

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.022

灰色关联融合霍夫变换的碳纤维板材边缘检测

刘瑞明¹, 周韬¹, 王志伟², 陈伦奥¹, 丁安南¹, 桑熔¹, 郑昂¹

(1. 江苏海洋大学电子工程学院, 江苏连云港 222000; 2. 中复碳芯电缆科技有限公司, 江苏连云港 222000)

摘要: 风力发电是能源结构中的重要组成部分, 碳纤维板材是制造高性能风力发电叶片的关键复合材料。由于碳纤维板材边缘没有脱模布包覆, 容易出现缺陷。为保证碳纤维板材的质量, 需要在生产检测环节严格执行质量检测标准。机器视觉在质量检测方面具有实时且高效的特点, 能够满足生产线实时检测的需要。碳纤维板材边缘检测算法是以工业控制计算机为算力平台, 对碳纤维板材边缘实现机器视觉检测。利用灰色关联融合霍夫变换对板材边缘贴合距离与脱模布贴合精确率进行检测。在进行碳纤维板材边缘检测时, 首先预处理图像, 将降噪算法与模糊边缘关联度融合在灰色关联中降低处理数据量; 其次, 利用灰色关联自适应滤波区分边缘图层与无效图层, 对边缘图层的有效数据进行筛选; 最后, 将有效边缘图层灰色关联度数据融合霍夫变换进行边缘参数空间运算, 实现碳纤维板材边缘检测。试验数据验证表明, 在每秒检测帧数、平均误差与检测精确率上符合碳纤维板材质量检测要求。

关键词: 机器视觉; 碳纤维板; 灰色关联; 霍夫变换; 边缘检测

中图分类号: TQ325.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0141-07

Detection of carbon fiber plate edge based on grey relational fusion Hough transform

LIU Ruiming¹, ZHOU Tao¹, WANG Zhiwei², CHEN Lunao¹, DING Annan¹, SANG Rong¹, ZHENG Ang¹

(1. College of Electronic Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222000, China;

2. Zhongfu Carbon Fiber Core Cable Technology Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: Wind power generation is an important part of energy structure, and carbon fiber sheet is the key composite material for manufacturing high-performance wind power blades. The edge of carbon fiber sheet is easy to appear defects because it is not covered with release cloth. In order to ensure the quality of carbon fiber sheet, it is necessary to strictly implement quality inspection standards in production inspection. Machine vision has the characteristics of real-time and high efficiency in quality inspection, which can meet the needs of real-time inspection in production line. The edge detection algorithm of carbon fiber sheet is based on industrial control computer, which realizes machine vision detection of carbon fiber sheet edge. Grey relational fusion Hough transform was used to detect the bonding distance between the edge of the plate and the bonding accuracy of the release cloth. In the process of edge detection of carbon fiber sheet, the image was preprocessed firstly, and the noise reduction algorithm and fuzzy edge correlation degree were combined in gray correlation to reduce the amount of data to be processed. Secondly, the edge layer and invalid layer were distinguished by gray correlation adaptive filtering, and the effective data of the edge layer were filtered. Finally, the effective edge layer gray correlation degree data was combined with Hough transform for edge parameter space operation to realize edge detection of carbon fiber sheet. The experimental data show that the number of frames per second, average error and detection accuracy meet the requirements of carbon fiber plate quality inspection.

Keywords: machine vision; carbon fiber board; grey correlation; Hough transform; edge detection

风力发电在可再生能源结构中的占比逐年增长, 风电装机总功率也在逐年提高。为满足国家的能源结构需求, 不仅要扩大风电发电机组装机数

量, 也要增大单个风力发电机组的功率。实现单个风力发电机组的功率增加必须增加叶片尺寸, 进而对整个风力发电叶片的结构强度提出了更高的要

通信作者: 周韬, 硕士研究生, 主要研究方向为复合材料缺陷检测

收稿日期: 2024-03-01

引用格式: 刘瑞明, 周韬, 王志伟, 等. 灰色关联融合霍夫变换的碳纤维板材边缘检测[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 141-147.

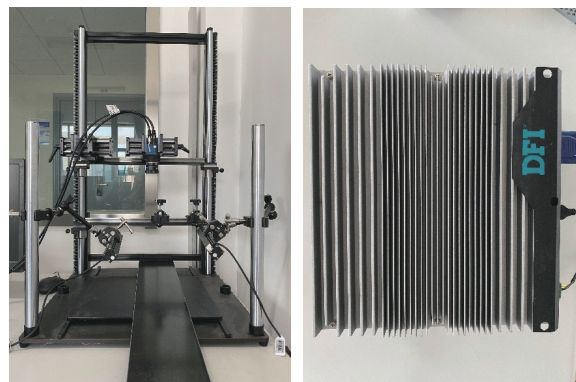
LIU Ruiming, ZHOU Tao, WANG Zhiwei, et al. Detection of carbon fiber plate edge based on grey relational fusion Hough transform[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 141-147.

求,尤其是对内部大梁板构件的力学性能提出了更高的要求。碳纤维板材具有质量轻、强度高、抗剪切等优良特性,是制造新型大尺寸与轻量化风电叶片的理想材料^[1]。碳纤维板材生产工艺流程主要包括浸渍、拉挤、覆膜与冷却。在生产过程中,浸渍过树脂基体的碳纤维丝束通过模具拉挤成型后制成碳纤维板材,后在表面覆盖脱模布保护板材表面,降温冷却后一次成型^[2]。碳纤维板材表面覆盖脱模布可以保持板材表面清洁,清洁的板材表面有利于多层碳纤维板的黏合。由于脱模布为双面贴合,在碳纤维板材边缘无法覆盖脱模布的区域,板材边缘极容易受到腐蚀或损毁。若贴合不良将导致脱模布对碳纤维板材的保护无法达到生产质量要求。因此在进行缺陷检测时,需要严格检查碳纤维板材边缘。生产过程中通常采用人工视觉检查脱模布边缘来检验板材质量,人工检测边缘的方法工作效率低下,检测精确性较低。

近年来,随着图像处理技术的发展和计算机平台的进步,机器视觉处理工业生产问题得到了广泛的应用。复合材料的边缘缺陷检测也可以采用机器视觉的方式^[3],传统边缘检测方法有 Roberts 算法、Canny 算法^[4]、HED 算法^[5]、Hough 算法等。然而传统边缘检测方法在检测平均误差与精确度方面都有一定的局限性^[6]。随着深度学习算法的研究不断深入。诸如:VGG^[7]、CNN^[8]、HED^[9]、Yolo^[10]等算法也常被用来提取边缘特征,但深度学习算法对设备算力有着较高的要求。在工业检测领域,高算力的计算机平台不仅增加了设备成本,而且进行边缘数据库建立时需要采集大量碳纤维板材边缘数据样本,进行样本训练后才能进行检测。不同板材工艺与覆膜工艺的碳纤维板材则需要不同的数据库样本进行训练,大大增加了样本数据库建立难度。工业控制计算机注重运行的稳定与安全,对于深度学习算法的运行能力较弱。因此利用工业控制计算机难以进行深度学习算法的实时检测。基于此,笔者在碳纤维板材边缘检测过程中,利用灰色关联自适应滤波抑制了随机噪声干扰。通过灰色关联与霍夫变换融合降低边缘数据无效积累,简化算法冗余结构,提高有效边缘数据利用率,增强边缘检测实时处理能力,提高边缘算法检测精度。在利用工业控制计算机进行碳纤维板材边缘检测时,降低了对于计算平台的算力要求。

1 检测系统的组成

基于机器视觉的碳纤维板材边缘缺陷检测系统如图1所示,检测组成部分主要由图像采集系统、图像处理系统与光源辅助系统三部分组成^[11]。其中,图像采集系统由两个 CCD 相机分别对板材上下两面进行彩色图像采集,CCD 相机型号为 MER-132-30GC,并通过 GigE 数据接口进行图像数据的传输,并集成 I/O (GPIO) 接口,网络千兆 wan 口将图像传输至图像处理系统。图像处理系统为 DFI 工控机(图1b),型号为 EC511-HD6G45,具有4个千兆网络 wan 口,该工控机易于固定安装,功耗较小采用被动散热系统,固态硬盘存储可以减少因生产线震动而导致的数据受损丢失,有效提高整体系统运行的稳定性。光源辅助系统主要由工业 LED 辅光灯与亮度调节控制器组成,可以在封闭空间条件下为待检测产品提供稳定可调的光源条件,提高检测的稳定性与均衡性,防止受到外界自然光线的影响。首先考虑到碳纤维板材经过高温热加工拉挤成型工艺处理时^[12],温度高达 800 °C,为防止长期近距离高温对于 CCD 摄像头产生热辐射,经试验测试反复比较,将工业 CCD 摄像头置于上下距离 35 cm 的位置进行采集图像最佳,对于 CCD 摄像头的热辐射在阈值内。亮度调节控制器则通过控制电流获得理想的 LED 辅光灯亮度,微调 LED 辅光灯调整距离与位置。通过 GigE 数据接口采集的图像数据传输至 DFI 工控机,并且调整相机图像白平衡、采集帧率、焦距与光圈得到稳定清晰的图像。



(a) Machine vision experimental stand (b) Industrial control computer

图1 检测设备

Fig. 1 Checkout equipment

2 边缘检测

边缘检测方法的选择直接影响到边缘检测精度,在边缘检测过程中,时常出现的图像噪声是影响检测精度的关键因素,不同算子抑制噪声的能力

直接影响到边缘检测的精度。在选择边缘检测方法时,需要根据实际检测需求选取合适的边缘检测方法,并且能够抑制图像噪声。传统的图像降噪方法有均值滤波、自适应滤波、中值滤波以及小波去噪等^[13]。去噪方法需针对特定的场景优化。在边缘检测过程中,时常出现随机纹理影响目标纹理的识别,即算法处理识别到的边缘中包含不需要的纹理。在碳纤维板材边缘识别过程中,识别的目标边缘是脱模布的边缘,而板材表面的纤维纹理以及其他纹理都是影响脱模布边缘识别的因素。由于脱模布平行于板材边缘,且距离板材边缘2~3 mm,因此有其特定的规律。对于具有单一色彩特征的碳纤维板材表面脱模布边缘检测,采取灰色系统理论中的灰色关联度进行去噪^[14]。灰色关联分析以具有建模样本少,系统具有预测性著称。通过弱化随机性,挖掘数据潜在规律性。能够处理小样本与贫信息系统。通过建立灰色预测区间及其关联性去除噪声干扰。

2.1 灰色关联自适应滤波

灰色关联度是用来描述系统中关联要素紧密程度的度量,是系统变化态势的一种度量方式^[15]。通过将系统中的变化量序列化,可以通过序列变化趋势与突变表示系统要素之间的紧密程度。通过系统序列的紧密程度可以筛选出系统中的目标要素。关联系数的选择用于定量的表示要素之间的相似性和相异性^[16]。序列选取具有方向性,设像素点为 $f(i, j)$,参考序列为 $x_0 = \{a, b, c\}$ 。假设比较序列为 $x_1 = \{x_1(k) = 12, 34, 56\}$,比较序列 x_1 由像素点 $f(i, j)$ 与其邻域像素点组成,通常情况下可以通过比较水平、垂直、左上右下、左下右上4个方向的像素构成来确定像素点 $f(i, j)$ 周围的像素变化情况。由于碳纤维板材表面具有脱模布边缘与板材边缘平行的特点,因此只通过比较垂直与水平方向上的像素点 $f(i, j)$ 变化即可。如图2与图3所示,水平方向上3个比较像素点为 $f(i-1, j), f(i, j), f(i+1, j)$,垂直方向上3个比较像素点为 $f(i, j-1), f(i, j), f(i, j+1)$ 。平面方向上则比较周围像素点如图4所示,在这个3×3的像素矩阵中,像素点之间均具有灰色关联。由灰色关联特性的一般性质可知^[16],灰关联度越大,比较序列 x_1 与参考序列 x_0 越相似;灰关联度越小,比较序列 x_1 与参考序列 x_0 越相异。模糊边缘的确定可以通过比较序列 x_1 与参考序列 x_0 之间的

变化剧烈程度确定。

$f(i, j-1)$
$f(i, j)$
$f(i, j+1)$

图2 垂直方向

Fig.2 Normal direction

$f(i+1, j)$	$f(i, j)$	$f(i-1, j)$
-------------	-----------	-------------

图3 水平方向

Fig.3 Horizontal direction

$f(i-1, j-1)$	$f(i, j-1)$	$f(i, j+1)$
$f(i-1, j)$	$f(i, j)$	$f(i+1, j)$
$f(i-1, j+1)$	$f(i, j+1)$	$f(i+1, j+1)$

图4 平面方向

Fig.4 Plane direction

采用邓氏灰色关联度计算窗口模板中每一个像素灰度值与窗口模板中灰度平均值的关联度差异。通过计算关联度差异,抑制窗口模板噪声,提高窗口模板中心点的灰度精确性。避免盲目搜索带来的效率损耗。根据窗口滑动宽度大小,可以近似地划分出边缘区域。灰色关联度算法具有贫样本与小样本分析的特质。在狭窄的窗口信息下,通过抑制低频灰度波动降低误检的概率,以滤除不良信息干扰,提高窗口宽度测量准确率,从而划定准确的边缘检测区域。

2.2 灰色关联系数

碳纤维板材图像经过噪声滤波之后,在边缘处会产生较大的灰度值阶跃变化,灰度值的阶跃变化在比较序列中通常表现为数值突然变大或变小。通过从水平方向与垂直方向比较序列的数值变化,利用阈值系数可以将边缘序列与非边缘序列分离。利用灰色关联度可以比较模糊的确定边缘在板材表面的位置。边缘在特定方向上具有连续性但在通常情况下边缘点与非边缘点与窗口中心点的关联度上有一定的区别。若窗口中心在边缘之上,那么窗口之中大部分的点灰度与之关联度较大,称之为强关联;若窗口中心在非边缘点,那么窗口之中大部分的点灰度与之关联度较小,称之为弱关联;若图像分辨率较高,边缘会被放大至多个检测窗口之中。此时,窗口之中即使全部为边缘点,也为弱关联,因此引入灰色关联系数辅助判定避免误差,虽然灰度阶跃的范围会因边缘灰色关联系数的选

取而发生变化,这种灰度阶跃的变化有着提前预知边缘范围的作用,同时可以用于边缘宽度测量。参考序列为 $x_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, 比较序列为 $x_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$, 记 $\min_i \min_k \Delta_i(k) = \Delta(\min)$, $\max_i \max_k \Delta_i(k) = \Delta(\max)$, 灰色关联系数 $\xi_i(k)$ 见式(1)。

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_i(k) + \rho \Delta(\max)} \quad (1)$$

式中: $\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$ 为参考序列 $x_0(k)$ 与比较序列 $x_i(k)$ 差值的绝对值, $i = 1, 2, 3, \dots, m$, ρ 为分辨系数; $x_0(k)/x_i(k)$ 为分辨率。通常 ρ 与 $x_0(k)/x_i(k)$ 成反比, ρ 越小, 分辨率越大; ρ 越大, 分辨率越小。其中灰色关联系数 ρ 取值过程中要控制 $\xi_i(k)$ 的散布范围。 $\xi_i(k)$ 取值范围越接近 1, 此时 $\rho \rightarrow +\infty$, 表示选取的图像灰度区域关联程度高, 在边缘提取过程中体现为边缘提取难度越高。因此在不引入噪声干扰的情况下, 应尽可能减小此时 ρ 的取值, $\xi_i(k)$ 才能尽可能地提高边缘检测能力。

2.3 标准霍夫变换

在线视觉边缘检测系统在纺织以及线缆等领域是一种全新的质量控制方法, 可以精确测量被检测物宽度的变化。标准霍夫(Hough)变换是常用的直线拟合方法^[17], 然而 Hough 变换缺点明显, 如运算量大、速度慢和不满足实时检测的要求等。Hough 变换在检测过程中可以通过峰值点的检索, 并将二维平面空间点参数空间化, 利用参数空间的离散特性进行参数累加。当使用极坐标表示直线时, 坐标公式如 $r = i \sin \theta + j \cos \theta$, i 为横坐标, j 为纵坐标。图像中每一个 (x, y) 对应一个特征点 (i, j) , 需要设一个参数为 $H(m, n)$ 的累加器矩阵, 其中 r 被 m 等分, θ 被 n 等分。由于标准 Hough 变换基于一对多的映射原理, 对于一幅参数为 $N \times N$ 的图像需要进行 $m \times n \times N^2$ 次 Hough 变换, 由于复杂的三角函数运算与坐标转换运算会消耗计算时间, 因此标准 Hough 变换直线检测方法虽然在抗干扰能力强以及直线拟合效果上比较有优势, 但不适用于实时边缘检测。

2.4 灰度关联融合 Hough 变换

灰色关联融合 Hough 边缘检测法在灰色关联已经取得关联模糊边缘的基础上只需将参数空间的方向角 θ 均匀分为 M 个区间, 代表 M 个均匀角度区间。即把 $\theta(x, y) \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ 均匀分为 M 个区间,

代表有 M 个均匀角度区间, 表示如式(2):

$$\theta_i(x, y) \in [-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi i}{M}, -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi(i+1)}{M}), \quad i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (2)$$

θ_i 为边缘像素点的不同集合, 将 $H(\theta_i)$ 定义为式(3)。

$$H(\theta_i) = \begin{cases} \sum_{x,y} 1, & \theta_i(x, y) \in \theta_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$H(\theta_i)$ 是在参数空间中不同角度区间的像素数, 如果边缘直线采样数为 n , 那么有效采样概率 P_1 为式(4)。

$$P_1 = \frac{n \times (n-1)}{\sum_{i=0}^m H(\theta_i) (\sum_{i=0}^m H(\theta_i) - 1)} \quad (4)$$

由于分母部分存在大量的累加和, 因此产生了大量的处理数据, 占用计算机内存分析与 CPU 占用率, 因此有效采样概率极小, 大量的无效数据产生降低了实时处理效率, 以及边缘计算的准确性。

采用灰色关联融合 Hough 变换的有效采样概率 P_2 为式(5)。

$$P_2 = \frac{n \times (n-1)}{H(\theta_i) [H(\theta_i) - 1]} \quad (5)$$

显然, 由于灰色关联已经确定模糊边缘, 大大减少了无效边缘数据积累, 由 $P_1 \ll P_2$ 可以看出, 灰色关联融合 Hough 变换的有效采样概率远远大于标准 Hough 变换的有效采样概率, 且灰色关联融合 Hough 变换边缘检测法在算法计算效率上具有优异性, 实现高帧率实时检测。

由此提出灰色关联融合 Hough 变换检测方法 (G-Hough), 一方面灰色关联已经筛选掉一些噪点; 另一方面, 灰色关联可以极大减少数据处理量。通过灰色关联可以将原本分散的图像灰度分层处理, 通过灰色关联分层参数的选取, 不同灰度层可以滤除大量的与计算边缘宽度无关的数据。而同一灰度层的关联灰度点可以通过 Hough 变换拟合直线^[18]的方式, 计算出边缘宽度, 不仅可以提高边缘宽度测量的准确性, 而且克服了标准 Hough 变换不能够实时线上检测的缺点^[19]。

3 试验验证

3.1 灰色关联度自适应滤波

灰色关联度自适应滤波如图 5 所示, 滑动窗口大小选取的不同会产生稀疏不同的全局灰度特征, 滑动窗口选取的越大, 窗口附近灰度波动越接近窗

口中心灰度,体现在全局灰度图像上为灰度波动较为稀疏(图5a);反之,滑动窗口选取的越小,如图5d所示,窗口大小为 2×2 像素,窗口周围灰度波动较中心灰度离散程度更大,体现在全局灰度波动更为密集。经过滑动窗口滤波之后较为稀疏的灰度关联图像在一定程度上具有去噪的作用,同时会丢失图像细节^[20]。较为离散的灰度关联图像则会引入较多的图像细节,不可避免地引入较多图像噪声。因此滑动窗口的大小选择需要适合灰色关联度自适应滤波的实际需要。

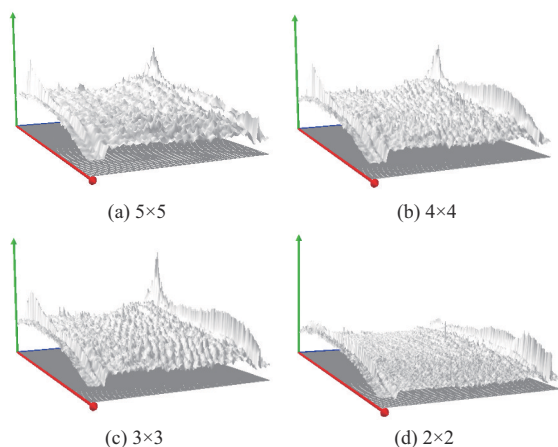


图5 不同窗口下的灰色关联度自适应滤波

Fig. 5 Adaptive filtering of grey correlation degree under different windows

边缘图像去噪与模糊边缘均可通过灰色关联度的自适应滤波实现。灰色关联度可以利用这一特点比较容易地区分板材边缘区域与脱模布边缘。这是因为图像在横向具有连续性,且在横向灰度上由于边缘的存在,发生了较大的图像灰度波动。这就产生了灰度剧烈变化的窗口,如果窗口中心是边缘点,则大部分灰度与窗口中心灰度关联度高,且距离比较接近^[20]。窗口中小部分灰度与窗口中心灰度关联度低但仍然彼此接近;如果窗口中心点是非边缘点,则窗口中绝大多数灰度与窗口中心灰度关联度极高且彼此距离接近。一般非边缘点不会出现关联度两极分化的现象。如若窗口像素宽度选取为一偶数,在窗口大小合适的情况下,在计算窗口中心点与边缘点时容易产生中心点漂移,不利于计算,图5b样本就是这样一种情况。因本试验的碳纤维拉挤板材边缘在板材两侧,因此在设计窗口时,可以通过小窗口在横向的左右滑动确定边缘的位置,以此来提高板材边缘的效率。因此选择一个 3×3 的模板(图5c),其中包含9个像素点。

3.2 灰色关联分辨率系数选取

根据公式(1)已知分辨率系数 ρ 与分辨率 $x_0(k)/x_i(k)$ 成反比,图6分别为分辨率系数不同取值时,图像在不同分辨率系数下灰度关联情况。由图6可以看出,随着 ρ 取值的减小,在进行灰色关联分析时分辨率不断提高,在灰度关联立体图像上,体现为图像表面细节更为丰富,相比 $\rho = 1.5$ 图像两侧只有隆起并无明显的尖峰, $\rho = 0.5$ 时在图像两侧已经可以明显看出尖峰(图6b),此处的尖峰即是通过降低分辨率系数,从而体现出灰度图像在纹理细节上的变化。不断降低分辨率系数,当 $\rho = 0.1$ 时(图6c),灰度之间更加细微的关联性不断地被放大,纹理上变得更加密集,且原本不易体现出的微小细节被降低的分辨率系数放大,随着分辨率系数进一步地减小,当 $\rho = 0.05$ 时(图6d),相比原始图像细节变得更加丰富。然而通过对比可以发现,随着分辨率系数的降低,边际效应愈发明显,在进行板材边缘检测时, $0.1 < \rho < 0.5$ 已经足够体现边缘细节特征,体现在图像上,两侧的边缘尖峰并未因分辨率系数降低而提高分辨率精度,反而在图像中间部分引入了细小的杂波。

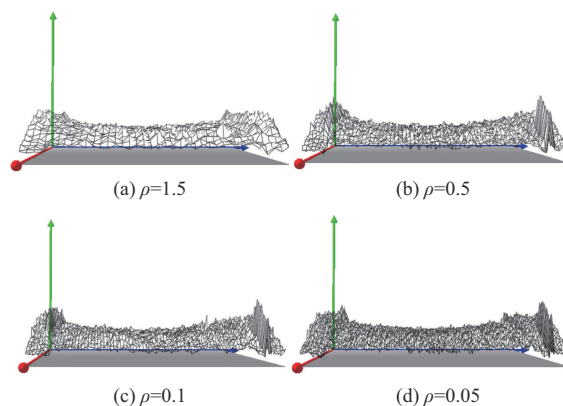


图6 不同分辨率系数下的灰色关联分析

Fig. 6 Grey correlation analysis under different resolution coefficients

3.3 目标分层检测

G-Hough检测通过在参数空间下减小无效边缘积累,增加有效采样概率,通过参数空间的方向角 θ 的改变,在灰度分辨率图像基础上分层选取有效边缘,通过参数空间的方向角 θ 分层过滤,可以在分层图像中抽取目标边缘,如图7所示。参数空间分层过滤边缘层与表面层已经被分离,通过不同的分层结果对比可知,三分层由于分层数较少,引入的噪声与相似区分度图层也较少,在两侧可以明显看到

清晰的边缘分离;四分层与五分层在边缘两侧引入较多其他图层噪声,难以分辨边缘部分;六分层将边缘层过多分层。因此,通过试验分析得出三分层的检测效果较好。

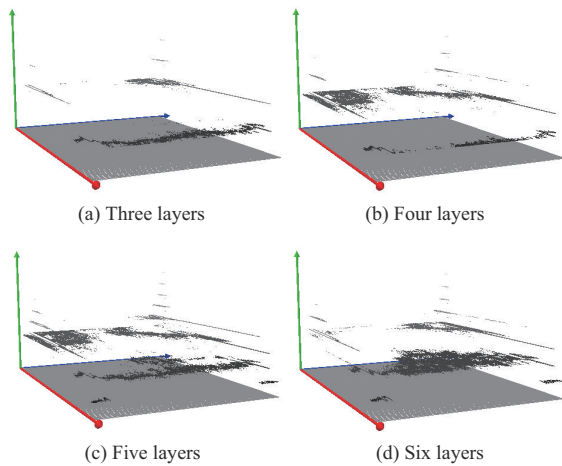


图7 不同方向角 θ 下的边缘分层结果

Fig. 7 Edge delamination results under different orientation angles θ

4 边缘检测结果分析

通过试验验证检测结果如图8所示,检测结果精确至0.1 mm。表1为边缘检测方法检测性能比较,分别从每秒检测图像帧数、平均边缘检测误差与边缘检测精确率三个评价维度对比笔者提出的G-Hough算法与其余四种算法的优劣性。

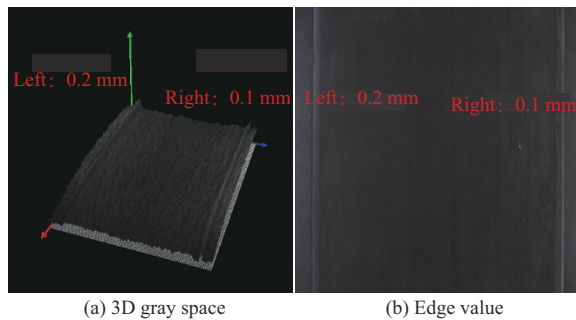


图8 边缘检测结果

Fig. 8 Edge detection result

表1 边缘检测方法检测性能比较

Tab. 1 Comparison of detection performance of edge detection methods

Algorithm	Pictures number/s	Detection error/mm	Accuracy rate/%
Roberts	37	0.3	87
Canny	28	0.2	93
HED	30	0.1	95
Hough	40	0.2	88
G-Hough	48	0.1	97

根据表1比较结果,分别选取了一阶边缘检测Roberts算法、二阶边缘检测Canny算法、深度学习

边缘检测HED算法^[21]、传统Hough边缘检测算法与灰色关联改进Hough算法进行比较,通过表1中边缘检测方法检测性能比较试验验证结果可知,一阶边缘检测Roberts算法由于定位精确不高导致平均误差较大^[22];二阶边缘检测Canny算法虽然提高了平均误差与边缘检测精确率,但每秒帧数较低,无法实时检测,容易导致漏检^[23];深度学习边缘检测HED算法把边缘检测精确率与平均误差提高到了较高的水平,但由于深度学习算法需要数据库学习,不同产品规格不同,技术标准不同,数据库成本高昂^[24];经试验验证:G-Hough碳纤维板材边缘检测方法每秒样张检测数相比其他方法高8~11张,平均测量误差小于0.1 mm,检测平均测量误差与检测精确率处于优异水平,边缘检测精确率高达97%。试验结果符合碳纤维板材质量检测要求。G-Hough碳纤维板材边缘检测方法克服以上板材边缘检测的缺点,在保证碳纤维板材边缘检测精确率与平均误差的基础上,实现了较高的每秒检测帧数,实现每秒帧数48帧的实时检测需求。

5 结论

碳纤维板材作为一种新型复合材料缺乏有效的实时检测手段。笔者提出的G-Hough碳纤维板材边缘检测方法,通过机器视觉的方式实现碳纤维板材的实时检测。经试验验证:每秒样张检测数相比其他方法高8~11张,平均测量误差小于0.1 mm,检测平均测量误差与检测精确率处于优异水平,边缘检测精确率高达97%。试验结果符合碳纤维板材质量检测要求。在同等硬件设备算力水平的基础上,超越传统边缘检测方法,提高了边缘检测精度与速度。相比深度学习的检测方法,提高了单位时间检测帧数,具有同等优异的检测精度的基础上降低了设备算力要求。

参考文献

- [1] 王永伟. 碳纤维复合板连续拉挤集成技术及工程化应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
WANG Yongwei. Research on integrated continuous pultrusion technology and engineering application of carbon fiber composite [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [2] 刘瑞明, 周韬, 徐春融, 等. 碳纤维拉挤板材表面缺陷检测[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9): 130-137.
LIU Ruiming, ZHOU Tao, XU Chunrong, et al. Surface defect detection of pultruded carbon fiber sheet[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(9): 130-137.
- [3] 张红霞, 王灿, 刘鑫, 等. 图像边缘检测算法研究新进展[J]. 计算

- 机工程与应用,2018,54(14):11-18.
- ZHANG Hongxia, WANG Can, LIU Xin, et al. Image edge detection algorithm and its new development[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(14):11-18.
- [4] 张舒,苗玉彬.基于改进HED网络的重叠葡萄果粒轮廓特征提取[J].计算机应用与软件,2023,40(9):157-164.
- ZHANG Shu, MIAO Yubin. Contour feature extraction of overlapping grape fruit based on improved HED network[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(9):157-164.
- [5] 胡爱民.基于机器视觉的封边板材尺寸在线检测系统的研究与开发[D].武汉:华中科技大学,2019.
- HU Aimin. Research and development of an Machine-vision-based on-line inspection system for board edge size[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [6] 崔莹,赵磊,李恒,等.基于小波去噪与改进Canny算法的带钢表面缺陷检测[J].现代电子技术,2024,47(4):148-152.
- CUI Ying, ZHAO Lei, LI Heng, et al. Strip surface defect detection based on wavelet denoising and improved Canny algorithm[J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(4):148-152.
- [7] LIU Yun, CHENG Mingming, HU Xiaowei, et al. Richer convolutional features for edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019, 41(8):1 939-1 946.
- [8] 刘长松.基于卷积神经网络的精细化边缘检测算法研究[D].天津:天津大学,2021.
- LIU Changsong, Research on crisp edge detection algorithm based on convolutional neural network[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [9] XIE Saining, TU Zhuowen. Holistically-nested edge detection[J]. International Journal of Computer Vision, 2017, 125:3-18.
- [10] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[J]. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022:7 464-7 475.
- [11] 倪金辉,肖军,文立伟.一种基于直线拟合的预浸料边缘直线在线视觉检测方法[J].计算机科学,2015,42(6A):16-23.
- NI Jinhui, XIAO Jun, WEN Liwei. Real-time visual inspection method to detect prepreg edge straight based on line fitting[J]. Computer Science, 2015, 42(6A):16-23.
- [12] 于天森,高华兵,王宝铭,等.碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展[J].工程塑料应用,2018,46(4):139-144.
- YU Tianmiao, GAO Huabing, WANG Baoming, et al. Research progress of molding process of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4):139-144.
- [13] 李玥玥,刘万平,黄东.融合多头注意力机制的图像降噪网络模型[J].计算机科学,2023,50(S2):326-333.
- LI Yueyue, LIU Wanping, HUANG Dong. Image denoising network model combine with multi-head attention mechanism[J]. Computer Science, 2023, 50(S2):326-333.
- [14] 曾友伟,杨恢先,唐飞,等.基于灰色关联度改进的Contourlet变换图像去噪算法[J].计算机应用,2013,33(4):1 103-1 107.
- ZENG Youwei, YANG Huixian, TANG Fei, et al. Improved image denoising algorithm of Contourlet transform based on gray relational degree[J]. Journal of Computer Application, 2013, 33(4):1 103-1 107.
- [15] 鲍学英,李海连,王起才.基于灰色关联分析和主成分分析组合权重的确定方法研究[J].数学的实践与认识,2016,46(9):129-134.
- BAO Xueying, LI Hailian, WANG Qicai. The combined weight based on grey relation and principal component analysis[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(9):129-134.
- [16] 张江鑫,沈小兰,王辉,等.快速随机Hough变换多直线检测算法[J].浙江工业大学学报,2013,41(3):346-350.
- ZHANG Jiangxin, SHEN Xiaolan, WANG Hui, et al. Fast multi-line detection algorithm using randomized Hough transform[J]. Journal Zhejiang University Technology, 2013, 41(3):346-350.
- [17] 王燕清,辛柯俊,陈德运,等.基于启发式概率Hough变换的道路边缘检测方法[J].计算机科学,2013,40(9):279-287.
- WANG Yanqing, XIN Kejun, CHEN Deyun, et al. Road edge detection based on heuristic probabilistic Hough transform[J]. Computer Science, 2013, 40(9):279-287.
- [18] 薛俊杰,徐安祺,蒋丹,等.基于运动分类和二维卷积的随机Hough变换航迹起始[J].现代雷达,2023,45(6):92-97.
- XUE Junjie, XU Anqi, JIANG Dan, et al. Tack initiation of randomized Hough transform based on motion classification and two-dimensional convolution[J]. Modern Radar, 2023, 45(6):92-97.
- [19] DOLLÁR P, ZITNICK C L. Fast edge detection using structured forests[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014, 37(8):1 558-1 570.
- [20] XIE S, TU Z. Holistically-nested edge detection[C]//Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015:1 395-1 403.
- [21] 张舒,苗玉彬.基于改进HED网络的重叠葡萄果粒轮廓特征提取[J].计算机应用与软件,2023,40(9):157-164.
- ZHANG Shu, MIAO Yubin. Contour feature extraction of overlapping grape fruit based on improved HED network[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(9):157-164.
- [22] MÉLY D A, KIM J, MCGILL M, et al. A systematic comparison between visual cues for boundary detection[J]. Vision research, 2016, 120:93-107.
- [23] 潘艳华,金辉,刘金国,等.基于改进Canny算法的合作靶标边缘检测[J].工业仪表与自动化装置,2023(5):83-88.
- PAN Yanhua, JIN Hui, LIU Jinguo, et al. Cooperative targets edge detection based on improved Canny algorithm[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2023(5):83-88.
- [24] 方路平,何杭江,周国民.目标检测算法研究综述[J].计算机工程与应用,2018,54(13):11-18,33.
- FANG Luping, HE Hangjiang, ZHOU Guomin. Research overview of object detection methods[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(13):11-18,33.