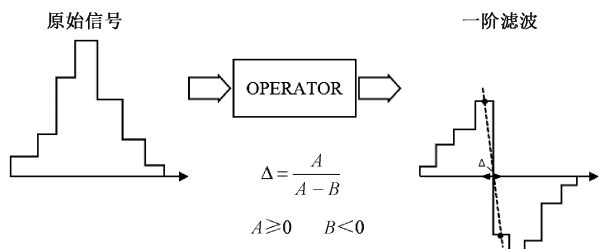


图 9 峰值插值

Fig. 9 Peak interpolation

本文采用 Blais 等<sup>[15]</sup>提出的 4 阶或 8 阶滤波器方法, 通过对激光条纹横截面附近的灰度值进行加权, 得到激光条纹截面方向的滤波结果。

$$Derivative_{4th} = f(u, v-2) + f(u, v-1) - f(u, v+2) - f(u, v+1) \quad (11)$$

$$Derivative_{8th} = f(u, v-4) + f(u, v-3) + f(u, v-2) + f(u, v-1) - f(u, v+4) - f(u, v+3) - f(u, v+2) - f(u, v+1) \quad (12)$$

其中,  $f(u, v)$  表示当前像素坐标处的灰度值,  $Derivative_{4th}$  表示 4 阶滤波算子,  $Derivative_{8th}$  表示 8 阶滤波算子,  $(u, v)$  表示图像上任意点的像素坐标。由于 8 阶滤波器具有优越的鲁棒性和精确性<sup>[16]</sup>, 本文重点采用 8 阶滤波器对线结构光光条进行处理。由于复材表面激光条纹图像数据较为复杂, 仅采用正负交界点处线性插值求解过零点并不能完全满足复杂数据下的精度要求。应用于实际

条纹数据的滤波器如图 10 所示。

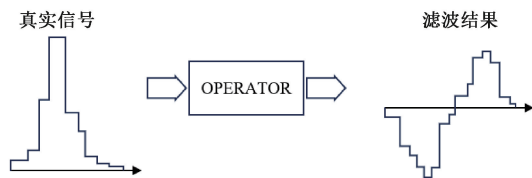


图 10 实际滤波结果

Fig. 10 Actual filtering results

针对传统 8 阶滤波器峰值点提取精度不足的问题, 本文提出了一种优化算法。步骤如下:

步骤 1) 使用摩尔轮廓跟踪算法, 将光条轮廓范围从 ROI 区域中提取出来;

步骤 2) 对于提取得到的光条轮廓  $S$ , 将轮廓内的所有像素点都与 8 阶滤波算子  $Derivative_{8th}$  进行卷积运算, 得到卷积结果  $I$ ;

步骤 3) 针对轮廓每一列的卷积结果, 通过对当前列轮廓起始位置  $F_{begin}(u, v_1)$  和结束位置  $F_{end}(u, v_2)$  间的所有滤波值进行从上到下搜索, 判断获得正负交界位置, 对搜索到的临近正负交界点处的多个滤波结果进行最小二乘直线拟合, 找到拟合直线过零点所对应的亚像素坐标值  $v_n$ ;

步骤 4) 将当前列所得亚像素坐标值  $v_n$  与前一列所得亚像素坐标值  $v_{n-1}$  进行做差, 取绝对值得到差值  $B$ , 将差值  $B$  大于阈值的亚像素坐标值  $v_n$  剔除, 继续向下进行正负交接判断, 再次拟合亚像素坐标位置, 直到符合设定的阈值范围;

步骤 5) 对光条轮廓范围内的每一列的卷积结果执行步骤 3)、4), 输出每一列的过零点, 即检测到的峰值位置;

步骤 6) 对当前 ROI 区域内的所有轮廓进行迭代求值后, 输出完整的光条中心点坐标。

所提出的方法包含提取光条结构轮廓, 对滤波后正负交界处临近多点进行最小二乘直线拟合判断过零点亚像素坐标位置, 对亚像素坐标前后值进行阈值判定, 这种设计使得算法具有更高的抗噪性, 且较于直接在正负交接点处插值计算零点坐标, 根据临近交界处的多个滤波点进行最小二乘拟合更加考虑光条中心点周围像素值权重的占比, 使得拟合结果具有更高的鲁棒性。

## 2.3 法向质心迭代法二次提取光条中心

为提高碳纤维复合材料表面缺陷检测的精确度, 针对峰值检测后所得到的单向亚像素精度的光条中心骨架点进行法向质心二次提取, 获得双亚像素精度的光条中心点坐标值。提取光条法线方向的方法很多, 比较常见的有基于 Hessian 矩阵和边缘检测结合法等。但是以上基于 Hessian 矩阵法提取光条法线方向对于运算量的要求较高, 难以实现光条纹中心线法线方向的快速提取<sup>[17]</sup>, 而边缘检测结合法虽然提取速度较快, 但是对噪声敏感且精度较低, 难以用于处理复材图片的复杂表面。所以本文采用粗提取得到的光条骨架点的切线方向作为光条的法线方

向,示意图如图 11 所示。

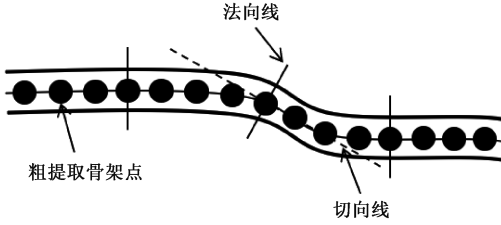


图 11 拟合光条法向线

Fig. 11 Fitted normal line of the light stripe

使用粗提取光条骨架点周围点进行直线拟合,待拟合的直线方程为: $y=kx+a$ , $k$ 和 $a$ 为两个待定参数,分别表示直线的斜率和截距。使用最小二乘法,将待检测点的周围多点(包括当前点)作为拟合数据 $(x_i, y_i)$ , $i=1, 2, \dots, N$ ,进行直线拟合。

$$\sum_{i=1}^N x_i y_i = \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) k + \left( \sum_{i=1}^N x_i \right) a \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i = \left( \sum_{i=1}^N x_i \right) k + Na \quad (14)$$

求解上述方程组便可得到待定参数 $k$ 和 $a$ 的最佳估计值:

$$k = \frac{N \left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right) \left( \sum_{i=1}^N y_i \right)}{N \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (15)$$

$$b = \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) \left( \sum_{i=1}^N y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right) \left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right)}{N \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (16)$$

根据最小二乘法拟合得到的当前检测点的切线斜率 $k$ 和当前点的坐标 $(x_1, y_1)$ 则根据点斜式:

$$m = -\frac{1}{k} \quad (17)$$

$$(y - y_1) = m(x - x_1) \quad (18)$$

可以得到当前点的法向方程。将光条法线方向内上下两倍光条宽度的所有亚像素坐标点进行双线性插值拟合得到对应的灰度值 $p(x_i, y_i)$ ,得到当前点法向方向的所有拟合坐标点集 $S$ 。根据点集 $S$ 利用质心法求出条纹中心的精提取坐标,其公式如下:

$$x = \frac{\sum_{i=0}^N p(x_i, y_i) \times x_i}{\sum_{i=0}^N p(x_i, y_i)} \quad (19)$$

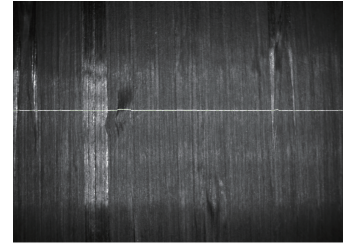
$$y = \frac{\sum_{i=0}^N p(x_i, y_i) \times y_i}{\sum_{i=0}^N p(x_i, y_i)} \quad (20)$$

其中, $N$ 为点集 $S$ 中的所有拟合点数, $(x, y)$ 为法向质心法拟合求得的精提取光条中心点。

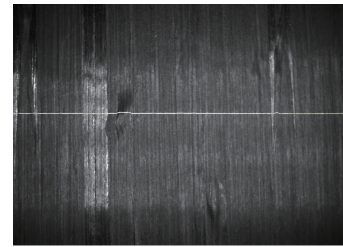
### 3 实验及结果分析

根据以上所提出的算法展开实验进行测试对比,实验时使用峰值功率为 240 W 的同轴环形频闪白光 LED 灯作为环境光源,使用功率 130 mw,中心波长 405 nm,投射线长 135 mm,宽 0.12 mm 的蓝紫色线激光为线激光发射器;使用大恒一千两百万 cmos 工业相机装配理光 25 mm 焦距的 C 口镜头为采集设备,相机分辨率为 4 096 pxel $\times$ 3 000 pxel,像素尺寸为 2.74  $\mu$ m $\times$ 2.74  $\mu$ m;软件所配置环境为 win10 系统,visual studio2017 以 win64release 模式下用 Opencv4.2 进行编程,用以提取图像中光条纹中心亚像素坐标位置。

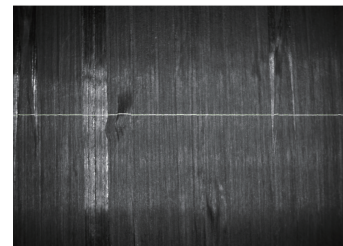
采用上述采集系统分别采集不同铺层缺陷表面共计 50 张线结构光条纹图像,涵盖诸如间隙、重叠、搭接、扭转、缺丝等常见缺陷种类,分别将这 50 张图像按照先后顺序进行编号。对以上五十张图像分别采用本文算法、Steger 算法、传统灰度重心算法及改进的灰度重心算法<sup>[18]</sup>进行实验测试,各个算法所运用的图像预处理条件如前文所述,均相同,在图像中为了便于画线展示光条纹中心线的位置,对亚像素级的坐标数值进行了取整处理。以采集到的包含有扭转、缺丝、褶皱、重叠、间隙缺陷的 1 号图像为例,图 12(a)为传统灰度重心算法提取的光条中心,图 12(b)为 Steger 算法提取的光条中心,图 12(c)为改进的灰度重心算法提取的光条中心,图 12(d)为本文算法提取的光条中心。



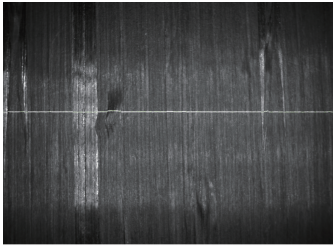
(a) 灰度重心算法  
(a) Grayscale centroid algorithm



(b) Steger算法  
(b) Steger algorithm



(c) 改进灰度重心算法  
(c) Improved grayscale centroid algorithm



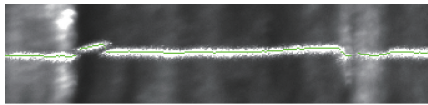
(d) 本文方法  
(d) Proposed method

图 12 光条纹中心线提取结果

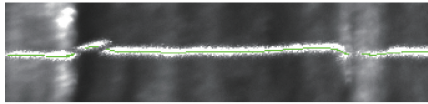
Fig. 12 Light stripe centerline extraction results

### 3.1 光条中心提取算法直观分析

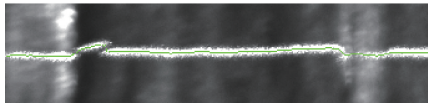
为了直观地对比不同算法所提取的效果,将缺陷表面图像中铺层缺陷所在处的中心线提取结果进行展示,图 13(a)~(d)为各算法提取扭转缺陷结果图,图 14(a)~(d)为各算法提取缺丝和褶皱缺陷结果图,图 15(a)~(d)为各算法提取重叠缺陷结果图,图 16(a)~(d)为各算法提取细微间隙缺陷结果图。



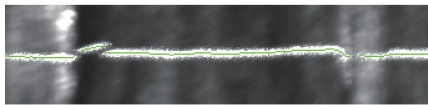
(a) 灰度重心算法  
(a) Grayscale centroid algorithm



(b) Steger算法  
(b) Steger algorithm



(c) 改进灰度重心算法  
(c) Improved grayscale centroid algorithm

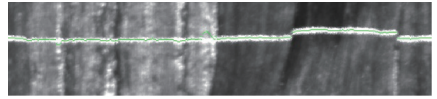


(d) 本文方法  
(d) Proposed method

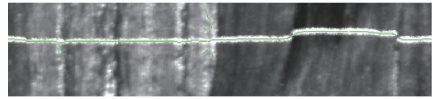
图 13 扭转缺陷提取结果

Fig. 13 Torsion defect extraction results

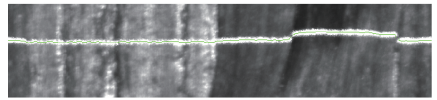
从以上图像局部缺陷处的线结构光条中心提取结果可以清晰地观察到,灰度重心法面对高亮噪声区域内的光条,提取效果不佳,会产生偏移,且提取到的线结构光中心线存在较为明显的锯齿状现象,线条的平滑性不佳。Steger 算法对于细微间隙缺陷处的光条提取效果不佳,且时常出现断线的情况,导致光条提取结果不够精确,同样在面对高亮噪声区域会提取多余杂点,提取效果不佳,需要后续叠加拟合算法实现去冗余点处理<sup>[19]</sup>。改进的灰度重心法由于叠加了多次滤波,光条中心轮廓平滑性有明显改进,且在光条



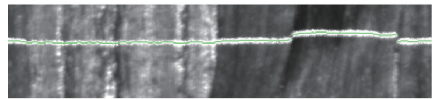
(a) 灰度重心算法  
(a) Grayscale centroid algorithm



(b) Steger算法  
(b) Steger algorithm



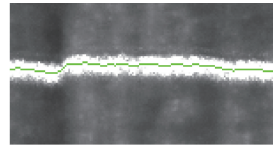
(c) 改进灰度重心算法  
(c) Improved grayscale centroid algorithm



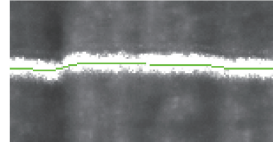
(d) 本文方法  
(d) Proposed method

图 14 缺丝和褶皱缺陷提取结果

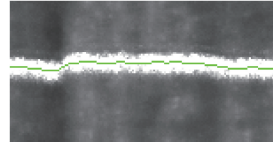
Fig. 14 Missing wire and fold defect extraction results



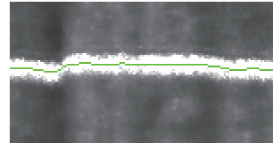
(a) 灰度重心算法  
(a) Grayscale centroid algorithm



(b) Steger算法  
(b) Steger algorithm



(c) 改进灰度重心算法  
(c) Improved grayscale centroid algorithm



(d) 本文方法  
(d) Proposed method

图 15 重叠缺陷提取结果

Fig. 15 Overlap defect extraction results

断线处有调整修补,但是修补后光条中心提取点中有明显杂点的产生,并在多次滤波后会影响重建点云的精度。相比之下,本文所提出的算法在整体上展现出了最佳的提取



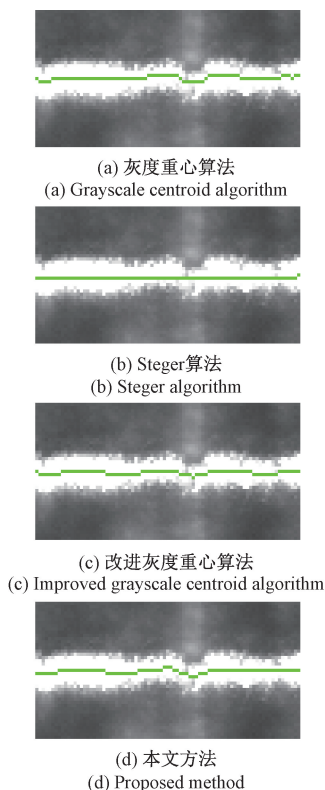


图 16 细微间隙缺陷提取结果

Fig. 16 Tiny gap defect extraction results

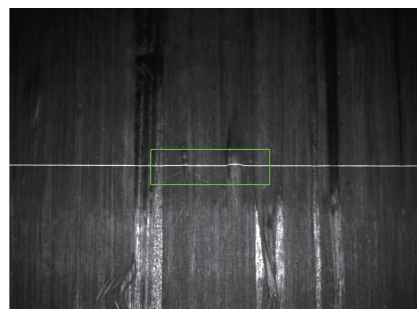
效果,所提取获得的光条纹中心线展示出较为准确的缺陷位置区域,所提取的光条纹中心线具有较好的连续性。

### 3.2 光条中心提取精度对比

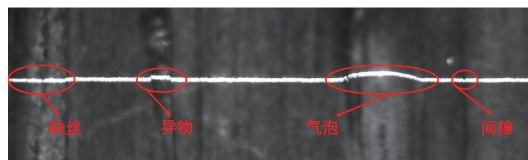
由于采集到的铺层表面线结构光条纹中心真值无法准确获得,因此难以使用标准误差  $\sigma$  判断算法提取光条中心坐标的精度。此时需要借助高精度线结构光轮廓仪针对铺层表面同一位置进行轮廓提取,选用的线结构光轮廓仪型号为深视智能 SR7140,点云间距为 0.03 mm,将提取出的轮廓数据作为真值用于判断本文算法提取的精度和准确性。

铺层缺陷表面图像和点云重建结果以 3 号图像为例进行展示,如图 17(a)。框线内的缺陷从左到右依次为缺丝,异物,气泡和间隙,如图 17(b)。在本文对比算法实验中,相机标定获得的内参结果和线结构光平面标定结果统一,图 18(a)~(d)为不同算法提取中心坐标重建后点云图像,图 18(e)为深视智能线结构光轮廓仪重建点云效果图像。

以轮廓仪重建点云数据为真值,针对多种缺陷位置点云进行定量处理,因为多数缺陷均在点云长度和高度方向有明显的起伏变化,选择以点云缺陷长度方向斜率起伏起始位置和结束位置为测量值。每种缺陷的标准差数据均为采集 10 组对比数据相减后作均值处理所得。测量结果如表 1 所示。



(a) 待重建图像  
(a) Image awaiting reconstruction



(b) 主要缺陷展示  
(b) Highlighted defect presentation

图 17 重建光条纹图像

Fig. 17 Reconstructed light stripe image

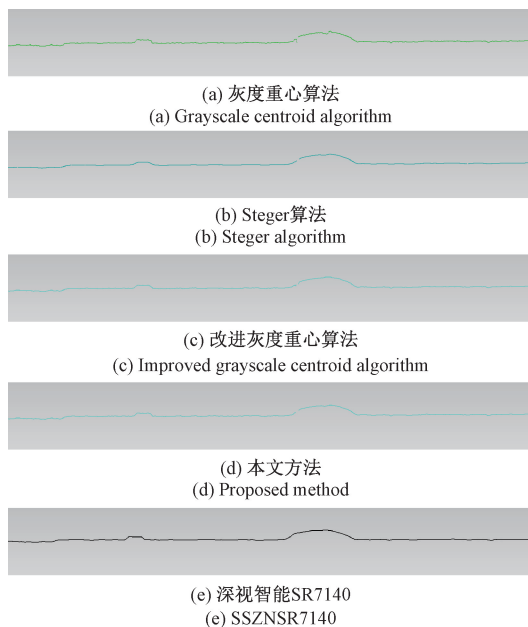


图 18 三维轮廓线

Fig. 18 3D contour line

如表 1 所示,针对细微间隙处,由于 Steger 算法处理获得的光条纹中心线过于平滑无法有效检测出细微间隙处,无法计算标准差,因为改进灰度重心算法为了使所提取光条中心线有较好的平滑特性导致其和 Steger 算法在面对缺陷处定量测量时点云精度同样表现较差,由于铺丝过程中产生的重叠缺陷具有直角梯形型式,一边因为丝束搭接具有明显高低差,一边则平缓下降紧贴铺层表面,使得灰度重心算法提取获得点云缺陷精度稍优于本文算法。但是本文算法所提取点云缺陷数据整体标准差较小,且本文算法



表 1 提取光条缺陷处重建精度

Table 1 Reconstruction accuracy at defect regions of light stripe

缺陷 (类)	算法提取所得点云缺陷的标准差/mm			
	灰度 重心法	Steger 法	改进灰度 重心法	本文 算法
缺丝	0.009 92	0.054 82	0.001 38	0.000 67
异物	0.003 32	0.015 09	0.018 71	0.002 51
气泡	0.102 52	0.179 62	0.101 64	0.082 16
间隙	0.006 17	—	0.025 00	0.006 01
重叠	0.005 38	0.030 62	0.009 66	0.007 70
扭转	0.021 22	0.029 66	0.041 29	0.011 79

采用光条纹骨架拟合计算光条法线方向并在法向上再次提取光条纹中心线,整体提取所得轮廓曲线更符合实际缺陷处的轮廓形貌曲线,相较于灰度重心法所提取的锯齿形轮廓线、Steger 算法提取出的断点轮廓曲线和改进的灰度重心法多次平滑拟合得到的轮廓曲线,兼具不错的平滑性和优良的细微间隙重建精度,对复材铺层表面缺陷的重建具有良好的鲁棒性。

3.3 极端光照条件下光条中心提取算法精度对比

为了验证本文光条纹中心线提取算法在面对极端光照条件下提取的精度,对采集到的 10 张正常光照(光源功率 5%)下的缺陷表面图片和同时采集获得的极端光照(光源功率 50%)下的缺陷表面图片分别采用以上 4 种算法进行中心线提取,各提取 5 次,将前后提取获得的光条纹中心线坐标进行对比处理。不同算法面对极端光照情况下所提取激光条纹中心线标准差如表 2 所示。

表 2 激光条纹中心线标准差

Table 2 Standard deviation of laser stripe centerline

中心线提取方法	中心线标准差/pixel
灰度重心法	21.658 940
Steger 法	2.005 510
改进灰度重心法	0.398 816
本文算法	0.377 566

不同算法提取极端光照条件下的光条纹中心图像如图 19(b)~(h)所示,正常光照下的光条纹中心图像如图 19(a)~(g)所示。

从图 19 中可以明显看出,当面对极端光照情况下,灰度重心法所提取的光条中心点完全失效,与表 2 中的标准差数据相对应。由表 2 和图 19 可以看出,本文算法在面对极端光照情况下,提取出的激光条纹中心线具有较好的鲁棒性。

3.4 光条中心提取算法速度对比

为了验证本文光条纹中心线提取算法的运行效率,对

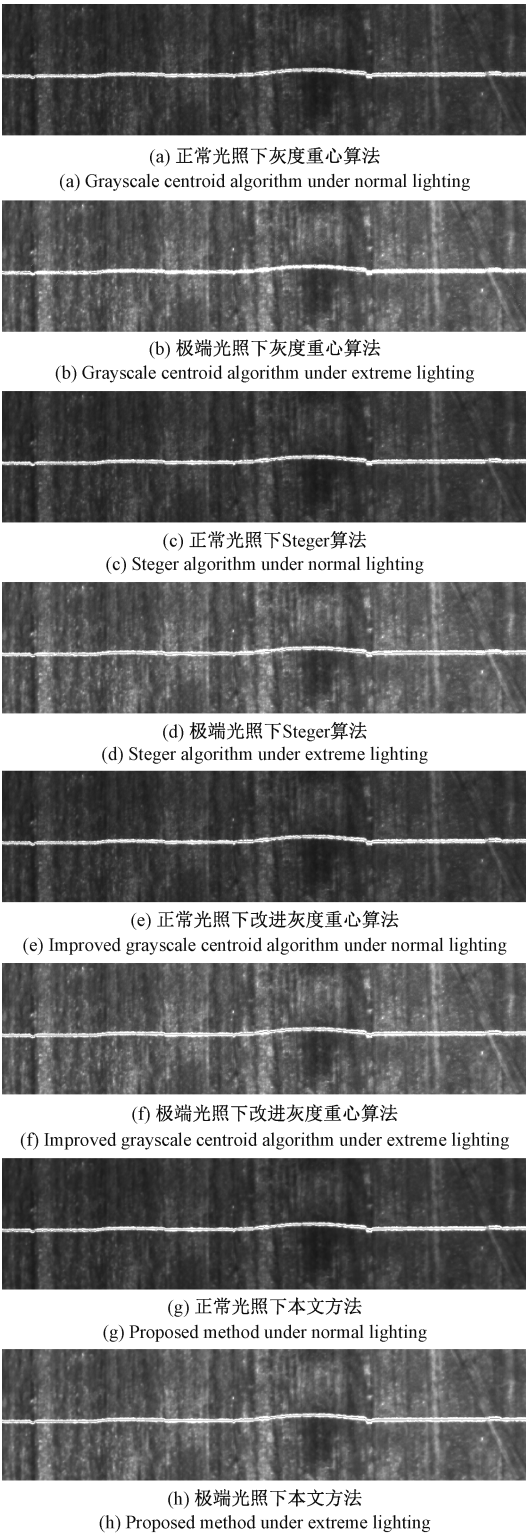


图 19 光条纹中心线提取结果对比

Fig. 19 Comparison of light stripe centerline extraction results

以上采集到的 50 张缺陷表面图片分别采用 4 种算法进行中心线提取,每轮处理 50 张图像,分别运行 10 次,取 10 次运算时间的平均值进行比较。不同算法提取 50 张图像激

光条纹中心线平均时间如表 3 所示。

表 3 提取光条中心线时间

中心线提取方法	提取光条纹中心所用时间/s
灰度重心法	11.299 9
Steger 法	25.271 2
改进灰度重心法	12.387 0
本文算法	5.357 8

如表 3 所示,Steger 算法由于需要多次计算海森矩阵特征值求取光条法线方向,需要大量计算时间,因此导致算法的运行时间相对较长。改进的灰度重心算法由于需要进行二次插值拟合,且需要进行两次滤波,增长了计算时间。本文算法由于提取了光条纹轮廓位置,相较于直接针对光条 ROI 进行计算的灰度重心法进一步减少了计算量,在时间方面拥有较好的提升表现。与灰度重心法相比,本文算法提取速度约提高 2 倍。与 Steger 算法相比,本文算法提取速度约提高 5 倍。

综合来说,本文算法满足铺丝生产环境下对点云重建的实时性要求和对缺陷位置提取的准确性要求,为复材铺层表面缺陷检测提供了前置技术支持。

4 结 论

面向线结构光的复材铺层表面测量中,针对拍摄得到铺层表面图片存在高亮噪声区域和铺层表面细微缺陷处光条中心线难以提取等问题,本文提出一种自适应的铺层表面线结构光中心线提取算法。首先将采集到的二维图像进行滤波,Ostu 阈值分割并使用 RANSAC 算法提取光条 ROI,接着通过轮廓跟踪算法和 8 阶滤波算子提取光条纹骨架点位置,最后通过法向质心法实现对激光条纹中心线的精确提取。通过实验结果验证可得,本文算法在复材表面存在高亮噪声区域的情况下,仍可以有效识别铺层表面细微缺陷激光条纹中心处,且无冗余点干扰,连续性较好,在铺层缺陷表面重建中,本文算法有着更佳的鲁棒性,同时本文算法在提取激光条纹中心线的速度相比 Steger 算法提高了近 5 倍。总体表明,本文算法能够实现快速可靠地提取复材表面激光条纹中心线,符合铺层表面缺陷检测对实时性的要求,为后续铺层表面缺陷检测工作提供可靠的点云缺陷信息。未来的工作将致力于针对本文算法所提取获得铺层表面缺陷点云数据的检测处理及研究。

参考文献

[1] 周亚罗,章洁,靳城楠,等. 基于 PCA 的金属工件表面线激光中心提取算法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(18):71-79.  
ZHOU Y L, ZHANG J, JIN CH N, et al. Laser center extraction algorithm of metal workpiece surface

line based on principal component analysis [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47 (18): 71-79.  
[2] 叶涛,何威燃,刘国鹏,等. 基于卷积神经网络的线结构光高精度三维测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2):183-195.  
YE T, HE W R, LIU G P, et al. High-precision 3D measurement method based on convolutional neural networks for line structured light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2):183-195.  
[3] 梅天灿,肖尧,毛索颖,等. 基于线结构光的三维垂线位移测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4):189-196.  
MEI T C, XIAO Y, MAO S Y, et al. 3D vertical displacement measurement method based on line structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 189-196.  
[4] 丁希仑,罗伟恒,刘斐,等. 自动铺丝成型构件缺陷在线检测技术进展[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9):1721-1733.  
DING X L, LUO W H, LIU F, et al. Review on automated fiber placement induced defects and their online monitoring technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(9):1721-1733.  
[5] 张杰,赵勃冲,张丽艳,等. 基于 2.5D 图像的复合材料铺丝在线缺陷检测[J]. 复合材料学报, 2025, 42(7): 4112-4128.  
ZHANG J, ZHAO B CH, ZHANG L Y, et al. Online defect detection of composite material fiber placement based on 2.5D images[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(7):4112-4128.  
[6] 李伟明,彭国,高兴宇,等. 线激光光条中心快速提取算法[J]. 中国激光, 2020, 47(3):192-199.  
LI W M, PENG G, GAO X Y, et al. Fast extraction algorithm for line laser strip centers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3):192-199.  
[7] JIAN X, CHEN X, HE W P, et al. Outdoor 3D reconstruction method based on multi-line laser and binocular vision [J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2):9554-9559.  
[8] XU G, ZHANG X Y, LI X T, et al. Timed evaluation of the center extraction of a moving laser stripe on a vehicle body using the Sigmoid-Gaussian function and a tracking method[J]. Optik, 2017, 130: 1454-1461.  
[9] YANG G W, WANG Y ZH. Three-dimensional measurement of precise shaft parts based on line structured light and deep learning[J]. Measurement, 2022, 191,110837.

- [10] DU H, WANG H F, GUAN Y Y, et al. Extraction of structured light stripes center from non-uniform scattering surfaces fused with deep learning[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 177: 108129.
- [11] 王志永, 于宇, 王武越, 等. 基于改进 Steger 算法流程的线激光中心提取[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 84-89.  
WANG ZH Y, YU Y, WANG W Y, et al. Line laser center extraction based on improved Steger algorithm process [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 84-89.
- [12] XIE K, LEI D, DU W K, et al. The monitoring of bridge under complex illumination based on digital image technology [J]. Measurement, 2023, 206: 112219.
- [13] 傅灯斌, 江茜, 齐龙, 等. 基于区域生长顺序聚类-RANSAC 的水稻苗带中心线检测[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 47-57.  
FU D B, JIANG Q, QI L, et al. Detection of the centerline of rice seedling belts based on region growth sequential clustering-RANSAC[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(7): 47-57.
- [14] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. Texas State: Pearson Education, 2018: 814-816.
- [15] BLAIS F, RIOUX M. Real-time numerical peak detector[J]. Signal Processing, 1986, 11(2): 145-155.
- [16] LI J L, WANG L, WAN Y Y. An adaptive weighted width extraction method based on the Hessian matrix for high-precision detection of laser stripe centers in low-exposure[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 181: 108436.
- [17] 高秋玲, 成巍, 李文龙, 等. 复杂光照环境下的线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光杂志, 2024, 45(5): 86-92.  
GAO Q L, CHENG W, LI W L, et al. A method for extracting the center of linear structured light stripes in a complex lighting environment [J]. Laser Journal, 2024, 45(5): 86-92.
- [18] 西安交通大学. 适用于水下空间重构的多线激光条纹中心提取方法和系统: 202311755181.4 [P]. 2024-02-09.  
Xi'an Jiaotong University. A multi-line laser stripe center extraction method and system for underwater spatial reconstruction: 202311755181.4 [P]. 2024-02-09.
- [19] CHANG H, LI D Y, ZHANG X Y, et al. Real-time height measurement with a line-structured-light based imaging system [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 368: 115164.

#### 作者简介

刘创, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、三维重建。

E-mail: zhangqingzhi101@outlook.com

王立忠(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为三维光学测量技术。

E-mail: wanglz@mail.xjtu.edu.cn