

# 基于组合特征图案的单目视觉三维振动测量

林云霖, 钟舜聪\*, 钟剑锋, 徐帖

福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108

**摘要** 针对结构三维振动同步测量问题, 提出一种基于组合特征图案的单目视觉三维振动测量方法。组合特征图案由圆形图案和正弦条纹图案组成并喷涂或粘贴于待测结构表面, 采用单目相机对该组合特征图案进行连续成像。运用图像重心算法提取圆形特征的重心坐标, 求出结构平行于成像平面的二维振动信息, 再运用能量重心频谱校正算法提取中心位置正弦条纹的密度信息, 据此求出垂直于成像平面的振动信息, 从而实现结构三维振动的同步测量。通过模拟仿真分析了图像噪声、成像分辨率、图案动态特征提取算法对测量性能的影响。对悬臂梁在脉冲激励下的空间自由振动进行实验测量, 并与 Hough 变换圆检测算法的提取信号进行对比, 结果表明该方法能够对结构三维振动位移信息进行高精度的同步测量。

**关键词** 测量; 三维振动测量; 组合特征图案; 重心算法; 单目视觉

中图分类号 TH113.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2212002

## Three-Dimensional Vibration Measurement of Monocular Vision Based on Composite Feature Pattern

Lin Yunlin, Zhong Shuncong\*, Zhong Jianfeng, Xu Tie

School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

**Abstract** Aiming at the problem of simultaneous measurement of three-dimensional (3D) vibration of structures, a monocular vision 3D vibration measurement method based on composite feature patterns is proposed. A monocular camera is used in continuous imaging of the composite feature pattern, which is composed of the circular patterns and sinusoidal fringe patterns and pasted on the surface of the structure to be tested. Barycenter coordinates of circle pattern features are extracted by the image barycenter algorithm, which is used to calculate the two-dimensional vibration information parallel to the imaging plane. Meanwhile, the density information of sinusoidal fringes is extracted by the spectral centrobaric correction method (SCCM), which is used to calculate the vibration information perpendicular to the imaging plane, and then the 3D vibration of the structure can be measured synchronously. The effects of image noise, imaging resolution, and pattern dynamic feature extraction algorithm on measurement performance are analyzed by simulation. Experimental measurement for a cantilevered beam excited by an impulse excitation is carried out, whose results are compared with the ones obtained by Hough transform circle detection algorithm. The experimental results demonstrate that the proposed method can simultaneously measure 3D vibration information of structures with high precision.

**Key words** measurement; three-dimensional vibration measurement; composite feature pattern; barycenter algorithm; monocular vision

**OCIS codes** 120.4630; 110.4155; 110.2970; 150.6910

收稿日期: 2020-12-27; 修回日期: 2021-01-20; 录用日期: 2021-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(51675103, 51905102)、中国博士后科学基金(2019M662226)、现代精密测量与激光无损检测福建省高校重点实验室开放基金(2018XKA003)、闽江学院福建省信息处理与智能控制重点实验室开放课题资助(MJUKF-IPIC202005)

通信作者: \*sczhong@fzu.edu.cn

## 1 引言

振动是工程技术和日常生活中常见的现象。振动在大多数场合都是有害的,会产生噪声、破坏机器的正常工作、缩短机器的使用寿命等,因此必须对振动进行动态测量以实现监测或诊断,从而保证结构的安全性和可靠性<sup>[1-2]</sup>。传统的电测器件,如加速度传感器<sup>[3]</sup>,以其价格低、精度高等优点被广泛使用,但是这种传感器需要附于待测结构表面,不可避免地引入质量负载效应<sup>[4]</sup>。非接触式的光学测振仪器<sup>[5-6]</sup>,如多普勒激光测振仪<sup>[7]</sup>,不会引入附加质量,测量精度高,但该系统往往比较昂贵,在普通测量领域应用成本较高。

近年来,随着计算机视觉技术的飞速发展,基于视觉传感器的非接触式振动测量方法得到广泛应用<sup>[8-10]</sup>。Guo 等<sup>[11]</sup>将 Lucas-Kanade 模板跟踪算法与改进的逆合成算法相结合,实现了对大型结构振动信息的实时提取。Lyu 等<sup>[12]</sup>介绍了一种基于条纹投影的低频振动快速监测系统,利用傅里叶变换轮廓术得到待测结构的振动信息。Havarán 等<sup>[13]</sup>采用随机化 Hough 检测算法来跟踪结构上的椭圆标记运动,提取三层框架结构的模态振型和固有频率等动态特性。Ribeiro 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于视频技术的铁路桥梁非接触式动态位移测量系统,通过跟踪精密特征图案中心得到铁路桥梁的振动信息。Zhong 等<sup>[15-16]</sup>提出了一种位感条纹图案,采用单台相机实现了待测结构沿成像光路的单维振动信息提取。邱志成等<sup>[17]</sup>研究了一种双目视觉测量结构振动和反馈控制的方法,通过图像处理算法得到柔性板的低频振动信息。伍济钢等<sup>[18]</sup>将双目视觉与特征匹配跟踪相结合,对特征点进行立体匹配,再利用跟踪算法获得结构三维振动信息。但是上述单目视觉系统难以同时对三个维度的振动信息进行测量;双目视觉系统可以同时测量三维振动,但是其系统配置与标定较为复杂。

因此,本文提出了一种基于组合特征图案的单目视觉三维振动测量系统及方法。该方法采用单目相机对附于待测结构表面的组合特征图案进行连续成像,运用图像重心算法和能量重心频谱校正算法(SCCM)<sup>[19]</sup>实现对待测结构的三维振动信息的同步测量。与其他双目视觉测量系统相比,本系统只需单个视觉传感器即可同时对结构三维振动信息进行高精度测量,降低了视觉测量系统的复杂性,提高了测量效率。本文详细介绍了该三维振动测量方法

的测量原理并进行了实验验证。

## 2 单目视觉三维振动测量系统及原理

### 2.1 系统组成

单目视觉三维振动测量系统如图 1(a)所示,该测量系统主要包含组合特征图案、待测结构、成像系统以及计算机。对于该测量系统,定义平行于成像平面的水平方向为  $x$  轴,竖直方向为  $y$  轴,垂直于成像平面的方向为  $z$  轴。测量系统的组合特征图案如图 1(b)所示,其主要是在黑色圆形图案正中心添加了一排单密度正弦条纹,组合特征图案上下左右均对称。外围黑色圆形图案的半径为  $r$ ,该半径可根据待测结构尺寸进行更改。测量前,将组合特征图案粘贴或者直接喷涂于待测结构表面;相机通过可调支架对准结构表面的组合特征图案,通过调整镜头焦距得到清晰的组合特征图像;相机连续采集组合特征图像信息并将其导入计算机,通过重心算法得到结构的三维振动信息。

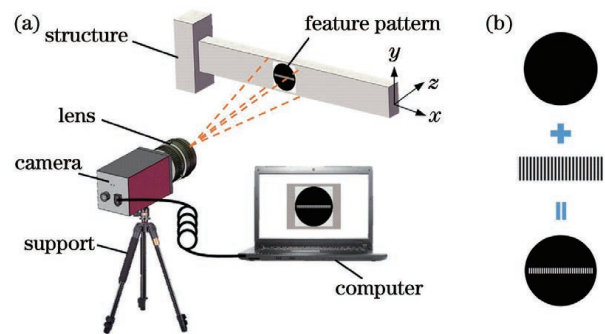


图 1 单目视觉三维振动测量系统。(a)测量系统简图;  
(b)组合特征图案设计

Fig. 1 3D vibration measurement system based on monocular vision. (a) Diagram of measurement system; (b) designed composite feature pattern

### 2.2 测量步骤

结构振动时,相机采集的组合特征图像的重心位置会发生偏移,同时中心部位正弦条纹的密度信息也会产生微小变化,利用图像重心位置变化和条纹密度变化可以求得结构的三维振动信息。该系统对组合特征图像的处理步骤如图 2 所示,在计算机中输入相机拍摄到的特征图像,分别对平行于成像平面的  $x$  轴和  $y$  轴、垂直于成像平面的  $z$  轴的信息进行测量。

对  $x$  轴和  $y$  轴振动信息的测量步骤如下:

1) 对特征图像进行预处理。计算图像阈值,进行二值处理(图像像素值大于阈值为 1,其余为 0)。为了减小中心部位正弦条纹对图像重心的影响,对

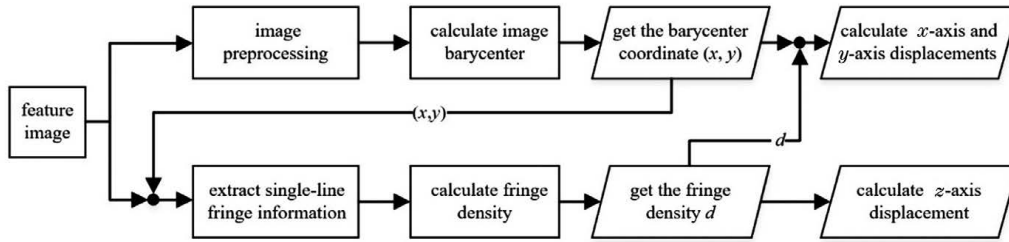


图 2 组合特征图像处理步骤

Fig. 2 Processing steps of composite feature pattern

组合特征图像进行连通区域标定,令特征图像内部的连通区域(即白色部分)数值都等于 0,使得组合特征图像成为一个标准圆形图像。

2) 运用图像重心算法计算组合特征图像重心,其计算公式为

$$C_x = S_{xi} / i, \quad (1)$$

$$C_y = S_{yi} / i, \quad (2)$$

式中: $C_x$ 、 $C_y$  分别代表图像重心算法求取的组合特征图像重心的  $x$  坐标和  $y$  坐标; $i$  表示图像中数值为 0 的像素点个数; $S_{xi}$  和  $S_{yi}$  分别表示数值为 0 像素点的  $x$  坐标和  $y$  坐标的总和。

3) 通过重心坐标变化及成像关系换算可以得到每帧图像  $x$  轴和  $y$  轴的振动信息。

对垂直于成像平面的  $z$  轴振动信息的测量步骤如下:

1) 直接读取图像且不进行任何预处理,保留中心部位正弦条纹图像的原始信息;2) 通过组合特征图像重心可以精确地定位正弦条纹所在的行和列,以组合特征图像重心为中心,读取长度为  $2l$  的单行条纹序列;3) 运用 SCCM 求取单行条纹的密度信息;4) 通过条纹密度变化以及成像关系换算可以得到每帧图像  $z$  轴的振动信息。

### 2.3 z 轴位移测量原理

通过组合特征图像中心部位的正弦条纹密度变化求得  $z$  轴振动信息  $\Delta z$ ,其位移测量原理如图 3 所示。结构振动时,结构表面的正弦条纹会与相机在距离上产生远近变化,这会引入相机拍摄的图像呈现出大小(或者密度)变化。文献[15]提出了一种非接触式的位感条纹测量方法,利用条纹密度变化测量结构空间位移信息。根据相机成像原理,图 3 中各参数满足

$$\frac{A}{D} = \frac{a}{F}, \quad (3)$$

$$\frac{A}{D + \Delta z} = \frac{a(t)}{F}, \quad (4)$$

$$a = p \times n, \quad (5)$$

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{F} = \frac{1}{f}, \quad (6)$$

式中: $A$  为组合特征图案中心部位正弦条纹的实际长度; $a$  为静止时刻(参考帧)成像条纹图像的长度; $a(t)$  为结构振动时刻条纹图像长度; $D$  为物距; $F$  为像距; $f$  为相机焦距; $p$  为相机成像传感器中每个像素点的尺寸; $n$  为长度为  $a$  的参考条纹图像所占的像素点个数。

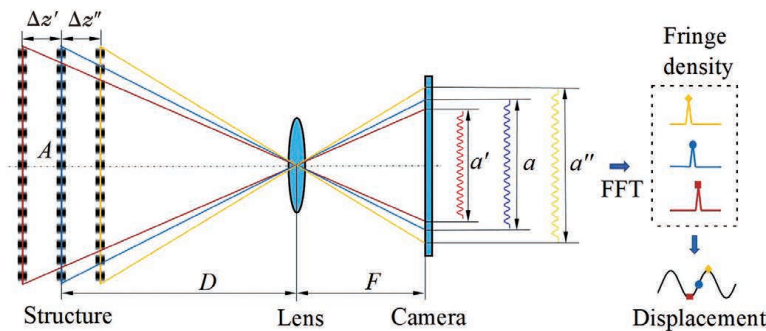


图 3 z 轴位移测量原理

Fig. 3 Measurement principle of  $z$ -axis displacement

将(3)、(5)及(6)式化简,可得到初始物距  $D$  为

$$D = f \left( 1 + \frac{A}{p \times n} \right). \quad (7)$$

对条纹序列进行快速傅里叶变换(FFT),得到成像条纹图像密度。但是傅里叶变换存在能量泄漏,不能得到非整数周期频率,故采用 SCCM 对条

纹密度  $d$  进行校正,以得到较高精度的密度值。将(3)、(4)式相除:

$$\frac{D + \Delta z}{D} = \frac{a}{a(t)} = \frac{d}{d(t)}, \quad (8)$$

通过化简可得  $z$  轴的位移  $\Delta z$  为

$$\Delta z = D \left[ \frac{d - d(t)}{d(t)} \right] = f \left( 1 + \frac{A}{p \times n} \right) \left[ \frac{d - d(t)}{d(t)} \right], \quad (9)$$

式中: $d$  为静止时刻条纹图像的密度; $d(t)$  为结构振动时刻条纹图像的密度。

## 2.4 $x$ 轴和 $y$ 轴位移测量原理

本测量方法中结构的  $x$  轴和  $y$  轴位移信息都是通过重心位置变化求得,两个方向的测量方法、测量步骤、测量性能相差不大,所以只对  $y$  轴测量原理进行介绍。运用图像重心算法求出成像图像中重心偏移距离  $h_y$ ,再通过换算关系求得  $y$  轴位移,其测量原理如图 4 所示。假设特征图案的重心初始位置为  $O$  点,当结构只沿  $y$  轴有位移时,重心  $O$  会偏移到  $O_1$  点处,此时  $y$  轴位移为  $\Delta y_1$ 。当结构沿  $y$  轴和  $z$  轴都有位移时,此时重心  $O$  会偏移到  $O_i$  点处, $h_y$  对应的  $y$  轴位移为  $\Delta y$ ,故在  $y$  轴位移换算时需要考虑  $z$  轴位移  $\Delta z$  引入的微小位移量  $\Delta y_2$ 。根据相机成像原理,图 4 中各参数可以表示为

$$\frac{\Delta y}{D + \Delta z} = \frac{h_y}{F}, \quad (10)$$

$$h_y = p \times m, \quad (11)$$

式中: $m$  为偏移段占用的像素点个数。同时,将(3)、(5)、(8)、(10)及(11)式进行化简,可得到  $y$

轴位移  $\Delta y$  为

$$\Delta y = m \frac{A}{n} \times \frac{d}{d(t)} = mR \frac{d}{d(t)}, \quad (12)$$

式中: $R = A/n$ ,表示图像中单个像素点对应的实际物体尺寸。

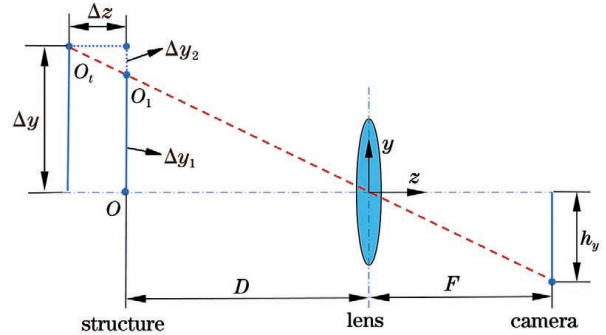


图 4  $x$  轴和  $y$  轴的位移测量原理

Fig. 4 Measurement principle of  $x$ -axis and  $y$ -axis displacements

## 3 测量系统的影响因素分析

### 3.1 SCCM 的性能分析

在  $z$  轴位移信息的计算过程中,需要将正弦条纹序列转化为密度(频率)信息。但是图像中的正弦条纹序列为有限长度,这会不可避免地产生时域截断误差引起的频谱泄漏,通过 FFT 求取的条纹密度会产生较大误差。因此,本研究采用 SCCM<sup>[19]</sup>对条纹序列进行频谱校正,得到精确条纹密度信息。该算法对条纹序列加 Hanning 窗,得到归一化表达式:

$$W(x) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi x/N), \quad x = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (13)$$

式中: $N$  为条纹的横向分辨率。Hanning 用于条纹序列时,以第  $i$  帧条纹序列的归一化校正频率  $d_i$  为中心的 Hanning 频谱主瓣能量函数为

$$E(d) = \left\{ \frac{A \sin[\pi(d - d_i)]}{2\pi d(d - d_i) [1 - (1 - d_i)^2]} \right\}^2, \quad (14)$$

根据 Hanning 窗的能量重心特性,可得到

$$\sum_{j=-n}^n E_{k+j}(k - d_i + j) = \sum_{j=-n}^n (k + j) E_{k+j} - d_i \sum_{j=-n}^n E_{k+j}, \quad (15)$$

$$\sum_{j=-n}^n E_{k+j}(k - d_i) = 0, \quad (16)$$

式中: $j$  为谱线号; $k$  为最大谱线值对应的谱线号; $E_{j+k}$  为对应  $k+j$  条谱线的能量谱线值。 $d_i$  可表示为

$$d_i = \sum_{j=-n}^n (k + j) E_{k+j} / \sum_{j=-n}^n E_{k+j}. \quad (17)$$

为了探究 SCCM 对  $z$  轴位移测量性能的影响,

采用 SolidWorks 软件模拟附有组合特征图案的待测结构在  $z$  方向上的振幅为 15 mm 和 0.25 mm 的正弦运动,利用软件成像模块生成两组随模拟运动信号变化的组合特征图像序列。分别采用 FFT 和 SCCM 求取两组图像的条纹密度,进而求出  $z$  轴位移信息,处理结果如图 5 所示。图 5(a)是振幅为 15 mm 的正弦运动的处理结果,实线是 FFT 求取



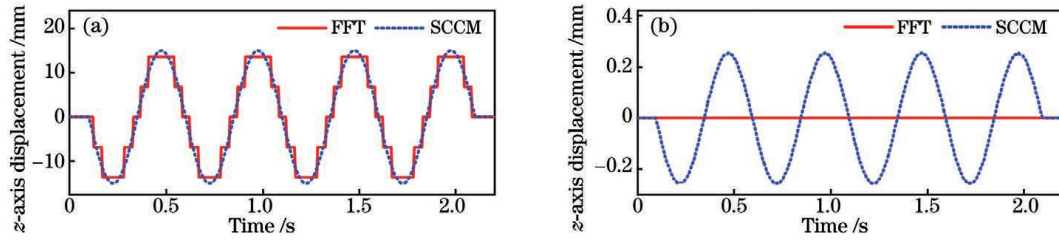


图 5 FFT 和 SCCM 提取的  $z$  轴振动位移对比。(a) 振幅为 15 mm; (b) 振幅为 0.25 mm

Fig. 5 Comparison of  $z$ -axis vibration displacement calculated by FFT and SCCM. (a) Amplitude of 15 mm; (b) amplitude of 0.25 mm

的位移曲线,可以看出曲线不平滑且呈现阶梯状,这是由 FFT 无法得到非整数周期信号的准确频率造成的误差。但是经过 SCCM 校正之后,可以精确得到条纹密度  $d$ ,所求取的位移曲线变得光滑且与模拟振动信号相符。图 5(b)是振幅为 0.25 mm 的正弦运动的处理结果,此时结构振动幅度很小,对应的条纹密度变化极其微小,FFT 已经无法识别条纹密度变化,进而无法得到结构位移信息;但是 SCCM 能够精准提取到条纹密度信息的微小变化,进而得到结构微小的位移信息,且测量精度可以达到微米级,因此采用 SCCM 可以极大地提高测量系统的  $z$  轴位移分辨率。

### 3.2 噪声对测量性能的影响

在视觉测量系统中,图像噪声是影响测量精度的主要因素之一。为了探究图像噪声对测量性能的影响,采用 SolidWorks 软件生成一组静止时刻结构表面的组合特征图像,图像大小为  $640 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$ ,在图像中加入不同量级的高斯噪声,生成 9 组信噪比 ( $R_{\text{SN}}$ ) 为 10 dB~90 dB、每组间隔为 10 dB 的噪声图像。运用本研究的重心算法对噪声图像进行三维位移信息提取,计算每组图像的位移标准差,结果如图 6 所示。从图中可以看出,随着图像信噪比的提高,三个方向的位移标准差随之减

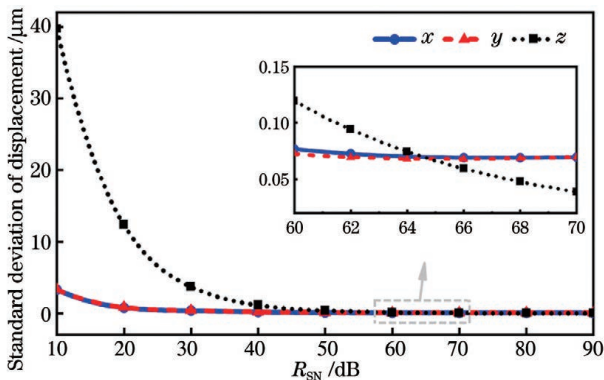


图 6 图像信噪比与位移标准差的关系

Fig. 6 Relationship between image signal-to-noise ratio and displacement standard deviation

小,且  $z$  轴的位移标准差比  $x$ 、 $y$  轴下降得更快,其主要原因是:在处理  $x$ 、 $y$  轴位移时,先对整个图像进行了二值处理,这减小了噪声对处理结果的影响,而为了保留原始的  $z$  轴正弦条纹图像信息,未进行任何预处理,所以其受噪声的影响较大;其次, $z$  轴位移测量方法只使用到正弦条纹所在单行的少量像素点,易受噪声影响。但是,采用 SCCM 求得的  $z$  轴位移标准差下降得很快,在信噪比为 65 dB 时的  $z$  轴位移标准差甚至比  $x$  轴和  $y$  轴数值还低。在信噪比为 50 dB 时, $x$ 、 $y$  和  $z$  轴的位移标准差分别为  $0.1166, 0.1105, 0.3627 \mu\text{m}$ ,因此可获得高精度的三维位移测量精度。

### 3.3 图像分辨率对视觉系统测量性能的影响

图像分辨率也是影响视觉系统测量性能的重要因素之一。为了讨论图像分辨率对测量性能的影响,采用 SolidWorks 软件的运动仿真模块模拟结构沿  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴的位移:

$$A(t) = 100\sin(6\pi t) + 100\sin(12\pi t). \quad (18)$$

采用成像模块采集两组组合特征图像,图像大小分别为  $212 \text{ pixel} \times 212 \text{ pixel}$  和  $640 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$ 。在两组图像中加入高斯噪声,生成信噪比为 50 dB 的噪声图像,采用本研究中三维振动测量方法提取  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向的位移信息,其结果如图 7 所示。图 7(a)、(b)和(c)分别是  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向的时域位移曲线,其中实线和点划线分别为从  $212 \text{ pixel} \times 212 \text{ pixel}$  和  $640 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$  组合特征图像所提取的位移曲线,点线为模拟的振动信号标准值。为了清晰地对比图像分辨率对位移测量的影响,对位移曲线进行了偏置绘图。从图中可以得出,随着图像分辨率的提高,测量精度也提高;同时,在较高分辨率情况下, $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向的位移测量结果与模拟振动信号对应的数值十分吻合,能达到  $\mu\text{m}$  级测量精度。在低像素时  $z$  轴位移的测量结果较差的原因是:少量像素点采集到的正弦条纹成像质量较差且条纹采样点数较少,求取的

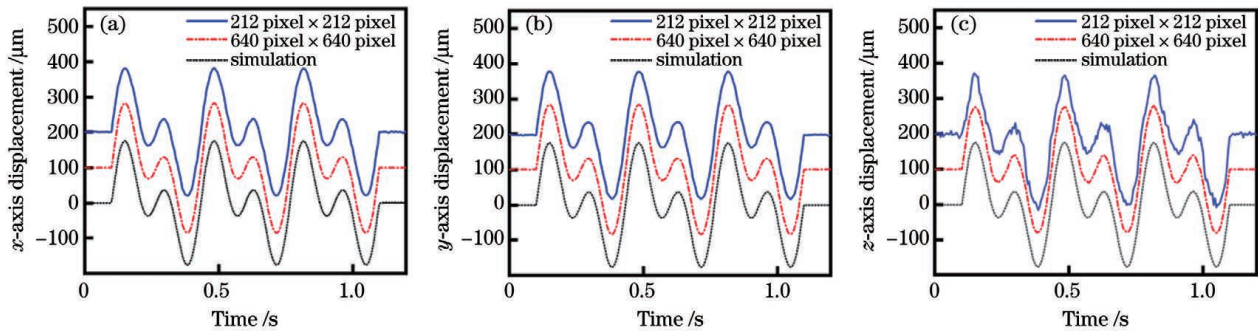


图 7 不同分辨率对测量性能的影响。(a)  $x$  轴位移;(b)  $y$  轴位移;(c)  $z$  轴位移

Fig. 7 Effect of resolution on measurement performance. (a)  $x$ -axis displacement; (b)  $y$ -axis displacement; (c)  $z$ -axis displacement

条纹密度会有较大误差;但是随着像素点的增多,正弦条纹成像质量得到提高,条纹采样点增多,系统对  $z$  轴位移的测量性能也极大提高。

为了验证分辨率对视觉系统实际测量性能的影响,将一个贴有组合特征图案的平板安装于激振器输出端,采用激振器在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向分别产生频率为 3 Hz 的正弦振动,使平板产生运动,相机对平板上的组合特征图案进行采集,采集帧率设置为 250 Hz,分别采集了分辨率为 160 pixel $\times$ 160 pixel、320 pixel $\times$ 320 pixel 及 480 pixel $\times$ 480 pixel 的组

合特征图像。运用本研究的重心算法对结构振动信息进行提取,其位移信息如图 8 所示。图中实线、点划线和点线分别代表针对分辨率为 160 pixel $\times$ 160 pixel、320 pixel $\times$ 320 pixel 及 480 pixel $\times$ 480 pixel 的图像提取的结构位移曲线。可以得出:随着图像分辨率的提高,测量精度提高;即使图像的分辨率较低,视觉系统也能较好地测量  $x$  和  $y$  轴位移,但在  $z$  轴的测量能力稍差;随着像素点的增多,该视觉系统也能得到较高的  $z$  轴测量精度。

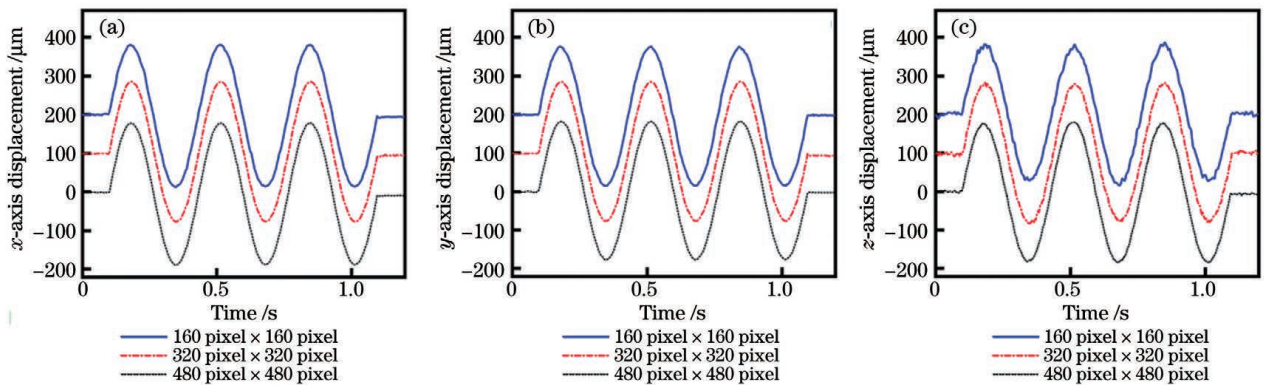


图 8 不同分辨率对视觉系统实际测量性能的影响。(a)  $x$  轴位移;(b)  $y$  轴位移;(c)  $z$  轴位移

Fig. 8 Effect of resolution on actual measurement performance of vision system. (a)  $x$ -axis displacement; (b)  $y$ -axis displacement; (c)  $z$ -axis displacement

## 4 实验及分析

### 4.1 测量系统

为验证该单目视觉三维振动测量方法的实际测量性能,搭建了一套悬臂梁振动测量系统,如图 9 所示。实验中使用了一块 350 mm $\times$ 50 mm $\times$ 2 mm 悬臂梁,将其一端安装在固定夹具上,另一端悬空且贴有组合特征图案。相机(PCO. 1200 hs)通过移动平台调整拍摄位置,并使用光学镜头(Nikon 24-85 mm F2.8-4D)调整焦距,使组合特征图案清晰地

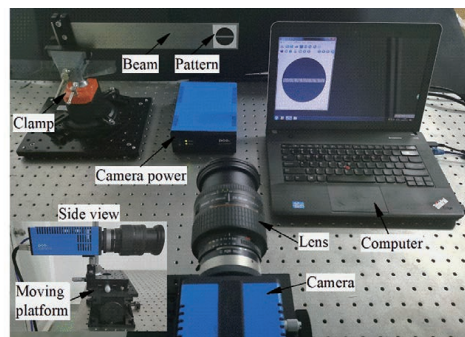


图 9 测量系统

Fig. 9 Measurement system



呈现在相机传感器中心位置。相机对图案进行连续成像,并通过数据连接线将成像图像导入计算机(Thinkpad e431,CPU:i5-3320,RAM:4G)。

#### 4.2 测量系统实际误差分析

实验中使用移动平台将相机调整到合适位置,并调整好镜头成像焦距( $f=85\text{ mm}$ )。相机的采集帧率设置为  $250\text{ Hz}$ ,尺寸为  $36\text{ mm}\times 36\text{ mm}$  的组合特征图案在相机中的成像大小为  $410\text{ pixel}\times 410\text{ pixel}$ ,故单像素点对应的位移量  $R$  为  $87.8\text{ }\mu\text{m}$ 。为了验证该三维振动测量系统的测量精确度,对静态结构的组合特征图像进行误差分析。高速相机在结构静止状态下采集 200 张组合特征图像,此时  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的位移都为 0;但是由于噪声、光照、系统本身振动等环境因素的存在,测量结果与真实值存在

一定偏差。采用本研究中的重心算法对 200 张图像进行位移信息提取,其结果如图 10 所示。图 10(a)~(c)分别为采用重心算法得到的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴误差曲线,从图中可以看出:该测量系统的实际测量精度能达到  $\mu\text{m}$  级别,且  $x$  轴及  $y$  轴的测量精度要高于  $z$  轴。作为对比,运用基于 Hough 变换圆检测的特征跟踪算法对相同的图像进行处理,其测量结果如图 10(d)~(f)所示。Hough 变换圆检测算法存在较大测量误差, $x$  轴及  $y$  轴测量误差较小,但也达到了数十微米量级;Hough 变换圆检测算法本身对垂直于成像平面的  $z$  轴位移不敏感,故其误差最大,且误差在几百微米范围内波动。同时,求取两种算法的误差数据的最大绝对误差、误差平均值及标准差,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,采用

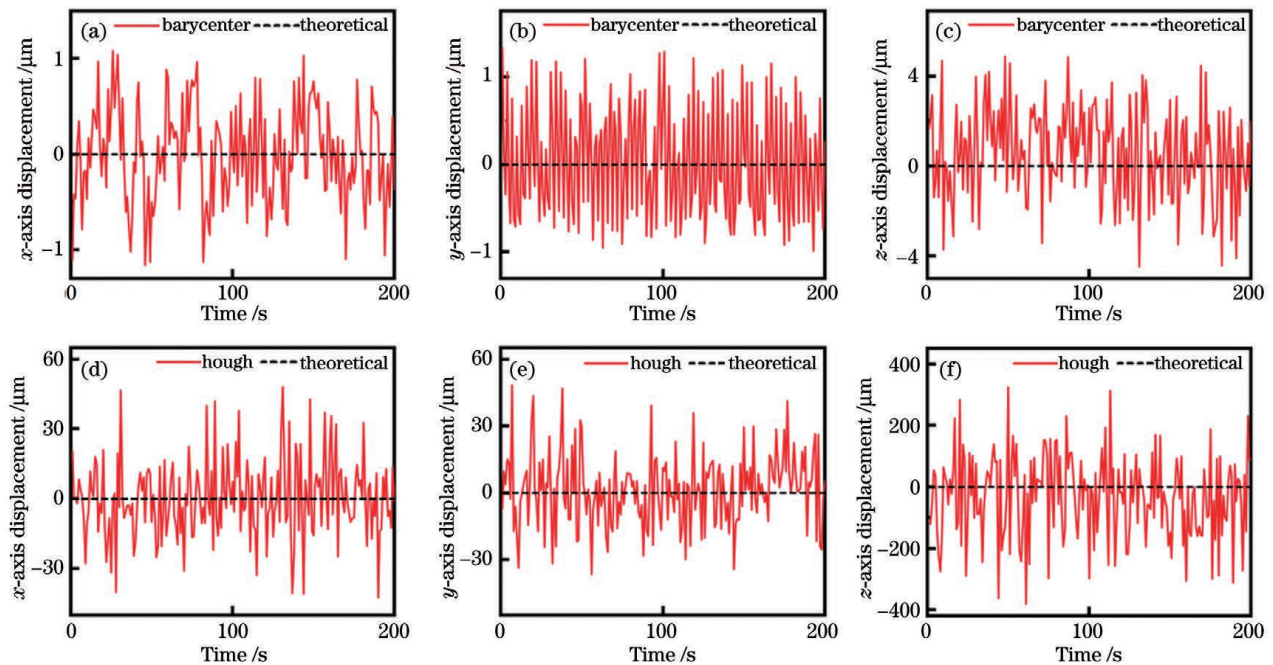


图 10 测量系统实际测量的误差曲线。(a)~(c)重心算法得到的  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴误差;(d)~(f)Hough 变换圆检测算法得到的  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴误差

Fig. 10 Actual measurement error curves of measuring system. (a)~(c) Error curves of  $x$ -axis,  $y$ -axis, and  $z$ -axis obtained by barycenter algorithm; (d)~(f) error curves of  $x$ -axis,  $y$ -axis, and  $z$ -axis obtained by Hough transform circle detection algorithm

表 1 重心算法及 Hough 变换圆检测算法的实际测量误差

Table 1 Actual measurement errors of barycenter algorithm and Hough transform circle detection algorithm  $\mu\text{m}$

Axis	Maximum error $\delta$		Mean error $\mu$		Standard deviation $\sigma$	
	Barycenter	Hough transform circle detection algorithm	Barycenter	Hough transform circle detection algorithm	Barycenter	Hough transform circle detection algorithm
$x$ -axis	1.165	48.121	-0.009	-0.036	0.495	16.456
$y$ -axis	1.332	48.257	0.020	1.472	0.638	15.930
$z$ -axis	4.881	380.481	0.587	-32.475	1.999	132.985

Hough 变换圆检测算法得到的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴标准差分别为 16.456, 15.930, 132.985  $\mu\text{m}$ , 所得误差较大, 测量精度较低。但是采用本研究中重心算法得到的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴标准差分别为 0.495, 0.638, 1.999  $\mu\text{m}$ , 都能达到微米甚至亚微米的精度, 相比 Hough 变换圆检测算法有数十倍的提升。

#### 4.3 悬臂梁振动测量实验

采用力锤敲击悬臂梁, 使其做自由阻尼衰减运动, 连续采集组合特征图像并使用本研究的重心算法进行三维振动信息提取。作为对比, 运用了基于 Hough 变换圆检测的特征跟踪算法对拍摄图像进行处理, 两种方法的处理结果如图 11 所示。其中

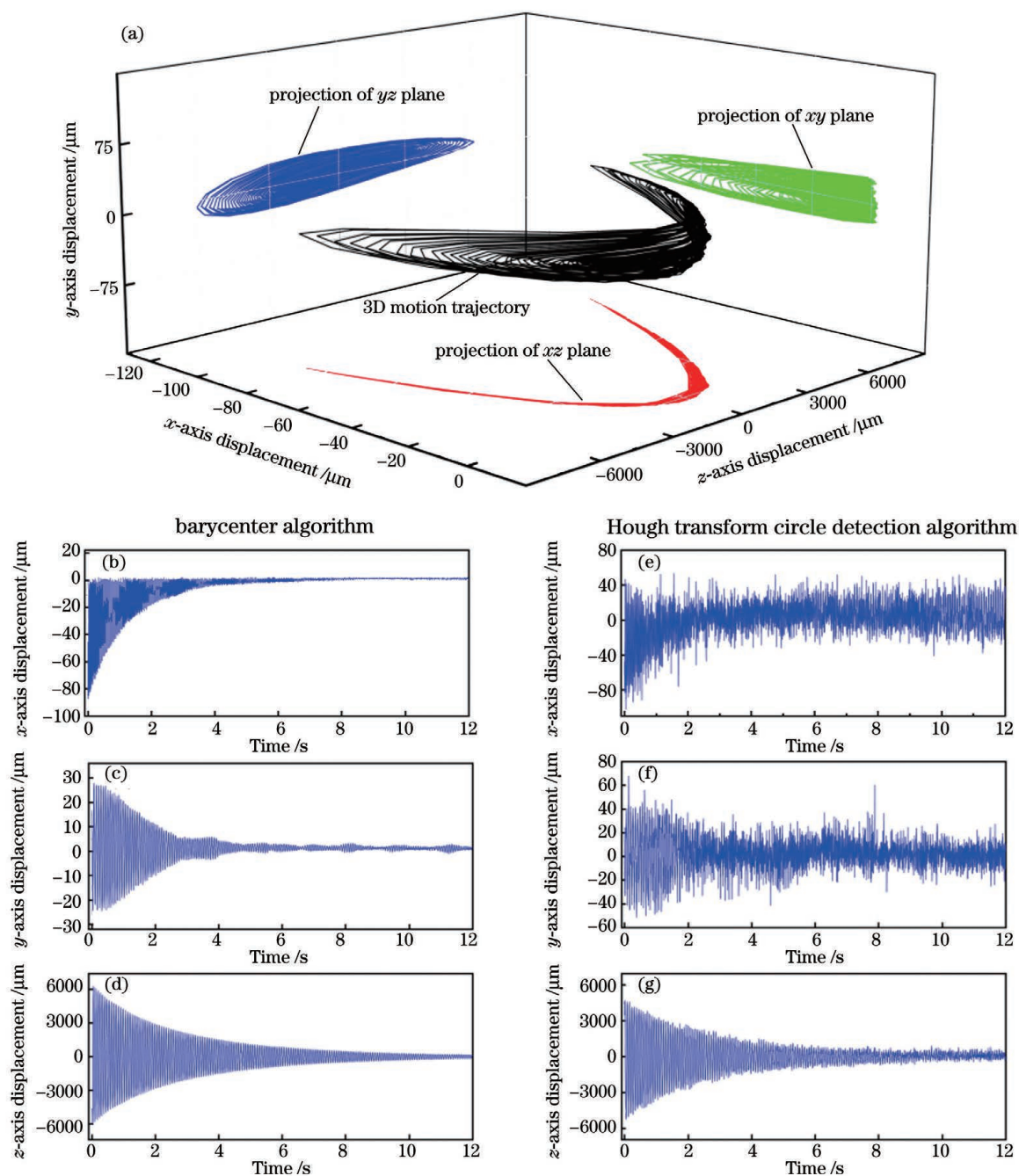


图 11 悬臂梁三维振动测量结果。(a)重心算法测得的悬臂梁三维空间位移轨迹;(b)~(d)重心算法测得的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴振动曲线;(e)~(g) Hough 变换圆检测算法测得的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴振动曲线

Fig. 11 Measurement results of 3D vibration of cantilever beam. (a) 3D displacement trajectories measured by barycenter algorithm; (b)–(d) vibration curves of  $x$ -axis,  $y$ -axis, and  $z$ -axis measured by barycenter algorithm; (e)–(g) vibration curves of  $x$ -axis,  $y$ -axis, and  $z$ -axis measured by Hough transform circle detection algorithm



图 11 (a) 为本研究中基于重心算法求取的悬臂梁悬空末端振动三维图, 实线代表悬臂梁的三维空间运动轨迹; 右侧、左侧、下侧实线分别是悬臂梁运动轨迹在  $xy$ 、 $yz$ 、 $xz$  平面的投影; 其中从  $xz$  平面的曲线中可以看出: 实验中的悬臂梁在  $xz$  平面做前后摆动运动。图 11 (b)、(d) 分别为该测量方法提取的悬臂梁  $x$  轴和  $z$  轴的位移曲线; 悬臂梁在阻尼影响下, 振动幅值逐渐减小, 最后趋向一定的值。理论上本装置的悬臂梁只会在  $xz$  平面内前后摆动, 而不会产生  $y$  轴位移, 但是由于悬臂梁夹紧力不均匀以及力锤敲击位置的偏差,  $y$  轴也会出现细微振动, 其振动曲线如图 11(c) 所示,  $y$  轴最大振动幅值为  $28 \mu\text{m}$ 。Hough 变换圆检测算法的处理结果如图 11(e)~(g) 所示, 可以看出 Hough 变换圆检测算法得到的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  位移曲线不平滑, 噪声较大, Hough 变换圆检测算法对  $100 \mu\text{m}$  以下的位移信息的识别能力较差。相比之下, 本研究中基于重心算法的测量方法在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向都具有较高的测量精度, 能够实现结构三维振动信息的高精度同步测量。

## 5 结 论

提出了一种基于组合特征图案的单目视觉三维振动测量方法, 并进行了仿真分析和实验研究。利用单目相机对附于待测结构表面的组合特征图案进行连续成像, 运用图像重心算法提取圆形特征的重心坐标, 求出结构平行于成像平面的二维振动信息; 运用 SCCM 提取中心位置正弦条纹的密度信息, 求出垂直于成像平面的振动信息, 从而实现结构三维振动信息的同步测量。通过对悬臂梁在脉冲激励下的自由振动进行测量, 验证了该方法同步测量结构三维振动信息的可行性。通过将本文算法与 Hough 变换圆检测算法进行对比, 验证了本文算法在测量精度上有较大提升, 能够实现结构三维振动信息的高精度同步测量。

## 参 考 文 献

- [1] Fan W, Qiao P Z. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study[J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, 10(1): 83-111.
- [2] Wang G B, He Z J, Chen X F, et al. Basic research on machinery fault diagnosis: what is the prescription [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(1): 63-72.

王国彪, 何正嘉, 陈雪峰, 等. 机械故障诊断基础研究“何去何从”[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(1): 63-72.

- [3] Mustafazade A, Pandit M, Zhao C, et al. A vibrating beam MEMS accelerometer for gravity and seismic measurements[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 10415.
- [4] Cakar O, Sanliturk K Y. Elimination of transducer mass loading effects from frequency response functions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2005, 19(1): 87-104.
- [5] Sun C M, Sun K H, Ge J Q. Measurement of surface vibrations of ultrasonic transducers by laser interference method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0904006.  
孙朝明, 孙凯华, 葛继强. 超声换能器表面振动的激光干涉测量[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0904006.
- [6] Yu H J, Zhao G G. Improving measurement accuracy of dual-frequency laser interferometer based on vibration node optimization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 151202.  
于海娇, 赵国罡. 基于振动节点优化提高双频激光干涉仪的测量精度[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 151202.
- [7] Castellini P, Martarelli M, Tomasini E P. Laser Doppler vibrometry: development of advanced solutions answering to technology's needs[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(6): 1265-1285.
- [8] Feng D M, Feng M Q. Computer vision for SHM of civil infrastructure: from dynamic response measurement to damage detection: a review[J]. *Engineering Structures*, 2018, 156: 105-117.
- [9] Yang Y C, Dorn C, Mancini T, et al. Blind identification of full-field vibration modes from video measurements with phase-based video motion magnification [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 85: 567-590.
- [10] Chen S, Chen G X, Han X J, et al. Development of vision-based displacement test method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(18): 73-78, 99.  
陈苏, 陈国兴, 韩晓健, 等. 基于计算机视觉的位移测试方法研究与实现 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(18): 73-78, 99.
- [11] Guo J, Zhu C A. Dynamic displacement measurement of large-scale structures based on the Lucas-Kanade template tracking algorithm[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 66/67: 425-436.
- [12] Lyu C G, Koirala P, Liu Y X, et al. Low-frequency vibration monitoring system based on optical image

- phase method with different fringe patterns[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(3): 1251-1258.
- [13] Havarani A, Mahmoudi M. Markers tracking and extracting structural vibration utilizing randomized Hough transform [J]. Automation in Construction, 2020, 116: 103235.
- [14] Ribeiro D, Calçada R, Ferreira J, et al. Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system [J]. Engineering Structures, 2014, 75: 164-180.
- [15] Zhong S C, Zhong J F, Zhang Q K, et al. Quasi-optical coherence vibration tomography technique for damage detection in beam-like structures based on auxiliary mass induced frequency shift [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 93: 241-254.
- [16] Zhong J F, Zhong S C, Zhang Q K. Quasi-OCVT technique for response-only experimental modal analysis of beam-like structures [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24 (11): e2017.
- [17] Qiu Z C, Wang X F. Vibration measurement and control based on binocular vision [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 51-58, 205.  
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, 205.
- [18] Wu J G, Shao J, Zhou G, et al. Vibration measurement of thin-walled parts based on binocular vision and matching and tracking of features [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57 (10): 101103.  
伍济钢, 邵俊, 周根, 等. 基于双目视觉与特征匹配跟踪的薄壁件振动测量 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101103.
- [19] Ding K, Jiang L Q. Energy centrobaric correction method for discrete spectrum [J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(3): 354-358.  
丁康, 江利旗. 离散频谱的能量重心校正法 [J]. 振动工程学报, 2001, 14(3): 354-358.