

文章编号:0254-0096(2020)05-0166-08

# 基于机器视觉的风电叶片风沙侵蚀程度检测方法研究

王雪平<sup>1~3</sup>, 张建斐<sup>2</sup>, 李万润<sup>1~3</sup>, 杜永峰<sup>1~3</sup>, 李慧<sup>1~3</sup>

(1. 兰州理工大学防震减灾研究所, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050;

3. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050)

**摘要:** 提出一种基于机器视觉的风电叶片表面无损检测方法,可快速检测出叶片表面有无缺陷。该方法结合机器视觉理论和图像处理技术,通过对采集到的叶片图像进行灰度化、空间滤波、图像增强、图像分割、图像去噪、形态学重建等算法,实现对叶片缺陷损伤区域的识别与特征参数的提取,可降低噪声和人工判读对叶片表面缺陷精度的影响,可为今后叶片无损检测的自动化和数字化提供参考。

**关键词:** 风电叶片; 机器视觉; 图像处理; 二值图像; 特征提取; 风沙侵蚀

**中图分类号:** TK83

**文献标志码:** A

## 0 引言

风力发电技术经过近几十年发展已成为公认的技术成熟、开发成本低、具有发展前景的可再生能源利用方式之一<sup>[1]</sup>。发展风电对于替代常规化石能源、保护生态环境、减少温室气体排放和实现经济的可持续发展等方面具有极其重要的意义。甘肃酒泉地区建成了全国第1个千万千瓦级风力发电基地,但因该地区常年气候干燥,土地沙漠化较为严重且风中常携带沙砾,对并网发电的风电叶片表面造成了划痕、裂纹等损伤。研究表明,叶片表面粗糙度增加及缺陷累积会导致发电效率降低5%~30%,还可能导致叶片运行失稳造成风力机整体倒塌<sup>[2]</sup>。

目前对风力机叶片表面划痕检测主要采用望远镜观察和绳索垂降,人工判读和记录为主的方法,缺点是费时费力、检测工作量大、检测效率低且受检测者的主观性影响较大,不利于叶片结构安全客观评估<sup>[3]</sup>。近年来迅速发展的机器视觉技术已在医药、机械和航天等产品表面缺陷检测中得到应用,在提高检测效率的同时可极大提高检测精度。因此本文针对传统风电叶片表面划痕的缺点,结合机器视觉技术,提

出一种基于机器视觉的风电叶片非接触式检测方法,进而实现风电叶片划痕的自动检测,以期风电系统的安全运营提供保证。

## 1 叶片表面划痕检测系统

视觉检测技术是建立在计算机视觉基础上的新型检测技术<sup>[4]</sup>,其原理是利用光学传感器模拟人的视觉功能,从待测对象的图像中提取目标信息,同时经计算机对图像进行实时处理,进而实现对图像的检测与评判。划痕检测与状态评估系统如图1所示,主要由照明系统、图像采集系统、数据传输系统、数据处理系统、状态评估系统组成。本文针对风电叶片表面划痕识别与评估所提出的视觉检测系统,其检测实现步骤为:1)根据相机的物距和视场大小,调节光源控制器使得均匀光照在目标物上;2)人工触发图像采集系统摄取待处理目标图像,并由传输系统将摄取图像实时传送到内置有图像采集卡的图像存储系统中;3)通过触发数据控制与管理系统的调用图像存储系统中的待处理图像至图像处理与状态评估系统中进行分析与判断,从而完成叶片损伤程度的检测与评估。

对于划痕视觉检测系统而言,其图像采集、数据传

收稿日期: 2017-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(51568041)

通信作者: 李万润(1985—),男,博士、副教授、硕士生导师,主要从事结构健康监测、结构动力响应方面的研究。ce\_wrl@lut.cn

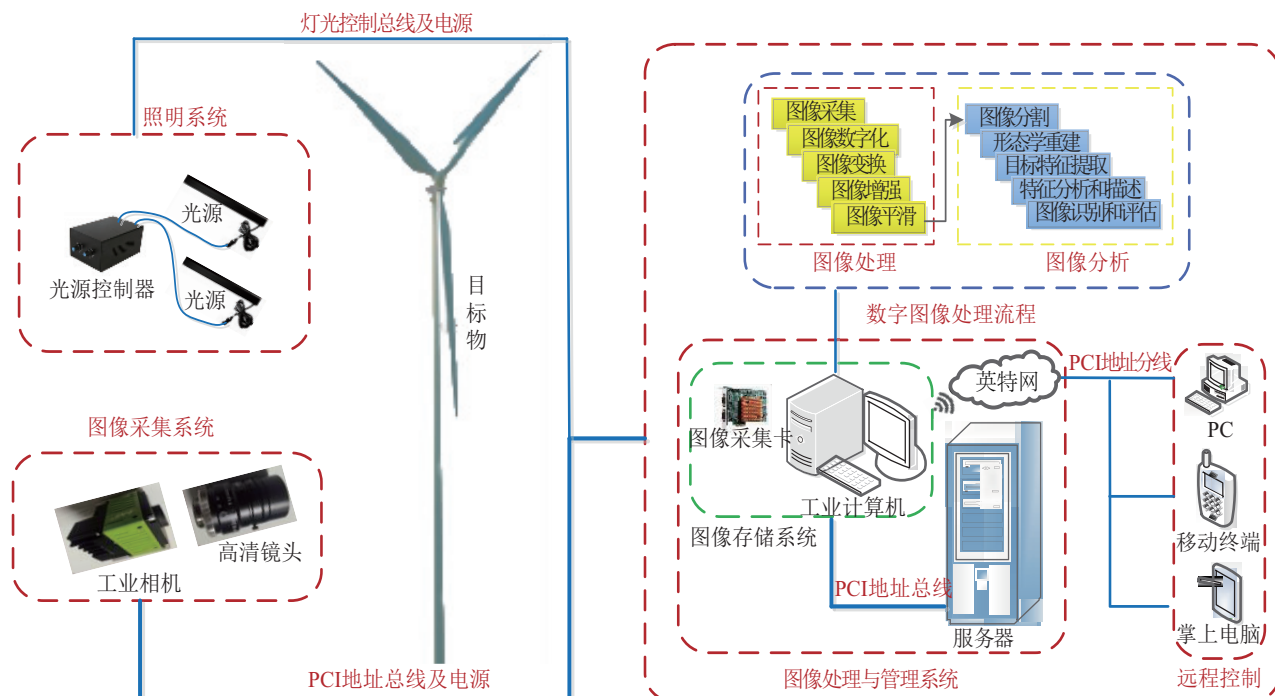


图1 检测系统结构示意图

Fig. 1 Sketch of structure for detecting system

输以及数据存储的稳定且无噪声污染,是后期划痕图像处理与状态评估的前提。但在实际工程中,往往由于环境、设备及信号传递等不可抗因素的影响,所采集到的划痕图像往往噪声比较严重,且不能真实反映叶片损伤程度。针对以上情况,为了消除系统自身所带来的图像质量问题,需针对图像处理与状态评估系统编制适用的图像处理算法以及确定评估损伤程度的几何特征参数值,为划痕图像识别及其划痕损伤程度评估奠定良好基础。

## 2 划痕图像增强技术

图像增强的主要目的是提高图像的质量和可辨识度,使图像更有利于观察或进一步分析处理。图像增强技术一般通过对图像的某些特征(如边缘信息、轮廓信息、对比度等)进行突出或增强从而更好地显示图像的有用信息,提高图像的使用价值。图像增强按作用域分为空域法(in spatial domain)和频域法(in frequency domain)2类。空域法较多应用于划痕识别,且空域滤波是图像增强中的常用方法,即对图像中以每个像素为中心的领域进行一系列的运算,然后将所得结果代替原

来的像素值,其数学表达式为:

$$g(x,y)=f(x,y)\cdot h(x,y) \quad (1)$$

式中,  $f(x,y)$  ——原始图像;  $g(x,y)$  ——处理后图像;  $h(x,y)$  ——空间运算函数;  $x, y$  ——像素点。

### 2.1 图像滤波增强算法

现有的图像增强处理方法主要有局部自适应直方图均衡、全局直方图均衡、同态滤波、空间滤波和中值滤波等<sup>[4]</sup>。虽然基于机器视觉的图像检测系统在医药、机械、航天等精密器械产品表面划痕检测方面已得到广泛应用<sup>[5-7]</sup>,但在图像增强方面并无统一算法。杨永跃等<sup>[8]</sup>采用中值滤波去噪法增强图像;胡小平等<sup>[9]</sup>采用维纳(Wiener)滤波作为划痕图像去噪增强方法;景晓军等<sup>[10]</sup>采用自适应平滑滤波来增强图像。因此为确定划痕识别的最优图像增强方法,本文特选取几何均值滤波、中值滤波、维纳滤波、自适应平滑滤波和 Gabor 滤波算法,并通过对同一张划痕图做处理来观察其增强处理后的划痕的边缘信息、轮廓信息、划痕的清晰度来优选出最佳的图像增强方法,各算法的函数关系式如表 1 所示。

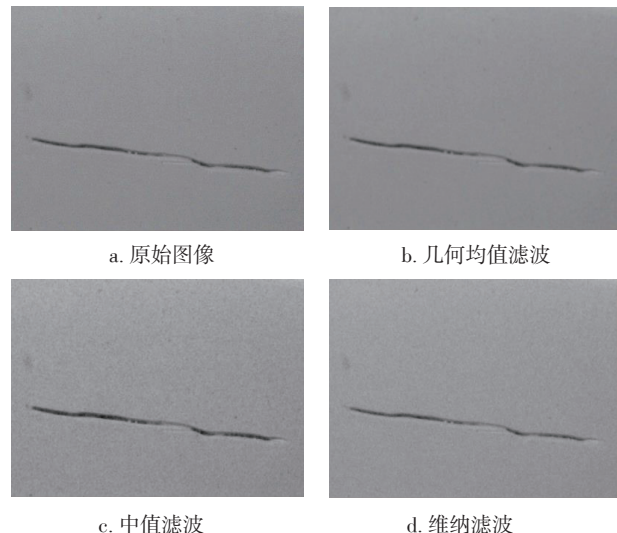
表 1 图像滤波方法  
Table 1 Image filtering method

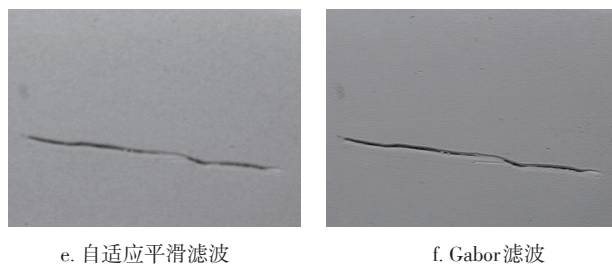
滤波方法	理论公式	公式说明
几何 均值 滤波	$G'(x,y) = \left[ \prod_{(i,j) \in S(x,y)} G(i,j) \right]^{\frac{1}{m \times n}}$	$m$ 、 $n$ 为邻域的大小尺寸; $G(i,j)$ 为滤波前二维图像矩阵( $i$ 、 $j$ 分别代表原始像素点); $G'(x,y)$ 为滤波后二维图像矩阵。
中值 滤波	$g(x,y) = \text{median}\{f(x-i,y-j)\}$ $(x,y) \in S \frac{n!}{r!(n-r)!}$	$g(x,y)$ 、 $f(x,y)$ 为像素灰度值; $S$ 为模板窗口; $n$ 为高斯核尺寸; $r$ 为半径。
维纳 (Wiener) 滤波	$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f(x_i, y_i)$ $\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f^2(x_i, y_i) - \mu^2$ $g(x,y) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} [f(x,y) - \mu]$	$\mu$ 为滤波图像均值; $\sigma^2$ 为滤波图像的方差; $M$ 为滤波器阶数。
自适应 平滑 滤波	$h(x,y) = e^{-\frac{d(x,y)}{2}}$ $d(x,y) = \sqrt{G_x(x,y)^2 + G_y(x,y)^2}$ $= \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} [g(x+1,y) - g(x-1,y)] \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{2} [g(x,y+1) - g(x,y-1)] \right\}^2}$	$h(x,y)$ 为自适应掩膜矩阵 $H$ 中的系数; $d(x,y)$ 为计算权系数。
Gabor 滤波	$g(x,y,\theta,\varphi,\sigma,f,\gamma) = \exp\left(-\frac{x'^2 - \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left[i\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \varphi\right)\right]$ $g(x,y,\lambda,\theta,\varphi,\sigma,\gamma) = \exp\left(-\frac{x'^2 - \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left[i\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \varphi\right)\right]$ $g(x,y,\lambda,\theta,\varphi,\sigma,\gamma) = \exp\left(-\frac{x'^2 - \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right) \sin\left[i\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \varphi\right)\right]$	$x' = x \cos \theta + y \sin \theta$ 、 $y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$ ; $\lambda$ 为波长,通常取值范围为 $2 \leq \lambda \leq 1/5$ 图像大小; $\theta$ 为方向,指定 Gabor 函数并行条纹方向, $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ; $\varphi$ 为相位偏移,其值范围为 $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ ; $\gamma$ 为长宽比,决定 Gabor 函数形状的椭圆率, $\gamma = 1$ 时图像呈圆形, $\gamma < 1$ 时形状随平行条纹方向拉长; $b$ 为带宽,带宽值必须为正实数,通常取 1; $f$ 为滤波频率。

## 2.2 不同滤波算法处理结果比较

原始图像如图 2a 所示,将同一划痕图像通过不同滤波算法进行比较,其中为保证各算法处理的结果对比有更强说服力,各滤波算法的滤波输出窗口均设置为  $3 \times 3$ ,处理结果如图 2e~图 2f 所示。几何均值滤波法和中值滤波法是 2 种基本滤波算法,其原理简单清晰且计算图像耗时短,处理结果分别如图 2b、图 2c 所示。通过对比分析可看出,这 2 种方法滤除噪声的效果较明显,但在突出划痕边缘特征上均不明显。图 2d 是维纳滤波处理效果图,与上述 2 种方法相比,其去噪效果并不理想,这是由于维纳滤波是以一种并非最匹配人视角效应的方式对图像进行平滑滤波。图 2e 为自适应平滑滤波算法处理后图像,与维纳滤波效果图 2d 对比可看出,该算法虽然同样模糊了划痕边缘,却使背景图像更加均匀,且锐化了划痕边缘,图像增强效果较好。图 2f 为 Gabor 滤波后结果,相比于中值

滤波处理效果(图 2c),裂缝背景得到更好的平滑、噪声滤除显著,而相较于图 2e,其划痕边缘与背景得到很好的分离、划痕轮廓明显且划痕清晰度最佳,从而有助





e. 自适应平滑滤波 f. Gabor滤波

图2 不同滤波算法的处理结果

Fig. 2 Processing results of different filtering algorithms

于后续图像分割时对划痕目标区域的提取。因此,在本研究中选用 Gabor 滤波作为图像去噪增强方法。

### 3 划痕图像分割技术

图像分割是将数字图像按照一定的准则将感兴趣的部分(或目标部分)从增强的图像中分离出来,图像分割结果的好坏直接影响对计算机视觉中图像的理解。图像分割技术主要包括边缘分割、阈值分割、区域分割等。图像阈值分割处理在图像分割应用中享有核心地位<sup>[11]</sup>。图像阈值分割方法一般基于亮度值的不连续性和相似性这 2 个特征的基中一个。划痕区域灰度值较低,背景区域灰度值较高,因此可找到一个合适的阈值  $T$  将裂缝与背景图像分离,达到图像二值化,计算式<sup>[12]</sup>为:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & f(x,y) \geq T \\ 0, & f(x,y) < T \end{cases} \quad (2)$$

Ostu 阈值分割是图像分割中应用最为普遍且较具说服力的算法。本文采用 Ostu 最大类间方差法,其原理为设  $f(x,y)$  为图像  $I_{m \times n}$  在位于  $(x,y)$  处的灰度值,灰度级为  $L$ ,则  $f(x,y) \in [0, L-1]$ 。

若灰度级  $i$  的概率  $p_i$  为:

$$p_i = \frac{f_i}{m \times n} \quad (3)$$

式中,  $m$ 、 $n$  ——邻域的大小尺寸;  $i=0, 1, \dots, L-1$ , 并且  $\sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1$ , 则将图像中像素按灰度级用阈值划分为 2 类, 即背景  $C_0$  和目标  $C_1$ , 背景  $C_0$  灰度级为  $0 \sim t-1$  ( $t$  代表灰度数), 目标  $C_1$  灰度级为  $t \sim (L-1)$ , 背景  $C_0$  和目标  $C_1$  对应像素分别为  $\{f(x,y) < t\}$  和  $\{f(x,y) \geq t\}$ 。

背景  $C_0$  部分出现概率为:

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{t-1} p_i \quad (4)$$

目标  $C_1$  部分出现概率为:

$$\omega_1 = \sum_{i=t}^{L-1} p_i \quad (5)$$

$\omega_0 + \omega_1 = 1$ , 背景  $C_0$  部分平均灰度值为:

$$\mu_0(t) = \sum_{i=1}^{t-1} i \cdot \frac{p_i}{\omega_0} \quad (6)$$

目标  $C_1$  部分平均灰度为:

$$\mu_1(t) = \sum_{i=t}^{L-1} i \cdot \frac{p_i}{\omega_1} \quad (7)$$

图像总平均灰度值为:

$$\mu = \sum_{i=0}^{L-1} i p_i \quad (8)$$

图像中背景和目标的类间方差为:

$$\sigma^2(k) = \omega_0(\mu - \mu_0)^2 + \omega_1(\mu - \mu_1)^2 \quad (9)$$

令  $k$  取值从  $0 \sim (L-1)$  之间变化, 计算不同  $k$  值下的类间方差  $\sigma^2(k)$ , 使得  $\sigma^2(k)$  最大时对应的  $k^*$  值即为所求最优阈值:

$$\sigma^2(k^*) = \max_{0 \leq k \leq L-1} \sigma^2(k) \quad (10)$$

图像阈值分割后划痕边缘的平滑、清晰度以及图像像素是否失真后期图像分析的关键问题。对图像进行双三次插值计算, 能保证目标图像有平滑的边缘和高清晰度<sup>[13]</sup>。对插值后的图像进行裁剪, 保持裁剪后图像与原图像尺寸一致, 这样能很好地解决上述问题。因此在进行阈值分割前先对图进行双三次插值计算和裁剪处理。插值计算后的裁剪图见图 3, 经 Ostu 阈值分割图如图 4 所示。

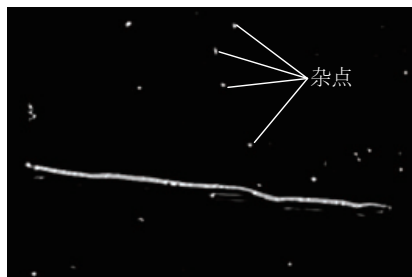


图3 双三次插值计算和裁剪图  
Fig. 3 Cubic spline interpolation image

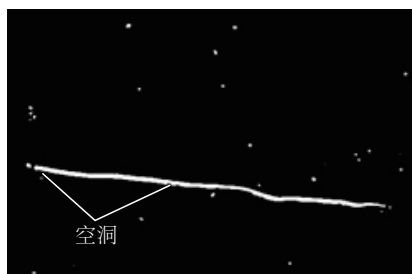


图4 Ostu 阈值分割图  
Fig. 4 Ostu threshold segmentation

### 4 形态学处理

对图像进行阈值分割后, 二值图像中仍不可避免

地存在杂点,这些杂点较划痕离散分布且占有较小,影响后期叶片损伤评估,同时划痕处可能还存在边缘毛刺、内部空洞的情况如图 5 所示。根据图 5 中所述情况,在图像处理运算中主要通过形态学中腐蚀和膨胀等运算<sup>[14]</sup>来解决。在图像处理应用中,膨胀和腐蚀更多地以各种组合应用,其中以开操作、闭操作、击中或击中不中变换最为典型。设  $A$  和  $B$  是  $n$  维欧几里得空间  $E^n$  的子集:

$$\begin{cases} A \circ B = (A \ominus B) \oplus B, \text{开运算} \\ A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B, \text{闭运算} \end{cases} \quad (11)$$

其中,形态学开运算用于除去所有不能包含结构元(目标区域)的部分,平滑目标轮廓,断开细的连接部分,去掉细的突出。针对图 5 中所述情况对划痕二值图像划痕做开运算处理,结果如图 6 所示。从图 6 可看到,所有不能包含目标结构元的部分被去除,且去掉了划痕边缘细的突出,划痕边缘得到平滑。

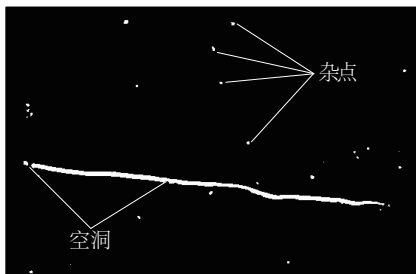


图 5 空洞杂点

Fig. 5 Holes and random points

## 5 划痕特征提取

为便于划痕定性定量描述,对形态学处理后的二值化图像进行连通域划分。本文选择图 6 中 2 个对比明显区域进行对比描述,即图中所示的划痕面积区域 1 和图像区域 2。通过观察叶片划痕形状及分析图片几何特征发现,受风沙侵蚀下的划痕形状主要呈现细长型。故本文在选择描绘子即特征值时主要选取划痕长径、短径、伸长度  $T$  和叶片损伤程度  $\varepsilon$ 。

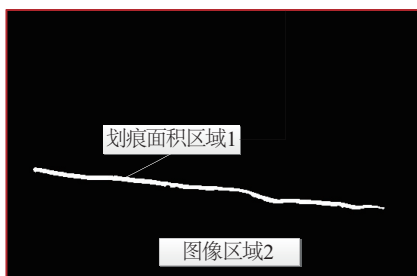


图 6 开运算处理图像

Fig. 6 Image processed with opened operation

### 5.1 划痕区域面积计算

目标面积是一个与区域有关的特征,定义形态学图像中目标物面积  $A$  就是目标物所占像素点数目,即包含在区域边界内总像素点数量。设目标  $f(x,y)$  大小为  $M \times N$ ,对形态学图像而言,目标物  $f(x,y)=1$  背景为 0,则目标物面积  $A$  为:

$$A = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \quad (12)$$

### 5.2 划痕伸长度 $D$

$$D = \frac{W \times L}{A} \quad (13)$$

式中,  $A$  ——划痕面积像素数量;  $W$ 、 $L$  ——包围缺陷目标最小矩形宽度像素数和长度像素数量。

伸长度趋近于 1,则划痕图像接近于圆形;若大于 1,则图像趋近于矩形,可用  $D$  把细长目标与近似圆形、方形和噪声目标区分开来。

### 5.3 叶片损伤程度 $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{A}{A_1} \quad (14)$$

式中,  $A_1$  ——叶片试件像素数量。

试验损伤程度  $\varepsilon$  越大,证明叶片受侵蚀程度越大。根据缺陷要求定义及实际应用要求,可通过观察叶片损伤程度的大小断定试件上是否有划痕。

### 5.4 叶片划痕短长径比值

为便于后续划痕评判依据的制定和划分。定义长径为包围划痕图像边界的直线最长距离;定义短径为与边界长径方向垂直直线中距离最大直线长度,划痕短径用边界上任意两点之间最大距离来表示<sup>[4]</sup>。由以上步骤构造出的特征参数划痕缺陷短长径之比是对缺陷识别做出的另一种简便度量。短长径之比较小,则表明缺陷为细长条形;反之,则接近于圆形。

## 6 试验条件及结果分析

检测系统实物图如图 7 所示。本次试验采用日本分析工业株式会社(JAI)SP5000M-PMCL 工业相机和 Kowa LM12HC-SW 镜头组合作为图像采集部分,该组合由于采集速度较高、低畸变率和相差小,使其具有较高的 MTF 值和对比清晰度,已在工业生产线在线检测、机器视觉、生命科学、人工智能和航空航天等众多邻域得到广泛应用。

根据 QCDT-XNYWPC 10104005—2013,即风力发电设备缺陷管理标准及实际应用要求,将划痕面积小于  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  视为正常,大于此条件视为缺陷。换算成



图7 检测系统实物图

Fig. 7 Sketch of structure for detecting system

像素坐标,即大于  $34 \times 34 = 1156$  像素时判为有划痕。  
反映到损伤程度上为  $\varepsilon = 3.61 \times 10^{-3}$  像素,即:

$$\text{判定} \begin{cases} \text{有划痕, } \varepsilon \geq 3.61 \times 10^{-3} \text{ 像素} \\ \text{无划痕, } \varepsilon < 3.61 \times 10^{-3} \text{ 像素} \end{cases} \quad (15)$$

此次试验中对功率为 300 W 某型风力发电机上的侵蚀叶片试件进行检测,为求得真实数据,随机抽取 18 个叶片试件,并对其划痕的面积  $A$ 、伸长度  $T$ 、短长径之比  $L_2/L_1$  及叶片损伤程度  $\varepsilon$  等主要形状特征进行统计,其结果如表 2 所示。从表 2 可看出,伸长度值在划痕中表现非常大,表明叶片表面缺陷主要是细长划痕而非圆形划痕;短长径比值表现得非常小,则表明该叶片区域越接近于细长形,存在划痕可能性也越大;叶片损伤程度  $\varepsilon$  值越大,表明该区域里叶片受侵蚀程度越严重。运用这些参数特性,即可对图像中所有标记区域进行检测。同时,从表 2 结果比较列中可知,存在人工检测和机器检测不一致的现象。人工检测认为叶片表面无划痕,但实际情况并非如此。究其原因,主要有 2 点: 1)传统人工检测结果往往受人眼视觉感受野的疲劳度、检测者的责任心和经验累积等主观因素影响,其检测精度往往取决于检测工人,而机器检测却不受主观因素影响,且能长时间稳定工作,从而保证检测结果的高精准;2)与人工检测相比,机器视觉检测还能通过运用

表2 划痕主要形状特征的统计结果

Table 2 Statistical results of feature parameters of scratches

叶片试件	划痕面积 $A/\text{像素}$	试件面积 $A_1/\text{像素}$	伸长度 $T$	短长径之比	叶片损伤程度 $\varepsilon$	机测	人测	结果比较
1	50182	800×400	2.1051	0.4623	0.1568	有	有	一致
2	9037	800×400	7.8112	0.4641	0.0282	有	无	不一致
3	62890	800×400	2.3471	0.3628	0.1965	有	有	一致
4	11041	800×400	2.6810	0.4760	0.0345	有	无	不一致
5	13282	800×400	2.4782	0.4556	0.0415	有	有	一致
6	37053	800×400	2.1330	0.2453	0.1158	有	有	一致
7	104989	800×400	2.0775	0.5451	0.3281	有	有	一致
8	107113	800×400	1.8024	0.2446	0.3347	有	有	一致
9	47990	800×400	1.9520	0.3671	0.1420	有	有	一致
10	26053	800×400	2.3640	0.2134	0.0814	有	无	不一致
11	8315	800×400	2.4488	0.0277	0.0260	有	无	不一致
12	24484	800×400	2.9908	0.0969	0.0765	有	无	不一致
13	43288	800×400	2.3284	0.1535	0.1353	有	有	一致
14	4183	800×400	2.6638	0.0381	0.0131	有	无	不一致
15	19721	800×400	2.1117	0.0804	0.0616	有	无	不一致
16	35686	800×400	12.4565	0.0854	0.1115	有	有	一致
17	2029	800×400	2.4805	0.2348	0.0063	有	无	不一致
18	13622	800×400	2.8398	0.6957	0.0426	有	无	不一致

优化的图像处理算法分析得到目标图像的细节、纹理形状以及高精度下目标的边缘特征等,从而客观厘定人眼无法观察到的细微差别。

## 7 结 论

本文针对传统风电叶片检测存在的问题,基于机器视觉技术,结合数字图像处理相关算法,提出一种非接触式风电叶片表面检测方法,并通过试验室试验验证了该方法的可行性与有效性。通过本文研究可得到以下主要结论:

1)通过对比不同滤波方法对同一张划痕图的滤波效果发现,Gabor 滤波较其他滤波方法在去噪、保证划痕边缘清晰度方面具有明显优势。

2)提出将双三次插值算子与 Ostu 最大类间方差阈值法结合的方法完成图像分割,并结合形态学处理的开运算,提出一种新的图像分割技术,进而利用该方法去除图像内部中的“杂点”,实现二值化图像内部连通。

3)基于形态学重建技术,对裂缝进行划痕识别和特征提取,进而判断叶片表面划痕情况。结合小功率风电叶片试件试验,结果表明,处理过程便捷快速,可避免人工检测带来的漏检和误检现象,具有可靠性高与重复性好等特点。

4)本文只针对图像处理及评估技术进行了研究,而对于如何将该方法用于无人机携带机器视觉系统对叶片进行现场检测还需进一步研究。

### [参考文献]

- [1] 杜嘉楠,韩宝生,张永,等. 挟风沙作用下风力发电机叶片涂层冲蚀过程腐蚀评价研究及实验平台的设计[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(4): 187-190.  
DU J N, HAN B S, ZHANG Y, et al. Corrosion evaluation research and experimental platform design of wind turbine under the action of blade coating erosion process in the aspect of sand-bearing current wind[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2014, 35(4): 187-190.
- [23] 张霆. 风力发电机组叶片状态监测与故障诊断系统设计和实现[D]. 上海: 上海电机学院, 2016.  
ZHANG T. Design and implementation of condition monitoring and bearing fault diagnosis system for wind turbine blades[D]. Shanghai: Shanghai Dianji University, 2016.
- [3] 王栋. 基于无人机的风电叶片检测应用[J]. 风能, 2016(4): 82-85.  
WANG D. Wind power blade detection application based on UAV[J]. Wind energy, 2016(4): 82-85.
- [4] 邓仕超,黄寅. 二值图像膨胀腐蚀的快速算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(5): 207-211.  
DENG S C, HUANG Y. Fast algorithm of dilation and erosion for binary image[J]. Computer engineering and applications, 2017, 53(5): 207-211.
- [5] OZBEK M, RIXEN D J. Operational modal analysis of a 2.5 MW wind turbine using optical measurement techniques and strain gauges[J]. Wind energy, 2013, 16(3): 367-381.
- [6] OZBEK M, RIXEN D J, ERNE O, et al. Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry[J]. Energy, 2010, 35(12): 4802-4811.
- [7] PAULSEN U S, SCHMIDT T, ERNE O. Developments in large wind turbine modal analysis using point tracking videogrammetry[M]. New York: Structural Dynamics and Renewable Energy, Volume 1. Springer New York, 2011: 772-776.
- [8] 杨永跃,邓善熙,何革群. 风力机叶片检测中的机器视觉技术[J]. 太阳能学报, 2003, 24(2): 232-236.  
YANG Y Y, DENG S X, HE G Q. The technology of intellectualized vision for blades measurement[J]. Acta energiae solaris sinica, 2003, 24(2): 232-236.
- [9] 胡小平,陈国良,毛征宇,等. 离焦模糊图像的维纳滤波复原研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(3): 479-482.  
HU X P, CHEN G L, MAO Z Y, et al. Study on Wiener filtering for restoration of defocus blur image[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2007, 28(3): 479-482.
- [10] 景晓军,李剑峰,熊玉庆. 静止图像的一种自适应平滑滤波算法[J]. 通信学报, 2002, 23(10): 6-14.  
JING X J, LI J F, XIONG Y Q. An adaptive smooth filter algorithms of still images[J]. Journal of China institute of communications, 2002, 23(10): 6-14.
- [11] 李哲毓,高明,马卫红. 基于计算机视觉的管壳表面划痕检测技术研究[J]. 应用光学, 2007, 28(6): 802-805.  
LI Z Y, GAO M, MA W H. Detecting technology of scratches on pipe surface based on computer vision[J]. Journal of applied optics, 2007, 28(6): 802-805.
- [12] YU S-N, JANG J-H, HAN C-S. Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel[J]. Automation in construction, 2007, 16(3): 255-261.

- [13] 王喆君, 徐磊, 陈抱雪. 插值函数在点阵传感器图像处理中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 463-465  
WANG Z J, XU L, CHEN B X. Application of interpolation function in lattice sensor image processing [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2007, 28(4): 463-465
- [14] 陈廉清, 崔治, 王龙山. 基于计算机视觉的微小轴承表面缺陷在线识别[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 132-135.  
CHEN L Q, CUI Z, WANG L S. On-line inspection of surface defect of micro bearing based on computer vision technology [J]. Journal of agricultural machinery, 2006, 37(5): 132-135.

## STUDY ON MONITORING METHOD OF WIND POWER BLADES EROSION SEVERITY UNDER WIND-SAND STORM BASED ON MACHINE VISION TECHNOLOGY

Wang Xueping<sup>1-3</sup>, Zhang Jianfei<sup>1</sup>, Li Wanrun<sup>1-3</sup>, Du Yongfeng<sup>1-3</sup>, Li Hui<sup>1-3</sup>

(1. Earthquake Protection and Disaster Mitigation Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. Disaster Prevention and Mitigation Engineering Research Center of Western Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The generating efficiency of wind power and safety of wind power structure are seriously influenced by such defects as eroded pits, scratches, cracks, etc. caused from surface of wind power blades under wind sand environment. A kind of nondestructive detecting method for the surface of wind power blades based on machine vision is put forward in this thesis to rapidly detect out whether there is defect on the surface of blades. The method combines machine vision theory and image processing techniques to realize the identification of defect area in blade and extraction of characteristic parameters by such algorithms as graying, spatial filtering, image intensification, image segmentation, image denoising, morphological remodeling, etc. For collected blade images, so as to reduce the impact of noise and artificial reading on defect accuracy of blade surface, for providing reference for the automation and digitization of future nondestructive detection.

**Keywords:** wind power blades; machine vision; image processing; binary image; characteristic extraction; wind-sand storm