DOI: 10.3901/JME.2019.14.019

位感条纹三维振动测量原理及试验研究*

钟剑锋¹ 钟舜聪¹ 彭志科²

(1. 福州大学机械工程及自动化学院 福州 350116;

2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

摘要: 针对当前单目视觉测量方法难以实现结构三维振动同步测量的问题, 提出一种基于位感条纹和高速相机的结构三维振动同步测量新方法。在建立测量系统完整的原理模型基础上, 系统描述单相机成像坐标下采用单个位感条纹获取结构三维动态位移信息的测量原理, 建立成像位感条纹三维编码动态参数与结构实际三维位移之间的内在联系, 推导各维位移的计算公式。通过结构三维运动和视觉成像系统的联合仿真模型, 验证位移测量原理和算法的正确性; 并通过仿真和试验分析系统的测量性能及其影响因素。通过对结构已知三维运动的测量, 并与基于三维加速度传感器的接触式测量方法进行对比试验, 验证基于位感条纹的视觉测量方法及系统在实现结构三维振动位移准确同步测量的有效性。

关键词: 位感条纹; 高速相机; 三维振动; 同步测量

中图分类号: TG156

Theoretical and Experimental Studies on 3D Vibration Measurement Based on Displacement-sensitive Fringe Pattern

ZHONG Jianfeng¹ ZHONG Shuncong¹ PENG Zhike²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: A novel method for the measurement of structural three-dimensional (3D) vibration based on a displacement-sensitive fringe pattern (DSFP) and a high speed camera is proposed to overcome the simultaneous measurement problem in structural 3D vibration using monocular vision. Based on the established model of the proposed monocular vision measurement system, the measurement principle for structural 3D vibration is illustrated systematically. The relationships between the real 3D displacement and the 3D dynamics parameters obtained from the recorded DSFP image sequence is established. The formulas for calculating each dimensional displacement is also derived. The correctness of the displacement measurement principle and algorithm is verified by using the co-simulation model of structural 3D motion and monocular vision system. The performance and its influencing factors of the measurement system are evaluated by simulation and experiment. The experimental results for known structural 3D displacement and the contrast test results with the 3D acceleration sensor demonstrates the effectiveness of the proposed DSFP and vision based system in structural 3D displacement measurement.

Key words: displacement-sensitive fringe pattern; high-speed camera; 3D vibration; simultaneous measurement

0 前言

振动信号可以为结构的安全评估和健康监测提供丰富的有效信息。振动测量技术按其测量对象接触与否可以分为接触式测量和非接触式测量。接触式振动测量传感器, 如加速度传感器、接触式位

移传感器等, 在一些场合会因其与结构的物理连接或自身附加质量对测量结构的振动特性产生一定的影响而受到限制。非接触式测量方法可实现非侵入式的测量, 结构动态特性不会受到测量传感器附加质量或外力的影响, 可用于结构模态参数的准确测量, 特别适用于一些轻质结构的测量。

机器视觉测量技术作为一种新的测量技术, 其以非接触、高效率、高精度、无负载效应等特点受到越来越多研究者的关注^[1]。并且, 随着数字成像技术与图像处理技术的发展, 二维图像传感器在成

* 国家自然科学基金(51675103)、机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金(MSV-2018-07)、上海市自然科学基金(18ZR1414200)和福建省科技计划(2019I0004)资助项目。20180503 收到初稿, 20190327 收到修改稿

像分辨率和成像速度方面都有较大提升,促进了视觉测量技术的快速发展。该类方法先采用相机对振动结构表面的标靶图案或自然特征进行连续采集成像,再采用不同图像处理技术实现被测结构振动、形变、位移等物理参数的测量。投影条纹法^[2]是一种基于机器视觉的非接触式全场光学测量方法,该方法通过采集投影在物体表面的条纹实现其形貌或振动的测量。TAY^[3]采用投影条纹和机器视觉实现微小构件的动态测量。MITCHELL^[4]采用条纹投影和机器视觉测量技术实现结构的模态分析。陈露等^[5]采用条纹投影实现扬声器的形变测量。该类方法通过采集的投影条纹强度信号获得条纹的相位信息,测量精度容易受到光强波动的影响。并且需要相位解包裹算法^[3]来对不连续相位进行解包裹以获得连续变化的相位信息。另外,该方法在测量时需要确定的系统参数较多,给测量带来一些不便。

也有研究者采用图像对比跟踪算法^[6]、模板匹配技术^[7]和边缘检测技术^[8]等实现结构的动态测量。DOIGNON 等^[9]等采用双目视觉测量系统,结合边缘检测算法和深度计算算法实现卷绕传输系统中移动卷绕物的横向位移及离面振动的测量。BUSCA 等^[7]采用模板匹配、边缘检测算法对安装于铁路桥表面的不同目标图像在图像传感器中的位置变化进行探测,实现了桥梁垂直位移的测量。FUKUDA 等^[6]和 FENG 等^[10]结合机器视觉测量、目标匹配和方向码匹配算法捕捉结构自然特征的运动实现结构的位移测量。KHUC 等^[11]也采用普通相机实现结构自然特征的运动检测与匹配,在不需要标靶图案的情况下实现结构的振动测量。国内学者季云峰^[12]采用长焦镜头的普通相机和无目标计算机视觉技术实现拉索桥拉索的振动测量与分析。

数字图像相关法是视觉测量提取结构动态信息的一种常见算法,可分为二维数字图像相关法^[13-15]和三维数字图像相关法^[16]。二维图像相关技术只需一个二维图像传感器,适用于面内位移的测量;三维数字图像相关技术则需要两个二维图像传感器对图像进行同步采集以实现结构三维振动的测量。数字图像相关法优点在于装置简单,具有较高的测量灵敏度和分辨率^[13]。陈忠等^[17]采用双目立体视觉实现结构全场振动的测量。歹英杰等^[18]采用双目立体机器视觉测量空间目标的三维运动参数及空间姿态等。上述测量技术在采用单个相机时一般只能实现平行于成像传感器平面结构二维动态位移的测量,要实现三维信息测量则需要采用两个相机进行同步采集。

近年来,作者提出两种基于白光干涉条纹的一

维^[19]和二维^[20]光学相干振动层析系统,该类系统可实现结构亚纳米级精度的单点或多点一维振动的测量,但该类测量方法需要搭建精密的干涉光路才能实现。结合基于干涉条纹的二维光学相干振动层析系统和基于机器视觉的非干涉振动测量技术各自的优点,作者提出一种基于类干涉条纹和高速相机的测量系统。该系统采用类似于干涉条纹的图片粘贴于结构表面作为振动传感器,并采用高速相机为探测器实现结构的振动测量^[21]、模态分析^[22]和缺陷检测^[23]。该测量方法主要可实现结构沿成像光轴方向微米量级到厘米量级振动位移的测量。本文在前期研究的基础上,针对单目视觉测量系统只能实现两个维度振动测量的不足,设计了一种新型位感条纹作为三维位移传感器,以高速相机作为探测器即可实现结构三维振动位移的同步测量。与其他研究者提出的基于单个相机的测量系统相比,扩展了单相机测量系统的测量维度、提高了测量效率。

1 系统组成及原理

1.1 系统组成

基于位感条纹和高速相机的新型三维振动测量系统原理如图 1 所示。该测量系统主要由位感条纹、高速相机和电脑组成。位感条纹作为三维振动传感器附于被测结构表面;高速相机用于结构振动过程中位感条纹图像的采集;电脑用于高速相机的控制及采集位感条纹图像的处理。该振动测量系统的三维测量坐标定义如图 1 所示:将沿成像光轴方向定义为 X 轴,竖直方向定义为 Y 轴,水平方向定义为 Z 轴。

图 1 基于位感条纹和高速相机的三维振动测量系统

位感条纹形式如图 1 所示,该位感条纹通过 Matlab 软件编程产生,再将其保存成图片并采用普通打印机将其打印到背胶相片纸上,即完成位感条纹传感器的制作。位感条纹有效条纹长度和宽度分

别为 L 和 W ，其值可由测量结构的尺寸和成像距离决定。该位感条纹的特点在于沿长度方向的条纹密度固定，而沿宽度方向的条纹密度按二次函数变化。因此，该位感条纹中心线位置对应于该二次变密度曲线斜率值为零的位置。在被测结构表面粘贴好位感条纹后，应使位感条纹图像成像于图像传感器的中心位置，并调整成像镜头的参数使位感条纹清晰成像。

1.2 X 方向位移测量原理

被测结构沿成像光轴方向的位移 $\Delta x(t)$ 可由成像位感条纹宽度方向中心线位置的条纹密度变化获得，其测量原理如图 2 所示，图 2a、2b 分别为测量系统侧视图和俯视图。因为制作完成的位感条纹有效条纹宽度和长度是固定的，所以图像传感器中位感条纹图像的成像宽度和长度将随着 X 方向位移的变化而变化，从而使位感条纹图像宽度方向中心线处的条纹密度发生变化。假设 t 时刻结构在 X 方向的位移为 $\Delta x(t)$ ，根据文献[23]可得沿 X 方向的位移可表达为

$$\Delta x(t) = \frac{D(d(t) - d_r)}{d_r} \quad (1)$$

式中， D 为成像系统的成像物距， d_r 和 $d(t)$ 分别为参考位感条纹中心线位置条纹的条纹密度和结构在成像光轴 X 方向有 $\Delta x(t)$ 位移时位感条纹中心线位置条纹的条纹密度。

图 2 系统 X 方向位移测量原理

1.3 Y 方向位移测量原理

结构 Y 方向的位移测量原理如图 3 所示，图 3a 中结构只沿 Y 方向有位移，该位移可以通过求取位感条纹宽度方向中心线在图像传感器中的位移 h 获

得。由图中成像关系可得，结构在 t 时刻只沿 Y 方向有位移 $\Delta y(t)$ 时，该位移可表达为

$$\Delta y(t) = D \cdot \tan(\alpha(t)) = D \frac{h(t)}{F} = D \frac{a\Delta m(t)}{F} \quad (2)$$

式中， F 为图像传感器和透镜之间的成像距离， $h(t)$ 为位感条纹中心线在图像传感器上相对于参考条纹中心线的位移，该位移可由等式 $h(t) = a\Delta m(t)$ 计算获得，其中 a 为图像传感器的像素点宽度， $\Delta m(t)$ 为 t 时刻位感条纹中心线在图像传感器上相对于参考条纹中心线偏移的像素点数。

图 3 系统 Y 方向位移测量原理

由图 3b 可知，当结构沿 X 和 Y 轴方向同时有位移时， X 方向位移将影响 Y 方向位移的计算。考虑 X 方向位移的影响，沿 Y 轴方向的位移可表达为

$$\Delta y(t) = \Delta y_1(t) + \Delta y_2(t) = D \cdot \tan(\alpha(t)) + \Delta x(t) \cdot \tan(\alpha(t)) \quad (3)$$

根据式(2)可得，在 t 时刻 $\tan(\alpha(t))$ 的值可表达为

$$\tan(\alpha(t)) = \frac{h(t)}{F} = \frac{a\Delta m(t)}{F} \quad (4)$$

将式(1)、(4)代入式(3)化简可得到 Y 轴方向位移表达式为

$$\Delta y(t) = \frac{Da\Delta m(t)d(t)}{d_r F} \quad (5)$$

又因为该成像系统的成像比例可由 D 和 F 之间的比值获得，即

$$M_a = \frac{D}{F} = \frac{L}{aN_L} \quad (6)$$

式中， L 为位感条纹有效条纹的实际长度， N_L 为位感条纹有效条纹长度在图像传感器中覆盖的像素点数。将式(6)代入式(5)化简可得

$$\Delta y(t) = \frac{L\Delta n(t)d(t)}{d_r N_L} \quad (7)$$

由式(1)、(7)可知,获得结构在 X 和 Y 方向位移 $\Delta x(t)$ 和 $\Delta y(t)$ 的关键在于准确确定位感条纹中心线在图像传感器中的坐标位置。只有得到位感条纹的中心位置后才能准确得到该中心位置的条纹密度值 $d(t)$ 和 Y 方向的偏移值 $h(t)$ 。在实际测量系统中,得到的条纹密度变化曲线采样分辨率受到图像传感器分辨率的限制,在求取条纹密度变化曲线斜率为零坐标点时可能存在较大的误差。因此在获得条纹密度变化曲线后可先对曲线进行拟合平滑,再求其斜率曲线,最后通过插值法求得条纹密度变化曲线斜率为零的坐标位置,实现结构 Y 方向位移的精确测量。

1.4 Z 方向位移测量原理

结构 X 和 Y 方向的位移分别可以从位感条纹宽度方向中心线处的条纹密度变化和位感条纹中心线在图像传感器中纵坐标位置的变化获得。同理,结构在 Z 方向的位移可以通过位感条纹有效条纹长度方向的中心点在图像传感器中的坐标位置变化求得,其测量原理如图 4a 所示。

图4 系统 Z 方向位移测量原理

假设粘贴于结构表面的位感条纹在图像传感器中的初始成像位置位于图像传感器的中心,即其参考中心点 P_r 位于图像传感器的中心,如图 4b 所示。在 t 时刻结构只在 Z 方向有位移 $\Delta z(t)$ 时,位感条纹

在图像传感器中的图像及其位置如图 4c 所示,此时位感条纹长度方向的中心点 P_i 与参考中心点 P_r 存在一定位移。根据图 4a 中的三角成像关系可得

$$\tan(\beta(t)) = \frac{F}{w(t)} = \frac{D}{\Delta z(t)} \quad (8)$$

即

$$\Delta z(t) = \frac{Dw(t)}{F} \quad (9)$$

将式(6)代入式(9)可得

$$\Delta z(t) = \frac{Lw(t)}{aN_L} = \frac{La\Delta n(t)}{aN_L} = \frac{L\Delta n(t)}{N_L} \quad (10)$$

式中, $w(t)$ 为位感条纹长度方向的中心点在 t 时刻偏移图像传感器参考中心 P_r 的距离,该距离可由等式 $w(t) = a\Delta n(t)$ 计算获得,其中 $\Delta n(t)$ 为位感条纹长度方向的中心点在图像传感器上沿 Z 方向偏移图像传感器中心 P_r 的像素点数。

当结构在 X 和 Z 方向同时有位移时,即当位感条纹的中心点位于图 4a 中的 P_j 位置时,结构在 X 方向位移将对成像位感条纹长度方向的中心点位置有影响,如图 4d 所示。考虑 X 方向位移的影响,结构在 Z 方向的位移为

$$\Delta z(t) = \Delta z_1(t) + \Delta z_2(t) = \frac{D}{\tan(\beta(t))} + \frac{\Delta x(t)}{\tan(\beta(t))} \quad (11)$$

将式(1)和(8)代入并化简可得

$$\Delta z(t) = \frac{Dd(t)}{d_r \tan(\beta(t))} = \frac{Dd(t)w(t)}{d_r F} \quad (12)$$

再将式(6)代入式(12)化简可得

$$\Delta z(t) = \frac{La\Delta n(t)d(t)}{aN_L d_r} = \frac{L\Delta n(t)d(t)}{N_L d_r} \quad (13)$$

通过式(13)即可消除 X 方向位移对 Z 方向位移的影响。

因此,要获得结构在 Z 方向的位移,必须获得位感条纹有效条纹长度方向的中心点在图像传感器上沿 Z 方向偏移图像传感器参考中心 P_r 的准确距离。如图 4c 所示,当结构只在 Z 方向有位移时,位感条纹宽度方向中心线处的条纹密度保持不变。此时,位感条纹宽度方向中心线处的有效条纹在图像传感器中的像素偏移量可以通过其与参考位感条纹中心线处条纹信号相关序列的最大峰值点坐标确定。但是,当结构在 X 和 Z 方向有位移时,成像位感条纹中心线处的条纹密度将发生变化,即有效条纹的空间频率将发生变化,如果采用参考位感条纹中心线处条纹信号与密度变化后的条纹进行相关运

算时，其相关系数将随着两条纹信号频率差的增大而减小。若因为 X 方向位移过大导致两条纹信号的频率差过大，它们之间将不相关，也就无法通过搜索互相关序列峰值坐标位置确定有效条纹在 Z 方向的像素偏移量。

针对该问题，可以通过当前条纹密度的变化重新生成与该条纹密度相同的且位于图像传感器中心的条纹信号作为参考条纹。保证用于相关运算的条纹信号频率相等，使相关序列峰值位置坐标永远存在。假设图像传感器宽度方向总的成像像素点为 N_a ，初始帧位感条纹中心线处的有效条纹周期数和覆盖的像素点分别为 p 和 N_L ，则在 t 时刻位感条纹中心线条纹覆盖的像素点为

$$N(t) = \frac{N_L d_r}{d(t)} \quad (14)$$

在 t 时刻生成的位于图像传感器中心位置的参考条纹在图像传感器中的分布函数为

$$f(n) = \begin{cases} 0 & n < \frac{N_a - N(t)}{2} \\ A \cdot \cos \left(-p\pi + \frac{2\pi \left(n - \frac{N_a - N(t)}{2} - 1 \right)}{N_L - 1} \right) & \frac{N_a - N(t)}{2} \leq n \leq \left(\frac{N_a + N(t)}{2} \right) \\ 0 & n > \left(\frac{N_a + N(t)}{2} \right) \end{cases} \quad (15)$$

式中， n 为图像传感器的横向坐标， A 为生成条纹的强度幅值，其值与采集得到的位感条纹中心线处的条纹强度幅值相等。通过式(15)即可求得与 t 时刻中心线条纹周期密度相等且位于图像传感器中心位置的参考条纹信号。再将 t 时刻的移位条纹信号与生成的参考条纹信号进行互相关运算，得出相关序列峰值坐标即可确定位感条纹长度方向的中心偏离图像传感器参考中心位置的像素点数 $\Delta n(t)$ 。最后根据式(13)得到 Z 方向的位移信号。在实际的测量过程中，有效条纹的采样分辨率也受到图像传感器分辨率的限制，在采用互相关运算确定峰值坐标位置时其坐标分辨率与像素点间距相同。为了提高系统在 Z 方向的位移分辨率，在进行互相关运算之前可先对两条纹信号进行插值处理。实际的插值点数可根据位感条纹图像实际的分辨率和希望得到的位移分辨率进行选择，一般该位移分辨率会随着插值点数的增加而提高。

1.5 位感条纹中心线的确定

由上述分析可知，采用该系统实现结构三维振

动测量的关键在于精确确定位感条纹宽度方向的中心线位置。如图 5a 中虚线所示，该中心位置与条纹密度变化曲线斜率为零的坐标位置相等。因此，要精确获得该中心位置必须获得准确的条纹密度变化曲线，该密度变化曲线可以通过求每行条纹的频率获得，通常可采用快速傅里叶变换求每行条纹的频率。但是因为该位感条纹的长度是有限的，采用快速傅立叶变换计算时会因为频谱泄露而不能获得条纹精确的密度信息。为了获得更为精确的条纹频率信息，在对每行条纹频率进行计算时采用能量重心校正法^[24]进行校正，以得到更为准确的条纹密度变化曲线。

在进行频谱校正时先对采集的干涉条纹信号加量纲一化的 Hanning 窗函数以减小其频谱泄露，该窗函数可表达为

$$W(m) = 0.5 - 0.5 \cos \left(\frac{2\pi m}{N_a} \right) \quad m = 0, \dots, N_a - 1 \quad (16)$$

式中， N_a 为采集得到的位感条纹沿长度方向总采样点数。当式(16)运用到采集的条纹信号时，其量纲一化的频谱主瓣模函数的平方为

$$G_{\omega_i} = \frac{A^2 \sin^2[\pi(\omega_i^1 - \omega_i^1)]}{4\pi^2(\omega_i^1 - \omega_i^1)^2 [1 - (\omega_i^1 - \omega_i^1)^2]} \quad (17)$$

式中， ω_i^1 和 A 分别为分析的第 i 行条纹信号的量纲一化频率和幅值。根据所加量纲一化 Hanning 窗函数的能量重心分布特性可以得出

$$\sum_{j=-z}^z G_{k+j} (k - \omega_i^1 + j) = \sum_{j=-z}^z (k + j) G_{k+j} - \omega_i^1 \sum_{j=-z}^z G_{k+j} \quad (18)$$

式中， G_j 为第 j 条谱线幅值， G_k 为主瓣内最大的谱线幅值， k 为最大谱线幅值对应的谱线号。那么第 i 行条纹的主瓣中心量纲一化频率

$$\omega_i^1 = \frac{\sum_{j=-z}^z (k + j) G_{k+j}}{\sum_{j=-z}^z G_{k+j}} \quad (19)$$

经能量重心频谱校正法校正后可得到条纹沿宽度方向的精确的频率变化曲线(即条纹密度变化曲线)，如图 5b 所示。得到条纹的密度变化曲线后对其进行多项式拟合平滑，并求得平滑后的密度变化曲线的斜率，通过插值求出斜率为零的坐标，即可确定位感条纹在宽度方向的中心线位置，如图 5c 所示。

图 5 位感条纹图及宽度方向中心线确定原理

2 系统测量性能影响因素分析

由系统三维位移测量原理可知,该系统主要采用高速相机对位感条纹进行成像以实现结构的三维振动测量。虽然采用能量重心频谱校正法可实现条纹密度信息的精确提取,但是该算法的精度会受到位感条纹图像分辨率和信噪比的影响。而位感条纹质量主要由位感条纹的打印质量和成像系统的成像质量决定。位感条纹的打印质量可以通过增加位感条纹的分辨率和采用打印质量高的打印机进行打印得到保证。而成像系统的成像质量却受到诸多因素的影响,如环境光照、成像镜头、图像传感器分辨率、图像位深等。通常相机图像传感器分辨率是固定的,为了获得更好的图像分辨率应尽量使更多的像素点用于位感条纹的成像。所以在实际的测量过程中应该根据成像距离选择合适的成像镜头。另外,由于外界环境光照条件、图像采样位深和成像噪声等因素的影响,成像位感条纹的图像信噪比也各不相同。

为了讨论位感条纹图像分辨率和信噪比对系统三维位移测量性能的影响规律,采用 SOLIDWORKS 软件的运动仿真模块建立结构三维振动模型,在结构的表面设置同样的位感条纹,并采用软件的成像模块对该位感条纹进行成像。为了评估该系统三维位移测量的不确定度与位感条纹图像分辨率和信噪比的关系,对静止结构表面的位感条纹进行拍摄。模拟中采集了两组分辨率分别为 476×238 像素点和 $1\,276 \times 638$ 像素点的位感条纹序列,每组序列为 200 张。然后对不同分辨率的两组位感条纹序列图像加入不同量级的高斯白噪声,

分别生成九组条纹信噪比分别为 10、20、30、40、50、60、70、80 和 90 dB 的条纹序列。然后采用提出的位移算法计算各组条纹序列的三维位移并计算位移的标准偏差来评估位移测量的不确定度,模拟结果如图 6 所示。由图可知,当位感条纹图的分辨率固定时,其各方向的位移不确定度随着条纹图像信噪比的增加而减小。从图 6a 和 6b 对比可以看出,增加位感条纹的图像分辨率也可以减小各方向位移的测量不确定度。从不同方向的位移不确定度变化曲线可以发现,在条纹图像信噪比低于 50 dB 时,该测量系统 X 方向的位移不确定度比 Y 和 Z 方向的不确定度要大得多。而随着条纹质量的提高,测量系统三个方向的位移不确定度差别越来越小。当位感条纹分辨率为 $1\,276 \times 638$ 像素点、信噪比为 50 dB 时, X、Y 和 Z 方向的位移不确定度分别为 $0.1\,\mu\text{m}$ 、 $0.2\,\mu\text{m}$ 和 $0\,\mu\text{m}$ 。因此,在获得高质量的位感条纹图像的情况下,该系统可获得较好的三维位移分辨率。

(a) 位感条纹成像分辨率为 476×238 像素点 (b) 位感条纹成像分辨率为 $1\,276 \times 638$ 像素点

图 6 位感条纹图分辨率和信噪比与位移不确定度的关系

3 试验及分析

为了验证提出的基于位感条纹的结构三维振动测量系统的可行性与准确性。搭建了一套试验测量系统分别对安装于三维电动移动平台的轻质平板结构和安装于激振器输出端悬臂梁的三维振动进行测量,试验装置如图 7 所示。试验中采用型号为 PCO.1200 hs 的 CMOS 高速相机,其最大分辨率为 $1\,280 \times 1\,024$ 像素,全分辨率下的最高帧率为 636 帧/s,单个像素点尺寸和位深分别为 $12\,\mu\text{m} \times 12\,\mu\text{m}$ 和 8 位。成像系统使用的成像镜头型号为 Nikon 24-85 mm F2.8-4D。位感条纹有效条纹长度和宽度分别为 40

mm 和 20 mm。

图 7 试验装置图

1. 位感条纹 2. 电脑 3. 三维移动平台 4. 高速相机 5. 移动平台
6. 悬臂梁 7. 激励器 8. 轻质平板

试验中首先对安装于三维电动移动平台的轻质平板结构的已知空间运动进行测量。该三维电动移动平台由三个一维电动移动平台(THORLAB: MTS25/M-Z8)搭建而成,并通过 Matlab 软件控制每个方向一维电动移动平台的运动,进而实现轻质平板结构的三维空间运动。平板结构运动前在其表面粘贴好位感条纹,放置好高速相机使位感条纹成像于图像传感器中心位置,调整好成像镜头和图像传感器的各参数使位感条纹图像清晰。试验中高速相机的成像范围设置为 640 像素×330 像素,曝光时间设置为 1 ms,并在两曝光时间点之间设置 4 ms 的延时,在该参数设置条件下高速相机的采样帧率为 200 帧/s。在实际的测量过程中,图像的对比度和成像质量可能会受到外界光照条件的影响。如果测量环境的光照条件不够理想可以使用外部光源照射位感条纹,以提高其成像质量。

设置好位感条纹和三维测量系统后,分别对 X、Y 和 Z 三个方向的一维电动移动平台施加位移幅值为 1 mm 的往复运动,其中各移动平台加速度和最大速度都设置为 1 mm/s^2 和 1 mm/s 。经三维测量系统测量得到的平板三维空间运动曲线如图 8a 所示,其在 XY、XZ 和 YZ 投影平面的投影曲线可以更好地观察其在各投影平面的运动情况。图 8b 为平板结构在 X、Y 和 Z 方向上的时域运动曲线,其往复运动幅值与各移动平台设置的幅值相等。验证了该振动

测量方法各方向位移计算算法的正确性与准确性,也说明了该基于单个位感条纹的结构三维振动测量系统可实现结构三维振动的同步测量。

(a) 三维移动平台上平板结构的三维空间运动曲线

(b) 三维移动平台上平板结构不同方向的运动曲线

图 8 平板结构三维位移测量结果

为了对该测量系统的测量精度进行验证,采用三维电动移动平台分别在 X、Y 和 Z 三个方向产生 5 步位移增量为 $10 \mu\text{m}$ 的阶梯运动。在运动过程中采用提出的动态测量系统对该位移进行测量,并通过提出的位移提取算法得到结构三个方向的阶梯位移曲线如图 9 所示。由图可知,系统可以分辨三个方向步距为 $10 \mu\text{m}$ 的阶梯运动。但是由于本系统中相机单个像素点尺寸和位深分别为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 和 8 位,采集得到的位感条纹信噪比较差,导致计算条纹密度信息时的误差较大。所以系统 X 方向的位移曲线噪声水平较大。但是系统 X 和 Y 方向的位移信号信噪比较高,可实现微米量级位移的分辨与测量。

图 9 结构三维阶梯位移试验测量结果

为进一步验证该三维振动测量系统对大位移结构的振动测量性能,采用该测量系统对悬臂梁结构的三维振动进行测量。因为悬臂梁在摆动时只在一个平面内运动,为了增加另一个维度的振动,将该悬臂梁固定于激振器的输出端,如图 7 所示。激振器输出端的振动信号幅值和频率可以由信号发生器(Agilent 33220)输出信号的幅值和频率控制。试验前,将位感条纹粘贴于悬臂梁自由端附近,并放置调整好高速相机。然后在悬臂梁自由端施加力矩后释放,使其自由摆动。同时,激振器输出端输出 1 Hz 的振动信号,使悬臂梁整体横向振动。

系统对该振动悬臂梁的测量结果如图 10 所示。其中图 10a 为悬臂梁在 X 和 Y 方向的时域空间摆动曲线,可以看出悬臂梁结构的摆动幅度逐渐衰减。该空间曲线左侧的投影曲线可以观察悬臂梁在 XY 平面的摆动轨迹;空间曲线下方的投影为悬臂梁在 X 方向时域位移曲线,由该衰减曲线的幅值变化可以看出,该测量系统在 X 方向可实现从微米量级到厘米量级的振动测量;空间曲线后侧的投影曲线为该悬臂梁在 Y 方向的时域位移曲线。图 10b 为悬臂梁结构在 Z 方向的时域振动曲线,通过能量重心频谱校正法校正后得到该单频振动信号的振动频率为 1.000 1 Hz,与输入激振器信号的频率几乎相等。进

图 10 悬臂梁结构三维振动测量结果

一步验证了基于位感条纹的三维振动测量系统的可行性与准确性。

该测量系统采用的高速相机在全分辨率条件下 (1 280×1 024 像素)最大帧率为 636 帧/s。根据采样定律,以采样频率为振动信号最高频率的 2.5 倍计算,该相机在全分辨率下可测量的理论最大振动频率约为 255 Hz,因此可以满足实际工程中一些大型工程结构大振幅、低频率振动的三维振动测量。但是该高速相机图像传感器的成像范围可以根据成像位感条纹的实际图像大小进行设置,在低成像范围条件下可实现几 kHz 的高帧率采集,也适用于结构高频振动的测量。为了验证该测量系统对高频三维振动位移的测量效果,采用该测量系统对扫频激励下的悬臂梁三维振动进行测量。试验中采用螺钉将悬臂梁一端固定于激振器的输出端,然后将位感条纹粘贴于距悬臂梁固定端 10 cm 的正面位置。为了对该系统的测量效果进行验证,试验中也采用基于三维加速度传感器的动态测试系统进行同步测量。试验中,将三维加速度传感器(PCB, 型号: 356B21)安装于距悬臂梁固定端 10 cm 的背面位置,并采用动态测试采集系统(东华测试, DH5922)对加速度信号进行同步采集。激振器输出扫描频率范围为 0~300 Hz,扫描周期为 6 s 激励信号。高速相机的成像范围设置为 600 像素×244 像素,曝光时间设置为 0.5 ms,该设置下高速相机的采样频率为 2 kHz。扫频激励下悬臂梁结构的三维振动位移测量结果如图 11 所示。

图 11 扫频激励下悬臂梁结构三维振动位移测量结果

图 11a、11b 和 11c 分别为结构在 X 、 Y 和 Z 方向上的时域振动位移曲线。由图可知, 当扫频激励信号的频率与梁结构的共振频率相近时梁结构将发生共振, 其振动幅值将变大。因为激励器沿梁的 X 方向进行激励, 所以沿 X 方向的振幅较大, 其最大振动幅值约为 3 mm。而沿 Y 和 Z 方向上的振动幅值较小, 最大振动幅值分别为 230 μm 和 12 μm 。因此, 该测量系统可以实现高频振动结构三维位移的测量。

因为三维加速度传感器测量得到的是悬臂梁的三维加速度信号, 在时域上与三维位移信号难以对比。因此通过悬臂梁动态信号的频域信号对比分析对测量系统的测量性能进行对比验证, 对比结果如图 12 所示。图 12a、12b 和 12c 分别为三维加速度传感器和位感条纹传感器在 X 、 Y 和 Z 方向上振动加速度信号和振动位移信号的频谱对比结果。由图可知, 三维加速度传感器和位感条纹都可以得到悬臂梁结构的各阶共振频率。因此, 该测量系统可用于一些高频振动结构三维振动的同步测量。

图 12 加速度传感器和位感条纹测量动态信号的频谱对比

本文提出的位感条纹三维振动位移测量系统, 只需将设计的位感条纹粘贴于或者喷涂于待测结构的平整表面, 采用高速相机采集随结构振动的位感条纹图, 并运用提出的三维位移算法对采集的位感条纹图像进行处理即可实现结构三维振动位移的同步测量。并且轻质位感条纹的质量较小, 对于一般

结构其质量几乎可以忽略不计, 不会对测量结构引入附加质量而影响其振动特性。特别适用于一些轻质、大柔度或宽振幅范围振动结构的测量。因此, 可用于结构动态特征参数的准确测量与评估, 实现结构的状态监测或缺陷检测, 从而保证工程结构的安全性及其可靠性。

4 结论

(1) 提出一种结构三维振动同步测量的新方法, 该方法采用新型位感条纹作为结构三维振动传感器, 采用高速相机作为探测器实现结构的三维振动同步测量。

(2) 分析影响该测量系统测量精度的各种影响因素, 模拟结果表明, 该测量系统 X 、 Y 和 Z 三个方向的测量精度各不相同, 但是它们之间的精度差别随着位感条纹图像信噪比提高而减小; 并且它们的测量精度都随着位感条纹图像分辨率和信噪比的增高而提高。

(3) 搭建试验测量系统并对安装于三维电动移动平台平板结构和悬臂梁结构的三维振动进行测量, 试验结果表明, 该基于位感条纹和高速相机的三维振动同步测量系统可精确地实现结构微米量级到厘米量级大振幅范围内三维振动的同步测量。

参 考 文 献

- [1] 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, 846.
XU Chao, ZHANG Yifan, HAN Xiaoming, et al. Vibration displacement measurement of large flexible structures based on machine vision[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 781-786, 846.
- [2] FU Yu. Low-frequency vibration measurement by temporal analysis of projected fringe patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 226-234.
- [3] TAY C J. New method for measuring dynamic response of small components by fringe projection[J]. Optical Engineering, 2003, 42(6): 1715.
- [4] MITCHELL A. Optical modal analysis using white-light projected fringes[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(3): 250-258.
- [5] 陈露, 王效惠, 李雪, 等. 基于条纹投影的振动扬声器形变测量[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(1): 22-27.
CHEN Lu, WANG Xiaohui, LI Xue, et al. Deformation

- measurement of a vibrating speaker based on fringe projection[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(1): 22-27.
- [6] FUKUDA Y, FENG M Q, NARITA Y, et al. Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm[J]. Sensors Journal, IEEE, 2013, 13(12): 4725-4732.
- [7] BUSCA G, CIGADA A, MAZZOLENI P, et al. Vibration monitoring of multiple bridge points by means of a unique vision-based measuring system[J]. Experimental Mechanics, 2014, 54(2): 255-271.
- [8] 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.
- CHEN Su, CHEN Guoxing, HAN Xiaojian, et al. Development of vision-based displacement test method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(18): 73-78, 99.
- [9] DOIGNON C, KNITTEL D, MAURICE X. A vision-based technique for edge displacement and vibration estimations of a moving flexible web[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2008, 57(8): 1605-1613.
- [10] FENG M, FUKUDA Y, FENG D, et al. Nontarget Vision sensor for remote measurement of bridge dynamic Response[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20: 1-12.
- [11] KHUC T, CATBAS F N. Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(1): 1-17.
- [12] 季云峰. 无目标计算机视觉技术在斜拉索振动测试中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(20): 184-188, 202.
- JI Yunfeng. Application of non-target computer-vision-based technique in stay-cable vibration measurement [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(20): 184-188, 202.
- [13] PAN Bing, QIAN Kemao, XIE Huimin, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(6): 1-17.
- [14] FAZZINI M, MISTOU S, DALVERNY O, et al. Study of image characteristics on digital image correlation error assessment[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(3): 335-339.
- [15] YUAN Yuan, HUANG Jianyong, FANG Jing, et al. A self-adaptive sampling digital image correlation algorithm for accurate displacement measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65(1): 57-63.
- [16] HELFRICK M N, NIEZRECKI C, AVITABILE P, et al. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(3): 917-927.
- [17] 陈忠, 陈教豆. 基于双目立体视觉与数字散斑图像相关的全场振动测量[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 121-126.
- CHEN Zhong, CHEN Jiaodou. Full-field vibration measurement based on binocular stereo vision and digital speckle image correlation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 121-126.
- [18] 歹英杰, 汪伟, 邓士杰, 等. 基于立体机器视觉的动目标空间位姿测试研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 188-194, 212.
- DAI Yingjie, WANG Wei, DENG Shijie, et al. Position and posture measurement of dynamic target based on stereo machine vision[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 188-194, 212.
- [19] ZHONG Shuncong, SHEN Hao, SHEN Yaochun. Real-time monitoring of structural vibration using spectral-domain optical coherence tomography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(1): 127-131.
- [20] ZHONG Jianfeng, ZHONG Shuncong, ZHANG Qiukun. Two-dimensional optical coherence vibration tomography for low-frequency vibration measurement and response-only modal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 79: 65-71.
- [21] ZHONG Jianfeng, ZHONG Shuncong, ZHANG Qiukun, et al. Vision-based measurement system for structural vibration monitoring using non-projection quasi-interferogram fringe density enhanced by spectrum correction method[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(1): 1-12.
- [22] ZHONG Jianfeng, ZHONG Shuncong, ZHANG Qiukun. Quasi-OCVT technique for response-only experimental modal analysis of beam-like structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(11): 1-10.
- [23] ZHONG Shuncong, ZHONG Jianfeng, ZHANG Qiukun, 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.
- [24] 谢明, 丁康. 频谱分析的校正方法[J]. 振动工程学报, 1994, 7(2): 172-180.
- XIE Ming, DING Kang. Correction method for spectrum

analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 1994, 7(2): 172-180.

作者简介：钟剑锋，男，1988 年出生，博士，讲师。主要研究方向为机电系统状态监测与智能诊断技术研究。

E-mail: zhongjianfeng@fzu.edu.cn

钟舜聪(通信作者)，男，1976 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为结构健康监测和设备故障诊断、无损检测和定量评价、光学精密诊断仪器和太赫兹技术等。

E-mail: sczhong@fzu.edu.cn

彭志科，男，1974 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为非线性振动理论及方法、振动信号分析、设备故障诊断等。

E-mail: z.peng@sjtu.edu.cn