

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.11.011

基于 Canny 算子和 FFT 的非接触图像振动测量研究*

李 理¹, 杨晓翔^{1,2*}, 刘键涛¹, 郭金泉¹

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116;
2. 泉州师范学院 应用科技(航海)学院, 福建 泉州 362000)

摘要:针对接触式振动测量过程中需要接触被测结构且易受外界影响,双目视觉非接触式振动测量过程中操作步骤较复杂的问题,提出了一种基于 Canny 算子和 FFT 的非接触图像振动测量方法。首先通过相机采集被测结构的运动图像,并进行了灰度化处理,利用 Canny 算子提取了图像的边缘特征;然后选取了图像系列像素点,用 Matlab 软件跟踪提取了其运动信息,进行了 FFT 分析,得到了该边缘像素点的振动频率,即被测结构的振动频率;最后进行了简支梁正弦激励稳态响应实验与悬臂梁冲击响应测试实验,并将实验结果与加速度传感器测量结果进行了比较。研究表明:在 10 Hz ~ 35 Hz 简支梁正弦激励下测得的振动频率与传感器测量结果相对误差小于 1.1%,悬臂梁冲击响应测试下测得的振动频率与传感器测量结果相对误差小于 0.7%,该方法具有实际应用的可行性。

关键词:非接触式测量;振动;Canny 算子;快速傅里叶变换

中图分类号:TH73

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)11-1183-05

Non-contact image vibration measurement based on Canny operator and FFT

LI Li¹, YANG Xiao-xiang^{1,2*}, LIU Jian-tao¹, GUO Jin-quan¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
2. Applied Technology (Navigation) College, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the contact vibration measurement process needs to contact the structure under test and is susceptible to external influences, and the operation steps in the binocular vision non-contact vibration measurement process is more complicated, a non-contact image vibration based on Canny operator and FFT was proposed. Firstly, the moving image of the structure under test was acquired by the camera and grayscaled. The edge feature of the image was extracted by Canny operator. Then the pixel points of the image series were selected, and the motion information was extracted and traced by Matlab software. The edge pixel was obtained by FFT analysis. The vibration frequency of the point was the vibration frequency of the structure to be tested. Finally, the steady-state response experiment of the sinusoidal excitation of the simply supported beam and the impact response test of the cantilever beam were carried out, and the experimental measurement results were compared with the acceleration sensor measurement results. The results indicate that the relative error between the vibration frequency measured by the sinusoidal excitation of the 10 Hz to 35 Hz beam and the sensor measurement is less than 1.1%, and the relative error between the vibration frequency measured by the cantilever beam impact response and the sensor measurement is less than 0.7%, which has practical application feasibility.

Key words: non-contact measurement; vibration; Canny operator; fast Fourier transform(FFT)

收稿日期:2019-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11372074)

作者简介:李理(1995-),男,湖南娄底人,硕士研究生,主要从事非接触式振动测量方面的研究。E-mail:LL160630@163.com

通信联系人:杨晓翔,男,教授,博士生导师。E-mail:yangxx@fzu.edu.cn

0 引 言

振动测量在检测机械结构性能、生物医学和优化设计等各种工程研究领域应用非常广泛。测量的物理参数一般为：位移、速度、加速度和应力等。常用的传感器有位移传感器、速度传感器、加速度传感器和电涡流传感器等^[1-3]。

振动测量方式一般分为接触式测量与非接触式测量。接触式测量是人为将传感器固定在被测物体上进行振动测量，安装过程较复杂，人为因素对结果容易造成影响，并在测量过程中有很多限制。如被测结构质量应不小于传感器重量的 10 倍，否则需要进行特殊的安装方式，而且不能测量不易接触到的物体等^[4-5]。

因此，由于接触式测量的一系列问题，非接触式测量开始进入人们的视野，非接触式测量一般是指不直接接触物体表面，通过机械、光电等方法获得采集信息，与接触式测量相比，具有采集速度快、采集过程中人为因素对结构影响较小和测量不可接触物体的优点。如 YEH 和 CUMMINS^[6] 发明的激光多普勒振动测试技术 (LDV)；KEHOE^[7] 将其应用于被测结构的模态分析；MAIO^[8] 在改进的基础上应用于直升机尾椎的振动测试等，但其应用受到测试模型大小以及测试成本的限制。近年来兴起的机器视觉振动测量，通过采用双目相机从不同的角度与位置获取了物体图像，得到了结构的三维位置的变换信息，从而实现了振动测量。如 NAJAFI^[9] 基于立体视觉技术对大型风洞进行了运行模态分析；SABINO^[10] 基于两对双目立体系统，实现了对风力涡轮机叶片的振动频域测量等，但双目视觉测量过程中涉及相机标定、立体校正、特征点匹配和三维重建等专业性较强的步骤，并不适合所有测量者。

因此，本文基于传统接触式振动测量、多普勒激光测振和双目视觉振动测量中存在的问题，提出一种基于 Canny 算子和 FFT 的非接触图像振动测量方法。

1 快速傅里叶变换 FFT 的基本原理

在振动信号处理与数据分析中，FFT 具有非常重要的地位，本研究即通过对边缘像素点的时程信号进行快速傅里叶变换，进而分析得到其振动信号。

快速傅里叶变换 (FFT) 是 Cooley 和 Tukey 基于 W_N 因子周期性与对称性，构造的针对离散傅里叶变换

(DFT) 的快速算法^[11]。

在对图像进行数字信号处理时，结合二维连续函数傅里叶变换，将图像视为两个独立变量 x, y 的函数 $f(x, y)$ ，且满足 $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x, y)| dx dy < \infty$ ，定义傅里叶变换为：

$$F(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(u_x + v_y)} dx dy < \infty \quad (1)$$

式中： μ — x 轴频率变量； ν — y 轴频率变量。

并定义：

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{-j2\pi(u_x + v_y)} du dv \quad (2)$$

式中： $f(x, y)$ —傅里叶逆变换。

傅里叶变换相对应的振幅谱、相位谱以及能量谱分别为：

$$|F(u, v)| = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\varphi(u, v) = \arctan \left[\frac{I(u, v)}{R(u, v)} \right] \quad (4)$$

$$E(u, v) = R^2(u, v) + I^2(u, v) \quad (5)$$

式中： $R(u, v)$ —傅里叶变换实部； $I(u, v)$ —傅里叶变换虚部； $\varphi(u, v)$ —傅里叶变换相位谱； $E(u, v)$ —傅里叶变换功率谱。

对 $f(x, y)$ 进行抽样得到二维离散信号 $f(m, n)$ ，其中， $0 \leq m \leq M - 1, 0 \leq n \leq N - 1$ ，从而得到二维离散傅里叶变换 (DCT) 与其逆变换分别为：

$$F(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \exp \left[-j2\pi \left(\frac{mk}{M} + \frac{nl}{N} \right) \right] \quad (6)$$

$$f(m, n) = \left(\frac{1}{MN} \right) \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} F(k, l) \exp \left[j2\pi \left(\frac{mk}{M} + \frac{nl}{N} \right) \right] \quad (7)$$

通过对 $f(x, y)$ 的频谱 $F(x, y)$ 进行抽样，则得到其离散傅里叶变换 (DFT)。离散傅里叶变换的过程如下：

$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad n = 0, \dots, N - 1 \quad (8)$$

式中： x_n —离散傅里叶变换； N —数据长度。

根据式 (8) 可以得出 X_{N+k} 为：

$$X_{N+k} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{j2\pi(N+k)n}{N}} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi n} e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (9)$$

利用其对称性，从 DFT 的定义化简可得：

$$X_k = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2m} e^{-\frac{j4\pi km}{N}} + e^{-\frac{j2\pi k}{N}} \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2m+1} e^{-\frac{j4\pi km}{N}} \quad (10)$$

由上述公式 (8 ~ 10) 可以得出：上述这种利用

DFT 对称性的方法,使算法时间复杂度由原本的 $O(N^2)$ 变为 $O(N \log N)$,这种快速算法即是快速傅里叶变换(FFT)。

本研究通过对提取到的边缘特征,利用 Matlab 自带 FFT 函数进行快速傅里叶变换,将提取到的时程信号转换为频域信号,可得到结构的振动频率组成。

2 Canny 边缘检测算子的基本原理

Canny 边缘检测算子是 CANNY J^[12] 于 1986 年提出的一个多级边缘检测算法,得到的边缘像素点则是通过 Canny 检测算法所提取出来的。Canny 算子通常将图像进行灰度化,然后用高斯噪声去除模糊,降低伪边缘的识别。

高斯核如下:

$$K(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

式中: σ —标准差; x^2 —邻域内其他像素的距离; y^2 —邻域内中心像素的距离。

梯度幅值和方向分别为:

$$G(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (12)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left[\frac{G_x(x, y)}{G_y(x, y)}\right] \quad (13)$$

式中: $G_x(x, y)$ — x 方向的一阶偏导数; $G_y(x, y)$ — y 方向的一阶偏导数; $G(x, y)$ —该像素点梯度幅值; $\theta(x, y)$ —该像素点梯度方向。

在求得的幅值图像中,可能存在多个较大的幅值,但实际的边缘点只有一个,因此,Canny 算法根据像素点的梯度方向采用 3×3 大小,8 个临近像素点或者邻域沿梯度方向进行差值运算,而后进行中心像素点与邻近两交点的像素幅值比较,若前者幅值大于后者幅值,则被视为边缘点,被保留;否则视为非边缘点,被排除。最后基于高阈值 Q_H 和低阈值 Q_L 的滞后阈值,对非极大值进行图像分割,若某像素点梯度阈值 $G(x, y) < Q_L$,则认为该像素为非边缘像素点被排除;若某像素点的梯度幅值 $G(x, y) > Q_H$,则认为该像素为边缘像素点被保留;若某像素点梯度阈值 $Q_L < G(x, y) < Q_H$,则寻找邻近梯度阈值大于 Q_H 的点为边缘像素点,其他为非边缘像素点。

本研究取高阈值 $Q_H = 1$,低阈值 $Q_L = 0.3$,同样,利用 Matlab 自带的 edge 函数进行 Canny 算子提取结构的边缘特征。

3 实验方案

本文进行简支梁正弦激励稳态响应实验和悬臂梁

冲击响应测试实验,通过与传感器所测结果进行比较,检验所提方法的可行性。

实验采集图像的相机为 MV-CA050-20UM 工业相机,镜头参数为 NIKKOR 50/1.8D,相机帧率为 100 fps;信号发生器为 RIGOL DG1022Z,传感器为 YD-81 压电式加速度传感器,通过 uTekL 数据采集与处理分析软件进行数据处理,采样率为 128 Hz。

为了提高实验结果的可靠性及减少计算量,利用图像采集软件选取的图像较清晰,将传感器与碳纤维板接触的部位作为感兴趣区域(ROI)。

3.1 简支梁正弦激励稳态响应实验

本研究通过信号发生器依次产生 10 Hz、15 Hz、20 Hz、25 Hz、30 Hz 和 35 Hz 的正弦稳态激励信号,通过激振器作用于碳纤维板。通过传感器采集碳纤维板的振动信号,同时使用相机采集碳纤维板的动态图像。实验过程中,相机帧率为 100 fps,数据采集时间为 18 s,增设附加光源,改善光照条件。为提高实验结果可靠性,只分析感兴趣区域。

简支梁正弦激励稳态响应实验系统如图 1 所示。

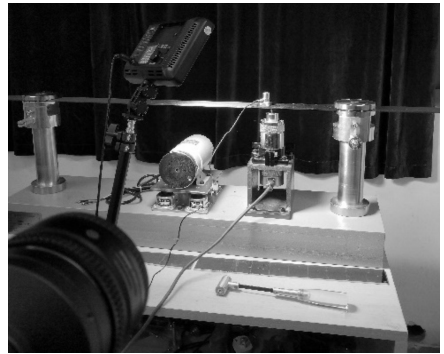


图 1 简支梁正弦激励稳态响应实验系统

3.2 悬臂梁冲击响应测试实验

本研究将变截面钢板、等截面钢板一端固定,制作成悬臂梁,在另一自由端使用冲击锤进行激振。实验过程跟简支梁正弦激励稳态响应实验过程类似。相机帧率为 100 fps,考虑到悬臂梁模型达到稳态时间较短,数据采集时间设为 8 s。

悬臂梁冲击响应测试实验系统如图 2 所示。

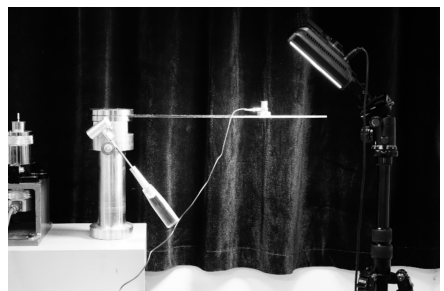


图 2 悬臂梁冲击响应测试实验系统

4 实验及结果分析

4.1 简支梁正弦激励稳态响应实验及结果分析

本研究以正弦稳态激励信号为 10 Hz 的实验结果进行分析。传感器测得的 10 Hz 稳态激励频谱图如图 3 所示。

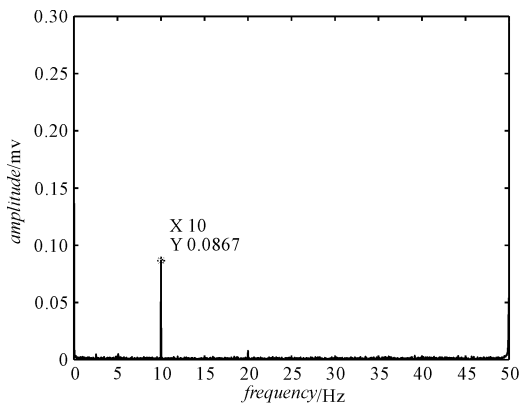


图 3 传感器测得的 10Hz 稳态激励频谱图

本研究通过选取序列像素点中的边缘像素点,利用 find 函数跟踪提取其位置变化时程信号,计算其振动频率组成,即所提所说的非接触振动测量方法。在 10 Hz ~ 25 Hz 感兴趣区域,选取相同的图像序列像素点,像素点序号为 [17, 20] ~ [17, 67]; 在 30 Hz 和 35 Hz 选取的像素点序号为 [17, 40] ~ [17, 100]。

Canny 算子提取的边缘特征如图 4 所示。

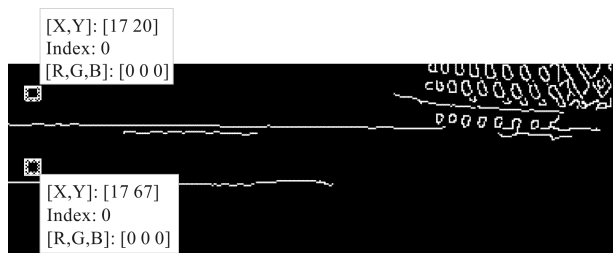


图 4 Canny 算子提取的边缘特征

所提方法测得的 10 Hz 稳态激励频谱图如图 5 所示。

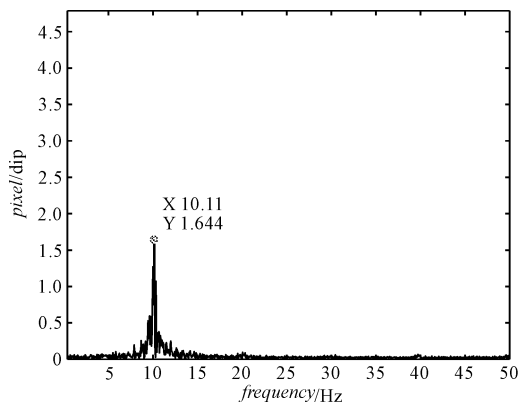


图 5 所提方法测得的 10Hz 稳态激励频谱图

传感器与所提方法测量结果对比表如表 1 所示。

表 1 传感器与所提方法测量结果对比表

激励信号 /Hz	传感器实测 /Hz	所提方法实测 /Hz	相对误差 /(%)
10	10	10.11	1.1
15	15	14.94	0.4
20	20	19.94	0.3
25	25	24.89	0.44
30	30	30.11	0.36
35	35	35.17	0.48

从表 1 中可以得出:

在上述实验条件下,传感器测量结果与所提方法所测量的结果误差范围不大于 1.1%, 满足一般结构的振动测量精度要求,具有可行性。

4.2 悬臂梁冲击响应测试实验及结果分析

本研究对变截面钢板、等截面钢板悬臂梁分别进行冲击激励测试实验。考虑到悬臂梁到达稳定状态时间以及冲击锤的作用时间较短,在冲击锤激励的同时先采集图像,进行传感器数据采集。

在数据处理中,图像采集的第 1 s 数据,即前 100 帧不进行计算,传感器采集的最后 1 s 数据不进行计算,即仅计算两者同步采集到的 7 s 数据。变截面悬臂梁序列像素点选取的序列像素点为 [520, 6] ~ [520, 95], 等截面钢板悬臂梁选取的序列像素点为 [477, 7] ~ [477, 67]。

Canny 算子提取的边缘特征如图 6 所示。

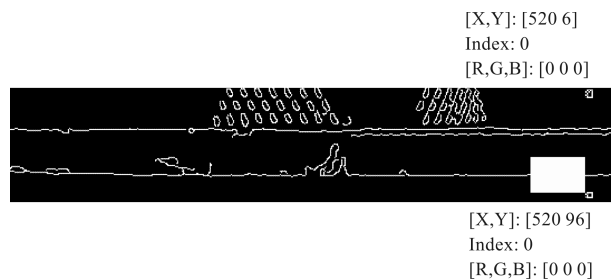


图 6 Canny 算子提取的边缘特征

传感器与所提方法测量结果对比表如表 2 所示。

表 2 传感器与所提方法测量结果对比表

悬臂梁类型	传感器实测 /Hz	所提方法实测 /Hz	相对误差 /(%)
变截面	21.97	22.13	0.7
等截面	18.69	18.63	0.3

从表 2 可以得出:

在上述实验条件下,传感器测量结果与所提方法所测量的结果误差范围小于 0.7%, 满足一般结构的振动测量精度要求,具有可行性与实用性。

对比图(4,6)提取的边缘特征可知:

冲击激励试验中提取的边缘较清晰,原因是相对于碳纤维板,钢板与背景有更好的色差。

5 结束语

本文提出了一种基于 Canny 算子和 FFT 的非接触图像振动测量方法。通过不同频率的简支梁正弦激励稳态响应实验和悬臂梁冲击响应测试实验,验证了所提方法的可行性与实用性,结论如下:

(1)在简支梁正弦激励稳态响应实验中传感器与所提方法测量结果相比较,相对误差小于 1.1%;在悬臂梁冲击响应测试实验中,相对误差小于 0.7%,说明使用该方法测量结构振动频率的可行性;

(2)在一些无法直接使用传统传感器测量的被测结构中,可以使用该方法进行测量,并使用附加光源,提高采集到的边缘特征以及测量结果的准确度;

(3)在测量过程中增大被测结构与测量背景的色彩对比度,可提高测量结果的可靠性。

参考文献 (References):

[1] LIU J T, YANG X X. Learning to see the vibration a neural network for vibration frequency prediction [J]. **Sensors**, 2018,18(8):25-30.

[2] KI T P, SANG H K, HEUNG S P, et al. The determination of bridge displacement using measured acceleration[J]. **Engineering Structures**,2004,27(3):371-378.

[3] ENGLERT C R, BABCOCK D D, HARLAND-ER J M. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): concept and experimental demonstration[J]. **Ap-**

plied Optics, 2007,46(29):7297-7307.

[4] MARK S, TORBEN R L. Piezoelectric Accelerometers and vibration preamplifiers: theory and application handbook [M]. Naerum: Bruel and Kjaer,1978.

[5] VICTOR W. Machinery vibration: measurement and analysis [M]. Beijing:McGraw-Hill Education,1991.

[6] YEH Y, CUMMINS H Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer [J]. **Applied Physics Letters**, 1964,4(10):176-178.

[7] KEHOE M W, SNYDER H T. Thermoelastic vibration test techniques [R]. California: NASA technical memorandum 101742,1991.

[8] MAIO D D, EWINS D J, MAIO D D, et al. Continuous scan, a method for performing modal testing using meaningful measurement parameters: part I [J]. **Mechanical Systems & Signal Processing**, 2011,25(25):3027-3042.

[9] NAJAFI N, PAULSEN U S. Operational modal analysis on a vault in a large wind tunnel using stereo vision technique [J]. **Energy**, 2017(125):405-416.

[10] SABINO D D, PEREIRA J A, POOZESH P. Digital image-stitching techniques applied to dynamic measurement of large structures [J]. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2018,40(4):236.

[11] COOLEY J W, TUKEY J W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series [J]. **Mathematics of Computation**, 1965,90(19):297-301.

[12] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**,1986,8(6):679-698.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

李 理,杨晓翔,刘键涛,等. 基于 Canny 算子和 FFT 的非接触图像振动测量研究[J]. 机电工程,2019,36(11):1183-1187.

LI Li, YANG Xiao-xiang, LIU Jian-tao, et al. Non-contact image vibration measurement based on Canny operator and FFT [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(11):1183-1187.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>