

基于亮度和相位光流的结构振动测量对比*

唐小洋¹, 谢培悦¹, 刘祚秋¹, 汪利¹, 焦柯², 王建强³

1. 中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107
2. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010
3. 广东安评科技有限公司, 广东 佛山 528248

摘要: 相位光流法首先通过小波滤波获得图像的局部相位信息, 再通过相位梯度与相位变化估计结构位移, 对光照变化和图像噪声都具有良好的鲁棒性, 且在测量范围方面也较传统亮度光流法有一定提升。针对图像噪声、光照变化设计了多组模拟实验, 在不同位移下对两种方法的测量误差进行了对比。结果表明, 相位光流法在超过1个像素位移、有噪声和光照变化的情况下均有更好的测量效果。最后, 用两种方法对模拟和实际的悬臂梁振动视频进行运动估计, 验证了两种方法在结构微小振动估计中的有效性以及相位光流法的优越性。

关键词: 图像位移估计; 亮度光流; 相位光流; 微小位移

中图分类号: O32 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)02-0112-08

Comparison of structural vibration measurement based on intensity-based and phase-based optical flow

TANG Xiaoyang¹, XIE Peiyue¹, LIU Zuochu¹, WANG Li¹, JIAO Ke², WANG Jianqiang³

1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China
2. Guangdong Architectural Design & Research Institute Company Limited, Guangzhou 510010, China
3. Guangdong Anping Technology Company Limited, Foshan 528248, China

Abstract: Phase-based optical flow method firstly obtains the local phase information of the image through wavelet filtering, and then estimates the displacement of structures with phase gradient and phase change. It has good robustness to illumination change and image noise, and has a certain improvement in the measurement range compared with the traditional intensity-based optical flow method. Several simulation experiments were designed for image noise and illumination change respectively. The measurement errors of the two methods were compared under different sizes of displacement. Those results show that the phase-based optical flow method has better measurement effect when there is more than 1 pixel displacement, noise and illumination change. Finally, two methods are used to estimate the motion of the simulated and actual cantilever beam vibration video, and the validity of the two methods and the superiority of phase-based optical flow method in the estimation of structural micro-vibration is verified.

Key words: image displacement estimation; intensity-based optical flow; phase-based optical flow; micro displacement

* 收稿日期: 2024-06-07 录用日期: 2024-08-27 网络首发日期: 2024-10-14

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2022B0101080001); 国家自然科学基金(11972380)

作者简介: 唐小洋(2000年生), 女; 研究方向: 结构振动测量与监测;

E-mail: tangxy39@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 汪利(1989年生), 男; 研究方向: 计算力学; E-mail: wangli75@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240193

结构振动测量是结构健康监测领域的重要一环(朱宏平, 2011; 聂滋森等, 2020; 陈信君等, 2023)。传统的接触式传感器(如加速度计、位移计等)虽具有高精度、高采样频率等特点, 但均存在布设困难(Feng et al., 2018)、采样点离散(Fan et al., 2011)、引入附加质量等缺陷。基于计算机视觉的非接触式测量方法(Pan, 2018; 周星源等, 2024; 单明广等, 2024)克服了接触式传感器的相关缺陷, 受到了学术界的广泛关注(李婉培等, 2024)。其中, 亮度光流法和相位光流法两种光学方法兼具效率与精度, 在结构微小振动测量领域具有显著优势。

光流是相机与目标之间的相对运动导致的亮度改变(裴巧娜, 2009)。亮度光流法(Lucas et al., 1981)基于结构运动前后亮度恒定的假设, 通过图像亮度场的空间梯度与帧间亮度差异计算结构的运动速度或位移。亮度光流法天然具有亚像素精度, 对测量区域没有严格的要求, 在小位移测量时的表现十分出色。然而, 对于帧间位移过大、光照变化明显等情况, 亮度光流法会凸显出其局限性。实际的振动测量难免出现目标瞬时位移过大、环境光照变化等情况, 这会导致亮度光流法给出错误的测量结果。

不少学者开辟并推广了从图像频域获取结构运动信息的思想。Fleet et al.(1990)首次提出通过计算时空带通视频的相位梯度来跟踪恒定的相位轮廓。随后, Barron et al.(1994)的实验结果证明了该方法的可靠性。Gautama et al.(2002)将上述技术运用到了光流场的估计当中。Chen et al.(2015)在运动放大(Wadhwa et al., 2013)的基础上运用基于局部相位的光流法来计算位移。Cha et al.(2017)将基于相位的光流法与无迹卡尔曼滤波结合, 降低了噪声水平。相位光流法的图像相位信息与光照强度无关, 故各图像帧的相位图在目标邻域内满足亮度恒定假设, 可克服测量过程中可能存在的光照变化问题。而且, 通过调整获取相位信息的核函数参数, 可改变相位光流法的理论测量范围, 获取亮度光流法难以测量的较大幅度的速度或位移信息。

因此, 本文针对具有直线边缘的结构振动测量问题, 对两种光流方法的测量范围、精度以及对光照、噪声的鲁棒性进行了对比。并开展了悬臂梁振动实验, 验证两种方法在微小振动测量中的有效性以及相位光流法的优越性。

1 亮度光流法

传统的亮度光流法通过计算图像亮度值的时空梯度获取全场光流估计, 需满足假设条件: 1) “小运动”假设, 即目标的位置不随时间剧烈变化, 在相邻图像帧间的位移较小; 2) 亮度恒定假设, 即同一目标运动过程中, 在不同图像帧的成像亮度不变。

考虑 t 时刻坐标 (x, y) 处的目标, 在经历时间 Δt 后, 发生平面平移 $(\Delta x, \Delta y)$ 。根据亮度恒定假设, 有

$$f(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = f(x, y, t), \quad (1)$$

其中 f 为图像亮度函数。在“小运动”假设下, 相邻的两帧图像中 Δx 、 Δy 、 Δt 均为小量, 因此可将式(1)等号左边在 (x, y, t) 处泰勒展开, 并忽略二阶及以上高阶项, 得

$$\frac{\partial f}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{\partial f}{\partial t} = 0.$$

记 x 方向速度 $u = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$, y 方向速度 $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t}$, 则光流约束方程为

$$f_x u + f_y v + f_t = 0, \quad (2)$$

其中 $f_x = \frac{\partial f}{\partial x}$, $f_y = \frac{\partial f}{\partial y}$, $f_t = \frac{\partial f}{\partial t}$ 。光流约束方程包含 u , v 两个未知数, 还需添加额外约束才可求解。Lucas et al.(1981)提出了Lucas-Kanada算法以增添约束, 该算法假设目标运动具有空间一致性, 即相同表面的相邻点运动相似。若邻域内包含点的个数为 n , 即可获得方程组:

$$\begin{cases} f_{x1}u + f_{y1}v = -f_{t1}, \\ f_{x2}u + f_{y2}v = -f_{t2}, \\ \vdots \\ f_{xn}u + f_{yn}v = -f_{tn}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $f_{xi}u + f_{yi}v = -f_{ti}$ 表示第 i 个像素点处的光流约束方程。其矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} f_{x1} & f_{y1} \\ f_{x2} & f_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ f_{xn} & f_{yn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f_{t1} \\ f_{t2} \\ \vdots \\ f_{tn} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

将式(4)记作 $\mathbf{F}_x \mathbf{U} = -\mathbf{F}_t$, 则该方程组的解为 $\mathbf{U} = (\mathbf{F}_x^T \mathbf{F}_x)^{-1} \mathbf{F}_x^T (-\mathbf{F}_t)$, 具体形式为

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n f_{xi}^2 & \sum_{i=1}^n f_{xi} f_{yi} \\ \sum_{i=1}^n f_{xi} f_{yi} & \sum_{i=1}^n f_{yi}^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -\sum_{i=1}^n f_{xi} f_{ti} \\ -\sum_{i=1}^n f_{yi} f_{ti} \end{pmatrix}.$$

2 相位光流法

空间域图像可分解为多个不同尺度和方向的正弦波, 图像的整体平移会改变且仅改变正弦波的相位。因此, 对于图像的整体平移, 可通过二维傅里叶变换的相位图差异反映图像间位移。但实践中关注的是局部运动, 复杂且静止的图像背景使得图像的全局相位变化无法直接表征待测目标位移, 因此需将傅里叶变换中的全局三角函数卷积核替换为小波卷积核以获得局部相位信息。

二维复数 Gabor 滤波器核函数已被证明与动物视觉皮层图像信号基本一致 (Marçelja, 1980)。本文采用其作为相位光流法的小波滤波器, 用于获取图像的局部相位信息。该核函数在空间域内的表达式为

$$g(x, y) = w(x, y)$$

$$\times \left\{ \cos \left[2\pi(u_0 x + v_0 y) \right] + j \sin \left[2\pi(u_0 x + v_0 y) \right] \right\},$$

其中 u_0 和 v_0 分别为水平和垂直方向的中心频率, $w(x, y)$ 为高斯包络函数, 其在空间域内表示为

$$w(x, y) =$$

$$K \exp \left[-\frac{(x \cos \theta + y \sin \theta)^2}{2\sigma_r^2} - \frac{(-x \sin \theta + y \cos \theta)^2}{2\sigma_a^2} \right],$$

其中 K 为控制幅值缩放的比例常数, σ_r 和 σ_a 分别为高斯包络径向和切向的标准差, $\theta = \arctan \frac{v_0}{u_0}$ 为

Gabor 小波的方向。

为得到局部相位信息, 将视频帧与大小为 $m \times n$ 的二维复数 Gabor 滤波器进行卷积获得复值图像

$$\begin{aligned} C(x, y) &= \sum_{\Delta x=0}^m \sum_{\Delta y=0}^n f(x + \Delta x, y + \Delta y) g(\Delta x, \Delta y) \\ &= \text{Re}(x, y) + j \text{Im}(x, y). \end{aligned}$$

局部相位通过四象限反正切函数计算, 即:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{2 \text{Im}(x, y)}{\text{Re}(x, y)}.$$

通过上两式可知, 图像 f 的边缘区域可在与 Gabor 滤波器卷积后产生具有特定特征的局部相位场, 且对于同一边缘, 其相位场不因光照强度、图像噪声等产生明显变化, 仅与边缘位置相

关, 即

$$\varphi(x, y, t) = c, \quad (5)$$

其中 c 为常数。式(5)左右两边对时间 t 求导, 可得 $\varphi_x u + \varphi_y v + \varphi_t = 0$ 。该方程形式上与方程(2)一致。本文仅考虑垂直于图像边缘方向的运动情况, 即仅考虑相位梯度方向的分量速度 v_c , 其模长为

$$\|v_c\| = \frac{-\varphi_t}{\sqrt{\varphi_x^2 + \varphi_y^2}},$$

则分量速度 v_c 最终可表示为

$$v_c = \varphi_{x,y}^n \|v_c\| = \frac{(\varphi_x, \varphi_y)}{\sqrt{\varphi_x^2 + \varphi_y^2}} \|v_c\| = \frac{-\varphi_t}{\varphi_x^2 + \varphi_y^2} (\varphi_x, \varphi_y).$$

3 实验结果

本节以白色窄带作为识别目标, 模拟实际测量中的物体边缘, 分别用亮度光流法和相位光流法估计图像中窄带的平移量。为了研究图像噪声、光斑及光斑亮度变化对两种方法测量结果的影响, 设计了无光斑无噪声、无光斑有噪声、有光斑亮度不变、有光斑亮度线性变化和有光斑亮度非线性变化 5 种工况。实验中, 原始参考图像大小为 400×200 像素, 背景为纯黑色, 白色窄带位于图像正中心, 长度与图像高度一致, 宽度为 4 个像素。采用仿射变换对原始参考图像进行处理, 以实现窄带亚像素级别的平移。以 0.01 像素为步长, 生成平移量 d 为 0~2 像素之间的一组图像, 以分析光流法实验结果与位移大小之间的关系。图像和处理后的图像如图 1 所示, 框线选中位置为实验选择的的目标点, 其像素坐标为 (98, 240)。

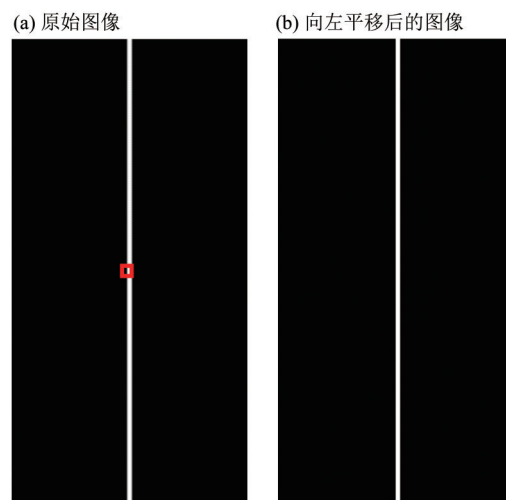


图 1 原始图像和向左平移后的图像

Fig. 1 The original image and the image after panning to the left

3.1 图像预处理及参数设置

亮度光流法的“小运动”假设直接依赖于原始图像亮度场的有效空间频率 (Lu et al., 2021), 高频分量会显著降低亮度光流法的测量范围, 因此可在计算前对图像作滤波处理, 常用的滤波方式为高斯滤波。根据 Lu et al. (2021) 的文献, 本节选择大小 9×9 像素、标准差为 2.6 的高斯滤波器对原始图像及变形图像进行高斯滤波。

在采用相位光流法进行计算时, Gabor 滤波器卷积核大小选择为 10×10 像素。为了确定 Gabor 滤波器的最优中心频率, 引入非线性值 N (Miao et al., 2022) 来判定滤波效果的优劣。

$$N(x, y) = \left| \frac{\varphi_1(x, y)^2 - \varphi_2(x, y)^2}{2\varphi_i(x, y)} \right|,$$

其中

$$\varphi_{x1}(x, y) = \sqrt{\varphi_{x1}(x, y)^2 + \varphi_{y1}(x, y)^2},$$

$$\varphi_{x2}(x, y) = \sqrt{\varphi_{x2}(x, y)^2 + \varphi_{y2}(x, y)^2},$$

φ_{x1} 和 φ_{y1} 分别为原始图像 x 和 y 方向的空间相位梯度, φ_{x2} 和 φ_{y2} 则为平移后图像的空间相位梯度。 φ_i 为两张图像的相位差, 即相位的时间梯度。 N 的值越小, 意味着该处相位的非线性程度越低, 对光流的估计则越准确。

根据计算结果, x 方向的中心频率 u_0 选择为 0.1 Hz。由于白色窄带平行于 y 轴, 故 y 方向的中心频率 $v_0 = 0$ 。根据 Miao et al. (2022) 的文献, Gabor 滤波器中高斯包络的切向标准差 $\sigma_a = 50$, 径向标准差 $\sigma_r = \frac{0.7764}{|(u_0, v_0)|}$ 。

3.2 无干扰情况下的位移估计

用亮度光流法和相位光流法估算白色窄带位移, 得到的误差-位移结果如图 2 所示。从图中可以看出, 对于 1 个像素内的微小位移, 亮度光流法能获得较好的结果, 但测量误差随位移增大而增大; 当位移超过 1 个像素时, 亮度光流法的测量误差急剧增加。然而, 相位光流法的测量误差始终保持在 0.05 像素内, 且不随位移发生明显变化。故同等条件尤其是在超过 1 个像素位移时, 相位光流法的测量效果明显优于亮度光流法。

3.3 含噪声情况下的位移估计

将 3.1 节的原始图像和测试图像中按式 (6) 进

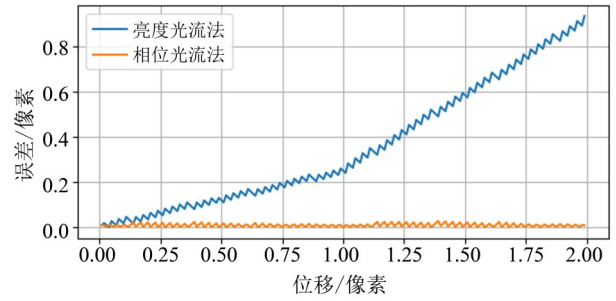


图2 两种方法对无干扰图像的测量误差

Fig. 2 The measurement error of the two methods on the non-interference image

行变换, 生成一组含噪声的图片序列:

$$\tilde{I}(i, j) = \begin{cases} 0, & I(i, j) + \eta(i, j) \leq 0, \\ \text{round}(I(i, j) + \eta(i, j)), & 0 < I(i, j) + \eta(i, j) < 255, \\ 255, & 255 \leq I(i, j) + \eta(i, j), \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\tilde{I}(i, j)$ 是加入噪声后的图像在 (i, j) 处的像素值, $I(i, j)$ 是原始图像在 (i, j) 处的像素值, $\eta(i, j)$ 是由一个均值为 0、标准差为 50 的高斯分布生成的随机数, $\text{round}(\cdot)$ 表示对 (\cdot) 四舍五入取整。用亮度光流法和相位光流法测量含噪声图像中白色窄带的位移, 并与无噪声图像的测量结果进行对比, 结果如图 3 所示。

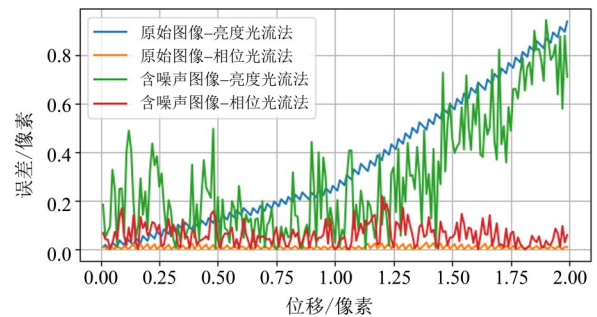


图3 两种方法对含噪声图像的测量误差

Fig. 3 Measurement error of the two methods on a noisy image

从图中可看出, 加入噪声后, 两种方法测量误差的稳定性均有不同程度的降低, 亮度光流法的结果均不再可靠, 相位光流法的测量误差虽有所提升, 但基本低于 0.2 像素, 且依旧不随位移发生明显变化。该结果说明相位光流法相较于亮度光流法更具抗噪性。

3.4 光照强度变化下的位移估计

为测试两种方法在光照强度变化条件下的鲁

棒性, 继续以白色窄带为研究对象, 设置以下 3 组实验进行对比。

1) 将原始测试图像条带的灰度值由 255 降低至 100, 向背景中添加白色光斑以模拟光源。

2) 在 1) 的基础上, 除原始图像外, 分别将平移后图像的亮度值按式(7)进行线性变换

$$I_c = aI_0 + b, \quad (7)$$

其中 $a = 0.6$, $b = 5$, I_0 为仅添加模拟光源后的图像, I_c 为变换后的图像。

3) 在 1) 的基础上, 除原始图像外, 分别将平移后图像的亮度值按式(8)进行非线性变换:

$$I_c = 255 \times c \left(\frac{I_0}{255} \right)^\gamma, \quad (8)$$

其中亮度缩放系数 $c = 1$; 调节常数 $\gamma = 0.2$ 。

三组实验的图像示例如图 4 中所示。在计算过程中, 采用式(8)对图像进行零均值归一化处理, 以减小光斑及亮度变化带来的测量误差。

$$\hat{I} = \frac{I_0 - E(I_0)}{\sigma(I_0)}, \quad (9)$$

其中 I_0 为原始图像亮度场, $E(I_0)$ 和 $\sigma(I_0)$ 分别为 I_0 的均值和标准差。理论上, 若亮度变化为线性变换, 图像经零均值归一化处理后的测量结果将与无变换时完全相同; 但当亮度发生非线性变换时, 零均值归一化方法将显现出一定的局限性。

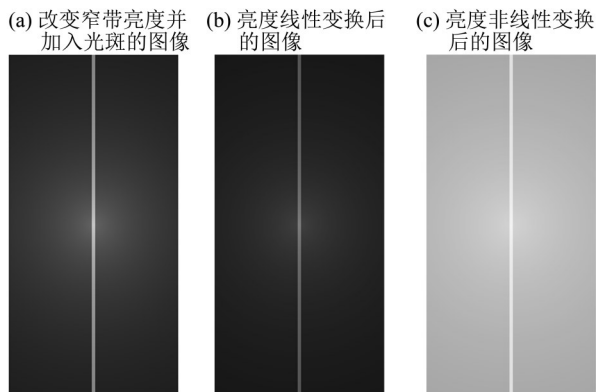


图 4 添加光斑和改变光照强度后的测试图像示例

Fig. 4 Example of a test image after adding flare and changing the light intensity

3.4.1 仅添加白色光斑对测量结果的影响 用两种方法对添加光斑后的图像进行位移测量, 并以无光斑时的结果作为参考, 结果如图 5 所示。可以看出, 光斑的引入不影响算法收敛, 仅位移大于 1 像素时相位光流法的测量误差略微增加。

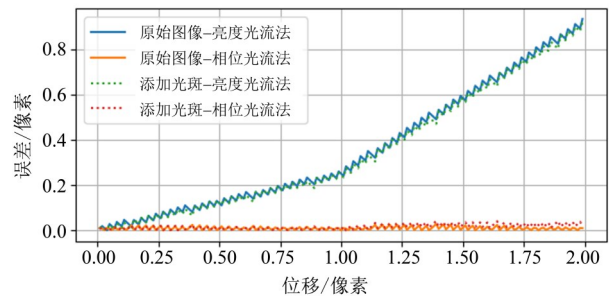


图 5 两种方法对添加光斑图像的测量误差

Fig. 5 The measurement error of the two methods for the image of the added spot

3.4.2 亮度发生线性变换对测量结果的影响 用亮度光流法和相位光流法对零均值归一化后的图像进行位移测量, 并与仅添加光斑(无亮度变化)的结果进行对比, 结果如图 6 所示。从图中可以看出, 亮度线性变换前后, 两种方法的测量结果完全相同, 符合前述理论。这是因为采取了零均值归一化的预处理, 图像亮度线性变换在预处理后的图像与线性变换前可保持一致。

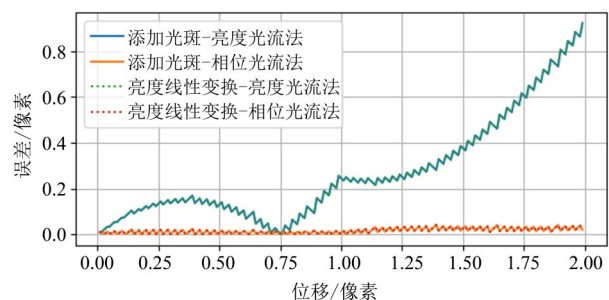


图 6 两种方法对亮度线性变换后图像的测量误差

Fig. 6 The measurement error of the image after the linear transformation of luminance by the two methods

3.4.3 亮度发生非线性变换对测量结果的影响 用亮度光流法和相位光流法对零均值归一化后的图像进行位移测量, 并与仅添加光斑(无亮度变化)的结果进行对比, 结果如图 7 所示。图 7 显示, 当亮度发生非线性变换后, 相位光流法的测量误差依旧能维持在较低水平, 但亮度光流法的估计误差已超过 1 像素, 不再适用。

从以上结果可以看出, 亮度光流法对图像亮度变化较为敏感, 尤其是图像亮度发生非线性变化时, 亮度光流法的“亮度恒定假设”不再适用。而相位光流法的测量结果则始终能保持在较低的误差范围内, 对光照变化具有鲁棒性。

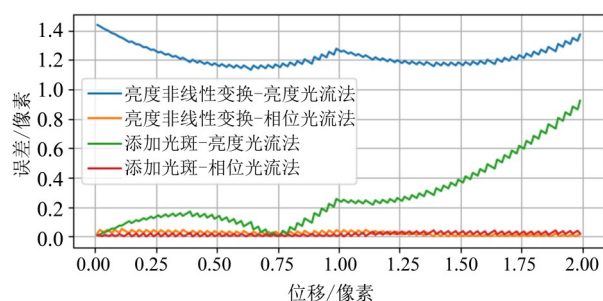


图7 两种方法对亮度非线性变换后图像的测量误差

Fig. 7 The measurement error of the image after the nonlinear transformation of luminance by the two methods

3.5 亮度发生非线性变换且含噪声情况下的位移估计

为测试两种方法在含亮度变化和噪声时的鲁棒性, 将3.4.3节所用的参考和测试图像按式(6)进行变换, 生成一组既带有亮度非线性变换又含噪声的图片序列, 本例中选择添加标准差为10的零均值高斯白噪声。用亮度光流法和相位光流法测量含噪声图像中白色窄带的位移, 并与无噪声图像的测量结果进行对比, 结果如图8所示。

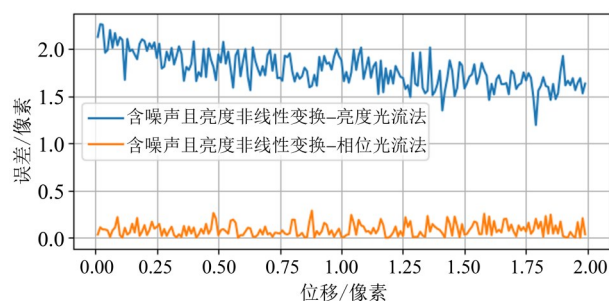


图8 两种方法对含噪声图像的测量误差

Fig. 8 Measurement error of the two methods on a noisy image

从图中可看出, 在亮度非线性变换的基础上加入噪声后, 两种方法测量误差的稳定性均有不同程度的降低, 但相位光流法的测量误差虽有所增大, 但基本低于0.25像素, 且依旧不随位移发生明显变化。该结果说明在同时含有噪声和亮度非线性变换的情况下, 相位光流法相较于亮度光流法依旧有较强的鲁棒性。

4 模拟视频的对比测试

为了对比两种方法在结构微小振动(最大振幅约为1像素)下的有效性及测量精度, 用blender软件渲染生成一个模拟悬臂梁振动的实验视频。实

验首先采用abaqus软件仿真一个长0.5 m, 宽20 mm, 厚2 mm的悬臂梁受迫振动。边界条件为上端自由、下端固支, 载荷条件为施加于悬臂梁顶部沿厚度方向的大小为0.4 N的瞬时集中力, 如图9(a)所示。对悬臂梁施加载荷后20 s内的响应进行仿真, 每隔0.25 s输出一次模型, 并将模型导入blender软件中生成图像, 共生成801帧图像。

测量过程仅考虑梁厚度方向的运动, 需保证梁厚度方向平行于图像平面。在采用blender渲染的过程中, 悬臂梁模型、相机、光源的设置采用定义的空间笛卡尔坐标系, 悬臂梁(均质)的质心设置在坐标系原点处, 长度方向平行于y轴, 宽度方向平行于z轴, 相机与点光源的位姿及相关参数如表1所示。上述条件下, 图像中悬臂梁模型的宽度约为4像素, 最大振幅约为1像素, blender渲染的视频帧如图9(b)所示。

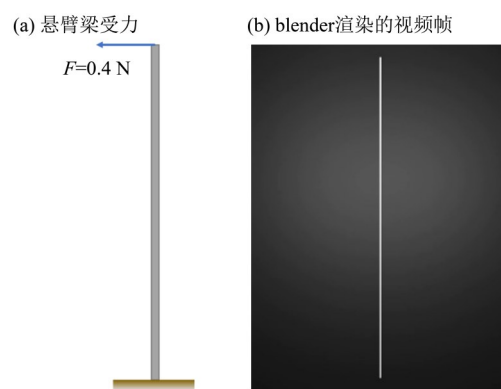


图9 悬臂梁示意图与blender视频渲染

Fig. 9 Schematic diagram of a cantilever beam and its video rendering of blender

表1 blender参数设置

Table 1 Blender parameter setting

| 物理参数 | 数值 |
|-------------|-------------------|
| 相机空间坐标/m | (0, -0.25, -0.75) |
| 相机姿态旋转角/(°) | (180, 0, 0) |
| 相机焦距/mm | 55.46 |
| 视场(FOV)/mm | 36 × 48 |
| 图像分辨率 | 480 × 640 |
| 点光源坐标/m | (-0.5, 0.2, -1) |
| 光源强度/W | 100 |

用亮度光流法和相位光流法对悬臂梁位移进行测量, 选择悬臂梁左顶点作为目标点, 其坐标为(24, 237)。将估计光流与计算结果对照, 结果如

图 10 所示。从图中可以看出, 两种光流法均能测得可靠的实验结果, 但相位光流法的测量结果与真实值吻合程度更高。为进一步验证两种方法的测量精度, 采用均方根误差 (RMSE) 作为评判指

标, 亮度光流法与相位光流法的 RMSE 分别为 0.421 3 和 0.160 9 像素。因此, 相位光流法的测量精度方面较亮度光流法更具优势。

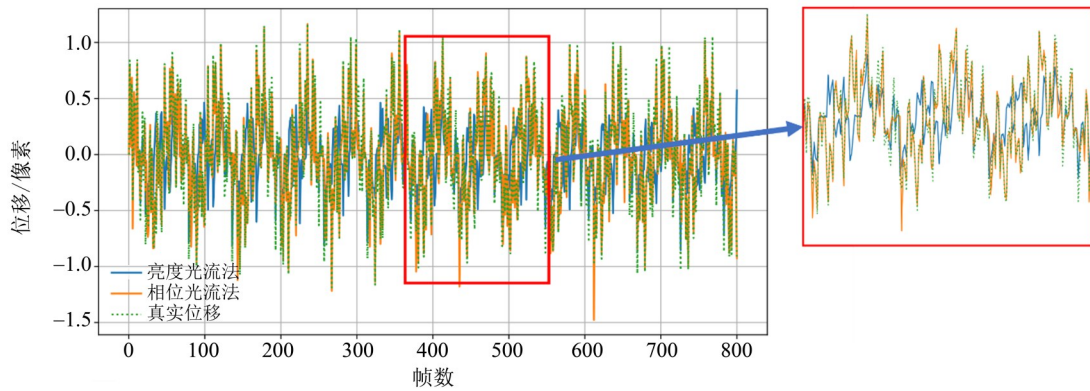


图 10 两种方法对模拟视频的估计结果

Fig. 10 Estimation results of simulated video by both methods

5 悬臂梁实验

以悬臂梁为研究对象, 用高速摄像机拍摄其受到力锤激励后的振动视频, 并用两种光流法测量梁上一点的速度响应, 激光测振仪同步采集测点的速度数据作为参考值。实验布置如图 11(a) 所示, 钢制悬臂梁长 50 cm、宽 30 mm、厚 3 mm, 将悬臂梁底端固定在夹紧平台上, 使梁在静止时在画面中保持竖直, 从夹紧处到悬臂梁顶端距离为 43.8 cm。激光测振仪测点位于悬臂梁左侧, 测点距离悬臂梁顶部 60.19 mm。采用 Photron S9 高速摄像机进行拍摄, 拍摄帧率为 250 fps, 分辨率为 240×750, 拍摄过程中, 采用无频闪灯提供光照强度稳定的照明。所拍视频帧样例如图 11(b) 所示。

视频录制开始后, 用力锤快速锤击悬臂梁固定端附近一点使其振动, 到振动衰减至稳定状态时停止录制。将两种方法测得的速度数据与激光测振仪采集的数据进行对比, 结果如图 12 所示。

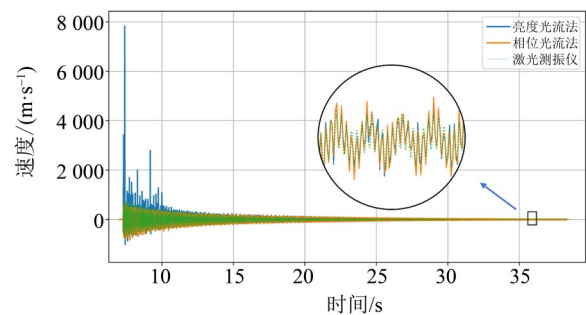


图 12 两种方法对真实视频的估计结果

Fig. 12 Estimation results of actual video by both methods

(a) 实验布置



(b) 视频帧



图 11 实验布置和视频帧示意图

Fig. 11 Layout of the experiment and example of video frame

从图中可以看出, 在速度较大时, 亮度光流法的 RMSE 为 111.361 mm/s, 因为帧间位移超出测量范围而给出了错误结果; 而相位光流法的 RMSE 为 31.883 mm/s, 与真实结果吻合较好。在速度较小时, 两种光流法测得的速度与激光测振仪采集数据吻合较好。该结果验证了两种光流法在小速度/位移下测量的有效性, 以及相位光流法在较大速度/位移时的优越性。值得一提的是, 激光测振仪虽然能实现非接触式测量并获得较为精确的振动响应数据, 但其无法直接获取结构的全局响应, 而基于视频的光流法则克服了 this 缺点。

6 总 结

本文从图像噪声、光照变化的角度,对亮度光流法和相位光流法在微小位移下的运动估计效果进行了对比,并用模拟和真实的悬臂梁振动视频验证了两种方法的有效性,得到以下结论:

(1) 亮度光流法在1个像素的位移范围内可以获得较为准确的光流估计,但超过1个像素后结果

将趋于发散;相位光流法在0~2个像素范围内可获得准确的测量结果,在位移超过1个像素时的测量效果明显优于亮度光流法。

(2) 相位光流法对图像噪声及图像亮度非线性变化的鲁棒性优于亮度光流法。

(3) 在光照稳定的条件下,两种方法针对结构的微小振动测量均能获得有效结果;在精度方面,相位光流法的测量精度高于亮度光流法。

参考文献:

- 陈信君,吕中荣,汪利,2023.基于加速度信号分解和正则化的宽频位移重构方法[J].中山大学学报(自然科学版中英文),62(5):128-135.
- 李婉培,吕中荣,谢培悦,等,2024.柔性曲拱振动测量的双尺度数字图像相关方法[J].中山大学学报(自然科学版中英文),63(2):108-114.
- 聂滋森,李冬安,曹明志,等,2020.基于频率数据与稀疏正则化的悬臂梁损伤识别[J].中山大学学报(自然科学版),59(6):148-153.
- 裴巧娜,2009.基于光流法的运动目标检测与跟踪技术[D].北京:北方工业大学.
- 单明广,党萌萌,熊雪芬,等,2024.基于视频的振动测量技术研究进展[J].实验技术与管理,41(3):1-18.
- 朱宏平,余璟,张俊兵,2011.结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J].工程力学,28(2):1-11+17.
- 周星源,齐晶晶,马利祥,等,2024.基于高速视觉的非接触式振动特性识别方法[J].安徽工程大学学报,39(1):45-52.
- BARRON J L, FLEET D J, BEAUCHEMIN S S, 1994. Performance of optical flow techniques[J]. Int J Comput Vis, 12(1): 43-77.
- CHA Y J, CHEN J G, BÜYÜKÖZTÜRK O, 2017. Output-only computer vision based damage detection using phase-based optical flow and unscented Kalman filters [J]. Eng Struct, 132: 300-313.
- CHEN J G, WADHWA N, CHA Y J, et al, 2015. Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification[J]. J Sound Vib, 345: 58-71.
- FAN W, QIAO P, 2011. Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study [J]. Struct Health Monit, 10(1): 83-111.
- FENG D, FENG M Q, 2018. Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection—A review [J]. Eng Struct, 156: 105-117.
- FLEET D J, JEPSON A D, 1990. Computation of component image velocity from local phase information [J]. Int J Comput Vis, 5(1): 77-104.
- GAUTAMA T, van HULLE M A, 2002. A phase-based approach to the estimation of the optical flow field using spatial filtering [J]. IEEE Trans Neural Netw, 13(5): 1127-1136.
- LU Z R, LIN G, WANG L, 2021. Output-only modal parameter identification of structures by vision modal analysis[J]. J Sound Vib, 497: 115949.
- LUCAS B D, KANADE T, 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]//IJCAI'81: 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2: 674-679.
- MARÇELJA S, 1980. Mathematical description of the responses of simple cortical cells[J]. J Opt Soc Am, 70(11):1297-1300.
- MIAO Y, JEON J Y, KONG Y, et al, 2022. Phase-based displacement measurement on a straight edge using an optimal complex Gabor filter [J]. Mech Syst Signal Process, 164: 108224.
- PAN B, 2018. Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals[J]. Meas Sci Technol, 29(8): 082001.
- WADHWA N, RUBINSTEIN M, DURAND F, et al, 2013. Phase-based video motion processing [J]. ACM Trans Graph, 32(4): 1-10.

(责任编辑 王海蓉)