[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.06.011

基于图像边缘与Hough变换的振动位移测量方法

郭　强[1]，许　涛[1,2]，李建平[1]，陈玉立[1]，高　琛[1]

（1.西安工程大学 机电工程学院，陕西 西安　710600；
2..西安工程大学 西安市现代智能纺织装备重点实验室，陕西 西安　710049）

摘　要：为了解决振动位移测量场合受限于传感器的安装空间，以及其本身质量对测量精度的影响，课题组提出了一种基于视频图像的振动测量方法，建立了图像边缘检测结果与目标物体位移之间的联系。由于使用经典Canny算法进行图像测量时，其图像边缘会出现不连续或虚假的情况，因此采用图像灰度与Hough变换相结合的方法，提高其测量精度。为验证该方法的有效性，搭建了箱体模型（目标物体）进行振动实验；并将经典Canny算法得出的结果及文中提出的视频图像测量的结果与传感器测得结果进行比较。实验结果表明，提出的方法相比使用经典Canny算法进行图像测量时精度提高了大约12%，且具有测量简单和测量范围灵活等优点。该方法为测量环境受限的场地提供了一种新的思路。

关　键　词：振动测量；图像灰度矩；边缘检测；Hough变换

中图分类号：TH113.1；TP391.411　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005-2895(2023)06-0076-06

Vibration Displacement Measurement Method Based on Image Edge and Hough Transform

GUO Qiang[1], XU Tao[1,2], LI Jianping[1], CHEN Yuli[1], GAO Chen[1]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi′an Polytechnic University, Xi′an 710600, China;
2. Xi′an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi′an Polytechnic University, Xi′an 710049, China)

Abstract: In order to solve the problem of vibration displacement measurement being limited by the installation space of sensors, and reduce the impact of sensor quality on measurement accuracy, a vibration measurement method based on video image was proposed, and the relation between image edge detection results and target object displacement was established. Due to the presence of discontinuity or falsehood in image edges by using the classic Canny algorithm for image measurement, a method of combining image gray level and Hough transform was adopted to improve the measurement accuracy. In order to verify the effectiveness of this method, a vibration experiment based on a vibration test bench box was designed. And the results obtained from the classic Canny algorithm and video image measurement results proposed in the article were compared with the results measured by sensors. The experimental results show that the proposed method improves the accuracy of image measurement by approximately 12% compared to using the classic Canny algorithm. The proposed method has the advantages of simple measurement and flexible measurement range, and provides a new way to measure the site with limited environment.

Keywords: vibration measurement; image gray moment; edge detection; Hough transform

收稿日期：2023-04-21；**修回日期**：2023-08-30

基金项目：广东省精密齿轮柔性制造装备技术企业重点实验室2022年度开放基金（2021B1212050012-05）；陕西省科技厅自然科学基金面上项目（2019JM-417）。

第一作者简介：郭强（1996），男，四川遂宁人，硕士研究生，主要研究方向为基于机器视觉的振动测量。E-mail：1972831300@qq.com

振动测量对设备的健康监测和结构优化十分重要。通过对设备进行振动测量,能够监测系统的运行情况,并进行故障诊断。随着技术的进步,振动测量分析已经成为工程领域不可或缺的一部分[1-2]。振动的测量一般主要分为接触式测量和非接触式测量[3]。常见的接触式测量会在一定程度上改变结构自身的力学性能,影响测量的精度。非接触式测量如激光测振仪,虽然可以避免接触式测量的一些缺点,但是其操作复杂、设备昂贵[4]。

以相机和机器视觉相结合的技术,正逐渐成为一种新型的振动测量方法[5-9]。该方法根据提取的目标特征选择合适的图像相关算法,获得视频中给定目标的位置信息,并通过初始位置与最终位置之间的相对偏移获得图像序列中结构的位移信息。然而,大多数视觉测量方法在目标识别和位移相关方面存在理论和技术上的不足,许多学者就这种测量系统的应用范围和关键技术展开了深入的探讨。文献[10-11]的作者证明了相机的空间分辨率可以有效地帮助我们快速准确地获取复杂结构的动态力学特性,但图像处理方法的精度会对使用相机测量物体振动的结果造成影响。文献[12-13]的作者证明了图像的边缘检测技术和目标对象的内容会影响物体振动测量时信息获取的完整性。为了使振动信息的获取更加精准,需要开发出适当的图像处理技术,特别是在图像边缘检测对视频图像处理方面的技术。图像边缘检测通常是通过 Canny 算子、Sobel 算子以及 Roberts 算子来实现,但是环境噪声会对检测结果造成影响。为了减少噪声对边缘检测的不利影响,许多学者采用了高斯滤波和均值滤波等技术,以期达到更好的结果。当图像中包含不同类型噪声时,文献[14]的作者通过对 Sobel 算子的边缘检测技术进行改进,提高了提取图像边缘信息的精度。当采集的图像分辨率受限,边缘出现不连续时,文献[15-16]的作者通过对 Canny 算子边缘检测技术进行相应改进,来提高图像边缘准确性和可靠性。

为了能够改善噪声和图像边缘检测不清晰对图像处理时精度的影响,课题组提出了基于图像灰度矩的亚像素边缘检测与 Hough 变换相结合的算法来测量振动,并通过搭建的箱体模型(目标物体)进行振动实验,验证课题组提出方法的有效性。

1　位移测量方法设计

图像边缘是图像信号中最基本的特征信号之一。图像边缘是图像分析的基础,也是计算机视觉目标分析的重点。在使用相机作为视觉传感器拍摄视频,对物体的振动进行测量时,外界的光照、噪声等不确定因素会对测量过程中边缘提取产生干扰,从而影响测量精度。为了减少这些噪声和边缘检测不清晰带来的误差,提出了一种改进的振动测量方法。首先对图像进行预处理,提取感兴趣区域(region of interest, ROI)以降低计算量,提高计算效率;其次采用基于灰度矩的亚像素边缘检测算法,对感兴趣区域的目标对象进行边缘位置的确定;然后通过 Hough 变换算法提取边缘图像的中心点坐标,通过每帧图像之间中心点位置的变化,计算得出目标物体像素位移;最后通过比例因子算法,计算出真实位移。

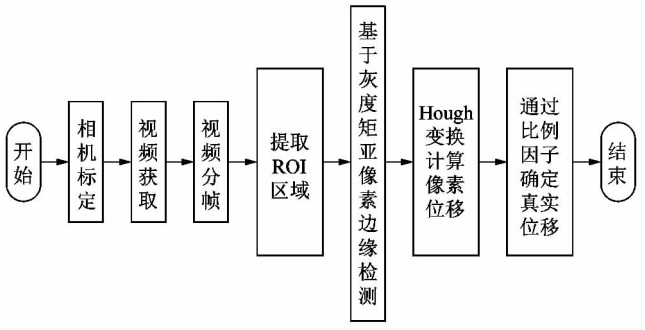


图 1　视频测量的流程

Figure 1　Flow of video measurement

1.1　相机标定

通过相机标定,建立起二维图像与三维现实世界之间的联系,从而准确地计算出实际的位移。常用方法有 3 种:比例因子转换计算法、全投影矩阵转换法和平面单应性矩阵转换法[17]56。当相机拍摄平面的轴近似垂直于被测物体表平面时,则其径向失真可近似忽略不计,此时真实世界物体实际尺寸与图像世界与之对应的图像尺寸比值即计算的比例因子。

Dong 等[17]63提出可使用径向畸变忽略不计的变焦镜头,以此来降低实际应用中繁琐的相机校准工作。课题组采用的试验设备高速相机自带校准功能,且拍摄时拍摄角度满足径向畸变忽略定律,因此可采用比例因子算法,计算得出真实振动位移。

1.2 基于灰度矩的亚像素边缘检测

采用灰度矩[18]作为基础的亚像素边缘检测算法，主要是根据真实图像的边缘分布与图像理想阶跃模型的灰度矩一致原理来精准地识别出边缘的位置。图 2 所示为图像二维理想边缘模型，它是由灰度值为 h_1 和 h_2 的一些像素点构成的。它的归一化模型是由边缘两侧的灰度值 h_1 和 h_2、边缘位置 ρ 和边缘方向 θ 共 4 个参数共同决定，它们可以表示为：

$$E(x,y,\rho,\theta)=\begin{cases}h_1, x\cos\theta+y\sin\theta\leqslant\rho;\\ h_2, x\cos\theta+y\sin\theta>\rho。\end{cases} \tag{1}$$

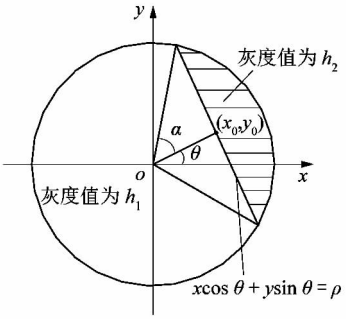


图 2 二维理想边缘模型

Figure 2 Two-dimensional ideal edge model

假设 ω_1 和 ω_2 分别是 h_1 和 h_2 的图像灰度值像素点与整个图像的边缘像素点总数比值，并且 $\omega_1+\omega_2=1$。则前 3 阶的灰度矩为：

$$\overline{m}_k=h_1^k\omega_1+h_2^k\omega_2, k=1,2,3。 \tag{2}$$

因此，求前 3 阶的灰度矩等同于计算单位圆内的每个像素点灰度值的加权和，即：

$$\overline{m}_k=\sum_{j=1}^{N}\omega_i G_{j,k}。 \tag{3}$$

式中：ω_i 为第 i 个像素点灰度值对应的权值，$G_{j,k}$ 为单位圆中第 j 个像素点的 k 阶灰度值，N 代表加权数目。

所以可计算得到边缘的位置 ρ 和边缘的方向 θ 分别为：

$$\rho=\cos\alpha; \tag{4}$$

$$\sin\theta=\frac{y_0}{\sqrt{x_0^2+y_0^2}}; \tag{5}$$

$$\cos\theta=\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2+y_0^2}}。 \tag{6}$$

式中：x_0，y_0 为单位圆的灰度重心坐标。

通过计算得出归一化模型的 4 个参数以后，则二维边缘亚像素坐标 (x_s,y_s) 的计算公式为：

$$\begin{bmatrix}x_s\\ y_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x\\ y\end{bmatrix}+\frac{N}{2}\cdot\rho\begin{bmatrix}\cos\theta\\ \sin\theta\end{bmatrix}。 \tag{7}$$

1.3 Hough 变换圆检测基本原理

Hough 变换圆检测[19]基本原理：通过将二维图像中的圆转化为一个确定半径和圆心坐标的三维空间点，来完成二者之间的映射。图像坐标空间中圆心坐标为 (a,b)，半径为 r，其方程如下：

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2。 \tag{8}$$

当图像空间 $[x,y]^T$ 的标靶圆上任意点转换到参数空间 $[a,b,r]^T$ 时，其变换过程为：

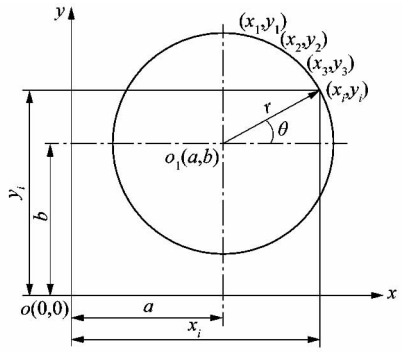
$$\left.\begin{aligned}a&=x-r*\cos\theta;\\ b&=y-r*\sin\theta;\\ r&=r_0。\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

式中：$0<r_0\leqslant r$，x 和 y 分别为实际图像空间中的点，a，b 和 r 则分别为点在参数空间中的坐标，极坐标参数 r 和 θ 则可以用来描述图像空间中任意点的位置。

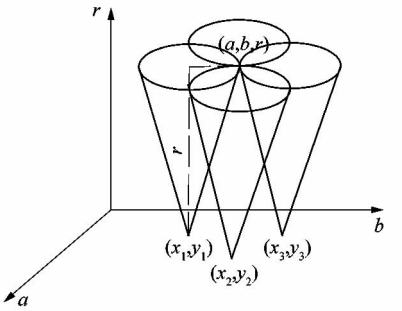
通过式(9)，可将在图像空间圆上的点映射到相应的参数空间 $[a,b,r]^T$，转化为在参数空间的三维锥面。Hough 变换圆检测的基本原理如图 3 所示。由图 3(b)可得：在图像空间圆上的点受限于此圆的圆心和半径，因此在参数空间对应的三维锥面必定相交于一点，公共交点的坐标为图像空间圆对应的圆心坐标 (a,b) 和其半径的长度 r。

2 振动测量系统组成

基于图像边缘的振动测量系统如图 4 所示。被测目标物体与振动实验台连接，为了测量物体上某个点的振动，将圆形人工标签贴于待测点；振动台下方与地板连接处安装了减振塑胶垫，能够降低相机与目标对象耦合振动产生的误差；为了减少光照不匀导致视频采集产生的根源误差，使用稳定可调的光源；使用高速相机 CCD 作为视频采集的设备，可以获得更多的视频图像信息，便于分析实验方法的可靠性；用三脚支架固定相机并调整使其光轴近似垂直于被测物表面；通过水平移动相机支架，控制相机与拍摄物体之间的距离，来确保视频采集时被测物体是完整清晰的；为确保相机的中心区域与被测物体的中心相重合，需要调整支



(a) 图像空间



(b) 参数空间

图 3　Hough 变换圆检测的基本原理

Figure 3　Basic principle of Hough transform circle detection

架的垂直高度;上位机通过网线与相机连接,利用软件控制相机进行视频采集,然后根据需求保存视频图片,进而完成数据的采集。

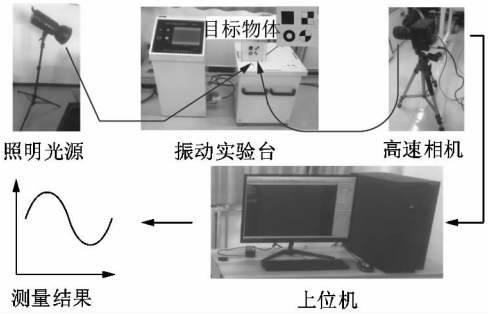
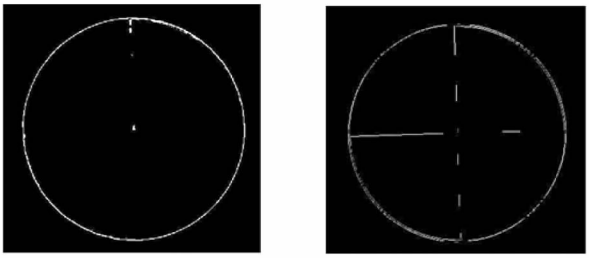


图 4　振动测量系统

Figure 4　Vibration measurement system

在实际工程中,若测量场合受制于传感器的安装空间时,本文中提供的方法能够作为替代,通过对相机采集的视频进行处理,测量目标物体的振动。在传统的振动测量方式中,直接测量模式需要直接将传感器固定于被测物体的表面进行测量;在相对测量模式中,需要将传感器安装在参考物体上。而通过相机进行振动测量,是一种经典的相对测量方式。但在测量时必须保证相机的平稳度,这样才能够确保测量结果的可靠性。此外,还需要对被测物体进行多次测量,通过分析其测量结果,求取平均值,减少单次试验误差。

课题组分别使用基于灰度矩的亚像素边缘检测和传统图像测量法中基于经典 Canny 算法的相关方法对目标物体进行边缘检测,结果如图 5 所示。由图 5 可得,相对于经典的 Canny 算子边缘检测,课题组所使用的方法能够更为精准地提取目标边界,对于噪声的干扰具有更好的效果,后期使用 Hough 变换处理时能够获得更高的精度。



(a) 基于灰度矩的亚像素边缘检测　(b) 经典Canny算子边缘检测

图 5　目标对象边缘检测结果

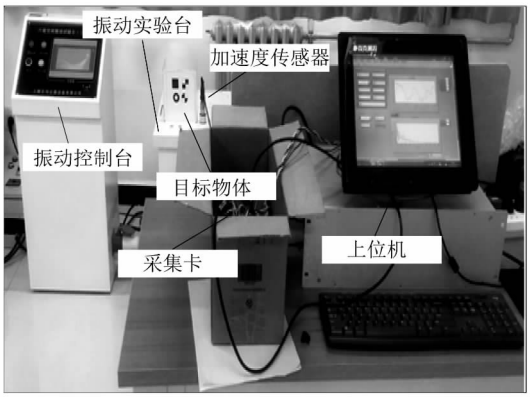
Figure 5　Edge detection result of target object

3　实验与测量结果分析

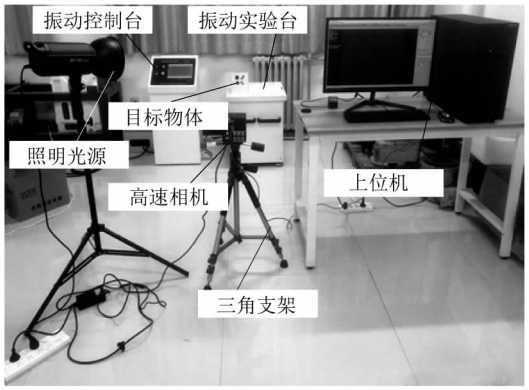
为验证课题组所提出方法的有效性,并进一步改进提升,课题组采用传统振动测量方法对目标物体上待测点的振动进行测量,并将其结果与文中方法测得结果进行比较,验证其有效性。同时将该方法与传统图像测量法中基于经典 Canny 算法计算结果进行对比分析,得出其性能的提升效率。目标物体通过螺母、垫圈与实验台相连,保证其不产生耦合振动。在实验进行时,将加速度传感器(AC102-1A)贴于与目标物体同一平面的振动实验台表面,通过采集卡(NI 9223)传入上位机并通过 LabVIEW 程序实现信号采集和存储,从而分析获得振动平台的振动位移及频率信息。最后经过转换,可得到目标物体的振动位移信息。

使用课题组提出的方法,首先需要保证实验中照明充足,而相机与振动台振动耦合可忽略不计,然后通过设置实验台的振动频率和振动方向,使实验台上的目标物体产生振动。再将相机(FASTCAM UX100)固定安装于三脚架上,调整相机的拍摄角度,使镜头与目

标物体相平齐,且能够清晰地捕捉目标物体画面,并进行拍摄,然后存储拍摄的视频。最后通过网线接口 RJ-45 将数据传输上位机,并采用文中的方法与使用经典 Canny 算法对存储视频进行处理分析,获得目标物体的振动相关信息。实验现场如图 6 所示。



(a) 传统测量



(b) 视频测量

图 6 实验现场

Figure 6 Experimental site

整个测量过程发现,振动实验台本身的振动对相机拍摄时产生的影响可忽略不计。本次实验中,实验设备性能参数如表 1 所示。

通过积分,目标物体的加速度信号可转换成位移信号,且采集数据越多,其积分后的结果越准确。为提升实验结果的精度,将相机的帧率设置为 2 000 帧/s,加速度采样频率设置为 10 kHz,本次实验在 30 Hz 和 40 Hz 的激励下进行。使用经典 Canny 边缘检测与 Hough 结合和文中提出的基于灰度矩的边缘检测与 Hough 相结合算法分别对多次拍摄的视频图像进行分析与计算,并且将结果与传统振动测量的结果进行对比,得到结果如图 7 和图 8 所示。

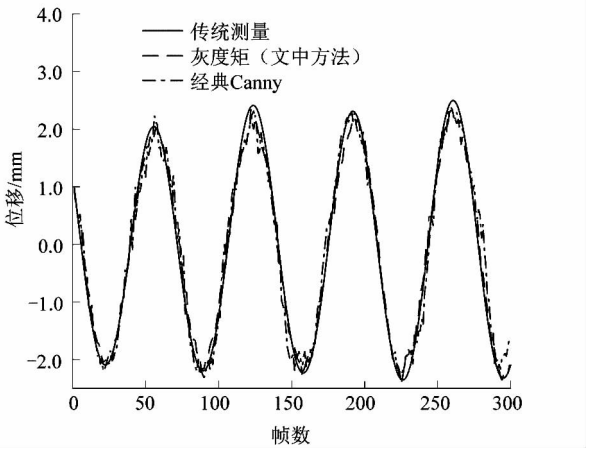


图 7 30 Hz 垂直激励下的位移

Figure 7 Displacement under 30 Hz vertical excitation

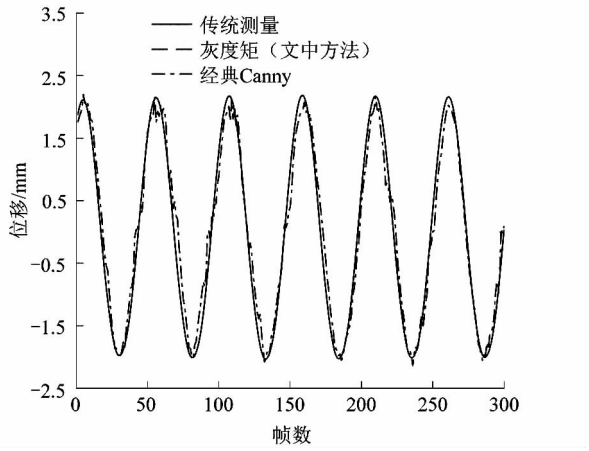


图 8 40 Hz 垂直激励下的振动

Figure 8 Displacement under 40 Hz vertical excitation

表 1 设备性能参数

Table 1 Equipment performance parameters

设备名称	频率/Hz	振幅/mm	功率/W	分辨率/像素	帧率/(帧·s^{-1})	数字接口	灵敏度/(m·s^{-2})
试验台	1 ~ 600	0 ~ 5					
光源			1 ~ 160				
高速相机				1 280 × 1 024	1 ~ 4 000	千兆以太网	
加速度传器							980

由图7和图8可知,基于视频图像的振动某些地方会出现较多的误差,其原因可能是实验过程中振动台本身运行时产生的噪声以及环境中含有噪声的叠加。通过比较3者振动位移测量结果,课题组提出的基于灰度矩的算法与 Hough 变换结合,比经典的 Canny 算法与 Hough 变换结合更接近传统测量方法的测量结果。为体现课题组提出方法的优势,将通过图像处理的结果与传统测量结果之间的相对误差$|e_r|$作为主要指标进行评价:

$$|e_r| = \left|\frac{w_p - w_t}{w_t}\right|。\tag{10}$$

式中:w_t为传统测量方法得到的计算结果;w_p是根据图像处理分析得到的振动位移。

根据图7与图8所示的结果和式(10)可知,文中方法得出的$|e_r|$比传统图像测量中基于经典 Canny 算子相关方法得出的结果精度提高了大约12%。由此可见,课题组提出的改进方法具有更高的计算精度。

4　结语

针对传统振动测量方法不便捷的问题,课题组提出了基于图像灰度矩边缘与 Hough 变换相结合的测量方法。在此基础上,该方法通过相机替代传感器,实现对目标物体的振动测量,并通过振动台实验对本文研究方法的精确性和可靠性做出了验证。实验结果表明,课题组提出的方法相比传统图像测量中基于经典 Canny 算子的相关方法计算的精度提高了约12%,具有更好的精确性。总的来说,该方法具有操作便捷、使用范围灵活等特点,可为振动测量提供更多的选择。

参考文献:

[1] PENG C, ZHU M T, WANG K, et al. A two-stage synchronous vibration control for magnetically suspended rotor system in the full speed range[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 481.

[2] DREIER F, GUNTHER P, PFISTER T, et al. Interferometric sensor system for blade vibration measurements in turbomachine applications [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(8): 2297 – 2302.

[3] BAQERSAD J, POOZESH P, NIEZRECKI C, et al. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics: a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86: 17 – 34.

[4] POOZESH P, BAQERSAD J, NIEZRECKI C, et al. Large-area photogrammetry based testing of wind turbine blades[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86: 98 – 115.

[5] ZHONG F Q, QUAN C G. A single color camera stereo vision system [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 18(4): 1474 – 1482.

[6] LAVATELLI A, ZAPPA E. Modeling uncertainty for a vision system applied to vibration measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(8): 1818 – 1826.

[7] FENG D M, FENG M Q. Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 88: 199 – 211.

[8] LYDON D, LYDON M, DEL RINCON J M, et al. Development and field testing of a time-synchronized system for multi-point displacement calculation using low-cost wireless vision-based sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(23): 9744 – 9754.

[9] 肖文韬,李登峰. 结合图像增强的含噪齿轮图像边缘检测研究[J]. 机电工程,2021,38(7):918 – 922.

[10] YU L P, PAN B. Single-camera high-speed stereo-digital image correlation for full-field vibration measurement [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 94: 374 – 383.

[11] 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.

[12] 高亚东,刘荣明,王华明. 采用仿射变换的桨叶变形摄像测量 Newton-Raphson 算法[J]. 振动、测试与诊断,2013,33(3): 432 – 436.

[13] PAN B, TIAN L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19082 – 19093.

[14] 沈德海,张龙昌,鄂旭. 一种基于 Sobel 算子梯度增强的边缘检测算法[J]. 电子设计工程,2015,23(10): 162 – 165.

[15] ZHANG Y, BIEGING E, TSUI H, et al. Efficient and effective extraction of vocal fold vibratory patterns from high-speed digital imaging[J]. Journal of Voice, 2010, 24(1): 21 – 29.

[16] 段振云,单紫薇,赵文辉,等. 数字图像边缘的快速提取算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2017(12): 17 – 19.

[17] DONG C Z, CELIK O, CATBAS F N, et al. Structural displacement monitoring using deep learning-based full field optical flow methods [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(1): 51 – 71.

[18] 张永宏,胡德金,张凯,等. 基于灰度矩的 CCD 图像亚像素边缘检测算法研究[J]. 光学技术,2004,30(6): 693 – 698.

[19] HOUGH P V C. Method and means for recognizing complex patterns: US19600017715[P]. 1962-12-18.