

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.06.006

光流点匹配跟踪的薄壁件振动模态测试方法^{*}

伍济钢 王 刚 蒋 勉 张双健 王文楹

(湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室 湘潭 411201)

摘 要:针对传统模态测试方法存在获取信息有限和附加质量、已有非接触模态测试方法需进行复杂图像处理等问题,提出了光流点匹配跟踪的薄壁件振动模态测试方法,避免了需逐帧进行特征分割、提取等复杂的图像处理。首先,建立了面内振动视觉测量的成像模型,通过相机标定获取工业相机的内、外参数并进行了误差分析。研究了基于光流视觉测振的原理与方法,该方法通过单目相机采集带特征点的结构振动序列图像,运用金字塔的 Lucas-Kanada 算法进行光流点匹配跟踪,进而获得亚像素级特征点的振动信息,在此基础上进行模态参数辨识获得模态参数。基于提出的方法搭建了薄壁件振动模态测试系统,对薄壁梁进行了振动模态测试实验,并与激振器扫频测试结果和有限元仿真结果进行了对比分析。实验结果表明,固有频率误差在5%以内,模态振型一致,从而验证了提出方法的正确性,为薄壁件的振动模态测试提供了新方法。

关键词:薄壁件;振动模态测试;单目视觉;Lucas-Kanada 光流;匹配跟踪

中图分类号: TN911.73;TH113.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Vibration modal measurement method for thin-walled parts using optical flow point matching and tracking

Wu Jigang Wang Gang Jiang Mian Zhang Shuangjian Wang Wenyun

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Aiming at overcoming the problems that the traditional modal testing methods have limited information and the transducer additional mass effects modal parameters, and existing non-contact modal testing method requires complex image processing, a vibration modal measurement method for thin-walled parts using optical flow point matching and tracking is proposed. It avoids complicated image processing such as feature segmentation and extraction and so on in each frame. Firstly, the model of vibration detection based on the in-plane vision is developed. The intrinsic and extrinsic parameters of industrial camera are calibrated through the camera calibration board, and the errors are analyzed. The principle and the method of monocular vision vibration testing based on optical flow method are investigated. The vibrating sequence images of structure which has pasted feature points are captured with a monocular industrial camera. The pyramid Lucas-Kanada algorithm is used for optical flow point matching and tracking, and to get the vibration information of each sub-pixel feature point. And then the modal parameters are obtained by modal parameter identification. Based on the proposed method, a thin-walled vibration modal testing system is built and the vibration modal testing experiments with the thin-walled beam is investigated, the testing results are compared and analyzed between that of a shaker testing and FEM simulation. The results show that the natural frequency errors are less than 5% and the corresponding vibration modes are the same, which verifies the correctness of the proposed method, so the proposed method provides a new way for the vibration modal testing of thin-walled parts.

Keywords: thin-walled parts; vibration modal testing; monocular vision; Lucas-Kanada optical flow method; matching and tracking

1 引言

薄壁件具有重量轻、可靠性好和结构效率高等优点,已日益广泛地应用于工业生产的各个领域,但薄壁件的壁厚相对整体尺寸小,面积大且刚度低,在机械系统运行过程中极易产生振动,形成振动噪声甚至引起机械故障,因此必须对薄壁件进行振动模态测试^[1-2]。传统接触式振动测量方法一般使用一个或多个传感器实现振动参数的识别,其检测系统相对复杂,且因粘贴传感器引入附加质量而改变原有动力学特性^[3],同时接触式传感器获取的信息量有限,不容易实现全场测量。针对传统接触式测量方法的不足,非接触式测量法被提出。刘晓军等人^[4]利用激光干涉技术对结构表面进行形貌测量,精度较高。覃斌^[5]利用单点激光测振仪,通过设计光学装置和运动装置,实现了单点激光连续扫描测振,获取了薄壁梁和薄壁圆筒的多阶模态振型。此类方法需要复杂的光路系统与运动控制装置,且前期调试对准复杂,增加了调试的难度^[6];此外,对被测物体表面质量要求较高。

近些年来,由于视觉测量具有非接触、全场等优点,已在振动测量领域得到了广泛研究和应用。基于机器视觉的模态测试方法,国内外已取得初步进展,Giergiel等人^[7]利用单相机对物体进行振动测量,可用于实现系统的振动控制和在线诊断;Romaszko等人^[8]提出一种利用单目相机分析均匀悬臂梁的受迫振动;Chen等人^[9]提出一种运动发大的技术对悬臂梁等简单结构进行模态识别;许畅等人^[10]提出一种利用数字摄像机测量技术在轨大型柔性结构进行模态参数辨识的方法。这些方法基本上是通过图像处理特征点的方式获取振动参数,即通过逐帧处理采集到的图像,获取特征点质心位置,从而绘制特征点位移曲线,此类方法易受到图像处理效果和外界环境干扰,如非特征点噪声对结果会产生很大影响。同时针对具体振动模态参数的辨识以上研究未完整的搭建一套模态测试与验证系统。

针对上述问题,本文提出了光流点匹配跟踪的薄壁件振动模态测试方法,该方法通过单目相机采集带特征点的结构振动序列图像,并将特征点作为目标进行匹配跟踪,以此获得振动信号,然后进行模态识别获取模态参数。最后搭建了相应的测试系统,对典型薄壁件—薄壁梁进行了面内振动模态测试实验,并与激振器扫频测试结果及有限元仿真结果进行了对比分析。研究结果表明,本文方法可准确可靠测得悬臂梁的振动模态参数,避免了逐帧进行特征分割、提取等复杂的图像处理,具有高系统辨识度、高测量效率、良好的抗干扰性等优点,为薄壁件的振动模态测试提供了一种新的方法。

2 薄壁件振动模态测试方法

2.1 基于单目视觉的振动模态测试思路

本文提出的基于单目视觉的薄壁件振动模态测试总体思路是利用单目相机采集薄壁件上的特征点振动序列图像,通过光流法匹配跟踪特征点获取振动信息,并以此来识别模态参数。

相对其他振动模态测试方法,本文提出的方法选用适当的人工点状标志,可以确保测量精度和可靠性,利用金字塔的LK(Lucas-Kanada)算法^[11]连续跟踪目标特征点,从而得到每个特征点位移随每帧图像的曲线,即该点的振动时程位移曲线。将时频振动信号通过傅里叶分析即可得到结构振动的频率信息。最后将各特征点进行曲线拟合,得到每阶频率下相应的振型。本文提出的基于单目视觉的薄壁件振动模态测试方法流程如图1所示。

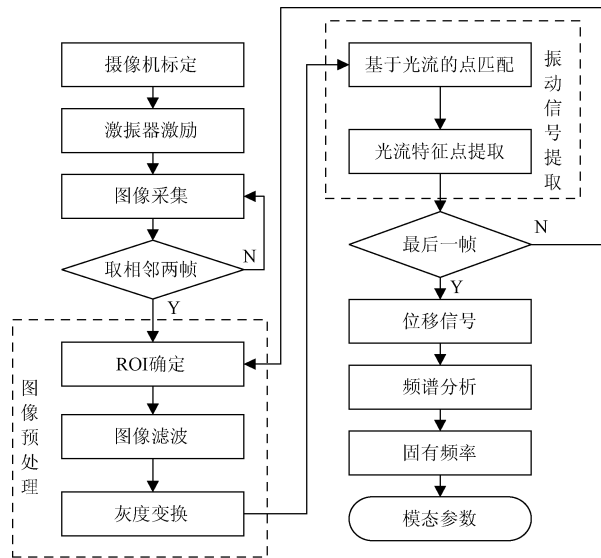


图1 基于单目视觉的薄壁件振动模态测试流程

Fig.1 Flowchart of modal testing for thin-walled parts based on monocular vision

2.2 单目面内振动成像原理

根据针孔成像模型,在被测物体做面内振动时,即相机及镜头平面平行于被测物体方向振动,因物体的面内振动与其在成像平面上的位置存在映射关系,通过分析成像变化即可获得物体的面内振动特性^[12]。

图2中, a 为像距, b 为物距, O 为相机光心,假定物体相对平行于相机平面,同时只在面内运动。那么在 t_0 时刻, A 为被测物体振动前的原位置,其高度为 h , B 表示振动前被测物体在相机成像平面的位置,其高度为 h' 。经过时间 Δt 后,物体在面内向上移动 w ,相应物体在成像平面高度为 H 。根据相似关系得到物体在成像平面中

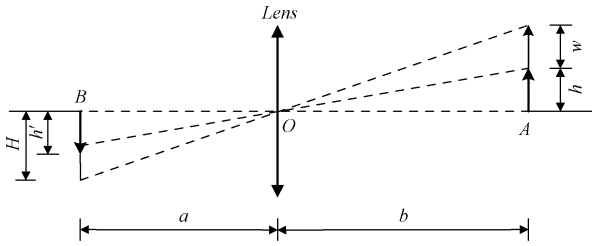


图 2 面内振动成像等效针孔模型

Fig. 2 Equivalent pin-hole model for in-plane vibration camera imaging

的位移为:

$$\Delta h = H - h' = \frac{a \cdot (h + w)}{b} - \frac{a \cdot h}{b} = \frac{a \cdot w}{b}$$

即:

$$\Delta h(t) = k \cdot w(t) \quad (1)$$

式中:系数 $k = a/b$ 。由此可知,面内运动的位移量与相机成像平面内的位移量成线性关系,故可通过物体振动图像中像素坐标的变化来表示其实际空间下的位移变化。

2.3 基于光流法的振动频率和模态振型测试

光流是指图像中灰度模式的运动速度,它是空间中运动的结构在相机成像平面上像素点运动的瞬间速度。光流场是物体在三维真实世界中的运动场在二维图像平面上的投影^[13]。即像素光流的集合。光流计算就是研究图像灰度在时间上的变化与影像中物体结构及其运动的关系^[14]。

光流计算一般基于如下假定^[15]:亮度恒定;时间连续或者运动是“小运动”;空间一致性。基于光流的亮度恒定及“小运动”假定,导出灰度图像光流场计算的基本方程^[16]:

$$I_x \mathbf{u} + I_y \mathbf{v} + I_t = 0 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u} = dx/dt, \mathbf{v} = dy/dt$ 是时刻 t 时图像中某一像素点沿图像平面 X, Y 轴方向的速度矢量,反映了物体的运动状况。 I_x, I_y, I_t 为图像灰度在空间和时间上的梯度。式中含两个未知数,但只有一个方程,其解有无穷多,显然这是一个不适定问题。

求解光流速度 $(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ 的方式有很多,本文采用 LK 算法^[11]。依据空间一致性假设一个局部区域(邻域)的像素运动一致,则建立邻域像素的系统方程来求解中心像素的运动,有:

$$\begin{bmatrix} I_x(x_1) & I_y(x_1) \\ I_x(x_2) & I_y(x_2) \\ \vdots & \vdots \\ I_x(x_n) & I_y(x_n) \end{bmatrix}_{n \times 2} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} I_t(x_1) \\ I_t(x_2) \\ \vdots \\ I_t(x_n) \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (3)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为邻域 Ω 内的像素,一般取当前像素

的 $3 \times 3, 5 \times 5$ 邻域的像素。也可对邻域内不同的像素点赋予不同的权值,定义光流估计误差为:

$$\varepsilon = \sum_{\Omega} W^2(i, j) (I_x \mathbf{u} + I_y \mathbf{v} + I_t)^2 \quad (4)$$

式中: $W^2(i, j)$ 表示像素点 (i, j) 在计算光流时的权重函数,它决定了空间邻域 Ω 内各像素点图像数据在计算光流时对约束产生的影响的大小,一般情况下,采用的 $W^2(x)$ 使空间邻域 Ω 中心部分产生的影响比邻域外围部分更大,通常使用 Gauss 核函数。

令式(4)等于 0,并分别对 $\mathbf{u}, \mathbf{v}$ 求导,可得到一个含多个约束条件的系统方程:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{A} \mathbf{w} = \mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{b} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{w} = (\mathbf{u}, \mathbf{v})^T, \mathbf{W} = \text{diag}[W(i_1, j_1), \dots, W(i_n, j_n)]^T, \nabla I(x) = (I_x, I_y)^T, \mathbf{A} = [\nabla I(x_1), \dots, \nabla I(x_n)]^T, \mathbf{b} = -[I_t(x_1), \dots, I_t(x_n)]^T$ 。

利用最小二乘法求解方程组,解得 $\mathbf{w} = [\mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{b}$,即光流法解可写成:

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i W^2(x_i) I_x^2(x_i) & \sum_i W^2(x_i) I_x(x_i) I_y(x_i) \\ \sum_i W^2(x_i) I_x(x_i) I_y(x_i) & \sum_i W^2(x_i) I_y^2(x_i) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} - \sum_i W^2(x_i) I_x(x_i) I_t(x_i) \\ - \sum_i W^2(x_i) I_y(x_i) I_t(x_i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

当 $[\mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{A}]$ 满秩,也就是 $[\mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{A}]$ 有两个较大特征向量时,那么 $[\mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{A}]$ 可逆,而跟踪窗口(邻域 Ω)的中心在图像的特征点区域时恰好满足条件,因为在特征点处有两个大的特征向量。从上述可以看出光流计算其实是对两幅图像中所选点进行匹配的过程。

本文提出的方法选用适当的人工点状标志,确保光流进行点匹配的稳定性 and 可靠性,由于空间特征点在不同时刻的图像坐标不同,通过图像金字塔的 LK 光流算法跟踪特征点,从而得到亚像素级特征点位移随每帧图片变化的曲线,即该点的振动时程位移曲线。将时频振动信号通过快速傅里叶变换(FFT)分析即可得到结构振动的频率信息。依据成像模型及其标定参数,可转换为实际坐标,既可用于振动幅值的测量。

根据模态振型激励的难易程度和工业相机最大帧率的限制,本文选择了相对容易激励和采集的水平波动型的模态振型作为研究对象。

由于模态振型是结构上各个特征点在振动下的一种相对位移变化,因此本文对模态振型的取值进行标准化。通过模态振型分析理论^[17]可知,第阶模态振型向量归一化为:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{1r} \\ \varphi_{2r} \\ \vdots \\ \varphi_{nr} \end{bmatrix} = \frac{1}{R_{mj}(r)} \begin{bmatrix} R_{1j}(r) \\ R_{2j}(r) \\ \vdots \\ R_{nj}(r) \end{bmatrix}$$

(7)

式中: φ_r 为第 r 阶的模态向量, $R_{ij}(r)$ 为图像中对应像素点第 r 阶的 y 坐标, $R_{mj}(r)$ 为各点 y 坐标向量中的最大值,以该值作为模态振型向量中最大的元素并赋值为1,实现归一化。将上述所提取的特征点的振型向量根据式(7)归一化,然后进行曲线拟合即可得到平滑的模态振型。

3 薄壁梁振动模态实测

3.1 基于单目视觉的测试平台的搭建

利用单个工业相机、模态激振仪、普通 LED 光源等搭建了振动模态测试平台,其中激振器用细绳悬挂在固定支架上,工业相机用三脚架水平固定在装置的正前方,LED 光源位于工业相机的左前方。本文实验选用 IMI 公司 IMB-3213UP 相机,分辨率为 640×480 、最高帧率为 600 pixel/s (640×480 , Mono 8)。测试平台实物如图 3 所示。

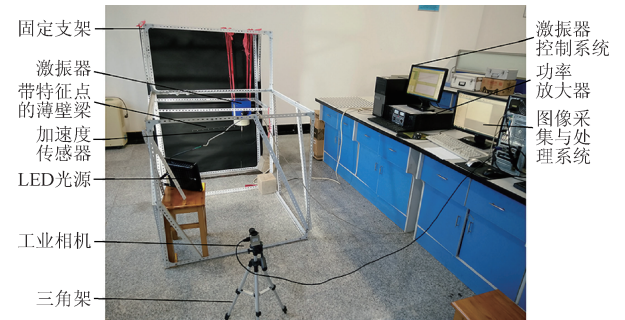


图 3 薄壁梁的振动模态测试平台

Fig. 3 The vibration modal test platform of thin-walled beam

3.2 相机的标定及其误差分析

根据工业相机成像数学模型的线性变换,需确定工业相机的内外参数,现获取 25 幅不同位姿的平面标定板图像,如图 4 所示,对每幅图像进行角点提取,采用平面

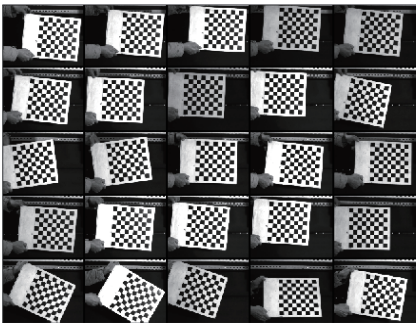


图 4 不同位姿标定板图像

Fig. 4 The image of calibration board in different position

标定算法^[18]获得相机的内参数如表 1 所示,其中 a_x 、 a_y 为图像坐标系上 u 、 v 轴的尺度因子, γ 为畸变因子, (u_o, v_o) 为图像的主点坐标。表 2 列出了前 5 幅标定板的外参数 (R, T) ,即旋转矩阵和平移矩阵,通过上述工业相机的内外参数,即可确定成像模型。

表 1 相机内参数标定

内参数	a_x	a_y	γ	u_o	v_o
参数值	2 506.30	2 503.60	0.00	230.98	324.24

表 2 标定板前 5 幅外参数

外参数	旋转矩阵 R	平移矩阵 T
第 1 幅	$\begin{bmatrix} -0.088\ 4 & 0.996\ 1 & -0.001\ 0 \\ 0.996\ 0 & 0.088\ 4 & 0.009\ 2 \\ 0.009\ 2 & -0.000\ 2 & -1.000\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 90.782\ 2 \\ -167.185\ 4 \\ 2\ 235.8 \end{bmatrix}$
第 2 幅	$\begin{bmatrix} -0.077\ 0 & 0.997\ 0 & -0.005\ 3 \\ 0.996\ 6 & 0.077\ 1 & 0.029\ 3 \\ 0.029\ 7 & -0.003\ 0 & -0.999\ 6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 92.846\ 0 \\ -196.0816 \\ 2\ 233.7 \end{bmatrix}$
第 3 幅	$\begin{bmatrix} -0.048\ 1 & 0.998\ 8 & -0.006\ 2 \\ 0.997\ 6 & 0.048\ 4 & 0.049\ 6 \\ 0.049\ 8 & -0.003\ 8 & -0.998\ 8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 86.638\ 0 \\ -223.722\ 5 \\ 2\ 228.0 \end{bmatrix}$
第 4 幅	$\begin{bmatrix} -0.057\ 9 & 0.998\ 2 & -0.015\ 5 \\ 0.997\ 8 & 0.058\ 4 & 0.030\ 0 \\ 0.030\ 9 & -0.013\ 8 & -0.999\ 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 25.725\ 5 \\ -231.780\ 9 \\ 2\ 218.0 \end{bmatrix}$
第 5 幅	$\begin{bmatrix} -0.091\ 8 & 0.995\ 8 & -0.001\ 2 \\ 0.995\ 7 & 0.091\ 8 & 0.008\ 4 \\ 0.008\ 8 & -0.000\ 4 & -1.000\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 18.676\ 8 \\ -204.403\ 8 \\ 2\ 219.2 \end{bmatrix}$

初始静止状态时,拍摄 10 幅含 12 个圆形特征点的待测结构图像,如图 5 所示,通过图像质心算法获取每幅图片的 12 个圆形点特征的质心像素坐标,并取以上工业相机内参数和外参数 R_1 、 T_1 为模型参数,获得每个点特征质心的实际坐标,如表 3 所示。

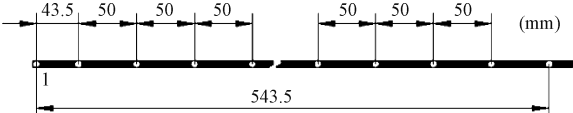


图 5 实际特征点距离

Fig. 5 Actual feature points distance

根据上述标定结果,透镜成像的过程中明显存在畸变,其中 u_o 、 v_o 得到标定的主点坐标为 $(230.98, 324.24)$,理论上主点坐标为 $(240, 320)$,主点坐标误差在 10 像素内,基本满足标定要求^[19]。根据上述标定结果 a_x 、 a_y 以及工业相机厂商提供的 $dx = dy = 4.8 \text{ }\mu\text{m}$,可计算标定如下:

表 3 静止状态下 10 幅特征点的实际坐标与距离
Table 3 Actual coordinates and distance of ten pictures feature points in stationary state

编号	实际坐标	理论距离/mm	实际距离/mm	误差/%
1	(167.93, -266.24)	$D_{1-2}=43.5$	43.83	0.7
2	(164.00, -222.59)	$D_{2-3}=50$	50.21	0.4
3	(158.60, -172.67)	$D_{3-4}=50$	50.19	0.3
4	(152.76, -122.82)	$D_{4-5}=50$	49.62	0.7
5	(147.82, -73.45)	$D_{5-6}=50$	50.39	0.8
6	(142.42, -23.35)	$D_{6-7}=50$	49.96	0.1
7	(137.21, 26.34)	$D_{7-8}=50$	49.66	0.7
8	(132.21, 75.75)	$D_{8-9}=50$	49.79	0.4
9	(127.06, 125.27)	$D_{9-10}=50$	49.75	0.5
10	(122.40, 174.80)	$D_{10-11}=50$	49.26	1.5
11	(117.99, 223.86)	$D_{11-12}=50$	49.16	1.7
12	(113.80, 272.87)			

$$f = \frac{a_x \cdot dx + a_y \cdot dy}{2} =$$
$$\frac{2\,506.30 \times 0.004\,8 + 2\,503.60 \times 0.004\,8}{2} = 12.02\,\text{nm}$$

(8)

镜头的标称焦距为 12 mm。

工业相机焦距的标定结果与标称值相差不大,特征点间的实际距离与理论距离有些偏差,其原因主要包括以下两方面:1)透镜制造和装配的误差,使得这些畸变无法避免;2)提取特征点的精度不够高,对结果造成一定的影响。总之,为了保证后续实验的精度,需要通过畸变系数对内外参数进行校正,此过程是一个非线性的优化过程,可以使 Levenberg-Marquardt 算法来实现^[20]。表 4 所示为计算所得的光学畸变系数。

表 4 光学畸变系数
Table 4 Optical distortion coefficients

光学畸变类型	径向畸变	偏心畸变
系数值	$k_1 = -0.055\,4$	$p_1 = 0.006\,0$
	$k_2 = 0.150\,5$	$p_2 = 0.004\,5$

3.3 单点自由振动测量对比实验

以薄壁梁为对象,其一端通过 4 个通孔与基座用螺栓固定,另一端自由。实验中分别采用本文提出的方法测量振动位移信号和采用丹麦 B&K 公司的多通道振动噪声测试分析系统来测量振动加速度信号,实验装置如图 6 所示。让薄壁梁处于静止状态,实验时在自由端给一瞬时脉冲力,使其产生自由振动,同时相机和加速度传感器开始记录。

对于获得的序列图像进行图像特征点跟踪,得到的振动位移数据如图 7 (a) 所示,B&K 加速度传感器直接采集的加速度信号如图 7 (b) 所示。将提取的加速度信

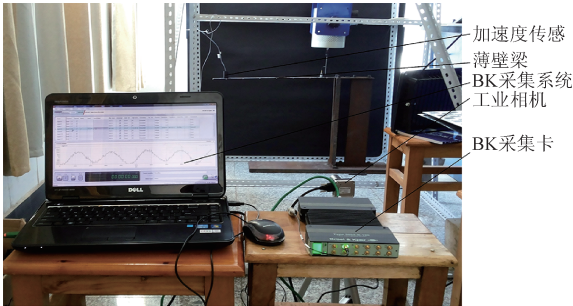
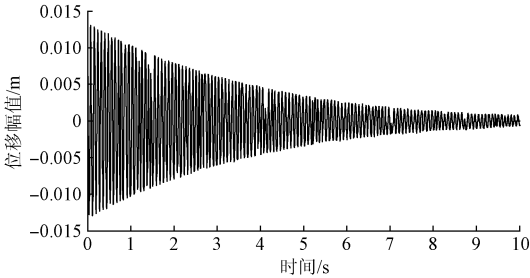
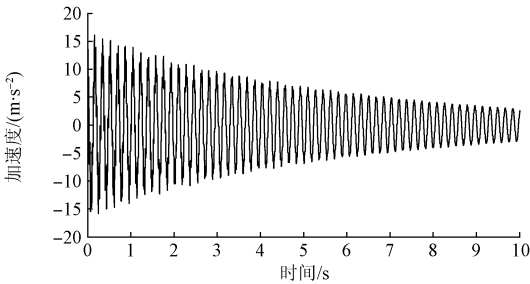


图 6 B&K 采集系统和视觉测量实验装置
Fig. 6 B&K acquisition system and experimental visual measurement device

号转化为位移信号并与本文提出方法测量得到的位移信号进行比较,如图 8 所示。



(a) 本文方法测量的位移信号
(a) The displacement signal of monocular vision measurement



(b) B&K测量的加速度信号
(b) Acceleration signal measured by B&K system

图 7 位移信号和加速度信号

Fig. 7 The displacement signal and the acceleration signal

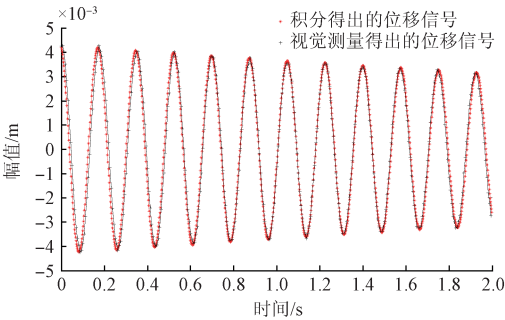


图 8 本文方法测量与加速度传感器测量结果对比
Fig. 8 Comparison of the measurement results of the monocular vision and the acceleration sensor

图8中‘*’是指由振动传感器包络线积分算法得到的位移信号曲线,‘+’是指由本文提出方法测量方法获得的位移信号曲线,将两种测量方法得到的信号分别进行傅里叶变换,得到响应频谱如图9所示。

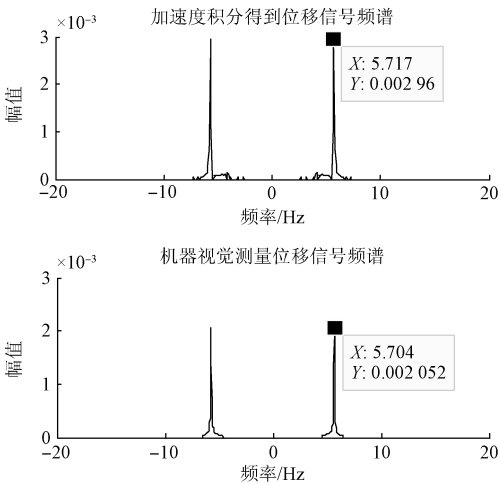


图9 频谱变换结果对比

Fig. 9 Comparison of spectrum transform result

从图8可知,两种测量方法所得曲线趋势一致,且两者的幅值也相差不大,只有微小的偏移,造成这种现象的原因是两种测量方法没能同时触发采集导致;从图9可知,两者的主频相差不大,表明含有主要成分一致,通过上述单点提取对比实验,可证明本文提出方法的可行性与准确性。

3.4 振动模态测试实验及分析

在薄壁梁上粘贴 12 个特征点,如图 10 所示,将薄壁梁固定在激振器的激振杆上,激振杆带动薄壁梁振动,在激振器控制仪系统中设置好扫频参数,打开图像采集系统,设置好图像采集软件参数,待实验开始时,开始采集图像。

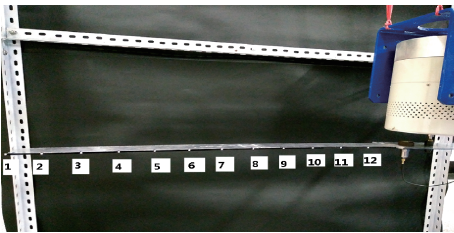


图10 含标记特征点的薄壁梁

Fig. 10 The thin-walled beam with sign features points

图11所示为薄壁梁振动模态测试扫频实验时的激振系统驱动电压,从图中可以看出从2~40 Hz,薄壁梁共有两阶固有频率,分别是3.60和22.77 Hz。采用本文提出的方法,获得12个特征点的时程位移曲线,前6个点曲线如图12所示。

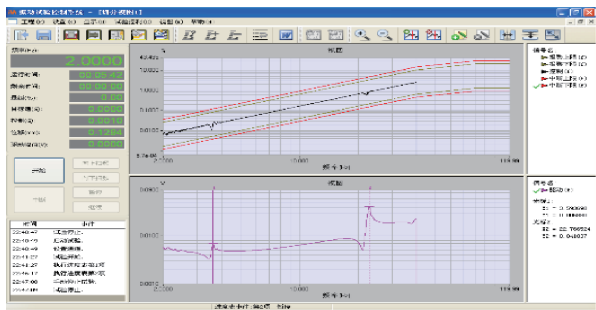


图11 扫频实验中激振系统的驱动电压

Fig. 11 Driving voltage of the excitation system in frequency sweeping testing

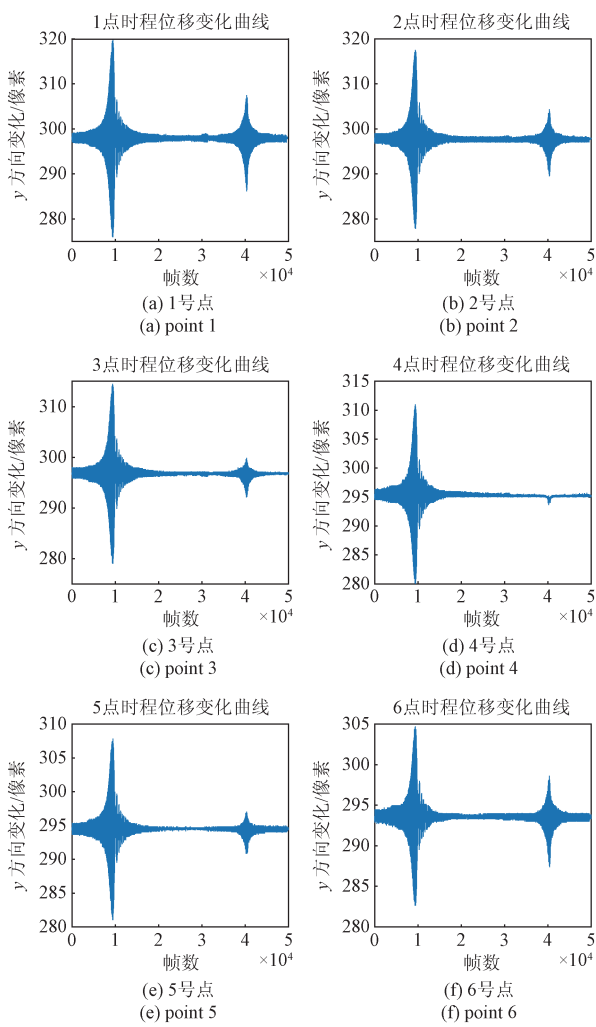


图12 前6个特征点时程位移曲线

Fig. 12 The time history displacement curve of the first 6 feature points

将上述12个特征点的位移时程曲线分别进行傅里叶变换,得到各点响应频谱图,前6个点的频谱如图13所示。

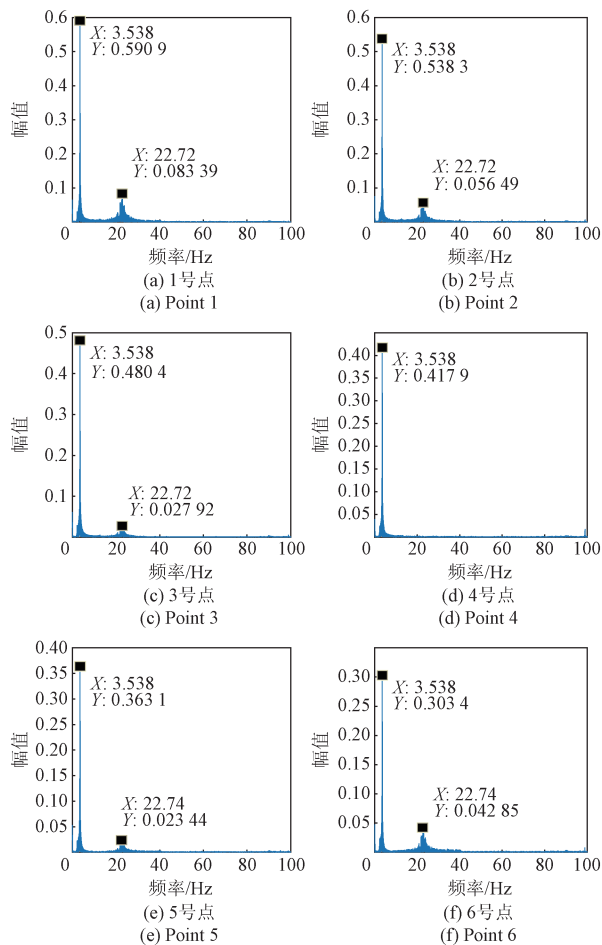


图 13 前 6 个特征点响应频谱

Fig. 13 Response spectrum of the first 6 feature points

分析 12 个特征点的频谱图,所有特征点的主要频率基本都对应 3.54 和 22.73 Hz,且没有其他的频率成分,因此可认为这两个频率是薄壁梁的固有频率。本次试验只获得了薄壁梁的前两阶振动模式频率,一阶固有频率为 3.54 Hz,二阶固有频率为 22.73 Hz。

在 3.60 和 22.77 Hz 频率下对薄壁梁进行定频分析,给激振器加相应的正弦激励,则可激出各自的模式振型。通过各特征点曲线拟合,可以得出每一阶频率下相应的振型,图 14 所示为对应固有频率下的模式振型。

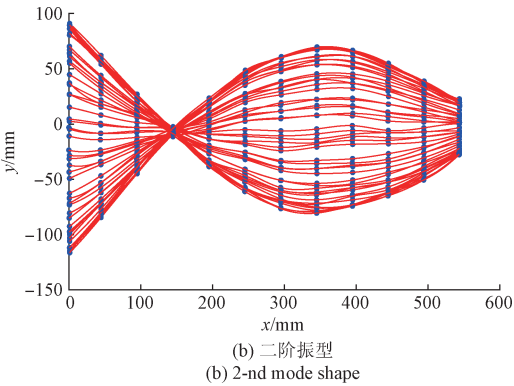
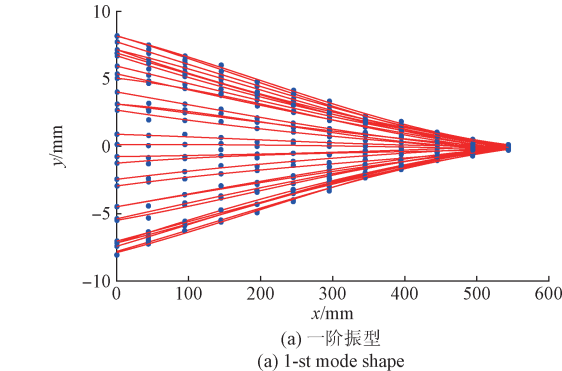


图 14 薄壁梁的前两阶视觉测量振型

Fig. 14 The first two-order vision measurement vibration model of the thin-walled beam

图 14 中由离散点构成的纵向直线表示特征点,其中 1 号特征点位于 $x = 0$ 的位置,最右端为 12 号特征点位置,从二阶振型图可知,4 号特征点位于二阶振型的一个节点上,这也是图 13 中 4 号特征点得不到二阶频率的原因。

4 实验结果对比与分析

4.1 激振器扫频结果对比

比较激振器得到的频率和本文提出方法获得的频率,如表 5 所示,结果表明本文提出方法能较好的辨识薄壁梁一阶固有频率和二阶固有频率,且误差在 2% 以下。

表 5 激振仪测试与本文提出方法的固有频率结果对照表
Table 5 Comparison of the natural frequency results between the vibrator testing and the proposed method

模态	激振仪测量/Hz	单目视觉测量/Hz	误差/%
1	3.60	3.54	1.7
2	22.77	22.73	0.2

4.2 有限元振动模式分析结果对比

薄壁梁的材料为铝,密度为 $2\,750\text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 $6.9 \times 10^{10}\text{ Pa}$,泊松比为 0.35。利用 ANSYS 软件对薄壁梁进行模式分析,图 15 所示为薄壁梁的有限元模型。

由于此次实验只考虑薄壁梁的水平波动模式振型,所以剔除薄壁梁的左右摆动和扭转的模式振型,可得前二阶波动振型的固有频率为 3.73 和 22.94 Hz。表 6 所示为有限元分析的振动模式固有频率和实验测试的固有频率对照表,从表 6 可以看出,有限元分析和实验测试所得到的前二阶固有频率结果差别很小,误差基本都控制在 5% 以下。图 16 所示为仿真得到的前两阶模式振型。

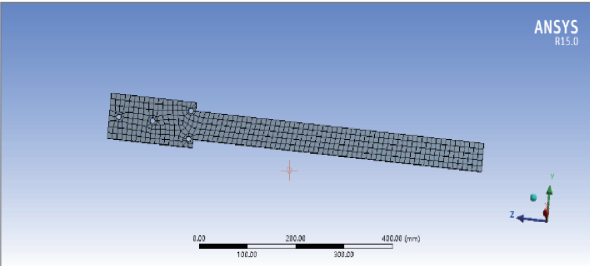


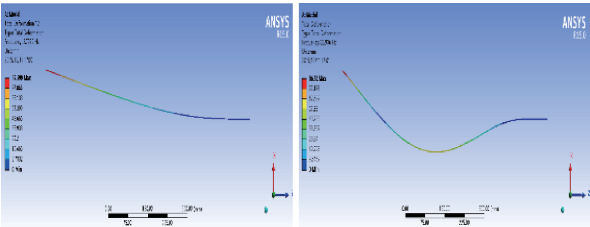
图 15 薄壁梁的有限元模型

Fig. 15 The finite element model of thin-walled beam

表 6 有限元分析与本文提出方法的固有频率结果对照表

Table 6 Comparison of the natural frequency results between the finite element analysis and the proposed method

模态	有限元分析/Hz	单目视觉测量/Hz	误差/%
1	3.72	3.54	4.8
2	22.94	22.73	0.9



(a) 一阶振型
(a) 1-st mode shape

(b) 二阶振型
(b) 2-nd mode shape

图 16 薄壁梁的前两阶有限元仿真振型

Fig. 16 The first two-order finite element simulation vibration model of the thin-walled beam

从图 14 和 16 可以看出有限元仿真和提取得出的薄壁梁第 1 阶波动振型都是以梁的端部做上下摆动;第 2 阶波动振型在振动过程中都呈现弧形。由此可以得出通过本文单目视觉测量法得出的薄壁梁模态振型和有限元分析所得的振型是一致的。

综上所述,经过激振器扫频和有限元振动模态分析的验证,本文提出的方法可准确测得悬臂梁的固有频率和模态振型,有效地识别薄壁件振动模态参数。产生误差的原因一方面是有限元方法难以精确模拟实际实验的工况,另一方面是本文提出的方法只测量了面内振动,而实际激振时悬臂梁的振动情况是复杂的,不仅有面内振动还有离面振动。

5 结 论

本文针对薄壁件振动模态测试需求,结合视觉测量

技术,研究了基于单目视觉振动测量的模态测试方法与基于金字塔的 LK 光流跟踪匹配算法,搭建了薄壁件振动模态测试系统,对薄壁梁进行了振动模态测试,获得了薄壁梁前两阶固有频率和相应的模态振型,并对测试结果进行了激振器扫频和有限元模态分析验证,固有频率误差在 5% 以内、模态振型一致,能够满足工程振动模态测试的基本要求,证明了本文提出方法的正确性和有效性。

参考文献

[1] 戴美玲,徐向阳,杨福俊,等. 薄壁球壳受刚性平面压缩的连续变形测量[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(5): 993-1000.
DAI M L, XU X Y, YANG F J, et al. Measurement of continuous deformation of thin-walled spheres compressed by a rigid plate[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 993-1000.

[2] SUN S, CHU S, CAO D. Vibration characteristics of thin rotating cylindrical shells with various boundary conditions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(18): 4170-4186.

[3] 尹涛. 时域响应中传感器附加质量影响消除[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4): 28-34.
YIN T. Elimination of transducer additional mass effects in time-domain responses[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(4): 28-34.

[4] 刘晓军,王益民. 同步相移干涉表面精密测量[J]. 中国机械工程, 2009, 20(18): 2218-2222.
LIU X J, WANG Y M. A synchronism phase shifting interferometry for on line precision surface measurement[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(18): 2218-2222.

[5] 覃斌. 单点激光连续扫描测振的薄壁件实验模态测试方法研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2013.
QIN B. Research on experimental modal testing method for thin-walled parts using single point laser continuous scanning vibration measurement[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2013.

[6] 刘立生,张合勇,王挺峰,等. 激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(6): 1508-1515.
LIU L SH, ZHANG H Y, WANG T F, et al. Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(6): 1508-1515.

[7] GIERGIEL M, KOHUT P. Analysis of dynamics of vibratory machines applying vision based measurements[J]. Mechanics & Mechanical

- Engineering, 2011, 15(4): 43-51.
- [8] ROMASZKO M, SAPINSKI B, SIOMA A. Forced vibrations analysis of a cantilever beam using the vision method [J]. Journal of Theoretical & Applied Mechanics, 2015, 53(1): 243-254.
- [9] CHEN J G, WADHWA N, CHA Y J, et al. Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 345(2015): 58-71.
- [10] 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 CH, WANG C, GAO J B, et al. Video grammetric based modal identification of on-orbit flexible structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(11): 17-23.
- [11] 张聪炫, 陈震, 黎明. 金字塔光流三维运动估计与深度重建直接方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1093-1105.
- ZHANG C X, CHEN ZH, LI M. Direct method for 3D motion estimation and depth reconstruction based on pyramid optical flow [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1093-1105.
- [12] 尹爱军, 张泉, 戴宗贤, 等. 离面振动光流分析方法研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 18-23.
- YIN AI J, ZHANG Q, DAI Z X, et al. Analysis of out-of-plane vibration using optical flow [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10): 18-23.
- [13] SONG X J, SENEVIRATNE L D, ALTHOEFER K. A Kalman filter-integrated optical flow method for velocity sensing of mobile robots [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(3): 551-563.
- [14] BARRON J L, FLEET D J, BEAUCHEMIN S S. Performance of optical flow techniques [J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 12(1): 43-77.
- [15] BEAUCHEMIN S S, BARRON J L. The computation of optical flow [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 1995, 27(3): 433-466.
- [16] HORN B K P, SCHUNCK B G. Determining optical flow [J]. Artificial Intelligence, 1981, 17(1-3): 185-203.
- [17] MURIN J, AMINBAGHAI M, HRABOVSKY J, et al. Beam finite element for modal analysis of FGM structures [J]. Engineering Structures, 2016, 121(8): 1-18.
- [18] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal on Robotics & Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [20] 刘一凡, 蔡振江, 索雪松. 基于基础矩阵与 HEIV 模型的双目相机标定 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1425-1431.
- LIU Y F, CAI ZH J, SUO X S. New calibration method of binocular camera based on fundamental matrix & HEIV model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9): 1425-1431.

作者简介



伍济钢 (通讯作者) received M. Sc. from Wuhan University in 2004, and Ph. D. from Huazhong University of Science and Technology in 2008, respectively. Currently, he is an associate professor in Hunan University of Science and Technology. His main research interests are machine vision and mechanical dynamics.



王刚, 2015 年于湖南科技大学获得学士学位, 现为湖南科技大学硕士研究生, 主要从事机器视觉、机械动力学等方面的研究。

E-mail: wang. g92@foxmail. com

Wang Gang received B. Sc. from Hunan University of Science and Technology in 2015. Currently, he is a M. Sc. candidate in Hunan University of Science and Technology. His main research interest is machine vision and mechanical dynamics.