文章编号:1001-4888(2025)06-0681-11

叶片挠度摄像测量与力学诊断方法研究*

高艺恒[1]，杨国辉[2]，关棒磊[3]，苏志龙[1,4,5]，于起峰[3]，张东升[1,4,5]

(1. 上海市应用数学与力学研究所，上海大学 力学与工程科学学院，上海 200444；2. 中国人民解放军 63853 部队，吉林白城 137001；3. 中国人民解放军国防科技大学 空天科学学院，湖南长沙 410073；4. 上海飞行器力学与控制研究院，上海 200092；5. 上海大学 绍兴研究院，浙江绍兴 312071)

摘要：针对当前风电叶片健康检测方法运维成本偏高、检测效率偏低，且在叶片损伤识别与定位上仍有局限的问题，本文提出基于双目视觉的非接触测量技术和叶片故障诊断方法。首先，针对大视场相机标定难题，在相机参数标定中使用逆深度化的 BA(Bundle Adjustment)算法对双目视觉系统的外部参数进行非线性优化，提高在户外大视场应用场景下的三维空间位置测量精度。其次，探索了基于挠度测量的叶片损伤识别方法，该方法先通过拟合叶片的旋转平面完成坐标系转换以提取旋转叶片的法向变形信息，进而通过比较含裂纹和不含裂纹叶片的峰峰值差异确定叶片损伤裂纹的位置。最后，在长度为 2.15 m 的叶片实验模拟系统中，实现了叶片三维位移的测量和预制裂纹的定位检测，测量结果显示，裂纹定位误差为 −0.05～0.05 m，测量结果较为理想，初步验证了所提出方法的可行性。

关键词：双目视觉；相机标定；三维测量；损伤检测

中图分类号：O348.1 **文献标志码**：A DOI：10.7520/1001-4888-24-137

0 引言

风能作为一种可再生清洁能源，正在成为许多国家能源结构中重要的补充来源[1]。叶片作为风电系统捕获能量的主要部件，受到各种复杂环境和不规则载荷的作用，其损伤问题也日益突出[2]。因此，对风电叶片进行损伤检测，及时发现潜在的机械故障，对风力发电承载结构的在役安全评估十分重要[3]。

当前风电叶片检测技术主要分为接触式与非接触式 2 类。接触式检测是应用较成熟的方案，其中最常见的一种方式需要风力机停止运转，人工携带检测设备进行高空逐点检测，但这种方式检测效率较低；另一种方式通过在叶片预埋传感器实时监测叶片的工作状态，如 XI 等[4]开发了一套叶片负荷监测系统，通过测量叶片根部的弯矩，对叶片的工作状态进行评估以检测损伤信息；YANG 等[5]通过安装在风电系统上的传感器完成数据采集，随后将多元数据集输入条件卷积自动编码器，以此捕捉叶片断裂前引发的系统动力学特征变化。然而，预埋传感器的维护，大大增加了风电系统的运维成本。近年来，一些非接触测量技术开始被应用于叶片健康检测，典型方法有 GPS 测量法[6]、基于声发射(AE)信号检测法[7]和微波雷达测量法[8]等，但存在检测范围有限和测量成本较高等问题，难以大规模推广。

基于立体视觉测量原理的非接触技术已被广泛应用于工业测量等领域[9−11]。该技术通过使用 2 台或者多台相机同步对测量目标进行时序成像，再利用图像匹配得到的视差信息重构目标的三维几何

* **收稿日期**：2024-09-08；**修回日期**：2024-11-21
基金项目：国家自然科学基金项目(11727804，12072184)
通信作者：张东升(1967−)，男，博士，教授。研究方向：实验力学。Email：donzhang@staff.shu.edu.cn

形状[12-13]以实现目标的运动和位移的测量。该技术已逐渐被应用于风电叶片检测[14],例如,WU 等[15]开展基于三维数字图像相关方法的风机叶片健康状况研究,获得了全场位移和应变等参数,并据此开发了时频域叶片健康状况诊断方法;FENG 等[16]采用数字图像相关方法对全尺寸叶片进行结构健康监测和状态评估,所提出的基于散斑的大视野户外自校准方法,可精准捕捉叶片平面内外变形特征;GUAN 等[17]在视频测量技术基础上,构建系列化叶片结构表观缺陷检测方案,实现了对涡轮机的叶片、传动装置和变速箱的全面检查。以上文献表明,双目视觉测量技术可实现远程、非接触式的检测,作为一种新兴的风电叶片损伤监测定位方法,具有重要的应用前景和研究价值。然而,在实际应用中如何实现快速的相机标定,如何根据测量的叶片运动和变形数据获取缺陷位置仍然存在一定的挑战。

本文首先介绍了双目视觉测量系统的组成部分和测量原理,提出了逆深度化的 BA(Bundle Adjustment)算法,将三维点坐标转换为逆深度表示,对双目视觉系统的外部参数进行非线性优化,以提高风电叶片三维位移测量的精度。此外为实现叶片损伤定位,提出一种通过提取叶片轴向位移分布特征,并以峰峰值作为挠度指标构建响应曲线开展损伤分析的方法。风电叶片损伤检测实验结果表明,该方法在对风电模型叶片的损伤定位中具有可行性,对风电叶片的监测维护具有参考价值。

1 测量方法与原理

1.1 双目系统组成与视觉模型

如图 1 所示,本文中的双目视觉测量系统由 2 个测量站构成。每个测量站均配备有集成高速固态硬盘和 PCIE×8 高速图像采集卡的高性能工控机、工业相机(Mikrotron EoSens 25CXP)、成像镜头(AF-S NIKKOR 70—200 mm f/2.8E)、高精度倾角传感器(SCT726)、二维转动云台和激光测距仪(SW600A)等设备。测量站借助外同步采集触发控制器,同步控制图像采集与相机外参标定,并完成三维重建和数据处理操作。

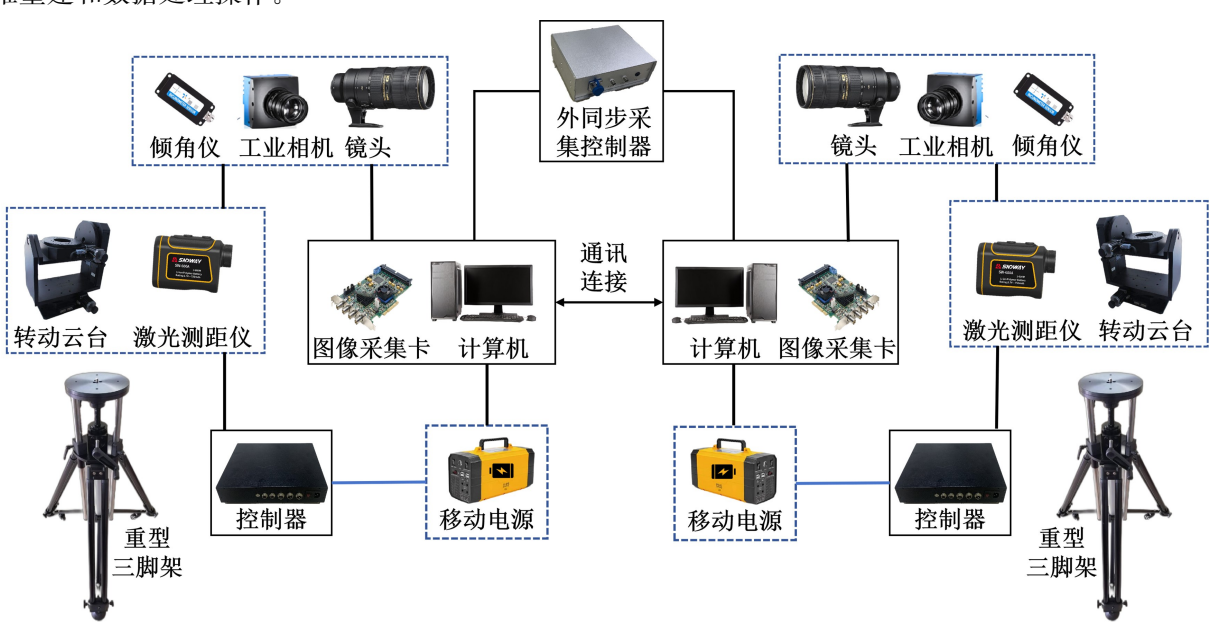

图 1 双目视觉测量系统

Fig. 1 Binocular vision measurement system

如图 2 所示为双目立体视觉模型。该模型通过 2 台相机从不同视角同步观测同一空间点,左右图像中对应的投影点形成视差。针对风电叶片这类大尺寸结构的测量需求,在光路布置上采用 2 个独立的测量站,测量站之间具有一定大小的立体角,并将世界坐标系与左相机坐标系重合,测量系统基于三角测量原理实现被测物体的三维重建。

在左右 2 幅图像上的投影点与世界坐标点 P 的投影关系为

$$Z_{cl}\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}_l[\boldsymbol{I}\mid 0]\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix},\quad Z_{cr}\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}_r[\boldsymbol{R}\mid \boldsymbol{t}]\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix}\tag{1}$$

式中：Z_{cl} 和 Z_{cr} 记作为左右相机的比例系数；$\boldsymbol{K}_l$ 和 $\boldsymbol{K}_r$ 为左右相机的内部参数矩阵；$\boldsymbol{I}$ 是 3×3 的单位矩阵；旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和平移向量 $\boldsymbol{t}$ 描述了右相机相对左相机的位姿关系。$P_l(u_1,v_1)$和 $P_r(u_2,v_2)$分别为三维空间点(x_w,y_w,z_w)在左右相机的投影点坐标。

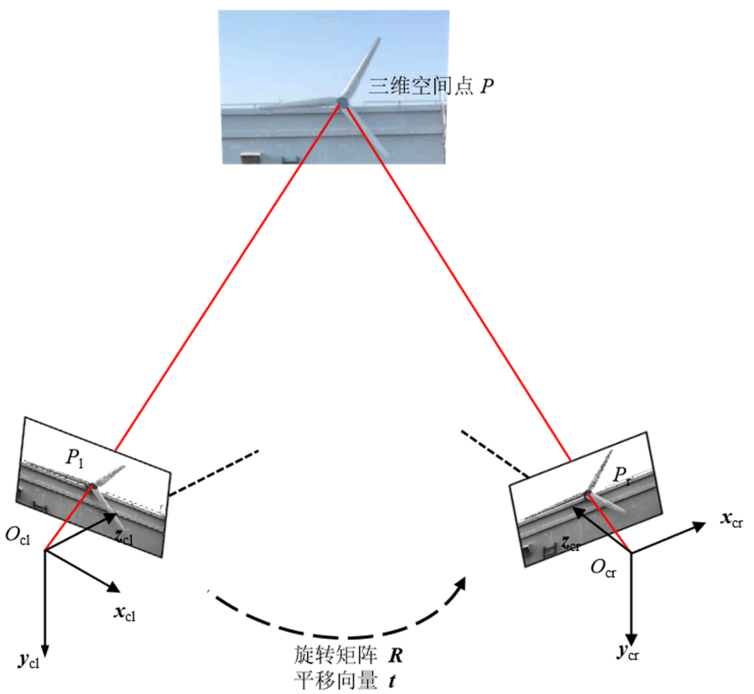

图 2　双目立体视觉模型

Fig. 2　Binocular stereo vision model

1.2　双目视觉标定与逆深度参数化光束平差优化

根据对极几何约束关系，左右相机的光心 O_{cl} 和 O_{cr}，空间点 P，以及投影点 P_l 和 P_r，位于同一平面内，结合图像特征点的匹配关系，可得约束关系为

$$\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}^{T}\boldsymbol{F}\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}=0\tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{F}$ 为左右投影点对应关系的基础矩阵，在确定双相机内部参数的情况下，$\boldsymbol{F}$ 可表示为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{K}_r^{-T}\boldsymbol{E}\boldsymbol{K}_l^{-1}\tag{3}$$

式中：本质矩阵 $\boldsymbol{E}$ 包含了双相机外部参数，由旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和平移向量 $\boldsymbol{t}$ 的反对称矩阵 $[\boldsymbol{t}]$ 组成。

$$\boldsymbol{E}=[\boldsymbol{t}]\times\boldsymbol{R}\tag{4}$$

对本质矩阵 $\boldsymbol{E}$ 进行奇异值分解(SVD)，可求解旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和平移向量 $\boldsymbol{t}$[18-19]。如果在图像中提取到足够多的特征点，可提高计算的鲁棒性，但在实际测量场景中，难以保证找到足够多的特征点。因此，一种可行的解决方法是通过与相机固连的高精度倾角传感器，并结合激光测距仪获取与旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 有关的信息，确定相机外参初值[20]。在获取相机外参初值后，使用逆深度参数化的光束平差法对系统的标定参数进行非线性优化[21-22]。

本文将空间坐标系与左相机坐标系对齐，三维坐标$(x,y,z)^T$ 的参数化形式为

$$\begin{bmatrix}\dfrac{u_i-c_x}{f_x}d & \dfrac{v_i-c_y}{f_y}d & d\end{bmatrix}^{T}\tag{5}$$

式中：f_x、f_y 为等效焦距；c_x、c_y 为主点坐标；d 为空间点左相机坐标系的深度，坐标中的 3 个分量仅包含唯一的深度参数。由于在大视场测量中，直接根据深度参数建立误差函数会使目标函数和梯度对数值误差较为敏感，因此将参数定义为逆深度，即 $\omega=1/d$ 的形式，得到参数化三维点坐标为

$$\begin{bmatrix} \dfrac{u_i-c_x}{\omega f_x} & \dfrac{v_i-c_y}{\omega f_y} & \dfrac{1}{\omega} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

采用逆深度参数化法可以提高算法的稳定性，更加适合大视场、大深度条件下的应用场景。结合特征匹配点对进行非线性优化，构建最小化重投影目标函数为

$$\underset{\boldsymbol{K},\boldsymbol{D},\boldsymbol{R},\boldsymbol{t},\omega}{\operatorname{argmin}}\sum_{i=1}^{n}\left\| u_{i\mathrm{r}}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}},\boldsymbol{D}_{\mathrm{r}})-(\boldsymbol{R}u_{i\mathrm{l}}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}},\boldsymbol{D}_{\mathrm{l}})+\omega_i\boldsymbol{t})\right\|^2 \tag{7}$$

式中：n 为参与标定匹配点对的数量；$\boldsymbol{D}$ 为畸变向量，包括左右相机的畸变参数 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{l}}$ 和 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{r}}$；$u_{i\mathrm{l}}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}、\boldsymbol{D}_{\mathrm{l}})$和 $u_{i\mathrm{r}}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{r}}、\boldsymbol{D}_{\mathrm{r}})$分别表示第 i 组左右特征点去畸变归一化图像坐标。

1.3 风电叶片旋转平面的确定和坐标转换

相机标定后，根据目标在左右相机图像中的像素坐标，由式(1)求解其三维坐标，进而计算其空间运动和变形。根据风电叶片的运动特征，在其旋转平面上建立一个新的世界坐标系。

在左相机坐标系中，平面方程为

$$Ax+By+Cz+1=0 \tag{8}$$

式中：A、B、C 分别为平面法向量在坐标系 x 轴、y 轴、z 轴方向上的分量。把原坐标系下测量的三维坐标点(x_i,y_i,z_i)代入到平面方程中，使用最小二乘法求解平面坐标系的参数，公式为

$$\operatorname{argmin}\sum_{i=1}^{n}\left(-\frac{A}{C}x_i-\frac{B}{C}y_i-\frac{1}{C}-z_i\right)^2 \tag{9}$$

在确定旋转平面后，把原始坐标进行变换，投影公式为

$$\begin{cases} x_i'=-A\cdot k+x_i \\ y_i'=-B\cdot k+y_i,\ k=\dfrac{Ax_i+By_i+Cz_i+1}{A^2+B^2+C^2} \quad (i=1,2,\cdots,n) \\ z_i'=-C\cdot k+z_i \end{cases} \tag{10}$$

式中：(x_i',y_i',z_i') 是原坐标(x_i,y_i,z_i)在旋转平面上的投影坐标。利用式(11)可求解旋转平面的旋转中心坐标$(x_{\mathrm{o}},y_{\mathrm{o}},z_{\mathrm{o}})$：

$$(x_{\mathrm{o}},y_{\mathrm{o}},z_{\mathrm{o}})=\frac{1}{n}\left(\sum_{i=0}^{n}x_i',\ \sum_{i=0}^{n}y_i',\ \sum_{i=0}^{n}z_i'\right) \tag{11}$$

旋转中心记作点 O，取旋转平面上一点 P，向量 $\overrightarrow{OP}$ 记作 $\boldsymbol{i}$，旋转平面的法向量 $\boldsymbol{n}=(A,B,C)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{i}$ 和 $\boldsymbol{n}$ 叉乘得到面内向量 $\boldsymbol{j}$，将三者单位化后，新的世界坐标下的三维坐标$(x_{\mathrm{w}},y_{\mathrm{w}},z_{\mathrm{w}})$可表示为

$$\begin{cases} x_{\mathrm{w}}=(x-x_{\mathrm{o}})\times\boldsymbol{i}_x+(y-y_{\mathrm{o}})\times\boldsymbol{i}_y+(z-z_{\mathrm{o}})\times\boldsymbol{i}_z \\ y_{\mathrm{w}}=(x-x_{\mathrm{o}})\times\boldsymbol{j}_x+(y-y_{\mathrm{o}})\times\boldsymbol{j}_y+(z-z_{\mathrm{o}})\times\boldsymbol{j}_z \\ z_{\mathrm{w}}=(x-x_{\mathrm{o}})\times\boldsymbol{n}_x+(y-y_{\mathrm{o}})\times\boldsymbol{n}_y+(z-z_{\mathrm{o}})\times\boldsymbol{n}_z \end{cases} \tag{12}$$

在新坐标系下，叶片在旋转平面内 x 方向的位移 u、y 方向的位移 v，以及相对于旋转平面的离面位移 w，可表示为

$$\begin{aligned} u&=x_{\mathrm{def}}-x_{\mathrm{ref}} \\ v&=y_{\mathrm{def}}-y_{\mathrm{ref}} \\ w&=z_{\mathrm{def}} \end{aligned} \tag{13}$$

式中：x_{def}、y_{def}、z_{def} 为三维点运动后的坐标；x_{ref}、y_{ref} 为其参考坐标。

1.4 叶片损伤定位方法

风电叶片在受力与变形特性上可近似为悬臂梁结构。为便于分析，进一步将其等效为矩形截面梁；根据该等效梁在离面方向刚度最低，易发生显著挠曲的特性，可建立表征叶片损伤的简化模型，如图 3 所示，基于该模型对比损伤叶片与健康叶片，即可获得损伤位置信息。

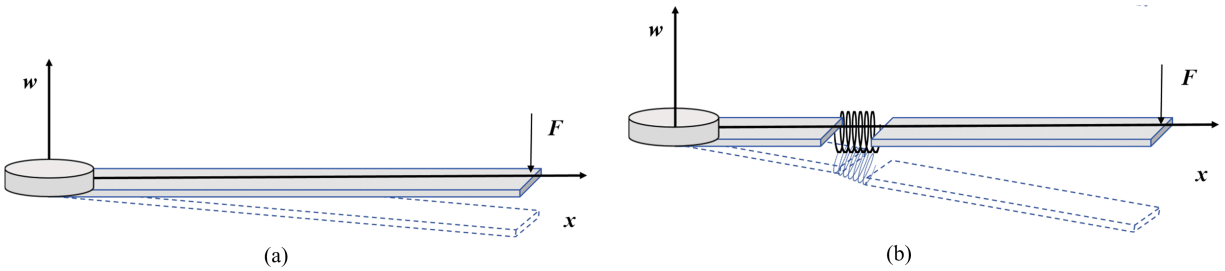

图 3　叶片的简化模型：(a)健康叶片；(b)裂纹损伤叶片

Fig. 3　Simplified model of blades：(a)without crack；(b)with crack

在承受复杂载荷 F 作用下，无损伤的叶片的挠度方程 $w(x)$ 为

$$w(x)=\int\left(\int\frac{M(x)}{EI}\mathrm{d}x\right)\mathrm{d}x \tag{14}$$

式中：$M(x)$ 为叶片截面弯矩；E 为材料弹性模量；I 为叶片截面惯性矩。

当叶片出现裂纹时，会导致叶片局部的刚度降低，该刚度损失可近似用 1 个扭转弹簧模型来代替(图 3(b))，含损伤叶片的挠度方程可表示为

$$w(x)=\begin{cases} w_1(x)=\int\left(\int\frac{M(x)}{EI}\mathrm{d}x\right)\mathrm{d}x & (0\leqslant x<l_1) \\ w_2(x)=w_1(l_1)+\int\left(\int\frac{M(x-l_1)}{\alpha EI}\mathrm{d}x\right)\mathrm{d}x & (l_1\leqslant x\leqslant l) \end{cases} \tag{15}$$

式中：以叶片的旋转中心为原点，l 为从叶根到叶尖方向的长度，l_1 为损伤裂纹位置到叶根的长度；α 为刚度折减系数，取值为 $0<\alpha\leqslant 1$，用于表征裂纹导致的局部刚度降低程度。根据式(15)不难看出，含损伤叶片的挠度曲线会在损伤位置处产生突变。

2　风电叶片的检测实验

2.1　测量系统

为了验证本文所提出检测方法的可行性，实验选取 1 台 3 叶片风电模型作为研究对象，通过电机驱动叶片旋转。该模型叶片长为 2.15 m，叶片为扁平弧形轮框结构，叶片宽度沿长度方向逐渐变窄，外层蒙皮为玻璃钢材料，内部填充轻质泡沫材料。实验前，在叶片表面预制散斑，以便结合数字图像相关方法跟踪叶片表面的三维运动和变形。在其中 1 个叶片背面预制裂纹缺陷，模拟叶片受损伤的情况。如图 4 所示，该裂纹损伤的深度为 4.5 mm，宽度为 2.5 mm，长度为 15 cm，损伤裂纹在距离风电叶片旋转中心 0.60 m 的位置。

双目视觉测量系统摆放位置如图 5 所示，图像像素分辨率为 5 120×5 120，成像镜头焦距为 70 mm，视场大小约 5 m×5 m。

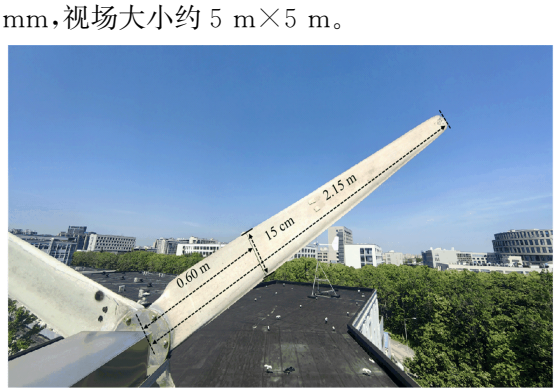

图 4　叶片的预制裂纹

Fig. 4　Predefined crack on the blade

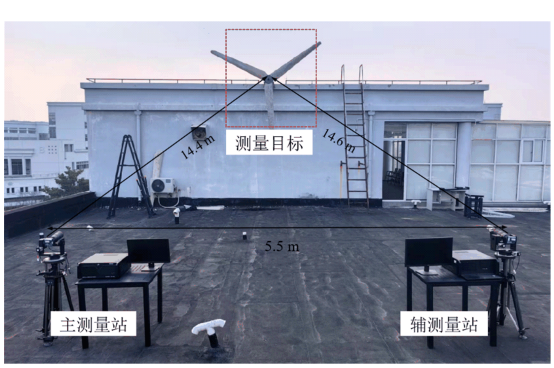

图 5　双目视觉测量实验场景布置

Fig. 5　Experimental layout with the binocular vision system

2.2 叶片三维运动测量

将左右相机对准被测物,调整左右相机的视场到合适位置,通过高精度激光测距仪,测量得到双站基线距离为 5.5 m,左右相机的工作距离分别为 14.4 m 和 14.6 m。在实验中,设置图像同步采集帧率为每秒 20 帧,双站相机共采集 6 个风电叶片旋转的完整周期。

在进行双目系统标定中,采用张氏标定法预先标定相机的内部参数[23];选择角点间隔为 40 mm、规格为 11×8 的棋盘格标定板完成标定,采用数字图像坐标系,以像素(pixel)为基本单位,标定结果见表 1。

表 1 相机的内部参数

Tab. 1 Internal parameters of the camera

相机内参	左相机	右相机
(f_x, f_y)/像素	(15 953.13, 15 948.96)	(16 067.93, 16 060.53)
(c_x, c_y)/像素	(2 613.91, 2 514.99)	(2 470.89, 2 479.03)
(k_1, k_2)	(0.087, −0.561)	(0.011, −0.394)

采用本文提出的标定方法进行大视场相机外部参数标定。通过固连在相机上的高精度倾角传感器,读取角度参数:左相机的俯仰角为 11.524°、侧滚角为 5.088°,右侧相机的俯仰角为 11.867°、侧滚角为−0.656°,再结合激光测距仪获取的距离信息,计算可得初始方位角为 20.151°,进一步求解平移向量后,执行逆深度优化法,得到精确的相机外部参数(表 2),整个过程可在 5 min 内完成。

表 2 相机的外部参数

Tab. 2 Extrinsic parameters of the camera

相机外参	数值
旋转向量/(°)	(0.81,20.65,1.09)
平移向量/mm	(−5 556.12,174.34,1 230.34)

标定结果的重投影误差为 0.25 像素,完成标定后,在场景中不同位置摆放棋盘格标定板,并对其内角点进行三维重建,计算得棋盘格边长,最大偏差为 0.38 mm,平均误差为 0.11 mm,标准差为 0.07 mm,测量结果表明,本文提出的标定方法在大视场相机标定中具有准确性。

接下来对风电叶片的运行过程进行检测,沿着叶片的径向方向选择了 8 个测点,如图 6 所示。采用考虑旋转和平移的图像相关算法[24],获取左右相机拍摄序列图像中这 8 个测点的像素坐标,再结合相机标定参数获得它们的三维空间坐标。随后,进行坐标系的转换,以风电叶片的旋转中心为原点,在旋转平面上建立新的世界坐标系,对叶片的面内位移和法向位移进行分析,计算得出的风电叶片的各方向位移结果如图 7 所示,由图可知,健康叶片在 3 个方向的位移均呈现周期性变化且周期稳定,表明双目视觉测量系统能够对叶片实现有效的跟踪测量。基于此,采用相同方法对含裂纹叶片进行实验,以获取其三维运动轨迹。

进一步对健康叶片与含裂纹叶片的法向位移数据进行傅里叶变换,得到相应的功率谱,结果如图 8 所示,图中幅值为相对功率占比,由图可知,2 类叶片的功率谱仅在幅值上存在微小差异,尚不足以用于判定叶片是否存在裂纹缺陷[15]。这说明频谱分析方法更适用于叶片动平衡调整及传动轴故障诊断[25],而非叶片裂纹识别。

2.3 叶片缺陷评估

基于本文提出的叶片力学模型,在叶尖施加外部激励使叶片产生离面变形,再利用双目测量系统记录叶片产生的动态变形。由于叶片表面已遍布预制散斑,因此可以添加足够的测点,每个测点都可输出叶片的离面位移。从叶根到叶尖划分了 70 个测点,按照距旋转中心(原点)的距离由小到大依次编号。选取 4 个测点为代表,其中 1 号测点位置为 0.256 m、30 号测点位置为 1.029 m、50 号测点位置

图 6　叶片上所选择的特征点

Fig. 6　Selected feature points on the blade

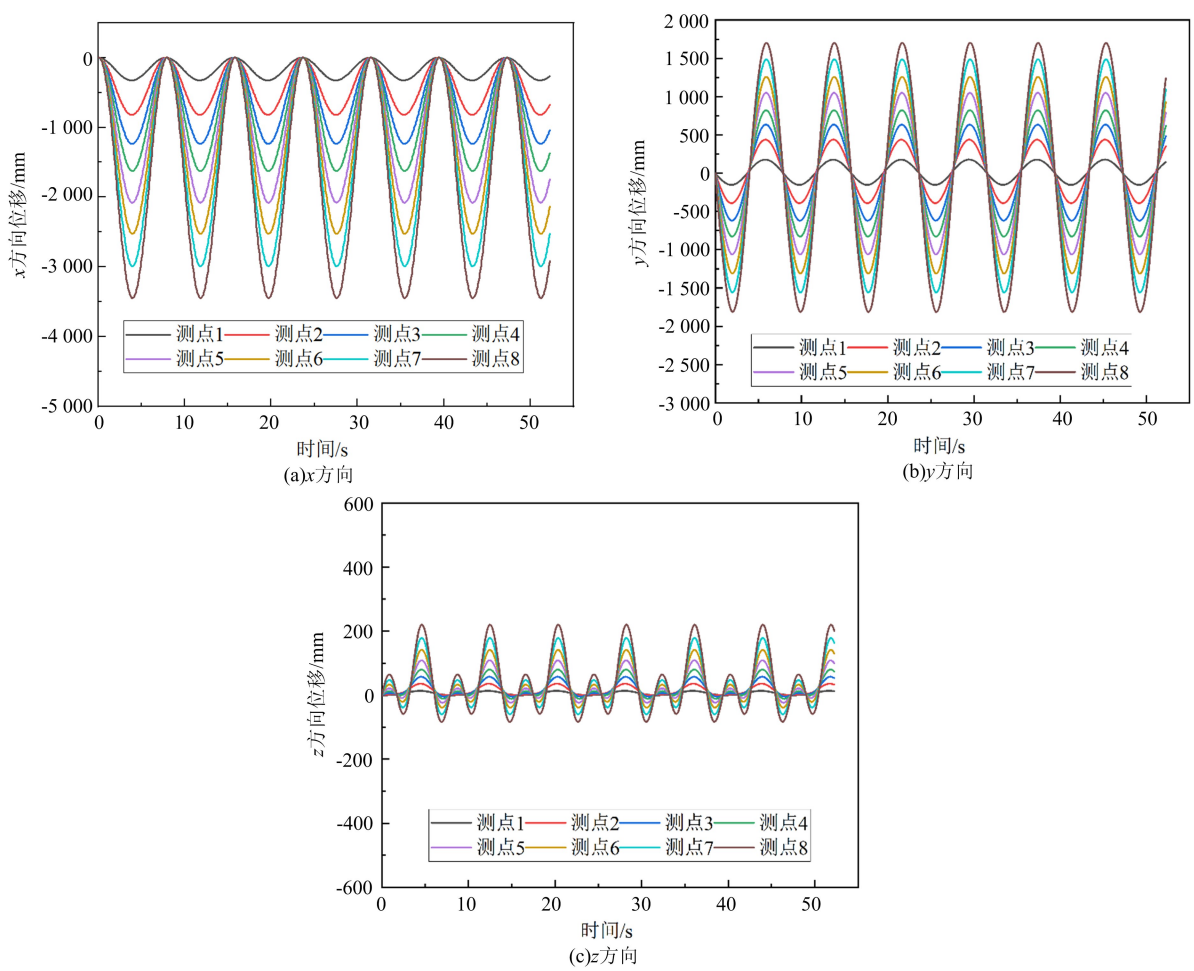

图 7　健康叶片 3 个方向的位移

Fig. 7　Motion of blade in three directions

为 1.565 m、70 号测点位置为 2.028 m。图 9 给出了 4 个测点的离面位移衰减曲线，曲线的峰峰值可表征叶片受外部激励后各测点产生的挠度水平，由图可见，从叶根到叶尖的各测点峰峰值呈逐渐增大趋势。

分别对健康叶片和带有损伤的叶片进行测试，两者峰峰值曲线如图 10 所示，由图可见，健康叶片的

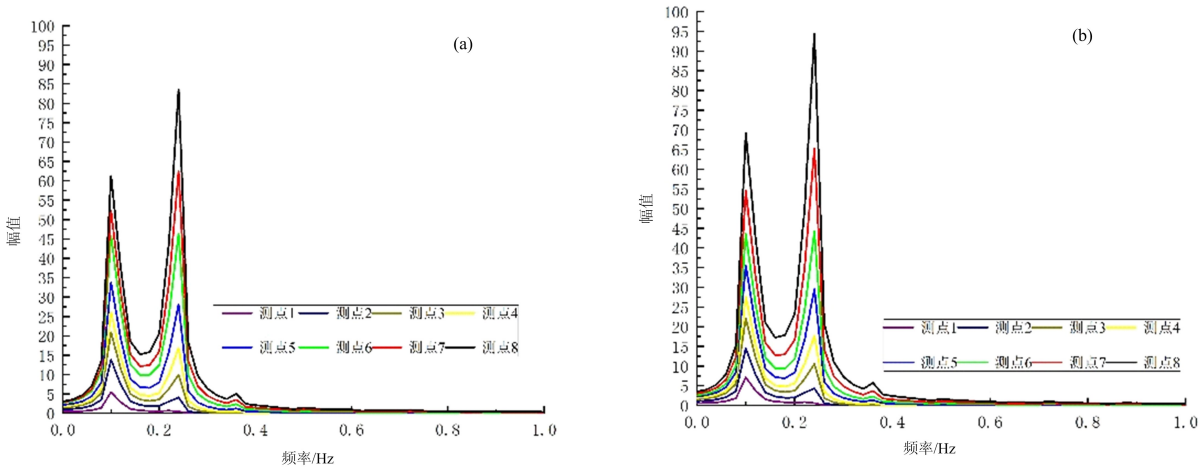

图 8 健康叶片和含裂纹叶片法向位移的功率谱图:(a)健康叶片;(b)含裂纹叶片

Fig. 8 Power spectrum of the blade displacement in normal direction:(a)without crack;(b)with crack

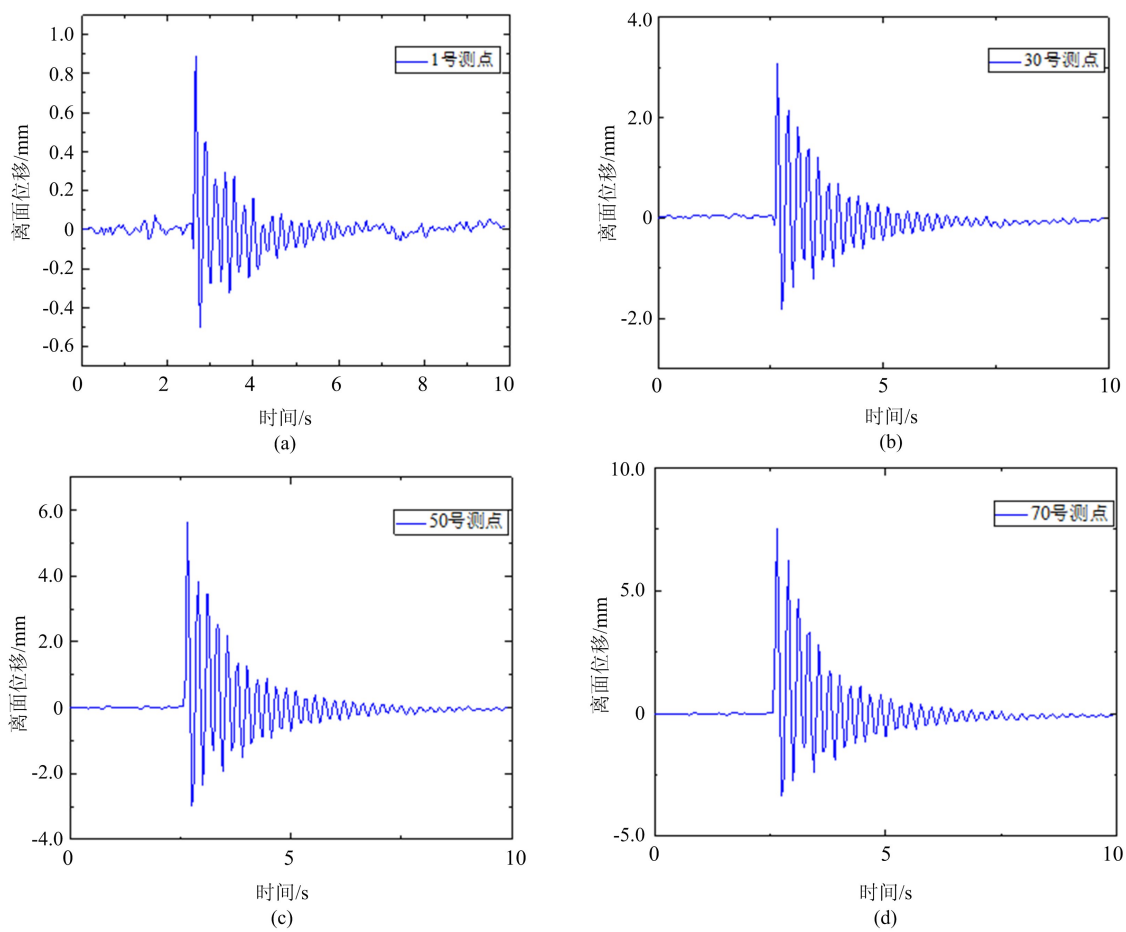

图 9 4 个测点的离面位移数据:(a)1 号测点;(b)30 号测点;(c)50 号测点;(d)70 号测点

Fig. 9 The out of plane displacement data of four measuring points:(a)measurement point 1;(b)measurement point 30;(c)measurement point 50;(d)measurement point 70

峰峰值曲线沿叶片长度方向较为平缓,未出现明显的斜率突变情况;而带有损伤的叶片,其峰峰值曲线存在显著的斜率变化。

基于 1.4 节给出的含损伤叶片挠度方程(式(15))可见,当叶片存在裂纹时,其刚度降低,导致挠度增大,因此,挠度曲线在裂纹处会出现突变,且在突变位置附近挠度曲线幅值发生较大差异。为消除叶

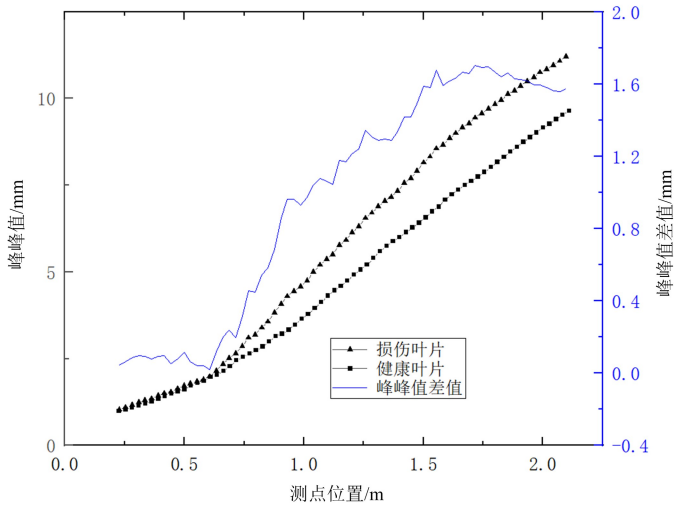

图 10　健康叶片和裂纹损伤叶片的峰峰值曲线

Fig. 10　Peak to peak displacement distribution of the blade with and without cracks

片初始状态差异的影响，首先将各个叶片测量所得的峰峰值曲线的起始值对齐，在相同的基准线上进行比较。之后通过简单的相减运算得到峰峰值差值曲线，该曲线在距离叶根 0.606 m 处出现明显突变，据此可识别出叶片的损伤位置。按照上述方法，对叶片重复测量 10 次，由表 3 测量结果可见，叶片损伤定位误差约为−0.05～0.05 m，表明该叶片缺陷检测方法具有很好的一致性。

值得注意的是，由于实际风电叶片的内部结构和本文所使用的叶片存在一定的差异，因此需要根据不同叶片的结构进行具体分析。

表 3　多次检测裂纹的结果

Tab. 3　Multiple inspections for crack detection

组别	测量值/m	偏差值/m
1	0.587	−0.013
2	0.606	0.006
3	0.602	0.002
4	0.585	−0.015
5	0.576	−0.024
6	0.650	0.050
7	0.567	−0.033
8	0.555	−0.045
9	0.603	0.003
10	0.595	−0.005

3　总结与结语

本文提出一种基于双目视觉的风电叶片运动检测及损伤定位方法。首先，针对户外大视场实验环境，采用逆深度化 BA 算法对双目视觉系统外部参数进行非线性优化；随后，通过拟合叶片旋转平面建立新坐标系，以便直观监测风电叶片的三维运动并分析风电叶片的健康情况。考虑到频谱分析对叶片内部裂纹的探测能力有限，本文引入外部激励，结合双目视觉测量获取叶片从叶根到叶尖多个测点的振动峰峰值数据；通过将健康叶片峰峰值曲线为基准，对比各叶片峰峰值曲线的差异后将差异显著区域判

定为裂纹位置。本文实验结果初步验证了所提方法在叶片缺陷检测中的可行性。

参考文献:

[1] NWAIGWE K N. Assessment of wind energy technology adoption, application and utilization: a critical review [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(5):4525-4536.

[2] WANG W J, XUE Y, HE C K, et al. Review of the typical damage and damage-detection methods of large wind turbine blades[J]. Energies, 2022, 15(15):5672.

[3] KONG C, BANG J, SUGIYAMA Y. Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life[J]. Energy, 2005, 30(11/12):2101-2114.

[4] XI Y B, LIN K G, PAN J N, et al. Bending moment characteristic analysis of utility-scale onshore wind turbine blades based on monitoring data[J]. Engineering Structures, 2023, 294:116714.

[5] YANG L X, ZHANG Z J. A conditional convolutional autoencoder-based method for monitoring wind turbine blade breakages[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(9):6390-6398.

[6] BROWN C J, KARUMA R, ASHKENAZI V, et al. Monitoring of structures using the global positioning system [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 1999, 134(1):97-105.

[7] DING S H, YANG C C, ZHANG S. Acoustic-signal-based damage detection of wind turbine blades: a review[J]. Sensors, 2023, 23(11):4987.

[8] PIERACCINI M, PARRINI F, FRATINI M, et al. Static and dynamic testing of bridges through microwave interferometry[J]. NDT & E International, 2007, 40(3):208-214.

[9] GENOVESE K, SORGENTE D. A morphing-based scheme for large deformation analysis with stereo-DIC[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 104:159-172.

[10] HAO J W, QIAO L, LI Z J, et al. Study on the fracture behavior of prefabricated fissures granite based on DIC and laser scanning techniques[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(5):1372-1390.

[11] GOLEWSKI G L. Validation of the favorable quantity of fly ash in concrete and analysis of crack propagation and its length—Using the crack tip tracking (CTT) method—In the fracture toughness examinations under Mode II, through digital image correlation[J]. Construction and Building Materials, 2021, 296:122362.

[12] NGUYEN H, LIANG J L, WANG Y Z, et al. Accuracy assessment of fringe projection profilometry and digital image correlation techniques for three-dimensional shape measurements[J]. Journal of Physics: Photonics, 2021, 3(1):014004.

[13] PAN B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(8):082001.

[14] 于起峰, 尚洋, 伏思华, 等. 大型结构变形及形貌摄像测量技术研究进展[J]. 实验力学, 2011, 26(5):479-490 (YU Qifeng, SHANG Yang, FU Sihua, et al. Development of videometrics for large-scale structural deformation and topography measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):479-490 (in Chinese))

[15] WU R, ZHANG D S, YU Q F, et al. Health monitoring of wind turbine blades in operation using three-dimensional digital image correlation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 130:470-483.

[16] FENG W W, YANG D, DU W X, et al. In situ structural health monitoring of full-scale wind turbine blades in operation based on stereo digital image correlation[J]. Sustainability, 2023, 15(18):13783.

[17] GUAN B L, SU Z L, YU Q F, et al. Monitoring the blades of a wind turbine by using videogrammetry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 152:106901.

[18] FATHIAN K, GANS N R. A new approach for solving the Five-Point Relative Pose Problem for vision-based estimation and control[C]//2014 American Control Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2014:103-109.

[19] HARTLEY R I. In defense of the eight-point algorithm[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(6):580-593.

[20] WANG J, GUAN B L, HAN Y S, et al. Sensor-aided calibration of relative extrinsic parameters for outdoor stereo vision systems[J]. Remote Sensing, 2023, 15(5):1300.

[21] SHAN J. A brief history and essentials of bundle adjustment[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan

University，2018，43(12)：1797-1810.

[22] WU C C，AGARWAL S，CURLESS B，et al. Multicore bundle adjustment[C]//CVPR 2011. Piscataway，NJ：IEEE，2011：3057-3064.

[23] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2000，22(11)：1330-1334.

[24] YANG D，SU Z L，ZHANG S Q，et al. Real-time matching strategy for rotary objects using digital image correlation[J]. Applied Optics，2020，59(22)：6648-6657.

[25] WU R，CHEN Y，PAN Y T，et al. Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering，2015，65：38-45.

Research on photogrammetry and mechanical diagnosis based on blade deflection

GAO Yiheng[1]，YANG Guohui[2]，GUAN Banglei[3]，
SU Zhilong[1,4,5]，YU Qifeng[3]，ZHANG Dongsheng[1,4,5]

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics，School of Mechanics and Engineering Science，Shanghai University，Shanghai 200444，China；2. People's Liberation Army of China 63853，Baicheng 137001，Jilin，China；3. College of Aerospace Science and Engineering，National University of Defense Technology，Changsha 410073，China；4. Shanghai Institute of Aircraft Mechanics and Control，Shanghai 200092，China；5. Shaoxing Institute of Technology，Shanghai University，Shaoxing 312071，Zhejiang，China)

Abstract：To address the issues of high operation and maintenance costs，low detection efficiency，and remaining limitations in damage identification and localization of current wind turbine blade health detection methods. A non-contact measurement technology based on binocular vision and a blade fault diagnosis method have been proposed. First，to address the challenge of large-field-of-view camera calibration，the inverse depth-based Bundle Adjustment（BA）algorithm was used in nonlinearly optimizing the external parameters of the binocular vision system，thereby improving the measurement accuracy for large field-of-view applications. The study on damage detection in a turbine blade was also explored based on experimental deflection measurements. By fitting the rotation plane of the turbine blade，the normal deformation of the rotary blade was extracted through the coordinate transformation. And the location of the damage in the blade was then determined by comparing the difference in peak-to-peak magnitudes between blades with and without cracks. Finally，an experimental wind turbine model was built with blade length of 2.15 m. The 3D displacement distribution of the rotating blade was characterized，and the prefabricated cracks in the blade were also detected. The measurement precision is within an error margin ranging from −0.05 m to 0.05 m. The feasibility of the proposed methods is preliminarily verified with the satisfactory measurement results.

Keywords：binocular vision；camera calibration；three-dimensional measurement；damage detection