

# 基于视觉的结构挠度无损检测技术

王 硕<sup>1,2</sup>, 李晓东<sup>1,2</sup>, 张东升<sup>1,2</sup>

(1. 上海大学 力学与工程科学院 上海市应用数学与力学研究所, 上海 200444;  
2. 上海市力学在能源工程中的应用重点实验室, 上海 200072)

**摘要:** 挠度是大型结构安全的重要指标, 对结构挠度的非接触动态监测技术研究具有重要的价值。开发了一种基于图像测量的桥梁挠度测试技术, 建立了基于数字图像相关方法的挠度匹配算法, 研发出基于单目视觉的挠度测量仪。通过室外精度验证, 评估了该测量系统进行远距离挠度测量的可行性和可靠性。最后利用该系统对武汉鹦鹉洲长江大桥进行了实时挠度测量, 测量结果和安装在桥上的全球定位系统(GPS)的读数高度一致。

**关键词:** 桥梁挠度; 单目视觉; 数字图像相关方法

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)01-0046-04

## A vision-based nondestructive testing technology for structural deflections

WANG Shuo<sup>1,2</sup>, LI Xiaodong<sup>1,2</sup>, ZHANG Dongsheng<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Development of computer vision technology is important to structural health monitoring since deflection is a key factor to large structures. In this study, a monocular video deflectometer has been constructed by developing an efficient fast algorithm based on Digital Image Correlation. The precision of the video deflectometer has been verified in the outdoor experiment. This system has been adopted to dynamically measure the vertical deflection of the Yingwuzhou Yangtze River Bridge at given positions. It is found that the measurement is in good agreement with the readouts from the existing GPS sensors which are embedded in the bridge.

**Key words:** bridge deflection; monocular vision; digital image correlation method

桥梁在国家交通建设中起着重要的作用, 关系到人民的生命财产安全。由于桥梁的工程结构设计、建造、施工和运营维护的情况复杂, 并且在服役期间要受到交通或风力等动荷载和地质气候等自然因素的破坏, 桥梁不可避免地会出现各种内部损伤或外部变形, 测量桥梁的挠度对于了解其安全性能以及服役状态具有重要价值。另外, 桥梁在动荷载作用下的振动响应和模态参数也是重要的力学参

数, 通过测量桥梁特定点的动力学参数, 如位移、速度、加速度等, 可以评估结构的动力学性能。针对桥梁的挠度测量一般有3种形式: ① 精密全站仪法, 其测量的基本原理为三角高程测量, 即测量两点间的水平距离和竖直角球顶两点之间的高度差。该方法需要人工布设标靶, 然后逐点测量, 测量效率低, 无法实时多点同步测量<sup>[1-2]</sup>; ② 预埋式传感器, 其往往需要固定在一个不动的参考点, 然后传感器的触头和测点紧密接触, 当测点产生位移时, 传感器随之产生读数, 但测点周围正好存在一处不动的参考点, 在测量现场通常是难以保证的<sup>[3-4]</sup>; ③ 全球定位系统(GPS), 虽然其具有实时测量、远距离测量等优点, 但成本昂贵<sup>[5-6]</sup>。目前, 上述桥梁挠度的测量方法都因存在着各自的局限性而各有缺点, 因此在针对不同结构形式的桥梁挠度测量时, 应选择最适用

收稿日期: 2019-04-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF01014200); 国家自然科学基金项目(11727804, 51732008, 11672347)

作者简介: 王 硕(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字图像相关技术

通信作者: 张东升, dongzhang@staff.shu.edu.cn

的仪器和方式。

随着数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术的不断发展,桥梁动态挠度检测技术越来越受到人们的关注。如采用在桥梁跨中安装特制的靶标,用电视摄像机远距离记录包含有靶标的图像,结合图像跟踪算法获得桥梁的挠度等<sup>[7]</sup>。通过开发先进的图像匹配算法,实现了远距离对目标点的实时跟踪<sup>[8]</sup>。结合特定的动力学分析,这种技术还可以用于悬索张力检测等一系列大型结构健康检测的问题上<sup>[9]</sup>。

基于单目视觉测量技术开发了一种实用的挠度测量仪,笔者介绍了其测量原理和算法流程,并通过室外精度验证,以及实际大桥现场挠度测试,验证了该系统对桥梁挠度测量的可行性。

## 1 基于单目视觉的挠度测量原理

用相机拍摄远处目标的图像时,基于小孔成像模型,目标点映射到相机的成像面上,通过数字图像相关匹配算法,可以获得目标点在图像上的像素位移。为了计算实际目标的位移,需要结合成像系统的固有参数(包括相机像素实际物理尺寸和镜头的焦距),以及相机和物体之间的外部参数(包括相机到目标的距离和相机的俯仰角和方位角)。基于单目视觉原理的挠度计算方法如图 1 所示。

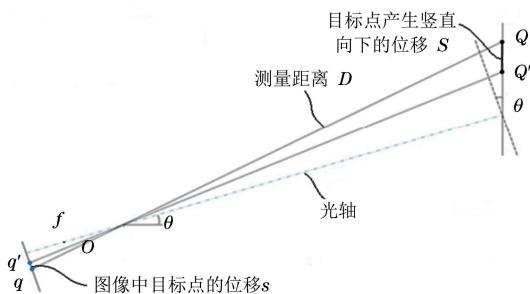


图 1 基于单目视觉原理的挠度计算方法示意

假设目标点 Q 产生竖直方向的位移 S,到达点 Q',检测到图像上目标点 q 产生位移 s,由几何关系可得出不同测量距离下的图像像素对应的实际尺寸  $I_r$

$$I_r \approx \frac{D}{\sqrt{f^2 + [(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2]l_{ps}^2}} \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

式中:  $(x_c, y_c)$  和  $(x, y)$  分别为图像中心和目标点的图像坐标;  $f$  为镜头焦距;  $l_{ps}$  为像素尺寸;  $\theta$  为相机光轴与水平面的夹角;  $D$  为目标点到相机的距离。

进而可以计算出目标点 Q 产生的竖直方向位移 S

$$S = I_r \times s \quad (2)$$

数字图像相关法的基本思路是根据被测物体表面变形前,其在图像中目标点邻域的灰度分布,基于一定的搜索策略在变形后图像中找到最相似的邻域,并认为其中心即目标点在变形后位移的位置。现有的多数数字图像相关技术使用特制的标靶,或在被测结构表面喷涂散斑图案作为目标进行跟踪,但这些方法在室外环境下,对大型结构设施实施测量时会比较困难,故应尽量选取图像中被测物体表面具有较高对比度的地方作为目标点,并且在图像中选取的邻域大小要包含足够大的对比度。为了评价变形前后目标点邻域的相似性,需要在变形后图像中全局搜索相关函数的极值。选用抗干扰能力较强的归一化最小平方距离相关函数

$$C(p) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{f(x_i, y_j) - \bar{f}}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2}} - \frac{g(x'_i, y'_j) - \bar{g}}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}} \right\}^2 \quad (3)$$

式中:  $f(x_i, y_j)$  为变形前图像中坐标为  $(x_i, y_j)$  点邻域的灰度分布;  $g(x'_i, y'_j)$  为变形后图像中坐标为  $(x'_i, y'_j)$  点邻域的灰度分布;  $\bar{f}$  和  $\bar{g}$  分别为两个点邻域的灰度平均值;  $M$  为图像中选取的邻域半径大小。

该方法的优势在于不需要在目标上黏贴特定的标志点,而是利用目标上固有的具有灰度变化特征的纹理作为标记,便于实际测量。数字图像相关需要在整像素和亚像素域对目标进行精确匹配,在整像素搜索中采用了改进的微粒群优化算法结合最大梯度搜索,提高了计算效率<sup>[10]</sup>。在整像素搜索中,微粒群中的每一个微粒通过自身的相关搜索和微粒群的相关系数来调整搜索路径,自适应汇聚于目标位置附近,结合最大梯度搜索策略,沿最短路径逼近目标点。采用逆向合成高斯牛顿法(Inverse Compositional Gauss-Newton, IC-GN)进行亚像素搜索,通过选用适当的形函数和插值函数,可达到 0.01 像素的定位精度<sup>[11]</sup>。

## 2 视频挠度仪集成

基于单目视觉的桥梁挠度测量系统的硬件组成主要包括工业相机、长焦镜头、测距测角模块、笔记本电脑和木质三脚架等。工业相机采用 USB 3.0 接口的互补金属氧化物半导体(CMOS)相机,每个像素尺

寸为  $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ , 图像空间分辨率为 2 048 像素  $\times$  1 536 像素, 图像灰度等级为 256, 镜头采用焦距为 50 mm 和 75 mm 的定焦镜头, 该设备结构紧凑, 组装快捷方便, 避免了传统视频挠度仪采用全站仪布局的形式, 大大提高了设备的可维护性。该系统软件基于 C++ 语言自主开发, 可实现多点同时测量、多点位移-时间曲线同步输出, 采样频率可达 40 Hz, 测量距离可达 500 m, 测量过程可采用视频录制, 便于后期图像数据的测量。

### 3 试验方法

#### 3.1 室外精度验证

为了考察测量系统的精度, 在室外搭建了测量平台, 开展了验证性试验。测量标靶固定在一个可水平和竖直移动的精密二维移动平台上, 平台固定在一个防震平台上, 并放置在一个离地面高度约 11 m 的屋顶上。精密移动平台由螺旋测微器驱动, 精度为 0.001 mm。安装在三脚架上的视频挠度仪放置在地面上, 采用焦距  $f = 50$  mm 的相机镜头, 并以 20 Hz 的采样频率对目标点上的目标点进行测量, 工业相机通过一根 USB 3.0 线缆将画面实时传输, 并显示在笔记本电脑上, 使用鼠标在图像上选取目标点, 测距望远镜测量出标靶距离相机 21.1 m, 相机光轴与水平面夹角为 31.97°。

通过手动调节二维移动平台, 使标靶产生竖直向上的 1.75, 3.5 mm 两段位移, 视频挠度仪实时输出目标点的挠度曲线。

#### 3.2 大桥检测

武汉鹦鹉洲长江大桥是世界跨度最大的三塔四跨悬索公路桥, 跨径布置为 225 m + 2 m  $\times$  850 m + 225 m。使用单目视觉挠度仪在武汉汉阳桥梁主题公园对鹦鹉洲长江大桥上两个典型位置进行了动态挠度测量。测量点信息如下所述。

(1) 使用焦距为 50 mm 的相机镜头测量 13#索处目标点, 测量距离为 267 m。

(2) 使用焦距为 75 mm 的相机镜头测量 22#索处目标点, 测量距离为 400 m。

试验中单目视觉挠度仪分别使用焦距为 50 mm 和 75 mm 的镜头对目标点进行实时挠度测量, 测量频率为 20 Hz。

### 4 试验结果

室外精度验证试验结果如图 2 所示, 取测量结果中最后稳定时段的位移数据, 利用平均偏差和均

方根误差进行误差分析, 平均偏差( $A_D$ )可表示为

$$A_D = \sum |V_i - R_i| / n \quad (4)$$

式中:  $V_i$  为单目视觉抗度测量系统的测量值;  $R_i$  为移动平台实际产生的竖向位移;  $n$  为测量值个数。

均方根误差(标准误差) $R_{MSE}$  可表示为

$$R_{MSE} = \sqrt{\sum (V_i - R_i)^2 / n} \quad (5)$$

最后稳定时段的实际位移  $R_i = 3.5$  mm, 最后稳定时段的平均偏差  $A_D = 0.08$  mm, 均方根误差  $R_{MSE} = 0.05$  mm。

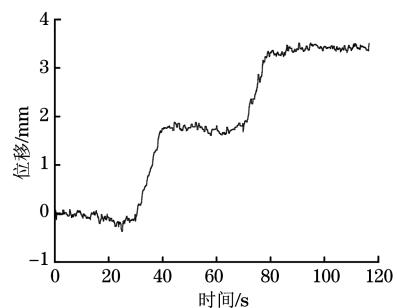


图 2 室外精度验证试验结果

鹦鹉洲长江大桥上安装有 GPS 传感器, 可以实时动态发射桥梁的三维位置。其中, 桥上 GPS 测量点 DEF7# 与单目视觉挠度测量仪在 13# 索处目标点相距 15 m; DEF10# 正好位于目标点 22# 索处。单目视觉挠度测量仪的挠度测量结果与 GPS 输出结果如图 3 所示。

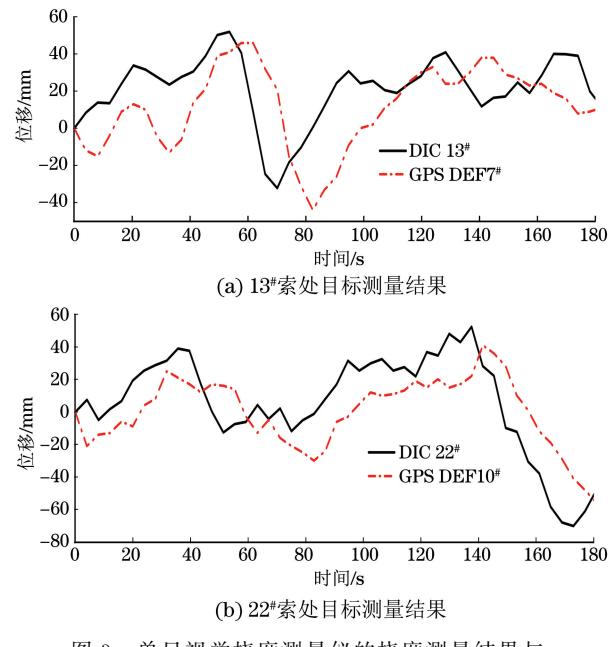


图 3 单目视觉挠度测量仪的挠度测量结果与 GPS 输出结果

由于两个测量系统具有不同的时间序列, 故两条曲线存在错位, 但趋势和测量数值基本一致, 验证

了单目视觉挠度测量仪的可行性和准确性。

## 5 讨论

视频挠度仪是一种非接触的结构挠度测量方法,其直接利用结构上的纹理特征进行测量,大大节约了使用成本。视频挠度仪在工程中应注意一些问题:首先,单目视频挠度仪采用一台相机对目标进行拍摄和测量,从测量原理上分析,其只能获取目标点的二维位移信息,配合测距望远镜和仰角测量,主要用于竖直方向的位移测量;其次,在测量中,由于实际被测结构具有三维几何尺寸,采用单目视频挠度仪测量时,图像上各个目标点到测量仪的距离各不相同,这意味着图像上各点具有不同的放大倍率,因此在实际测量时,对图像上各目标点都需要测距。

被测目标与相机之间的距离需借助激光测距仪测量,在此过程中测量的误差将直接影响最终挠度测量结果,激光测距仪测量精度为0.1 m,在室外大视场的测量环境下,被测目标与相机之间的距离通常在数十米到数百米之间,故可认为激光测距仪距离测量引起的误差可忽略不计。倾角传感器的测量精度为0.01°,虽然倾角传感器只是测量的相机光轴与水平面的夹角,但由于相机成像面尺寸远小于相机镜头焦距,因此当选择靠近图像中心区域的目标点进行测量时,可近似认为每个目标点在相机成像面上检测到的位移均为目标点产生的实际竖向位移在平行于相机成像面上的投影。

数字图像相关运算量较大,为了获得较好的实时性,开发了高稳定性、高精度的实时算法,在室外测量环境运用中起到了很好的效果。在外场测试中,单目挠度测量仪受到设备前方的车辆遮挡,在图4中以一条竖直的直线表示。当车辆移动后,目标点的挠度可自动找回并持续跟踪,大大提高了外长挠度测量的适应性。

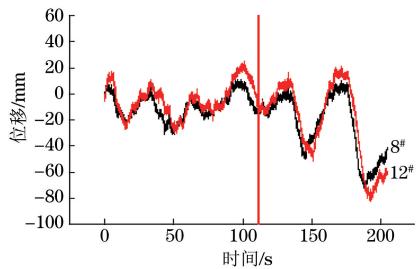


图4 相机被遮挡前后的挠度输出

在室外环境中,环境因素引起的相机基座振动会导致挠度测量误差。因此,应选择抗干扰性较强的木质三脚架作为挠度测量仪支架,并架设在牢固

平稳的地面上。同时,在图像中可以选择一个不动点作为参考,测量目标相对于不动点的挠度。该方法可以有效地消除环境振动带来的测量误差。另外,天气因素同样影响室外挠度测量结果,大雨大雾等极端天气条件会造成相机无法采集到高质量图像,导致测量误差。故室外挠度测量应尽量选择天气晴朗,风速较小的时候进行。

## 6 结语

在数字图像相关技术的基础上,选择高速工业相机作为传感装置,开发了一套户外大视场条件下的单目视觉挠度测量仪,其具有易操作、成本低、精度高和鲁棒性强等特点,形成了一整套动态挠度测试系统。系统理论完善,软硬件结构可靠,可在数百米工作距离上实现毫米级精度的动态挠度测量。

### 参考文献:

- [1] 张俊中,朱义朝,刘乾,等.基于全站仪在桥梁挠度检测中的应用和研究[J].测绘与空间地理信息,2019,42(1):41-44.
- [2] 毛建平,周小冬,覃乐勤.智能全站仪在大跨径桥梁荷载试验中的应用[J].西部交通科技,2016(9):87-89,105.
- [3] 陈成博.桥梁动挠度监测系统应用实例[J].交通世界,2017(14):74-75,77.
- [4] 张帆,李佳琦.基于一种位移传感器的桥梁挠度测量系统[J].电脑知识与技术,2016,12(20):239,242.
- [5] 王晓智.用GPS进行大型桥梁挠度变形观测的数据处理与分析[J].科技传播,2010(6):56-58.
- [6] 叶肖伟,张小明,倪一清,等.基于机器视觉技术的桥梁挠度测试方法[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(5):813-819.
- [7] YE X W, NI Y Q, WAI T T, et al. A vision-based system for dynamic displacement measurement of long-span bridges: Algorithm and verification [J]. Smart Structures & Systems, 2013, 12(3/4):363-379.
- [8] PAN B, TIAN L, SONG X. Real-time, non-contact and targetless measurement of vertical deflection of bridges using off-axis digital image correlation [J]. Ndt & E International, 2016, 79:73-80.
- [9] FENG M Q, AACE F, FUKUDA Y, et al. Nontarget vision sensor for remote measurement of bridge dynamic response [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(12):04015023.
- [10] WU R, KONG C, LI K, et al. Real-time digital image correlation for dynamic strain measurement[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(5):833-843.
- [11] PAN B, LI K, TONG W. Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations[J]. Experimental Mechanics, 2013, 53(7):1277-1289.