

双目立体摄影测量的风力机叶片振动频率分析*

买买提明·艾尼¹, 刘慧洁¹, 古丽巴哈尔·托乎提¹,
吴志强¹, 亚库普江·艾合麦提²

(1.新疆大学机械工程学院 乌鲁木齐,830047) (2.佰博机电科技有限公司 乌鲁木齐,830011)

摘要 为了准确识别物体模态频率,降低测试成本及环境要求,提出了一种双目摄影测量辨识结构模态频率的方法,并对某型风力机叶片进行了测试。首先,通过两台摄像机从不同方位同步并连续采集振动结构及人工布设的多个标记点的图像;其次,采用高斯滤波进行图像去噪,经过 Canny 算子分割特征点边缘信息,用最小二乘法和迭代法拟合圆曲线,对标记点进行高精度的亚像素定位,计算摄像机交会范围内每一个测试点的时间响应函数与三维空间坐标信息;然后,使用 KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) 算法实现特征点跟踪匹配,利用改进的快速傅里叶变换算法,将时域信号转换为频域信号,辨识了叶片的前 4 阶模态频率;最后,与加速传感器、激光多普勒测振仪 (laser Doppler vibration, 简称 LDV) 的对比结果表明,双目摄影测量获取的模态频率误差仅在 5% 范围内,验证了该方法的可靠性和有效性。

关键词 双目摄影;模态频率;激光多普勒;加速度传感器;振动测量
中图分类号 TB89;O329

引言

风能是一种使用清洁、成本较低、绿色环保的可再生能源,能够替代原始的化石燃料,降低了环境污染,是未来最具发展潜能的能源之一^[1]。风力发电机叶片是风电设备的关键部件。为提高叶片的工作效率和适应现代技术的发展,叶片的实际尺寸逐渐变大,但由于叶片长期在变风载荷、高温以及潮湿气候等环境下工作,整机或叶片很容易发生振动,导致表层掉落、折断等严重事故,增加了投入和维护成本^[2]。因此,需要设计满足尺寸和高效率的极端载荷以及承受疲劳、恶劣环境等影响的叶片。为了解叶片在复杂环境下的动态特性,通常利用试验测试方法获得结构的动态特性参数,包括接触式测量和非接触式测量。接触式测量主要以加速度传感器为主,该方法对结构产生附加质量,难以获取结构的真实动态特性,且随着被测对象的大型化和复杂化,仅使用少量的传感器很难获取大型结构的动态响应,因此接触测量范围有限,传感器的布置比较繁琐^[3]。非接触式测量主要是激光多普勒测振以及双目摄影测量等,激光测量方法虽精度高,但设备价格昂贵。因此,提出了通过双目摄影测量来辨识叶片模态频

率的方法。

与传统的数据采集系统相比,双目摄影测量具有非接触式、快速、多点测试、高精度以及对测试环境灵敏度低等优点,通过拍摄连续图像的方式还原被测物体的空间三维坐标、实际大小和形状等^[4-6]。激光多普勒测振仪具有非接触式、远距离测量、时间短、抗干扰性强以及测量分辨率高等优点。这两类方法已经广泛应用于汽车制造、航天航空、医疗及结构探伤等领域^[7-8]。Forbes 等^[9]通过非接触式测量方法辨识出运动状态下转子叶片的固有频率。Ozbek 等^[10]利用 4 个摄像机,从风力机叶片 33 个不同位置连续捕获平面图像,最终辨识出叶片主要模态频率。许畅等^[11]使用摄影测量法对在轨大型柔性结构进行模态参数辨识。邱志成等^[12]基于视频测量方法实现了多测点目标跟踪,完成了测试结构的几何建模,识别出被测结构的固有模态参数。陈丁等^[13]利用双目视觉技术获取试验模型在风洞流场激励下的位移样貌,识别某翼面模型的颤振特性。

针对传统传感器存在的不足,笔者结合了双目立体摄影测量、图像处理及同名点匹配等理论,以激光多普勒测振仪、加速度传感器和有限元分析法为参考标准,提出了一种基于双目立体摄影测量的高

* 国家自然科学基金资助项目(12162031)

收稿日期:2020-06-30;修回日期:2020-08-18

精度测振方法。首先,对摄像机畸变参数进行校准,利用平面标定算法^[14]进行摄像机的标定;其次,在图像去噪和边缘分割的基础上,采用最小二乘法和迭代法拟合圆曲线,对标记点进行高精度的亚像素定位;然后,通过特征点的灰度残差来实现特征点的匹配跟踪,获取动态图像中特征点的时域响应曲线;最后,经快速傅里叶变换,得到频域响应。通过对某风力发电机叶片的测试结果表明,所提方法能够较准确地识别出叶片的主要模态频率,对环境的要求低,体现了非接触式和全场视野测量的优越性。

1 双目摄影测量原理

数字图像相关技术是利用双目立体视觉技术,通过追踪物体表面上明显的特征点来测量结构的三维坐标、位移及应变,主要应用在全场应变、变形、位移、振幅及模态等信息的精确测量和获取。为了获取风力机叶片主要模态参数,笔者在考虑摄像机畸变参数的情况下,利用2台摄像机获取叶片的模态频率。技术路线流程图如图1所示。

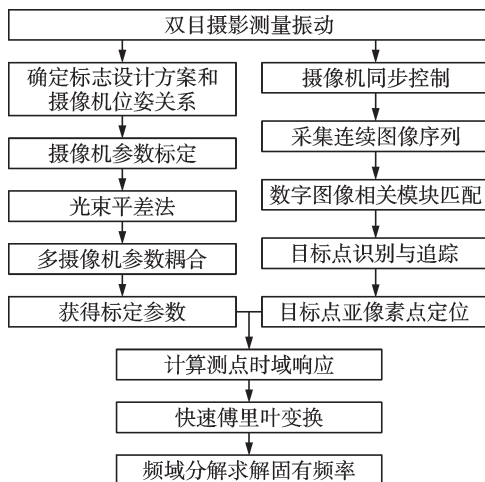


图1 技术路线流程图

Fig.1 Flow chart of technical route

图2为双目立体测量原理。其中: $O_c^l-X_c^lY_c^lZ_c^l$ 和 $O_c^r-X_c^rY_c^rZ_c^r$ 分别为左右摄像机坐标系; O_c^l 和 O_c^r 为左右摄像机光轴中心; f_l 和 f_r 为左右摄像机有效焦距; $O_l-x_l y_l$ 和 $O_r-x_r y_r$ 为左右摄像机图像物理坐标系; $o_l-u_l v_l$ 和 $o_r-x_r y_r$ 为左右摄像机像素平面坐标系; $O_w-X_w Y_w Z_w$ 为世界空间坐标系; C_l 和 C_r 为左右摄像机成像平面。

图像实际成像时,主点像平面坐标之间存在细微的误差,记为 $p_l(x_l, y_l)$ 和 $p_r(x_r, y_r)$ 。另外,镜头在加工和装配时也存在一定的误差,导致各像点在相

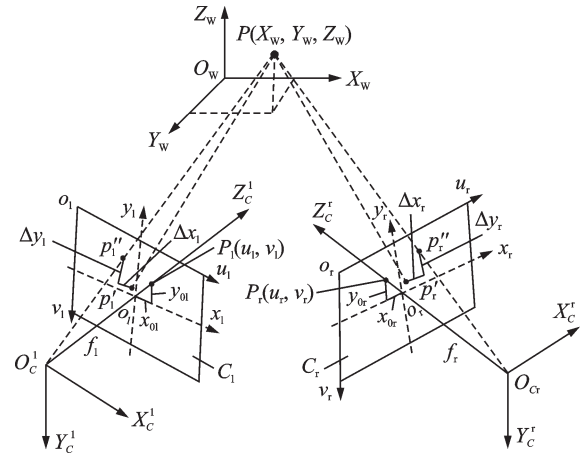


图2 双目立体测量原理图

Fig.2 The principle of binocular stereo photogrammetry

对理论位置 p_l', p_r' 成像到 p_l'', p_r'' 。

被测结构在图像物理坐标系中的位置转换到世界空间坐标系,主要是坐标系的旋转和平移,如图3所示。其中: R_l, R_r 为将世界空间坐标系分别旋转于左右摄像机坐标方向一致的 3×3 的旋转矩阵; T_l, T_r 为将世界空间坐标系分别平移于左右摄像机原点重合的 3×1 平移矩阵; $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 为任一点在世界坐标系中的齐次坐标; $(X_c^l, Y_c^l, Z_c^l, 1)$ 为空间任意点 P 在左右摄像机中的齐次坐标; $(u_l, v_l, 1)^T, (u_r, v_r, 1)^T$ 为左右摄像机中图像物理坐标系的齐次矩阵; T_{lr} 为平移向量; R_{lr} 为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵。

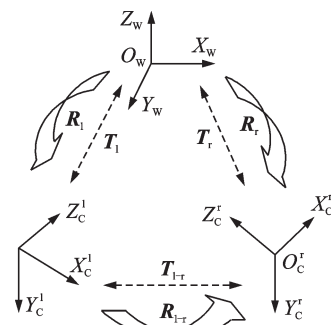


图3 坐标系的旋转与平移

Fig.3 Transformation between world and cameras system

摄像机坐标系与世界坐标系之间的变换过程为

$$\begin{bmatrix} X_{Ci} \\ Y_{Ci} \\ Z_{Ci} \end{bmatrix} = R_i \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{Xi} \\ T_{Yi} \\ T_{Zi} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X_{Ci} \\ Y_{Ci} \\ Z_{Ci} \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{i(3 \times 3)} & \mathbf{T}_{i(3 \times 1)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

图像坐标系与世界坐标系之间的转换可表达为

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_i \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{i(3 \times 3)} & \mathbf{T}_{i(3 \times 1)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{i(3 \times 3)} & \mathbf{T}_{i(3 \times 1)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{00}^i & p_{01}^i & p_{02}^i & p_{03}^i \\ p_{10}^i & p_{11}^i & m_{12}^i & p_{13}^i \\ p_{20}^i & p_{21}^i & p_{22}^i & p_{23}^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} \alpha_i & \gamma & u_0^i \\ 0 & \beta_i & v_0^i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $\alpha_i = f/dx$, $\beta_i = f/dy$, 为有效焦距; γ 为坐标轴倾斜参数; $(u_0^i, v_0^i, 1)^T$ 为主点坐标; s_i 为缩放比例因子。

由于镜头制造过程有先天性误差以及摄像机镜头不完全平行于图像平面等原因,造成了畸变误差。本研究中摄像机模型采用针孔成像模型,计算了摄像机径向和切向畸变。

径向畸变模型 $\Delta\delta_x^i$ 和 $\Delta\delta_y^i$ 为

$$\begin{cases} \Delta\delta_x^i = \bar{x}(1 + K_1 c^2 + K_2 c^4 + K_3 c^6) \\ \Delta\delta_y^i = \bar{y}(1 + K_1 c^2 + K_2 c^4 + K_3 c^6) \end{cases} \quad (5)$$

切向畸变模型 $\Delta\epsilon_x^i$ 和 $\Delta\epsilon_y^i$ 为

$$X_w = \frac{\left[\frac{[(p_{03}^r - u_r p_{23}^r)(u_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (u_r p_{23}^r - p_{01}^r)(u_l p_{23}^l - p_{03}^l)]}{[(u_r p_{22}^r - p_{02}^r)(u_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (u_l p_{21}^l - m_{01}^l)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l)]} - \frac{[(p_{13}^l - v_l p_{23}^l)(u_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (v_l p_{21}^l - p_{11}^l)(v_l p_{23}^l - p_{03}^l)]}{[(v_l p_{22}^l - p_{12}^l)(v_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (v_l p_{21}^l - p_{11}^l)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l)]} \right]}{\left[\frac{[(p_{10}^l - v_l p_{20}^l)(u_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (v_l p_{21}^l - p_{11}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]}{[(v_l p_{22}^l - p_{12}^l)(u_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (v_l p_{21}^l - p_{11}^l)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l)]} - \frac{[(p_{00}^r - u_r p_{20}^r)(u_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (u_r p_{21}^l - p_{01}^r)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]}{[(u_r p_{22}^r - p_{02}^r)(u_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (u_r p_{21}^l - p_{01}^r)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l)]} \right]} \quad (9)$$

$$Y_w = \frac{\left[\frac{[(p_{03}^r - u_r p_{23}^r)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l) + (u_l p_{23}^l - p_{03}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]}{[(u_r p_{20}^r - p_{00}^r)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l) + (u_r p_{22}^r - p_{02}^r)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]} - \frac{[(p_{13}^l - v_l p_{23}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l) + (v_l p_{20}^l - p_{10}^l)(u_l p_{23}^l - p_{03}^l)]}{[(v_l p_{20}^l - p_{10}^l)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l) + (v_l p_{22}^l - p_{12}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]} \right]}{\left[\frac{[(u_l p_{20}^l - p_{10}^l)(u_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (p_{11}^l - v_l p_{22}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]}{[(v_l p_{20}^l - p_{10}^l)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l) + (v_l p_{21}^l - p_{11}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]} - \frac{[(u_r p_{20}^r - p_{00}^r)(u_l p_{21}^l - p_{01}^l) + (p_{01}^r - u_r p_{21}^r)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]}{[(u_r p_{22}^r - p_{00}^r)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l) + (u_r p_{22}^r - p_{02}^r)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]} \right]} \quad (10)$$

$$Z_w = \frac{\left[\frac{[(p_{03}^l - u_l p_{23}^l)(v_r p_{20}^r - p_{10}^r) + (v_r p_{23}^r - p_{13}^r)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]}{[(v_r p_{20}^r - p_{10}^r)(p_{01}^l - u_l p_{21}^l) + (v_r p_{21}^r - p_{11}^r)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]} - \frac{[(p_{03}^r - u_r p_{23}^r)(v_l p_{20}^l - p_{10}^l) + (v_l p_{23}^l - p_{13}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]}{[(v_l p_{20}^l - p_{10}^l)(p_{01}^l - u_l p_{21}^l) + (v_l p_{21}^l - p_{11}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]} \right]}{\left[\frac{[(u_l p_{20}^l - p_{10}^l)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l) + (p_{12}^l - v_l p_{22}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]}{[(v_l p_{20}^l - p_{10}^l)(p_{01}^l - u_l p_{21}^l) + (v_l p_{21}^l - p_{11}^l)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]} - \frac{[(u_r p_{20}^r - p_{10}^r)(p_{02}^l - u_l p_{22}^l) + (p_{12}^r - v_r p_{22}^r)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]}{[(v_r p_{20}^r - p_{10}^r)(p_{01}^l - u_l p_{21}^l) + (v_r p_{21}^r - p_{11}^r)(u_l p_{20}^l - p_{00}^l)]} \right]} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_x^i = P_1(c^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y} \\ \Delta\epsilon_y^i = P_2(c^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1\bar{x}\bar{y} \end{cases} \quad (6)$$

校准畸变后,空间上点 P 在左摄像机坐标系中的实际坐标 $P_i''(x_{p_i''}, y_{p_i''})$ 表达式为

$$\begin{cases} x_{p_i''} = \bar{x}_i + K_1 \bar{x}_i c^2 + K_2 \bar{x}_i c^4 + K_3 \bar{x}_i c^6 + \\ \quad P_1(c^2 + 2\bar{x}_i^2) + 2P_2 \bar{x}_i \bar{y}_i \\ y_{p_i''} = \bar{y}_i + K_1 \bar{y}_i c^2 + K_2 \bar{y}_i c^4 + K_3 \bar{y}_i c^6 + \\ \quad P_2(c^2 + 2\bar{y}_i^2) + 2P_1 \bar{x}_i \bar{y}_i \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\bar{x} = x_i - x_0^i$; $\bar{y} = y_i - y_0^i$; $c^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$; K_1, K_2, K_3 为摄像机径向畸变系数; P_1, P_2 为摄像机切向畸变系数。

联立式(2)~(4),消去缩放比例因子 s_l 和 s_r , 可得关于 X_w, Y_w, Z_w 的4个共线方程为

$$\begin{cases} (u_l p_{20}^l - p_{00}^l) X_w + (u_l p_{21}^l - p_{01}^l) Y_w + \\ \quad (u_l p_{22}^l - p_{02}^l) Z_w = p_{03}^l - u_l p_{23}^l \\ (v_l p_{20}^l - p_{10}^l) X_w + (v_l p_{21}^l - p_{11}^l) Y_w + \\ \quad (v_l p_{22}^l - p_{12}^l) Z_w = p_{13}^l - v_l p_{23}^l \\ (u_r p_{20}^r - p_{00}^r) X_w + (u_r p_{21}^r - p_{01}^r) Y_w + \\ \quad (u_r p_{22}^r - p_{02}^r) Z_w = p_{03}^r - u_r p_{23}^r \\ (v_r p_{20}^r - p_{10}^r) X_w + (v_r p_{21}^r - p_{11}^r) Y_w + \\ \quad (v_r p_{22}^r - p_{12}^r) Z_w = p_{13}^r - v_r p_{23}^r \end{cases} \quad (8)$$

空间点 P 在2个摄像机的交会范围内,其必然满足式(8)。可以求出空间点 P 的坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 为

2 模态参数的自动识别

2.1 特征点检测

同名点匹配的本质就是寻找连续动态图像序列中给定的图像中的一点与其他图像中对应的点,使得这两点为空间同一物体点的投影。

2.1.1 亚像素边缘检测

为了对特征点的亚像素级精确定位,用边缘检测算子对圆曲线进行亚像素级边缘提取。经典的边缘检测算子有sobel算子、prewitt算子和robert算子等,这些算子的主要缺点是对噪声敏感。本研究利用Canny算子做圆曲线边缘粗定位,首先对图像进行高斯平滑,然后对平滑后的图像进行简单的二维一阶微分操作得到梯度图,采用“非最大抑制”算法寻找图像中的可能边缘点,最后通过双门限值递归寻找图像边缘点得到单像素宽度边缘图像^[15-16]。

$$G(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(u^2+v^2)}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

其中: $\sigma=2$ 。

Canny算子的性能由阈值 γ_1 和 γ_2 决定。 γ_1 决定梯度图中边缘检测起始点的性质, γ_1 越小保留的边缘信息就越多,得到的目标边缘就越精细,但是混杂的伪边缘也会增多; γ_2 决定检测终止点的性质, γ_2 越小保留的边缘信息就越多,边缘越连续。

2.1.2 亚像素中心定位

特征点经过摄像机成像后为椭圆,对经过Canny算子处理后所获得的具有边界信息的二值图像进行最小二乘拟合,从而确定特征点中心坐标位置。平面椭圆的一般方程为

$$x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0 \quad (13)$$

其中: (x, y) 为椭圆的中心点坐标。

椭圆拟合可求得椭圆方程的5个参数 B, C, D, E, F 。中心坐标计算公式为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{BE - CD}{C - B^2} \\ y_0 = \frac{BD - E}{C - B^2} \end{cases} \quad (14)$$

椭圆中心坐标即为所求特征点中心的精确位置,在像素坐标系中用 (u_i, v_i) 表示。为了抑制图像噪声的影响以提高定位准确度,可对边缘进行二次拟合,即第1次拟合后,计算每个边缘点的残差,将残差较大的点去除掉,再对剩余点进行第2次椭圆拟合。试验表明,图像质量不太好时,每次可以去掉5%的点。

2.2 特征点跟踪

对一段图像进行训练得到可信度较高的背景特征点,然后在后续帧中找到这些背景特征点的对应点,利用二者之间的关系求解仿射运动模型参数。通过KLT算子来选取图像中的特征点,再利用平移模型进行特征点跟踪,通过目标特征点与下一帧图像上以特征点像素误差最小为优化目标,完成对目标上特征点的匹配,实现对目标的识别及跟踪定位。对于第 N 幅图像上跟踪到的特征点,通过仿射模型进行连续性判断,对跟踪错误的特征点进行剔除,由此降低匹配误差,得到编码点配准结果。

将所采集的图像进行处理后,对跟踪区域的特征点进行优化处理,得出该跟踪区域的跟踪结果。由于每个跟踪区域中有多个跟踪特征点,当跟踪特征点个数小于给定阈值数时,对特征点进行自动添加,能够保证跟踪稳定性^[17-18]。

优化处理方法如下

$$\min = \sum_{j=1}^n \sqrt{(u_x - u_j)^2 + (v_x - v_j)^2} \quad (15)$$

其中: (u_x, u_j) 为所求跟踪区域的像素坐标; (v_x, v_j) 为跟踪区域中第 j 个特征点像素坐标; n 为跟踪区域内特征点个数。

2.3 快速傅里叶变换

根据测试结构上多特征点跟踪结果,基于双目立体成像原理,由摄像机标定参数,将待测特征点像素坐标转换为空间坐标,提取出特征点实际振动信息。令 $F(k)$ 等于 $F(k_x), F(k_y)$ 和 $F(k_z)$,分别表示三维空间点 P 在 X_w, Y_w, Z_w 方向的频域信号; $f(q)$ 等于 $f(X_w), f(Y_w)$ 和 $f(Z_w)$,分别表示空间点 P 在三维方向上的时域信号,即

$$F(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(q) e^{-i2\pi kq} dq \quad (16)$$

其中: $e^{-i2\pi kq} = \cos(2\pi kq) + i\sin(2\pi kq), i = \sqrt{-1}$ 。

利用快速傅里叶变换,可将时域信号 $f(q)$ 转换为频域信号 $F(k)$,以获得测试结构在 X_w, Y_w, Z_w 方向上的固有频率。

3 试验测量与结果对比分析

为了验证双目摄像测量方法的有效性,在双目摄像测试的同时使用激光多普勒测振仪和加速传感器测振方法进行振动和模态测试,并对比分析了试

验测试结果。

3.1 双目摄影测量平台

双目摄影测量平台如图 4 所示,主要由硬件和软件两部分构成。系统的硬件包括 DC-600-6 电动振动试验系统(扫频范围为 2~5 000 Hz,额定激振力为 5.88 kN)、SOPTOP LV-S01 自动焦距单点激光多普勒测振仪、压电加速度传感器、风轮(直径为 3.3 m,额定功率为 3 kW,额定转速为 450 r/min)、某型风力机空心叶片(材料为尼龙纤维增强复合材料,弹性模量 $E=8.3\times 10^6$ Pa,泊松比为 0.28,密度为 1.25 g/cm^3)、大华 A5131MU210 工业摄像机(1 280×1 024 pixel)、控制箱、激光头、采集卡、定焦镜头、控制盒、棋盘格标定板、电脑、编码标志点、三脚架以及各类连接线。系统的软件部分包括双目同时采集图像系统、激光反射信号采集系统和振动试验平台控制系统。

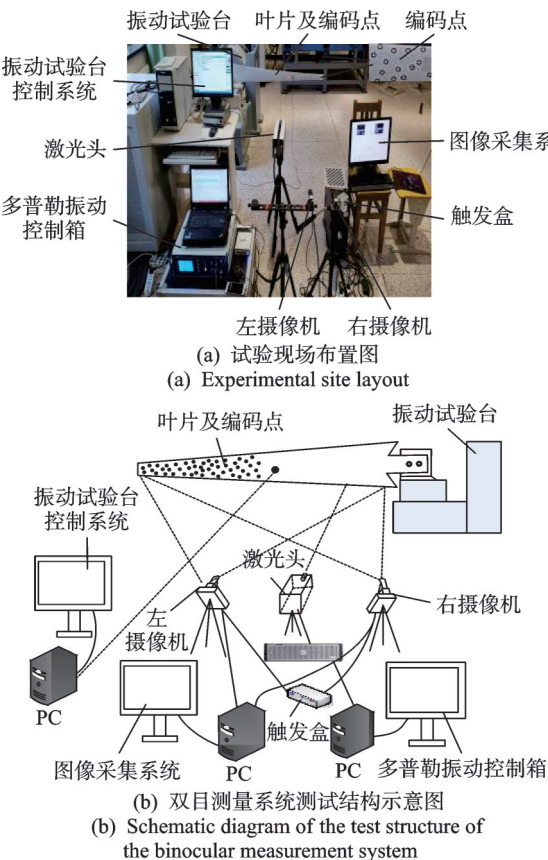


图 4 双目摄影测量平台
Fig.4 Binocular photogrammetry platform

3.2 双目摄影测量结果分析

3.2.1 摄像机标定

摄像机标定是从摄像机获取的图像信息中高精

度三维重建被测对象的空间几何尺寸和实际大小。试验采用大小为 27 mm×27 mm 的棋盘方块标定板来获取摄像机的内外方位元素,以获取摄像机径向和切向畸变参数。内参数主要由摄像机本身确定,包括焦距和畸变参数。外参数主要决定摄像机在世界坐标系中的位姿。标定板放在 2 台摄像机前方的交会区域,并从不同拍摄角度采集 30 张标定图像,首先单独标定左右摄像机,然后利用光束法平差算法^[19-21]对左右摄像机进行立体标定。左右摄像机的重投影误差如图 5 所示。摄像机与标定板的空间位姿可视化如图 6 所示。左右摄像机内部参数如表 1 所示。

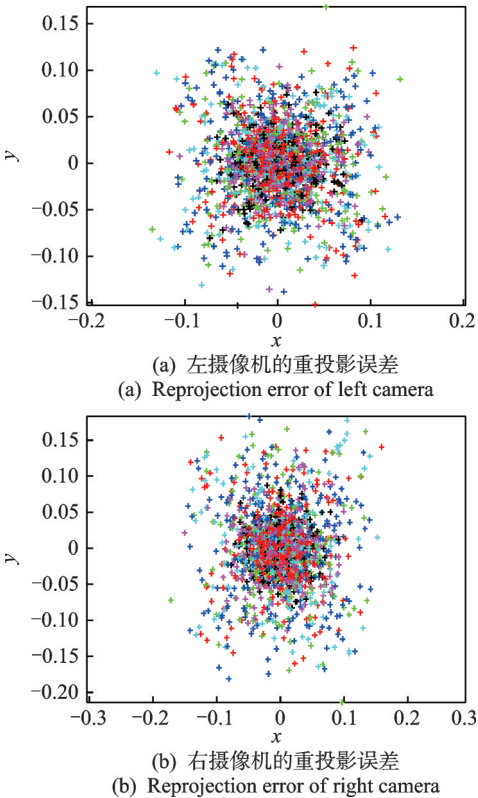


图 5 左右摄像机的重投影误差
Fig.5 Reprojection error of left and right cameras

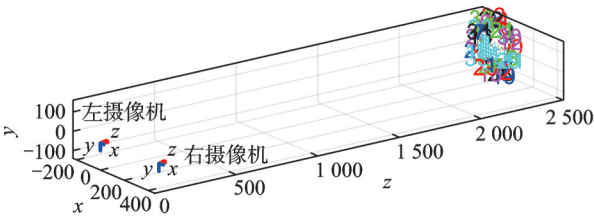


图 6 摄像机与标定板的空间位姿可视化
Fig.6 Space position of camera and calibration board

左右摄像机标定的外部参数为

表 1 左右摄像机内部参数
Tab.1 Internal parameters of the left and right camera

摄像机	主点坐标		有效焦距		径向畸变			切向畸变	
	u	v	f_x	f_y	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
左	2 688.407	2 687.702	333.616	277.544	0.134	-11.470	0.000 365	0.000 813	0.001 669 554
右	2 682.478	2 683.409	320.931	278.330	-0.280	-2.657	0.000 764	0.000 509	-0.002 218 260

$[R \quad \cdots \quad T]=$

$$\begin{bmatrix} 0.973\,4 & -0.005\,8 & 0.229\,6 & \cdots & -392.222 \\ 0.021\,6 & 0.997\,6 & -0.066\,4 & \cdots & 53.868 \\ -0.228\,6 & 0.069\,6 & 0.971\,0 & \cdots & -7.558 \end{bmatrix}$$

3.2.2 双目摄影测量模态识别结果

测试系统将叶片固定于电动振动试验平台,给定扫频和随机激励的工况下,将叶片水平安装在平台上进行测试。2台摄像机通过硬触发同步采集叶片振动连续图像序列1 200张,采样频率为120 Hz。首先,对左右摄像机采集的连续动态图像序列进行编码标志点的识别与匹配,每个测点等效于“位移传感器”,带有叶片时域响应信息;其次,把空间上每个测点的初始坐标点变换到空间坐标系原点,并对振动响应进行归一化,计算出每一个测点在 x,y,z 方向的时域振动响应;最后,对时域信号进行对应变换以获取模态频率。测定的时域和频域响应图如图7所示。

由图7(a,b,c)时域响应图可以看出,叶片振动表现为敲击振动的特性,振动逐渐减弱, z 方向上的振幅远大于 x 和 y 方向,每个测点在3个方向上的频

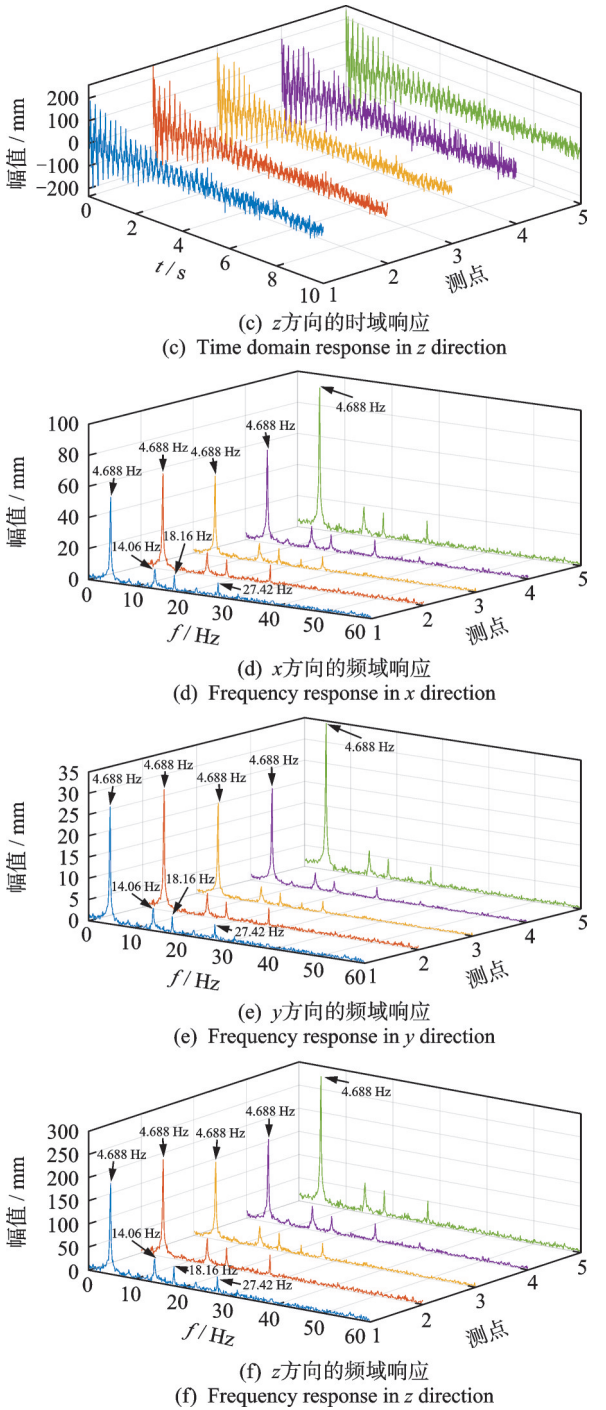
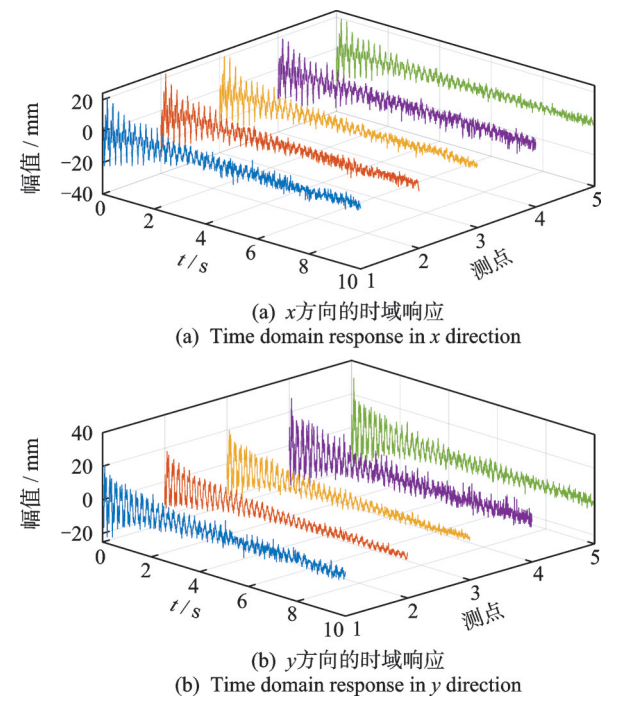


图 7 测定的时域和频域响应图
Fig.7 The response of the several points in the time and frequency domain

率变化是相同的。由图7(d,e,f)频域响应图可知,试验测得叶片的前4阶固有频率分别为4.688,

14.06, 18.16 和 27.42 Hz, 叶片振动主要沿着 y 方向挥舞和 z 方向摆振。

3.3 其他试验测试与频率识别结果

为验证试验的有效性,同时选用激光多普勒测振仪与加速度传感器进行测振。将激光多普勒测振仪安装在离叶片 1 500 mm 的位置,并且激光与叶片表面尽量保持垂直。选取 4 kHz 为采样频率,设置带宽为 100 Hz,采集 2 048 个快速傅里叶变换点数。多普勒频域响应图如图 8 所示。同时,使用压电式加速度传感器,其灵敏度为 49.19 mV/g。将加速度传感器安装在叶片表面,采用单输入单输出的方式,叶片振动的同时采集叶片尖端部分的加速度变化情况。图 9 为传感器频域响应图。

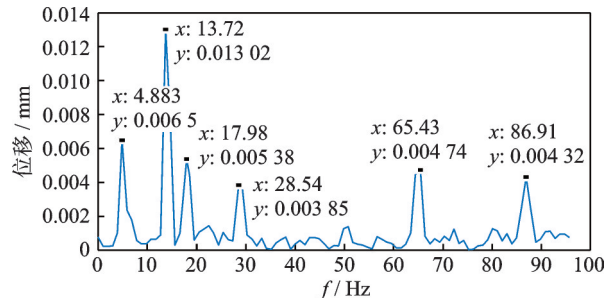


图 8 多普勒频域响应图
Fig.8 Doppler frequency domain response

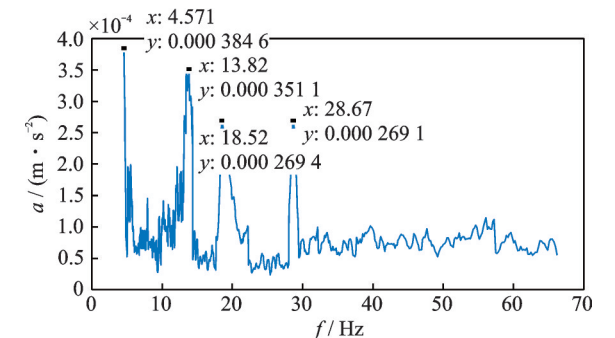


图 9 传感器频域响应图
Fig.9 Sensor frequency domain response

图 8 中多普勒测振仪测得了叶片前 6 阶固有频率,图 9 中加速度传感器获得叶片前 4 阶固有频率。双目测量与激光测量频谱以及加速度传感器结果对比如表 2 所示。

3.4 试验测试与分析结果对比

双目测量方法与多普勒测振及加速度传感器测振相比,相对误差低于 5%,能够精确快速地测量叶片的振动频率,满足测量需求。

表 2 双目测量与激光测量频谱以及加速度传感器结果对比

Tab.2 Comparison of binocular measurement with laser and acceleration sensor measurement results

模态阶数	模态频率/Hz			相对误差/%	
	多普勒测振	传感器测量	双目测量	误差 1	误差 2
1	4.883	4.571	4.688	-4.16	2.50
2	13.720	13.820	14.060	2.42	1.71
3	17.980	18.520	18.160	0.99	-1.98
4	28.540	28.670	27.420	-4.08	-4.56

4 结 论

- 1) 提出了双目立体摄影测量的方法,双目摄影测量辨识结构的模态频率具有非接触、精确、便于操作等特点。
- 2) 使用高斯滤波对图像进行平滑处理,经过 Canny 算子有效分割编码边缘信息,采用最小二乘法和迭代法拟合圆曲线,对标记点进行高精度的亚像素定位,实现对叶片上多测点振动信息的同时提取。
- 3) 利用 KLT 算子选取图像中的特征点,优化出像素最小误差,完成特征点匹配,实现跟踪定位。
- 4) 通过摄像机标定结果,结合快速傅里叶变换算法,辨识了叶片的前 4 阶模态频率,并与加速传感器、激光多普勒测振仪结果进行比对,坐标测量相对误差在 5% 范围内,验证了双目立体摄影测量方法的可靠性和有效性。

参 考 文 献

[1] 高天驰,赵海峰,石海荣.非平稳环境激励下结构模态参数识别方法综述[J].机械设计与制造工程,2019,48(9):1-7.
GAO Tianchi, ZHAO Haifeng, SHI Hairong. Review on the structural modal parameter identification methods under non-stationary ambient excitation [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48(9): 1-7. (in Chinese)

[2] CHRISTOPH W K. Fatigue of composites for wind turbines [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(10): 1363-1374.

[3] 宋安平,臧朝平,张忠.恒速直线连续面扫描激光多普勒测振方法[J].南京航空航天大学学报,2017,49(4):511-517.
SONG Anping, ZANG Chaoping, ZHANG Zhong. Laser doppler vibrometry method with uniform rate raster

- continuous scanning[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics&Astronautics, 2017, 49(4): 511-517. (in Chinese)
- [4] CLARKE T A, ROBSON S, CHEN J. A comparison of three methods for the 3-D measurement of turbine blades [C]//Measurement Technology and Intelligent Instruments. Wuhan: SPIE, 1993: 1-12.
- [5] MCGLONE J C, BETHEL J S, MIKHAIL E M. Introduction to modern photogrammetry [M]. New York: Wiley & Sons Inc, 2001: 247-275.
- [6] 史传飞. 面向大型产品的工业摄影测量技术与系统开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [7] KANG M S, STANBRIDGE A B, CHANGH. T G, et al. Measuring mode shapes with a continuously scanning laser vibrometer: hilbert transform approach [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(2/3): 201-210.
- [8] 崔笛, 张文, 应义斌. 激光多普勒测振技术在农产品品质检测中的应用[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 160-164.
- CUI Di, ZHANG Wen, YING Yibin. Application of laser Doppler vibration measurement technology in agricultural product quality testing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 160-164. (in Chinese)
- [9] FORBES G L, RANDALL R B. Estimation of turbine blade natural frequencies from casing pressure and vibration measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(2): 549-561.
- [10] OZBEK M, RIXEN D J, ERNE O, et al. Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry [J]. Energy, 2010, 35(12): 4802-4811.
- [11] 许畅, 王聪, 高晶波, 等. 基于摄像测量法的在轨柔性结构模态参数辨识[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(11): 17-23.
- XU Chang, WANG Cong, GAO Jingbo, et al. Video-grammetric based modal identification of on-orbit flexible structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(11): 17-23. (in Chinese)
- [12] 邱志成, 汪先锋. 基于双目视觉的振动测量及控制[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 51-58.
- QIU Zhicheng, WANG Xianfeng. Vibration measurement and control based on binocular vision[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 51-58. (in Chinese)
- [13] 陈丁, 吕计男, 季辰, 等. 双目视觉技术在高超声速颤振风洞试验中的应用[J]. 实验力学, 2015, 30(3): 381-387.
- CHEN Ding, LÜ Jinan, JI Chen, et al. Application of binocular vision measurement in hypersonic flutter wind tunnel experiment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3): 381-387. (in Chinese)
- [14] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 20(11): 1330-1334.
- [15] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [16] GEUSEBROEK J M, SMEULDERS-ARNOLD W M, VAN-DE-WEIJER J. Fast anisotropic gauss filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 938-943.
- [17] SHI J, TOMASI C. Good features to track [C]//1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle, WA, USA: IEEE, 1994: 593-600.
- [18] 马维金, 熊诗波, 熊晓燕. 基于模态理论的振动结构声辐射信号特征提取方法及其应用[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 15-20.
- MA Weijin, XIONG Shibo, XIONG Xiaoyan. Method for sound signal characteristic extrction based on modal analysis and its application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 15-20. (in Chinese)
- [19] 郑建冬. 基于单数码相机的三维摄影测量理论与关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [20] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1): 63-86.
- [21] NI K, STEEDLY D, DELLAERT F. Out-of-core bundle adjustment for large-scale 3D reconstruction [C]//2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision. Brazil: IEEE, 2007: 1-8.



第一作者简介:买买提明·艾尼,男,1958年1月生,博士、教授。主要研究方向为计算力学、现代设计理论与方法等。
E-mail:mgheini@263.net

通信作者简介:古丽巴哈尔·托乎提,女,1972年1月生,硕士、副教授。主要研究方向为非线性振动与控制、转子动力学、现代设计理论与方法等。
E-mail:gulbahart@163.com