

基于激光转移放大的结构振动视觉测量方法*

邓荣峰^{1,2}, 曹彦玲^{2,3}, 李 兵³, 林煜彬^{2,3}, 谷丰收²

(1. 广东机电职业技术学院汽车学院 广州, 510550)

(2. University of Huddersfield, Centre for Efficiency and Performance Engineering Huddersfield, HD1 3DH)

(3. 北京理工大学工业自动化学院 珠海, 519088)

摘要 针对传统视觉测量技术在结构振动检测中存在的空间分辨率低、检测误差大等问题,根据激光的准直特性以及光杠杆原理,提出了在高耸结构上安装激光发射装置,将结构振动转换为小范围内激光光斑振动,利用相机近距离检测激光光斑的振动,从而实现对结构振动精确测量的方法。首先,通过简化模型构建了结构振动位移与激光光斑位移之间的对应关系,重点突出了激光光斑位移对结构振动位移的放大作用;其次,通过仿真对所提方法的精度进行分析;然后,通过实验对所提方法的鲁棒性进行验证;最后,通过实验室条件下的简单实验,将所提振动检测方法获得的时域信号与激光位移传感器获得的信号进行了比较,并将频域信号与加速度传感器获得的信号进行了比较。结果表明,所提方法将远距离成像转变为近距离成像,在不增加成本的前提下,有效提升了结构振动的视觉检测精度,降低了测量过程中对环境光的要求。

关键词 结构健康监测;振动检测;激光光斑;图像校正;振动放大

中图分类号 TH11;TP391.9

引言

结构健康监测 (structural health monitoring, 简称 SHM) 技术是确保结构安全服役的关键,已在桥梁^[1]、风力发电机叶片^[2-3]、大坝^[4]、建筑^[5]、输电塔^[6]、柔性结构^[7]和航空复合材料结构^[8]等结构中得到应用。当结构受到破坏时,其模态参数(固有频率、阻尼率和振动模态振型)会发生相应的变化,这些变化可以从结构的振动过程中获得。与超声、X 射线以及红外检测技术相比,基于振动的 SHM 方法更容易实现全局损伤检测,已成为 SHM 领域最受欢迎的方法之一。

随着图像传感器和机器视觉技术的快速发展,基于视觉的振动检测技术在 SHM 领域显示出明显的优势,此类技术无需复杂的传感器安装过程即可实现非接触式、多点、高精度的振动检测。Chen 等^[9]使用单目相机实现了民用基础设施的振动检测,在 175 m 远处实现了对振幅仅为 0.21 mm 的振动测量。Tang 等^[10]使用单目相机检测了电缆吊装结构的位移,成像距离达数百米,误差仅为 2 mm。Guan 等^[11]使用 2 台相机在 500 m 距离处对风力发电

机叶片的振动进行测量,误差小于 3 mm。Bian 等^[12]使用 2 台相机在 200 m 的成像距离下,实现了误差小于 1 mm 的位移测量。Lin 等^[13]在约 2 km 远处成功检测了一座长为 888 m 的桥梁振动模态参数。尽管上述研究都在基于视觉的长成像距离位移检测方面取得了令人印象深刻的检测精度,但远距离视觉测量仍面临以下挑战。

1) 需要价格昂贵的长焦距镜头。文献[10]所用镜头最大焦距达到 500 mm,文献[12]所用镜头最大焦距达到 600 mm。超长焦距镜头不仅价格昂贵,且对相机的稳定性提出了更高要求,相机细微的振动都将带来显著的测量误差。

2) 位移检测精度的限制。成像距离越长,意味着单个像素所代表的实际长度越长,从而导致位移检测精度降低,对结构振动模态的响应能力减弱^[14]。文献[15-16]通过提高被测目标的特征点或边缘^[17-19]的定位精度来提高位移检测的精度,文献[20-21]在视觉振动位移检测结果精度不高的基础上,使用运动放大技术来提高结构振动模式的信噪比。为了提升相机的空间分辨率,一些研究将大型结构划分为

* 国家自然科学基金资助项目(62076029);内蒙古自治区科技计划资助项目(2023YFSW0003);广东省教育厅特色创新资助项目(2022KTSCX199, 2021KTSCX186);广东省教育厅重点领域专项基金资助项目(2021ZDZX1089)

收稿日期:2024-08-05;修回日期:2024-10-18

多个区段,使用相机分别对各区段进行单独测量。Tian 等^[22-23]和 Guo 等^[24]将大型结构划分为多个区域进行检测,通过振动模式融合各区段的检测结果,实现全局模态检测。这种方法虽然在一定程度上保证了视觉检测的准确性,但在融合各区段检测结果的过程中,不可避免的偏差可能会对结构振动模态识别造成影响。文献[25-27]将相机安装在无人机上,利用无人机将远距离成像变为近距离成像,从而提高位移的检测精度,但无人机晃动不可避免。

3) 易受环境光影响。在远距离摄影测量过程中,环境光会发生变化,目标的灰度值也会随之变化,这给目标位移的精确估算带来了挑战。

针对上述大型结构 SHM 中视觉检测技术面临的挑战,笔者提出了一种激光辅助的结构振动测量方法。该方法利用附着在结构上的激光装置,将结构的振动转变为小范围内激光光斑的振动,将远距离的视觉测量转化为近距离的视觉测量。该方法不仅提高了相机的空间分辨率,避免了环境光的影响,而且在振动转移过程中能够实现对结构振动位移的显著放大,保证了结构振动的精确测量,为视觉振动测量技术在 SHM 领域的应用提供了新的思路。

1 激光辅助的结构振动视觉测量

图 1 为利用激光辅助的结构振动测量方法示意图。激光装置固定在被测结构上,并在地面形成光斑。相机尽可能垂直地靠近光斑,记录光斑位置的变化过程。当结构发生振动时,激光光斑的位置也会相应发生变化。当结构前后振动时(从光斑看向结构),图像中的光斑将在 x 方向上移动;当结构侧向振动时,图像中的光斑将在 y 方向上移动。因此,通过建立图像中光斑的位移与激光装置所处结构位移之间的关系,即可实现对结构振动的检测。

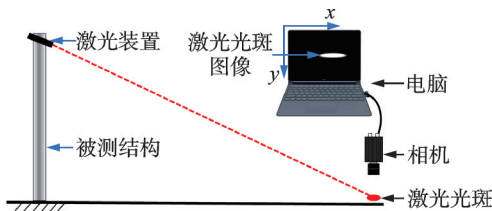


图 1 利用激光辅助的结构振动测量方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser-assisted structural vibration measurement method

1.1 测量原理

图 2 为测量原理示意图。假定被测结构的初始

状态与地面垂直。结构的下端固定在 O 点,上端允许振动。光斑落在地面上的 A 点。当结构上端发生位移 d_s 后,光斑落在地面 B 点。由于激光装置固定在结构上,在结构振动过程中,激光装置与结构之间的夹角保持不变。图 2 中的位移 d_s 为结构的前后振动位移,图像中结构垂直于纸面的振动位移为侧向振动位移。

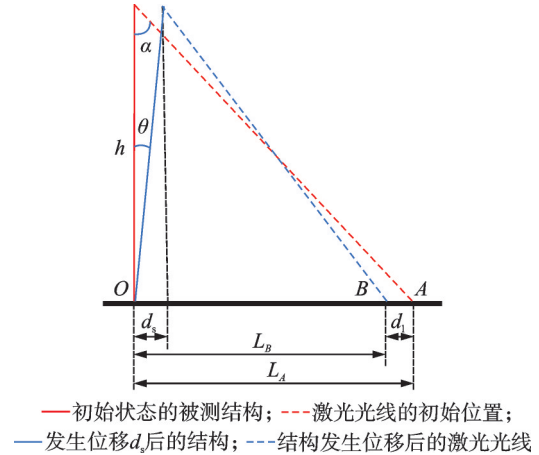


图 2 测量原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of measurement principle

根据图 2 得出

$$\frac{L_A}{h} = \tan \alpha \quad (1)$$

$$L_A - L_B = d_1 \quad (2)$$

其中： L_A 、 L_B 分别为 A 点和 B 点与 O 点的距离； α 为激光笔与结构的夹角（恒定不变）； d_1 为光斑位置的位移； h 为结构高度。

当 $d_s \ll h$ 时,可以认为结构上端发生位移后结构的高度不变。因此,得到以下等式

$$\frac{d_s}{h} = \tan \theta \quad (3)$$

$$\frac{L_B - d_s}{h} = \tan(\alpha - \theta) \quad (4)$$

其中： d_s 为结构上端发生的位移； θ 为结构发生位移前后的夹角。

将式(4)展开得到

$$\frac{L - d_s}{h} = \frac{\tan \alpha - \tan \theta}{1 + \tan \alpha \tan \theta} \quad (5)$$

将式(1)和式(3)代入式(5),可得

$$\frac{L_A^2 d_s - L_A d_s^2}{h^2 + L_A d_s} = d_1 \quad (6)$$

由于 $d_s \ll h$, L_A 可以假设与 h 为同一个量级,所以 $L_A d_s \ll h^2$ 。式(6)可简化为

$$-\frac{L_A}{h^2}d_s^2 + \frac{L_A^2}{h^2}d_s = d_1 \quad (7)$$

式(7)给出了 d_s 与 d_1 之间的对应关系。由式(7)可知,在已知结构高度和激光光斑初始位置的前提下,可以根据激光光斑的位移 d_1 计算出结构上端的位移 d_s 。考虑到 $\frac{L_A}{h^2}d_s^2 \ll \frac{L_A^2}{h^2}d_s$,式(7)可进一步简化为

$$\frac{L_A^2}{h^2}d_s = d_1 \quad (8)$$

式(8)建立了 d_s 和 d_1 之间更为简明的对应关系。由该式可知,当 $L_A > h$ 时,激光光斑位移对结构振动位移具有放大效应。该效应有效降低了对传感器空间分辨率的要求,是本研究所提方法的主要优势之一。

基于式(8),结构前后方向的振动位移可通过图像中光斑在 y 方向的位移推算得到,而结构侧向振动位移则与光斑在图像中 x 方向的位移直接对应,即通过计算光斑在图像中 x 方向的位移即可得到结构侧向振动的位移。需要说明的是,在侧向振动中,光斑位移不具放大效应。

1.2 所提方法的精度分析

式(8)是在式(6)的基础上经过2次简化后得到,笔者通过数值仿真的方法探讨2次简化过程对振动检测精度的影响。

2次简化过程对振动检测精度的影响由 L_A 和 h 的取值决定,设 d_s 为1 mm,考虑 h 与 d_s 的比值范围为[1 000, 4 000](该比例范围适用于大多数应用场景),步长为10, L_A 与 h 的比值范围为[1, 5],步长为0.01。在已知 h 与 L_A 的前提下,根据式(6)可以获得光斑的实际位移 d_1 ,将 d_1 分别代入式(7)和式(8),即可获得2次简化过程所对应的检测结果。2个简化过程对检测精度的影响分别用相对误差 D_1 和 D_2 表示,即

$$D_1 = |d_{s7} - d_s|/d_s \times 100\% \quad (9)$$

$$D_2 = |d_{s8} - d_s|/d_s \times 100\% \quad (10)$$

其中: d_{s7} 、 d_{s8} 为别为根据式(7)和式(8)计算出的 d_s 。

h/d_s 、 L_A/h 对 D_1 和 D_2 的影响趋势如图3所示。可以看出,在所考虑的参数范围内,2次简化过程引入的相对误差均在0.6%以内,这样误差水平就能够满足大多数场景的测量需求。从趋势上看,检测结果的相对误差随着 L_A 与 h 比值的增大而增大,随着 h 与 d_s 比值的增大而减小。说明:①尽管 L_A 与 h

的比值越大,激光光斑对结构振动的放大作用越显著,但引入的测量误差也越大,因此在实际应用过程中不应过分追求高放大倍数;②所提方法对高度较高且具有一定刚度的结构,测量误差较小。相反,如果结构高度较矮且刚度较低,所提方法的测量误差不可忽视。

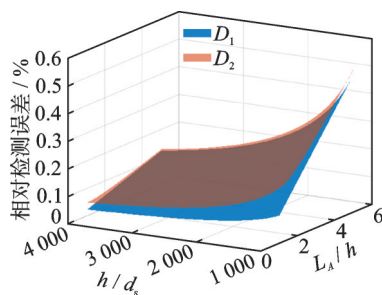


图3 h/d_s 、 L_A/h 对 D_1 和 D_2 的影响趋势

Fig.3 Trend graphs of D_1 and D_2 with the ratio of h/d_s and the ratio of L_A/h

图3中2个曲面之间的距离直接反映了第2次简化过程引入的误差,第2次简化过程引入的误差趋势如图4所示。可以看出,在所考虑的参数范围内,第2次简化过程引入的误差不超过0.1%,尽管这一微小误差完全可以避免,但显然式(8)更加简洁,且直接给出放大倍数的设置方式。因此,本研究后续计算均按式(8)进行。

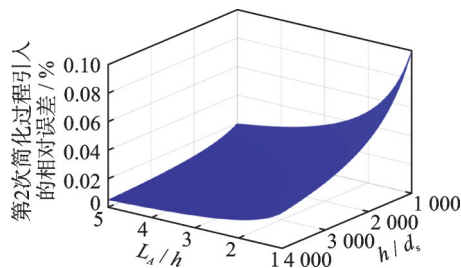


图4 第2次简化过程引入的误差趋势

Fig.4 Trend graphs of relative error due the second simplification

设定 $h=700$ mm, $L_A=3\,500$ mm, 即 $h/d_s=700$, $L_A/h=5$, 激光光斑的振幅会将结构上端的振幅放大25倍,将 d_{18} 缩小25倍后即可得到笔者所提方法的检测结果。图5为仿真数据检测结果。可以看出,所提方法的检测误差在0.8%以内,该误差水平随着 h/d_s 的增加以及 L_A/h 的减小而降低。可见,2次简化过程对检测结果的影响较小,所提方法理论上可以实现高精度的振动测量。

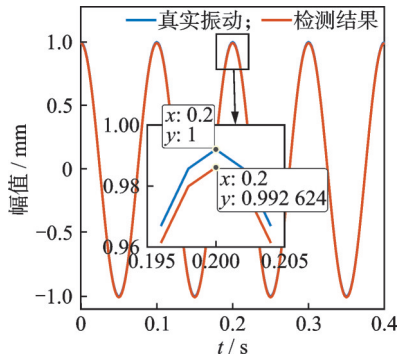


图 5 仿真数据检测结果

Fig.5 Detection results of the simulation data

1.3 利用已知四点校准图像空间分辨率

为了获得激光光斑的精确位移,需要将光斑位移由像素单位转变为物理长度单位。由于不能保证相机完全垂直于光斑平面,所得到的图像并不是正射影像,图像中不同位置的像素点所代表的实际长度并不相同。图像中每个像素点代表的实际长度都需要经过标定。为了获得以物理长度为单位的激光光斑位移,笔者通过“四点法”对图像进行校正,图 6 为图像校正原理示意图。

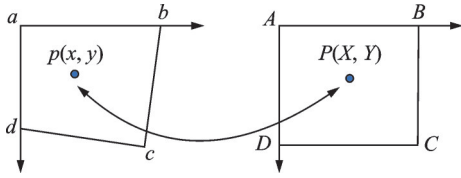


图 6 图像校正原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of image correction

校正前的图像如图 6 左图所示,校正后的图像如图 6 右图所示。同一目标点在 2 个不同图像中的坐标分别用 $p(x, y)$ 和 $P(X, Y)$ 表示。同一目标点在 2 个不同图像中的坐标满足以下关系

$$\begin{cases} x = c_1 X + c_2 Y + c_3 XY + c_4 \\ y = c_5 X + c_6 Y + c_7 XY + c_8 \end{cases} \quad (11)$$

以标准 A5 纸的 4 个顶点为参考点,手动确定校正前 4 个顶点 a, b, c 和 d 的图像坐标。由于 A5 纸的实际尺寸为 $148 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$,将 A, B, C, D 这 4 个点的坐标分别设置为 $(50, 50), (1\ 530, 50), (1\ 530, 2\ 150), (50, 2\ 150)$,这样修正后图像中的每个像素在水平和垂直方向上的分辨率均为 $0.1 \text{ mm}/\text{像素}$ 。修正图像的尺寸设置为 $1\ 580 \times 2\ 200$,这样修正后的图像可以比 A5 纸的范围更大,保证激光光斑振动过程不会超出图像边界,图像的修正过程通过双线性插值实现,图像校正结果如图 7 所示。

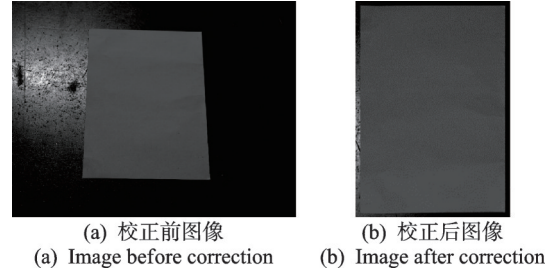


图 7 图像校正结果

Fig.7 Image correction result

1.4 光斑位移检测鲁棒性分析

激光光斑的灰度值分布呈现中间高、四周低,得益于激光光斑的高亮度特性,光斑在每一帧图像中的位置可以通过简单的图像分割方法获得。具体过程如下:通过图像二值化将光斑从背景图像中分离出来,考虑到直接二值化之后的光斑图像周围存在干扰点,其内部也可能存在孔洞。运用开运算去除干扰点,通过闭运算将内部孔洞填满,即可获得完整的光斑图像。光斑位置由光斑图像的中心确定。获取激光光斑位置的过程如图 8 所示。

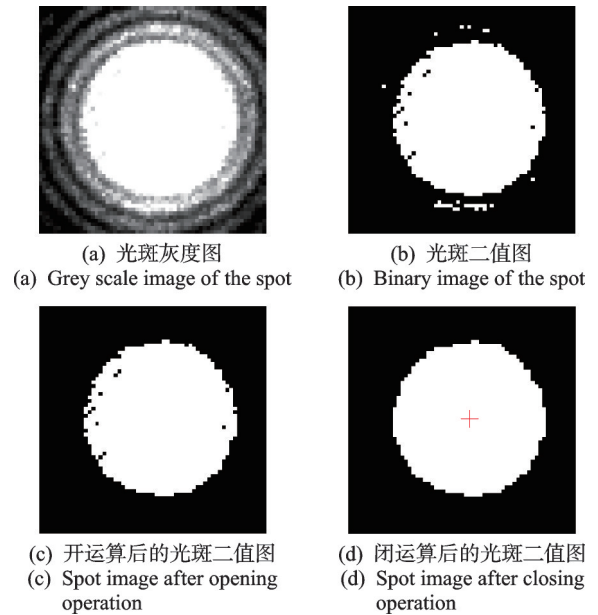


图 8 获取激光光斑位置的过程

Fig.8 The process of acquiring the laser spot position

为了验证所提方法不易受环境光影响,制作黑色背景下 4 个相同大小的圆形区域图案,圆形区域的大小与激光光斑接近,4 个区域填充的灰度分别为 100、150、200 和 250。将该图案打印出来,贴在竖直墙面,激光光斑打在圆形区域附近。用相机采集该图案的视频,拍摄过程中用灯光扫过图案区域,用

来模拟环境光的突变。运用所述方法获取激光光斑以及4个圆形区域的中心坐标。

图9为激光光斑位置稳定性对比。可以看出,环境光发生突变时,目标的亮度越高,其中心坐标越稳定。由于激光光斑高亮度特性,其中心坐标的稳定性远超4个圆形区域。特别需要说明的是,本研究方法为近距离拍摄,拍摄场景尺寸较小,很容易通过遮挡的方式避免环境光发生变化。因此,本研究方法相比传统视觉振动测量方法具有更高的鲁棒性。

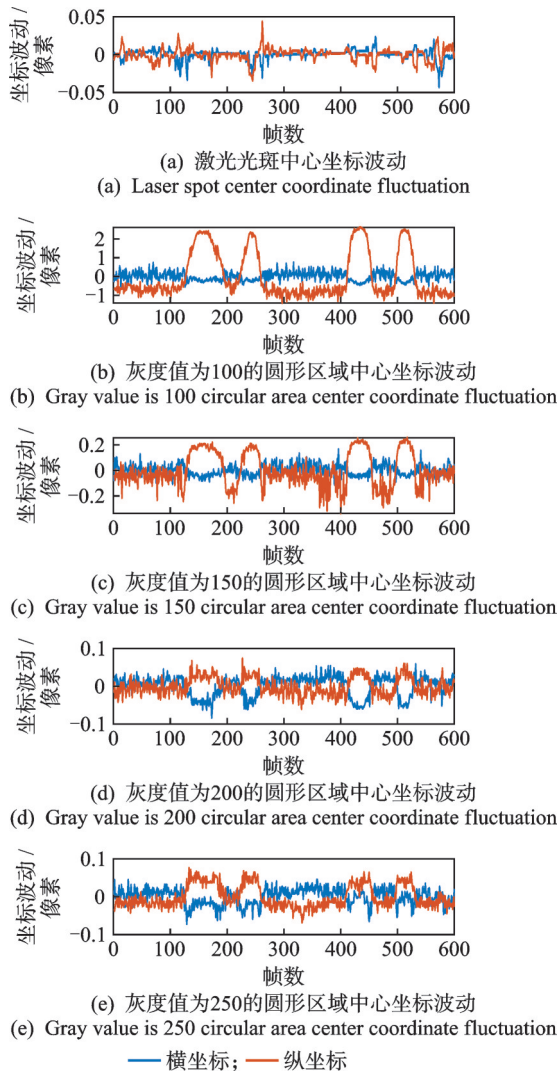


图9 激光光斑位置稳定性对比

Fig.9 Comparison of laser spot position stability

2 实验验证

为了验证所提方法的有效性,在小型风力发电机上进行了2个简单的实验。实验装置主要由3部分组成:鼓风机、小型风力发电机和高速相机。实验场景如图10所示。小型风力发电机由4个部分组

成:叶片、机舱、塔筒和底座。塔筒和底座通过4个螺栓连接。风力发电机塔筒的高度为1.89 m,激光装置安装在塔筒1.71 m的高度,激光光斑落在距离风力发电机塔筒约6.5 m的地面上。定义空间坐标系为 $x-y-z$,其中: $y-z$ 平面平行于激光线; z 轴沿垂直方向,与风力发电机塔筒平行。高速相机固定在距离地面约68 cm的高度拍摄激光光斑,相机的空间分辨率根据“四点法”进行校准。纸张的长边尽可能与 y 方向平行,以确保风力发电机塔筒上端沿 y 方向的位移与激光光斑沿纸张长边的位移相对应。

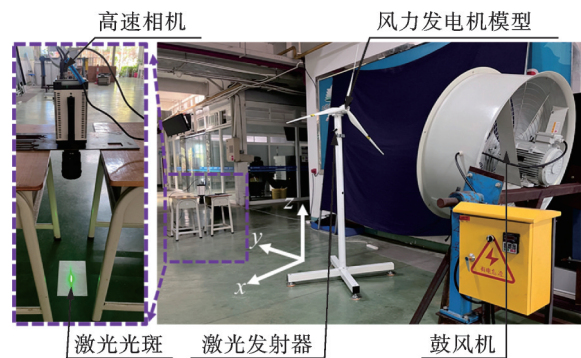


图10 实验场景

Fig.10 Experimental scene view

2.1 与激光位移传感器检测结果对比实验

第1个实验的目的是比较所提方法与激光位移传感器的检测精度。与激光位移传感器对比实验场景如图11所示,使用2个激光位移传感器测量风力发电机模型塔筒的振动。为避免塔筒振动时圆柱形塔身对振动位移的影响,制作了一个具有2个相互垂直平面的3D打印环,并将该环固定在塔筒上,确保其中1个平面与激光装置平行。2个相互垂直的平面分别代表塔筒在 x 和 y 方向上的振动。2个激光位移传感器分别对准2个相互垂直的平面来测量塔筒的振动,激光位移传感器的采样率为390.625 Hz。为了比较2种不同测量方法获得的时域信号,高速摄像机的帧频设置为391 Hz。

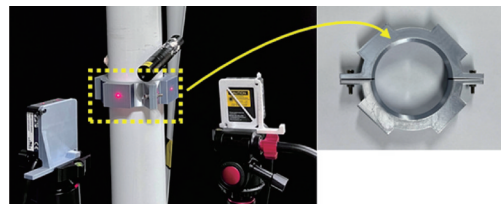


图11 与激光位移传感器对比实验场景

Fig.11 Experimental scenarios for comparison with laser displacement sensors

用力锤激励风力发电机塔筒,使其在 x 和 y 这两个方向上同时振动。使用高速相机捕捉激光光斑的运动,并通过图像重心法提取激光光斑中心的图像坐标,根据图像校正结果将激光光斑中心图像坐标转换为物理坐标。根据式(8)得到塔筒在 x 和 y 方向上的振动量,经手动对齐后与激光位移传感器的检测结果进行比较,所提方法检测结果与激光位移传感器检测结果对比如图12所示。图12中,激光位移传感器的时间单位为采样点序号,本研究所提方法的时间单位为采样点序号。考虑到2种不同检测方法对应的采样率存在细微差别,此处只选取了1 000个连续采样点进行对比。

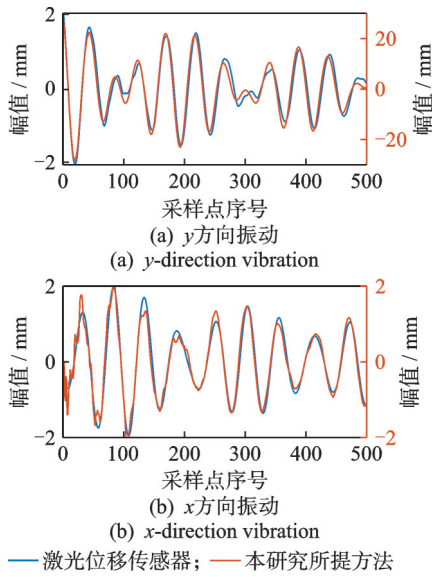


图12 所提方法检测结果与激光位移传感器检测结果对比
Fig.12 Comparison of the proposed method with the detection results of laser displacement sensors

由于激光装置的安装高度为1.71 m,激光光斑的初始位置距离塔筒约6.5 m,激光光斑在 y 方向的位移对激光装置处 y 方向上的位移放大了约14.5倍。

从图12可以看出,所提方法与激光位移传感器在 x 方向和 y 方向上的检测结果均具有较好的吻合度。同时,所提方法实现了对结构 y 方向位移的放大检测,放大倍数为14.2,与预期值14.5非常接近。

2.2 与加速度传感器检测结果对比实验

第2个实验的目的是比较所提方法与加速度传感器的检测精度。加速度传感器安装位移如图13所示,在风力发电机模型的塔筒上安装了一个三轴加速度计,高度与激光装置相同,加速度计的 z 通道测量风力发电机塔筒在 y 方向的振动, y 通道测量风

力发电机塔筒在 x 方向的振动。加速度计的灵敏度为 $5 \text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$,采样频率为 195.3125 Hz ,高速摄像机的帧速率设为 195 fps 。

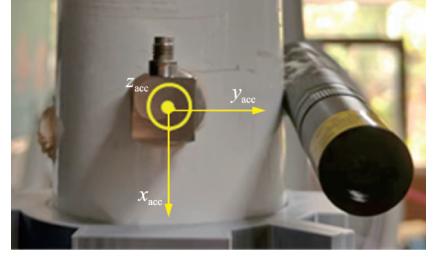


图13 加速度传感器安装位移
Fig.13 Mounting position of the acceleration sensor

使用恒速鼓风机驱动风力发电机模型,使叶片旋转。在此过程中,风力发电机塔筒出现轻微振动。通过扭矩扳手对塔筒下方螺栓的松紧是进行调节,扭矩分为2个等级:5 N·m和15 N·m。塔筒的振动由加速度计记录,激光光斑的振动由高速相机记录,采样时长均为60 s。所提方法检测结果与加速度传感器检测结果对比如图14所示,显示了2种不同测量方法获得塔筒在 x 和 y 方向上的振动频谱。需要说明的是,由于所提方法获得的是塔筒振动位

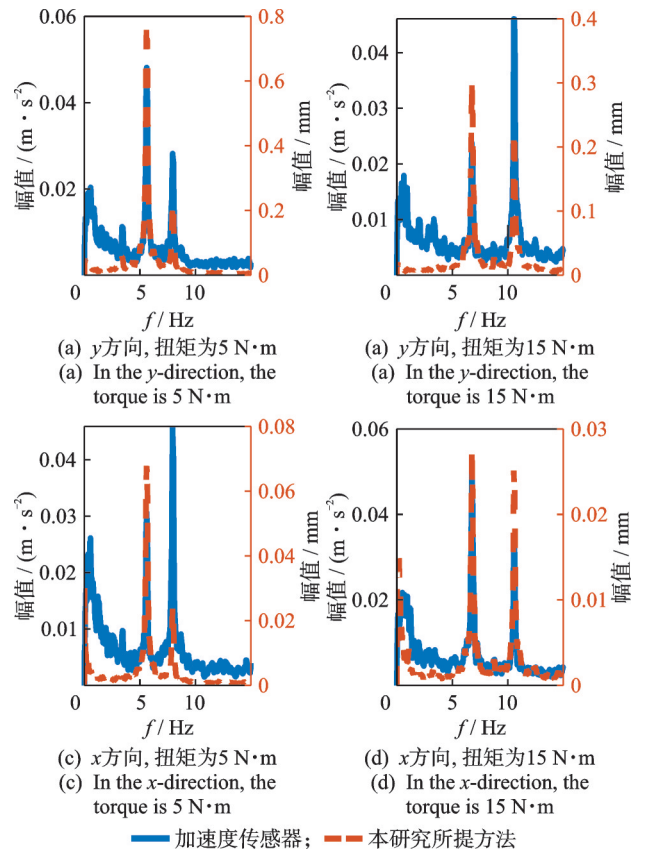


图14 所提方法检测结果与加速度传感器检测结果对比
Fig.14 Comparison of the proposed method with the detection results of accelerometer

移信息,而加速度传感器获得的是塔筒振动加速度信息,且第1个实验已通过激光位移传感器对比,验证了所提方法在位移检测方面的精度,此处仅对比2种检测方法获得的频率特征。

由图14可以看出,2种检测方法获得的塔筒固有频率的前2阶高度一致,均能反映扭矩增大、固有频率增高的趋势。根据加速度传感器获得的频谱可知, x 方向和 y 方向具有相近的振动幅度,而所提方法获得的 y 方向振动幅值显著大于 x 方向的振动幅值,这也再次验证了所提方法在 y 方向上具有放大效应。

综上可知,所提出方法的优势为:①激光光斑的位移可以显著放大结构振动的位移,这为测量结构微小振动提供了条件;②将远距离视觉测量转化为近距离视觉测量,更好地发挥了相机的空间分辨率,在不增加镜头成本的前提下提高了结构振动视觉检测的精度;③近距离视觉检测避免了传统户外视觉检测方法易受环境光影响的弊端,提升了视觉测振技术的鲁棒性及适用范围。

3 结束语

针对传统视觉测量技术在结构振动测量中的局限性,提出了一种基于激光辅助的结构振动视觉测量方法。通过激光装置将远距离结构的振动转化为近距离激光光斑的振动,在实现振动放大的同时,充分发挥相机近距离成像空间分辨率高、不易受环境光影响的优势。将所提结构振动视觉测量方法的检测结果与激光位移传感器及加速度传感器的测量结果进行比较,结果表明所提方法能够实现对结构振动的精确检测。

参 考 文 献

[1] 王腾义,李丹,张建. 桥梁结构轻量化健康监测思路与技术研发[J]. 土木工程学报, 2025, 58(6): 51-68.
WANG Tengyi, LI Dan, ZHANG Jian. Research of lightweight structural health monitoring strategies and technologies for bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(6): 51-68. (in Chinese)

[2] 孙仕林,王天杨,褚福磊. 基于振动及声学测量的风电叶片结构健康监测研究综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(7): 79-92.
SUN Shilin, WANG Tianyang, CHU Fulei. Review of structural health monitoring of wind turbine blades

based on vibration and acoustic measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(7): 79-92. (in Chinese)

[3] 买买提明·艾尼,刘慧洁,古丽巴哈尔·托乎提,等. 双目立体摄影测量的风力机叶片振动频率分析[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(6): 1112-1119.
MAMTIMIN Geni, LIU Huijie, GULBAHAR Tohti, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on gradient adaptive corrected logistic regression model[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(6): 1112-1119. (in Chinese)

[4] OLÁH L, TANAKA H K M, MORI T, et al. Structural health monitoring of sabo check dams with cosmic-ray myography[J]. Iscience, 2023, 26(10): 108019.

[5] 王毅飞,罗晓群,李建全,等. 基于结构健康监测的大直径球体高层支撑钢结构施工全过程性能评估[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(3): 80-88.
WANG Yifei, LUO Xiaoqun, LI Jianquan, et al. Whole process construction performance evaluation for large-diameter spherical high-rise supported steel structure based on structural health monitoring[J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(3): 80-88. (in Chinese)

[6] 张楷,孙超,刘家豪,等. 基于计算机视觉的输电塔位移监测ROI关键点法[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(5): 849-856.
ZHANG Kai, SUN Chao, LIU Jiahao, et al. ROI method for displacement identification of power transmission tower based on computer vision[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(5): 849-856. (in Chinese)

[7] 徐超,张一凡,韩晓明,等. 基于机器视觉的大柔性结构振动位移测量[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 781-786.
XU Chao, ZHANG Yifan, Han Xiaoming, et al. Machine vision based vibration displacement measurement of large flexible structures[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 781-786. (in Chinese)

[8] 刘青旭,陈海峰,ANTON B,等. 航天复合材料结构健康监测技术应用进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4563-4588.
LIU Qingxu, CHEN Haifeng, ANTON B, et al. Progress in application on health monitoring technology for aerospace composite structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 4563-4588. (in Chinese)

- [9] CHEN J G, DAVIS A, WADHWA N, et al. Video camera-based vibration measurement for civil infrastructure applications[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2016, 23(3): B4016013.
- [10] TANG Y, HUANG B, WANG S R, et al. Computer vision-based real-time continuous monitoring of the pose for large-span bridge cable lifting structures [J]. *Automation in Construction*, 2024, 162: 105383.
- [11] 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.
- [12] BIAN Y F, ZHAO H, LIU Z B, et al. Stereo vision-based health monitoring method for wind turbine towers [J]. *Measurement*, 2024, 226: 114148.
- [13] LIN G F, WANG L, LU Z R. Output-only modal analysis of the Humen bridge from video measurement [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2184: 012043.
- [14] DONG C Z, YE X W, JIN T. Identification of structural dynamic characteristics based on machine vision technology[J]. *Measurement*, 2018, 126: 405-416.
- [15] HAVARAN A, MAHMOUDI M. Markers tracking and extracting structural vibration utilizing randomized Hough transform[J]. *Automation in Construction*, 2020, 116: 103235.
- [16] LÜ J H, LÜ M B, XIAO J Y, et al. A point tracking method of TDDM for vibration measurement and large-scale rotational motion tracking[J]. *Measurement*, 2022, 193: 110827.
- [17] DENG R F, LIN Y B, HUANG B S, et al. Research on visual detection method of cantilever beam cracks based on vibration modal shapes [C] //International Congress and Workshop on Industrial AI 2021. Cham: Springer International Publishing, 2022: 434-444.
- [18] LI M S, FENG G J, DENG R F, et al. Structural vibration mode identification from high-speed camera footages using an adaptive spatial filtering approach[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166: 108422.
- [19] YU Z Y, SHEN G T, ZHAO Z Y, et al. Transverse vibration measurement of beam structure using based on subpixel-based edge detection and point tracking[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(3): 2671-2681.
- [20] YANG Y Z, JIANG Q. A novel phase-based video motion magnification method for non-contact measurement of micro-amplitude vibration[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 215: 111429.
- [21] CIVERA M, FRAGONARA L Z, SURACE C. An experimental study of the feasibility of phase-based video magnification for damage detection and localisation in operational deflection shapes[J]. *Strain*, 2020, 56(1): e12380.
- [22] TIAN Y D, ZHANG J, YU S S. Vision-based structural scaling factor and flexibility identification through mobile impact testing[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 122: 387-402.
- [23] TIAN Y D, ZHANG C, JIANG S, et al. Noncontact cable force estimation with unmanned aerial vehicle and computer vision[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2021, 36(1): 73-88.
- [24] GUO S L, ZHANG X, ZHANG J, et al. Mobile impact testing of a simply-supported steel stringer bridge with reference-free measurement[J]. *Engineering Structures*, 2018, 159: 66-74.
- [25] RI S E, YE J X, TOYAMA N, et al. Drone-based displacement measurement of infrastructures utilizing phase information[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 395.
- [26] SHAN J Z, HUANG P C, LOONG C N, et al. Rapid full-field deformation measurements of tall buildings using UAV videos and deep learning[J]. *Engineering Structures*, 2024, 305: 117741.
- [27] LAVEZZI G, CIARCIÀ M, WON K, et al. A DIC-UAV based displacement measurement technique for bridge field testing[J]. *Engineering Structures*, 2024, 308: 117951.



第一作者简介:邓荣峰,男,1982年9月生,博士、副教授。主要研究方向为基于视觉的结构健康监测技术。曾发表《Object-based thermal image segmentation for fault diagnosis of reciprocating compressors》(《Sensors》2020, Vol. 20, No.12)等论文。

E-mail: rongfeng.deng2@hud.ac.uk

通信作者简介:谷丰收,男,1957年7月生,博士、教授。主要研究方向为状态监测与故障诊断。

E-mail: f.gu@hud.ac.uk