

文章编号: 1001-4888(2021)01-0029-14

基于视觉的桥梁挠度测量方法与研究进展^{*}

邵新星¹, 黄金珂¹, 员方¹, 魏康¹, 侯士通¹, 任祥云¹, 徐向阳¹,
董帅⁴, 徐莹雋³, 王澄非², 杨福俊¹, 吴刚¹, 何小元¹

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏南京 211189; 2. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏南京 211189;
3. 东南大学 电子电工实验中心, 江苏南京 211189; 4. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 挠度是评估桥梁承载能力和健康状态最直观的指标。近 20 年来, 基于计算机视觉的桥梁挠度测量方法凭借其非接触式、快速简易安装等优点, 被逐步应用于实际测量中。本文从测量原理、测量方式和影响因素 3 个方面出发, 介绍了当前基于视觉的桥梁挠度测量方法与研究进展。在测量原理方面, 从相机标定、三维立体视觉、摄影测量、特征检测与匹配 4 个方面进行了介绍。在测量方式方面, 介绍了单相机二维测量、双相机三维测量、基于摄影测量的准静态测量和位移传递串联相机网络多点动态测量。在影响因素方面, 介绍了相机自身因素、标定因素、算法因素和环境因素 4 个方面对测量结果的影响, 并总结了目前国内外的研究成果。最后对基于视觉的桥梁挠度测量技术的未来发展趋势做出了展望。

关键词: 桥梁挠度; 摄像测量; 相机标定; 特征检测; 特征匹配; 计算机视觉

中图分类号: O34 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-20-110

0 引言

在新建桥梁的验收和在役桥梁的健康监测中, 桥梁挠度与桥梁的承载能力密切相关, 因此通常被认为是必须测量的基本参数。现有的桥梁挠度测量方法主要依赖于位移计、千分表、连通管、精密水准仪、数字水准仪、倾角仪、全站仪、微波雷达和 GPS 等测量设备, 表 1 给出了这些挠度测量方法的典型应用场景、优点以及局限性。从表 1 中可以发现, 传统的接触式测量方法几乎只能应用于静挠度测量, 难以实现动挠度测量以及满足实时测量和长期监测的工程需求。其中倾角仪虽然可以测量桥梁动挠度, 但是对仪器的性能提出了较高要求。此外, 加速度计虽然也可以测量桥梁动挠度, 但其通过对加速度进行两次积分获得位移的方式误差较大^[1,2]。

对于一些非接触式测量设备, 如激光多普勒测振仪 (Laser Doppler Vibrometers, LDV)^[3,4]、全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)^[5,6] 和雷达干涉测量仪^[7], 虽然可以实现实时测量, 但其系统的总成本往往很高, GPS 的测量精度更是无法满足桥梁挠度的测量需求。

为了突破现有桥梁挠度测量方法的局限性, 基于计算机视觉和摄影测量原理的摄像测量方法^[8], 被逐步应用于桥梁挠度测量中, 通过对变形前后的两幅图像上的点进行识别和追踪, 实现对桥梁挠度的测量。

^{*} 收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(11902074, 11827801)资助

通信作者: 何小元(1956—), 男, 博士, 教授。主要研究领域为实验固体力学和工程在线检测。Email: mmhxy@seu.edu.cn

表 1 常用的桥梁挠度测量方法
Tab. 1 Commonly used bridge deflection measurement methods

测量设备	典型应用	优点	局限性
位移计	桥下可搭设固定平台的桥梁	精度高;既可以测量静挠度,也可以测量动挠度	无法应用于横跨河流或深谷的桥梁
千分表	桥下可搭设固定平台的桥梁	精度高	无法测量动挠度;无法应用于横跨河流或深谷的桥梁
连通管	挠度变化范围较小的中短跨度桥梁挠度测量	精度高;原理简单;可实现自动化测量	受量程限制无法适用于纵坡较大的大跨径桥梁和挠度变化范围较大的桥梁挠度测量
精密水准仪	中短跨度桥梁静挠度测量	精度高	无法测量动挠度
数字水准仪	中短跨度桥梁挠度测量	精度高;效率高;没有人为读数误差;既可以测量静挠度,也可以测量动挠度	受光线影响较大,不适用于长期监测;成本较高
倾角仪	中短跨度桥梁挠度长期监测	成本低、精度高;不需要静止参考点;不受天气影响;既可以测量静挠度,也可以测量动挠度	动挠度测量时对倾角仪的瞬态反应和零漂等性能要求较高;量程有限,无法测量倾角变化范围较大的大跨度桥梁,如特大悬索桥、斜拉桥
非自动全站仪	中短跨度桥梁静挠度测量	精度高	无法测量动挠度
自动全站仪	中短跨度桥梁挠度长期监测	精度高;既可以测量静挠度,也可以测量动挠度	成本较高
微波雷达	桥梁挠度实时测量	精度高;受天气影响小;实时非接触测量	成本较高
GPS	挠度变形量大的特大跨度悬索桥、斜拉桥挠度测量	测量范围大;参考点与测量点的距离不受限制;实时非接触测量	精度较低;成本较高

1 基本原理

基于摄像测量方法的桥梁挠度测量系统基本组成如图 1 所示,其中包括测量硬件部分、软件算法部分、数据处理部分和数据传输部分。数据处理一般由电脑直接完成,数据传输可以分为有线传输和无线传输,硬件部分根据测量方式不同有不同的组成,软件算法部分根据不同的测量方式主要包括相机标定、三维立体视觉、摄影测量、特征检测与匹配。在软件算法部分,相机标定和特征检测与匹配是两个重要的组成部分。相机在完成内参与外参的标定后,即可建立图像坐标系与三维空间坐标系之间的关系。之后,通过检测桥梁表面的特征,进行特征匹配,从而实现桥梁挠度的计算。

1.1 相机标定

相机标定是确定图像坐标系与世界坐标系的对应关系,并对畸变图像校正的过程。对于工业相机镜头,由于制造精度以及组装偏差,会导致原始图像产生畸变。在相机镜头畸变中,通常考虑径向畸变和切向畸变^[9,10]。如图 2 所示,径向畸变使像素点产生靠近或远离像平面中心的偏差,切向畸变使像素点产生切向的偏差。对于视觉测量而言,镜头畸变的标定是测量精度的重要保证。通常,镜头畸变的标

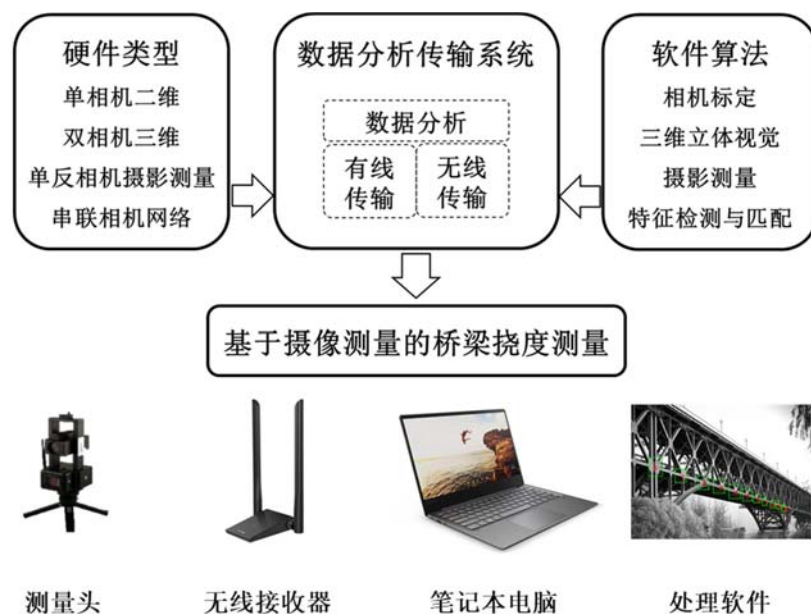


图 1 基于摄像测量方法的桥梁挠度测量系统基本组成

Fig. 1 Basic components of videogrammetry-based bridge deflection measurement system

定可以和相机内参同时进行。对于无法用畸变模型来描述的复杂镜头畸变,则可以提前单独标定镜头畸变。拍摄得到的是畸变后的图像,要想得到没有畸变的像素点位置就要通过畸变系数推导其映射关系。镜头畸变标定完成后,可以根据映射关系由畸变后的像素点计算畸变前的像素点位置,最后利用校正畸变后的像素点位置来计算最终的变形。对于双相机三维测量,也需要利用校正畸变后的像素点位置来进行三维重构。

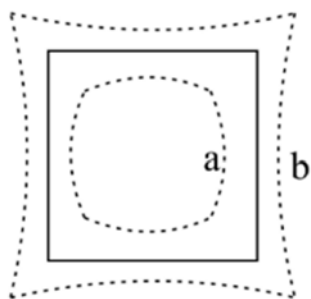


图 2 径向畸变:(a)桶形畸变;(b)枕形畸变

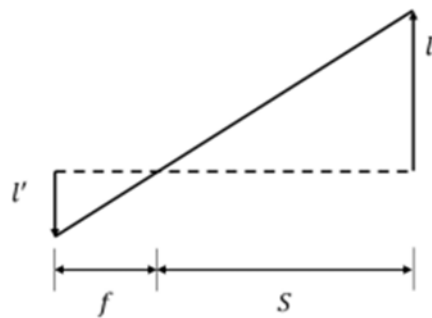
Fig. 2 Radial distortions:(a) barrel distortion;
(b) pillow distortion

图 3 简化的针孔相机模型

Fig. 3 Simplified pinhole camera model

1.1.1 简化模型的单相机标定

由于在桥梁挠度测量中,视场较大,无法使用标定板进行外参的标定,所以常使用基于简化模型的单相机标定方法。图 3 是简化后的相机针孔成像示意图。当相机光轴与待测平面垂直时,则有

$$l' = \frac{l}{s} f \quad (1)$$

式中: f 为镜头焦距; s 为物距; l 为待测平面上的点在平面内的位移; l' 为对应的像平面上的点在像平面上的位移。对于远距离桥梁挠度测量,相距一般近似等于镜头焦距,物距可以通过激光测距仪测得。

1.1.2 单相机标定

单相机标定主要是为了标定相机的内参和镜头畸变 D 。图 4 是相机的针孔成像模型示意图,图中所示坐标变换 1-2-3 分别表示从世界坐标系到相机坐标系,最后到图像坐标系的过程,世界坐标系中的

点 M 可表示为 $[X, Y, Z, 1]^T$, 其对应的二维图像坐标系中的点 m 可表示为 $[x, y, 1]^T$, 两点之间的关系可以表达为

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{R} | \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: s 是比例因子; $\mathbf{P}$ 为相机投影矩阵; $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{t}$ 分别表示世界坐标系相对于相机坐标系的旋转和平移, 是相机外参; $\mathbf{A}$ 为相机内参, 可以表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: f_x 和 f_y 分别表示镜头在图像 x 轴和 y 轴的等效焦距; f_s 为表示图像 x 轴和 y 轴偏斜程度的参数; c_x 和 c_y 表示主点坐标。

对于相机内参标定, 目前常采用的是张正友提出的棋盘格标定法^[12]。由于是平面标定, 则 $Z=0$, 并将式(2)改写为

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为单应性矩阵, 虽有 9 个未知量, 但将矩阵中的参数对 h_{33} 正则化, 则可知只有 8

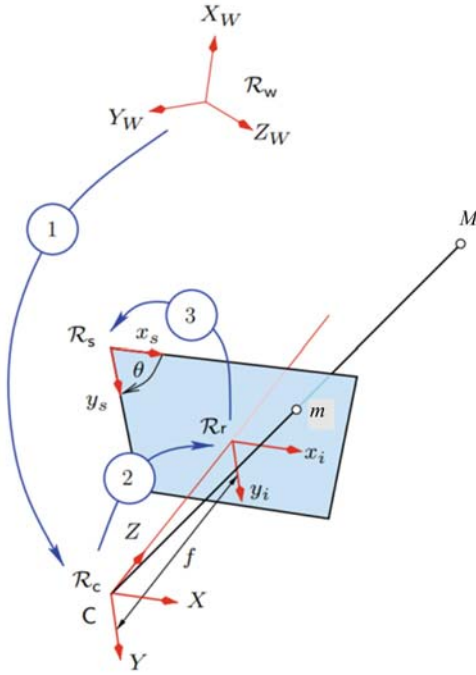


图 4 针孔相机模型^[11]

Fig. 4 Pinhole camera model^[11]

个独立参数需要求解。

为求解单应性矩阵, 对于每一个标定板位置需要知道图像坐标系与世界坐标系中 4 对对应点。按照文献[12]中的方法, 若有 3 个标定板的姿态, 则可解出相机内参和相机坐标系相对于平面标定板坐标系的外参。为了求解镜头畸变, 通常采用非线性优化的方法同时计算出相机内参、畸变参数以及标定板不同姿态下的外参^[12]。需注意的是, 通常认为相机内参在标定之后基本保持不变, 所以可将内参标定完成的相机带到实验现场进行测量。

1.1.3 双相机外参标定

假设两相机内参都已完成标定, 图像坐标的畸变也都得到了校正, 由式(2)可得 $s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$, 则

对相机 1 和相机 2 分别有 $sm_1 = P_1 M$ 和 $sm_2 = P_2 M$ 。由极线约束可知 m_1 和 m_2 满足如下的对应关系

$$m_2^T \mathbf{F} m_1 = 0 \quad (5)$$

式中: $\mathbf{F}$ 是一个 3×3 的基本矩阵。若将世界坐标系与相机 1 的相机坐标系对齐, 则 $P_1 = A_1[I | 0]$ 。记

$$P_2 = A_2[\mathbf{R} | \mathbf{t}], \quad \mathbf{t} = [t_1 \quad t_2 \quad t_3]^T, \quad [\mathbf{t}]_x = \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix}。则基本矩阵 \mathbf{F} 满足$$

$$\mathbf{F} = A_2^{-T} \mathbf{E} A_1^{-1} = A_2^{-T} [\mathbf{t}]_x \mathbf{R} A_1^{-1} \quad (6)$$

在相机内参完成标定后, 通过求解基本矩阵 $\mathbf{F}$, 可以计算本质矩阵 $\mathbf{E}$, 利用奇异值分解的方法进而

可以计算相机 2 对相机 1 的相对外参。Nistér 指出^[13], 如果两相机图像坐标系中至少有 5 对对应点, 就可以求解出相机的基本矩阵 $\mathbf{F}$ 。文献[14]提出使用散斑匹配和共面方程来求解双相机之间的相对外参, 通过非线性对标定参数进行迭代优化, 具有更高的求解精度。优化得到相对外参之后, 再由一个比例因子即可计算出平移向量的尺度信息。

1.2 三维立体视觉

在去除图像畸变后, 根据公式(2)可知, 一个空间中的点与其二维图像坐标系中点的关系可以用两个线性方程进行表达。若该空间点同时被两个相机看到, 将世界坐标系建立在左相机的相机坐标系上, 则与两个相机图像坐标系中点的关系可以用 4 个方程来表达, 如公式(7)所示, 其中下标 1 和 2 分别代表相机 1 和相机 2。公式(7)中的相机内参和相机外参可以通过标定得到, 图像点坐标可以由这两个相机图像匹配得到, 4 个方程则可以直接求解空间点的三维坐标信息。

$$\begin{bmatrix} f_{x1} & f_{s1} & c_{x1} - x_1 \\ 0 & f_{y1} & c_{y1} - y_1 \\ R_{11}f_{x2} + R_{21}f_{s2} + R_{31}(c_{x2} - x_2) & R_{12}f_{x2} + R_{22}f_{s2} + R_{32}(c_{x2} - x_2) & R_{13}f_{x2} + R_{23}f_{s2} + R_{33}(c_{x2} - x_2) \\ R_{21}f_{y2} + R_{31}(c_{y2} - y_2) & R_{22}f_{y2} + R_{32}(c_{y2} - y_2) & R_{23}f_{y2} + R_{33}(c_{y2} - y_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -(t_x f_{x2} + t_y f_{s2} + t_z(c_{x2} - x_2)) \\ -(t_y f_{y2} + t_z(c_{y2} - y_2)) \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 单目摄影测量

单目摄影测量技术可以实现标志点三维坐标的重构^[15], 即将利用不同位置不同角度拍摄得到的标志点图片, 使用数字图像处理和摄影测量技术进行处理, 进而精确测定目标在三维空间中位置的方法。其主要步骤分为图像的预处理、相对定向、光束法平差等步骤。

单目摄影测量系统一般由数码相机、标志点、光学基准尺、无线传输装置、计算软件组成, 图 5 为常用的数码相机。可以将数码相机和镜头的初始参数作为相机内参的初值。那么, 将一定数量的编码标志点粘贴在待测物体表面, 并用相机以任意的位置和角度对其拍摄一系列的图片, 同时保证该系列中连续的图片间覆盖有部分相同标志点区域, 基于 1.1.3 中的外参标定方法, 即可确定不同拍摄角度下的相机坐标系之间的相对外参。有了相机外参和相机的初始内参后, 就可以对标志点的三维坐标进行重构。此外, 利用自标定光束平差法以每个光束作为基本平差单元, 将像点坐标作为观测值, 按照共线条件方程列出优化目标函数为

$$\min \sum_{i,j} d[m_{i,j}, m(A, D, R_j, t_j, M_i)]^2 \quad (8)$$

式中: i 为标志点的编号; j 代表不同的拍摄角度; $m_{i,j}$ 为第 j 个拍摄角度下第 i 个标志点检测得到的标志点图像坐标; $m(A, D, R_j, t_j, M_i)$ 为标志点通过投影关系得到的图像坐标。

通过在全区域内统一进行平差处理, 可对相机内参、外参以及空间点坐标进行优化求解, 进而可获得高精度的空间点坐标。

1.4 特征检测与匹配

图像的特征检测与匹配是实现挠度测量的关键。通常采用的图像特征有灰度特征、特征点、梯度特征和几何特征等。灰度特征对被测物体表面的灰度信息有一定的要求, 利用灰度特征的最具代表性的技术即为数字图像相关技术, 其具有亚像素、高精度的优势。与灰度特征相比, 特征点技术对物体表面的灰度信息要求较低, 且具有尺度不变性和旋转不变性的优势, 因此对于复杂变形测量具有一定优势。通过检测图像特征, 将每帧图像的对应特征进行匹配, 可以计算出相应的挠度。对于桥梁挠度测量而



图 5 Nikon D7100 数码相机

Fig. 5 Nikon D7100 digital camera

言,其像素位移不会太大,但是实际测量过程中需要考虑雨雪雾遮挡、气流畸变等一系列因素对特征检测与匹配的影响。

1.4.1 基于数字图像的灰度特征与匹配

目前常采用的特征检测与匹配算法是模板匹配,其主要步骤是先在参考图像中选择匹配区域,然后与变形图中的目标区域采用相关函数进行模板匹配。Tong 比较了几种相关函数,指出归一化最小平方距离(zero-normalized sum of squared difference, ZNSSD)相关函数的鲁棒性和可靠性最好^[16]。

$$C_{\text{ZNSSD}} = \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M \left[\frac{f(W(x, y; \Delta p)) - f_m}{f_s} - \frac{g(W(x, y; p)) - g_m}{g_s} \right]^2 \quad (9)$$

式中: $2M+1$ 为模板的宽度; f 和 g 代表像素点 (x, y) 在参考图和变形图模板中的灰度值; f_m 和 g_m 代表参考图和变形图模板中的平均灰度; $W(x, y; p)$ 用于表示变形模板相对于参考模板的形函数; $f_s =$

$\sqrt{\sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M [f(W(x, y; 0)) - f_m]^2}$; $g_s = \sqrt{\sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M [g(W(x, y; p)) - g_m]^2}$ 。对于桥梁挠度测量,选择零阶形函数或一阶形函数即可满足要求。

匹配通常可以分为整像素匹配和亚像素匹配。对于桥梁挠度测量,相邻图像之间的位移通常不会特别大,因此常规的整像素匹配算法即可满足需求。潘兵等人^[17]比较了几种常用的亚像素匹配方法,指出 Newton-Raphson 迭代法具有较高的精度。由于计算效率和鲁棒性方面的优势,目前一般采用反向组合高斯牛顿算法进行匹配^[18-20]。

1.4.2 基于特征点的特征检测与匹配

通常采用 Harris^[21]、SIFT^[22]、SURF^[23]来进行特征检测。检测到特征点后,采用欧几里得距离^[22]进行相似性度量,距离越小,相似度越高。匹配过程可以通过遍历所有的特征点,进而选择出最优的特征点,但速度较慢;也可以使用文献[22]中的匹配方法,先提取最近邻的点进行匹配,再筛选出最优匹配,从而提高匹配速度,但是往往会出现异常匹配,这时需要将其剔除。常用的异常匹配剔除方法是随机抽样一致(RANdom SAMple Consensus, RANSAC)法。

1.4.3 基于梯度特征的方向码匹配

方向码匹配^[24](Orientation Code Matching, OCM)通过匹配梯度信息,对每个像素点以方向码的形式进行计算。假设图像各点灰度值由 $f(x, y)$ 表示,其偏导数 $f_x = \frac{\partial f}{\partial x}$, $f_y = \frac{\partial f}{\partial y}$,则像素坐标为 (x, y)

的点对应的方向角 $\theta_{x,y} = \tan^{-1} \left[\frac{f_x}{f_y} \right]$,其对应的方向码按如下方式定义

$$c_{f(x,y)} = \begin{cases} \left[\frac{\theta_{x,y}}{\Delta\theta} \right], & |f_x| + |f_y| \geq \Gamma \\ N = \frac{2\pi}{\Delta\theta}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

式中: Γ 是一个用来忽略低对比度区域的阈值,其目的是为了减小低对比度区域对匹配的干扰,但其值太大会造成梯度特征信息丢失,所以需要合理控制其范围; N 是为低对比度区域的点分配的一个固定值; $\Delta\theta$ 一般取 $\frac{\pi}{8}$ 。对于变形图和参考图有

$$D = \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M d(c_{f(x,y)}, c_{g(x,y)}) \quad (11)$$

式中: $c_{f(x,y)}$ 为初始参考图像在点 (x, y) 的方向码; $c_{g(x',y')}$ 为变形图像在点 (x', y') 的方向码。

$$d(a, b) = \begin{cases} \min\{|a - b|, N - |a - b|\}, & \text{if } a \neq N \cap b \neq N \\ \frac{N}{4}, & \text{if } a \neq N \cap b = N \\ 0, & \text{if } a = N \end{cases} \quad (12)$$

OCM 方法通过搜索变形图像上的点,使得 D 取得极小值,实现最佳匹配。为了降低误差,文献[25]中还提出使用双线性插值法对所得到的方向角插值,实现亚像素级精度。实验证明了 OCM 方法

具有旋转不变性和亮度不变性^[24]。在室外的桥梁挠度测量中 OCM 方法通过监测 300 多米外桥梁上现有的特征,获得了很好的挠度测量实验结果,且该方法对光照不足有很好的鲁棒性^[25]。

2 测量方式

2.1 单相机二维测量

在镜头的畸变标定后,基于 1.1.1 节中的标定方法,通过图像特征点的匹配,即可实现桥梁挠度的视觉测量。该方法具有简单、实用的特点,也是目前被广泛采用的视觉桥梁挠度测量方法^[26-30]。针对夜间测量,可以将桥梁上的路灯作为特征匹配点。为了减小环境光的影响,一般还可以在桥梁上安装蓝光照明装置,通过在镜头前安装窄带滤镜的方法,实现主动照明挠度测量^[29]。单相机二维测量的分辨率主要受到测量视场和成像分辨率的限制,对于长大跨桥梁,为了保证测量分辨率,还可以通过多套系统实现分段测量。图 6 所示为本课题组采用多套二维测量系统测量江西某长大跨桥梁的整体挠度的场景。图 7 为其中一套二维测量系统在货车经过时的挠度测量结果,其测量的跨度为 65m。



图 6 多套单相机二维测量系统测量长大跨桥梁挠度

Fig. 6 Deflection measurement of long-span bridge using multi-camera 2D system

实际桥梁挠度测量中,难以保证相机光轴与待测桥梁侧面垂直。由于桥梁挠度测量的特殊性(即只需要测量竖向位移),所以偏航角对测量结果不产生影响,滚动角的影响可以通过计算像素点的总位移消除。故只需要考虑俯仰角的影响,文献[28]给出了修正方法

$$V \cong \frac{L}{\sqrt{[(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2]l_{ps}^2 + f^2}} \frac{vl_{ps}}{\cos\beta} \quad (13)$$

式中: β 为相机的俯仰角; (x, y) 为像素点坐标; (x_c, y_c) 为主点坐标; L 为相机到待测桥梁侧面的距离; f 为镜头焦距; v 为像素点的位移,这里由于桥梁上待测点的水平位移相对于竖向位移是一个高阶小量,所以假设像素点的位移都是由于桥梁挠度引起的; V 为待测点的挠度; l_{ps} 为单个像素的实际物理尺寸。

2.2 双相机三维测量

基于立体视觉测量原理,使用从不同角度拍摄的两台相机即可实现被测物体表面三维位移的测量。对于桥梁挠度测量,与传统的双目三维测量最大的不同就是测量视场。由于桥梁结构一般具有尺寸大的特点,因此测量视场会非常大,双相机系统的标定将无法使用传统的平面标定法进行实施。为了实现大视场下的三维系统标定,可以在内参标定好的情况下,使用 1.1.3 节中基于极线约束的相机外参标定方法。在墙面上安装标志点,通过单目摄影测量重构^[15],大型墙面则可以直接充当内参标定的标定板^[14]。对于现场测量时的相机外参标定,考虑到桥梁的几何特征,若视场中的控制点信息不够,必要时甚至可以使用无人机携带标记点来充当标定过程中的控制点^[31],如图 8 所示。

对于双相机三维测量,需要将三维重构坐标系的竖向转到与桥梁挠度方向保持一致,这样测量的竖向位移才是桥梁的挠度值。与单相机二维测量相同,双相机三维测量的测量分辨率主要受到测量视场和成像分辨率的限制。对于大视场下的挠度测量,其测量分辨率往往会比较低。与单相机二维测量相比,双相机三维测量可以测量得到 3 个方向的位移,因此测量结果会更加丰富。

2.3 基于单目摄影测量的挠度准静态测量

基于单目摄影测量原理,通过在桥梁上安装标记点,并在桥梁变形前后对标记点进行三维重构,同

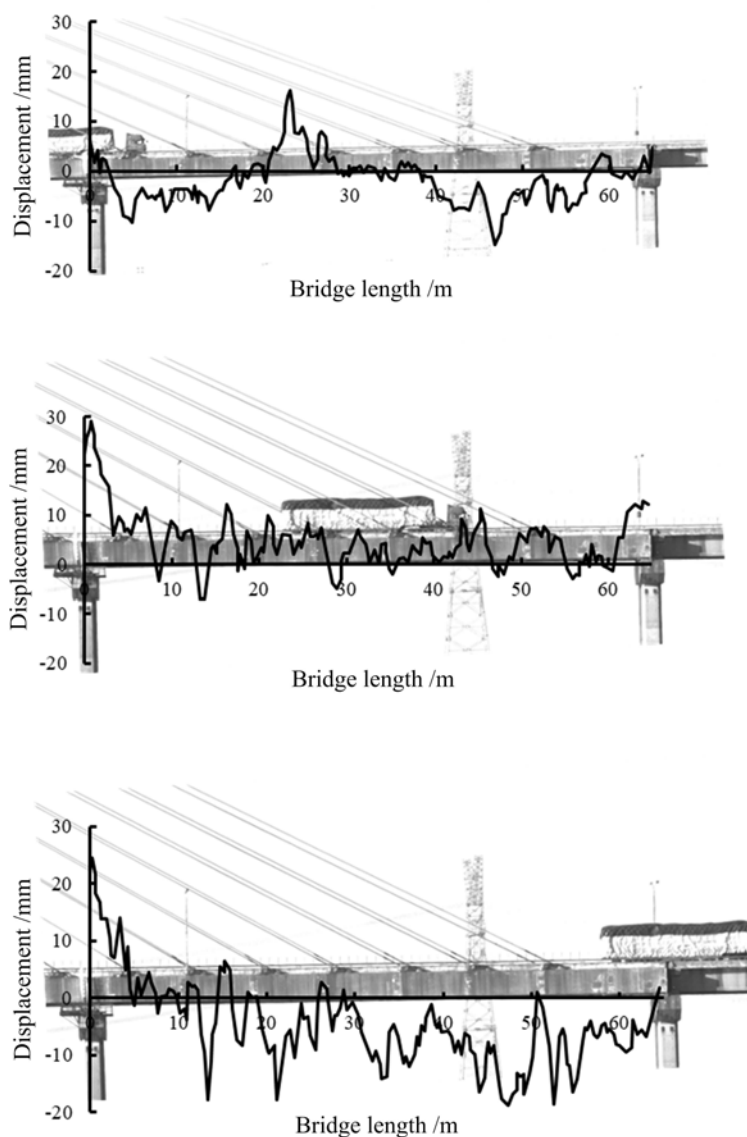


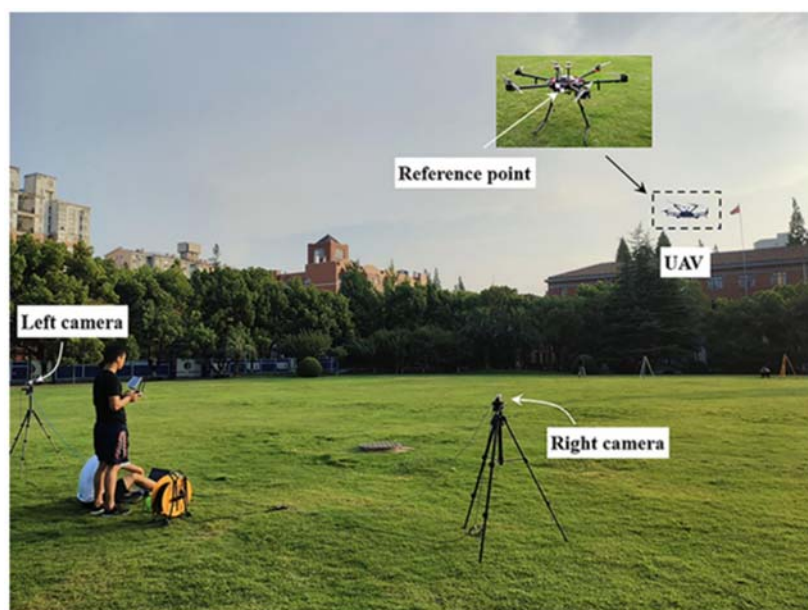
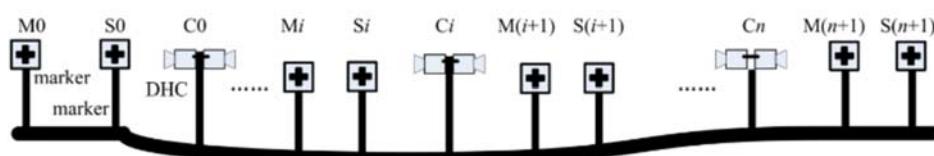
图 7 货车经过时其中一套二维测量系统的挠度测量结果

Fig. 7 Measured deflection using one of the two-dimensional measurement systems as truck passes

样可以测量不同时刻下的桥梁多点挠度信息^[32],如图 9 所示。该方法需要有一个不发生变形的参照坐标系,将不同时刻下的三维坐标信息都建立在参考坐标系下,才能实现挠度的高精度测量。参考坐标系可以建立在桥墩上,且坐标系的竖向需要与桥梁挠度的方向保持一致。同时,为了确定测量的尺度信息,需要在视场内放置一些标定尺。该方法具有设备简单、测点多、测量分辨高的优点,但是该方法无法实现桥梁的动态挠度测量。

2.4 位移传递串联相机网络多点动态测量

为了实现桥梁挠度的多点、高分辨、动态测量,国防科大的于起峰院士团队开创性地提出了位移传递串联网络摄像测量方法^[33],图 10 为该测量方式的原理图。 M 与 S 为合作标志点, C 为双头相机,下标 $0, \dots, i, \dots, n$ 为从左至右的单元编号,令 h 为合作标志点在图像中的竖向位移量, k 为图像对标志点的放大倍数, Δy 为合作标志或双头摄像机的竖向位移量, d 为相机与合作标志点间的距离, θ_{Ci} 为编号为 Ci 的双头相机单元的俯仰角变化量。只考虑竖向位移和俯仰角时有

图 8 大视场下的双相机三维变形测量^[31]Fig. 8 Binocular vision 3D deformation measurement with large field of view^[31]图 9 基于单目摄影测量的准静态挠度测量^[32]Fig. 9 Quasi-static deflection measurement based on close-range photogrammetry^[32]图 10 位移传递像机串联网路摄像测量原理^[33]Fig. 10 Principle of displacement-relay videometrics with camera series network^[33]

$$\begin{cases} h_{M_i}^G = k_{M_i}^G (\Delta y_{M_i} - \Delta y_{C_i} - d_{M_i}^G \cdot \sin \theta_{C_i}) \\ h_{S_i}^G = k_{S_i}^G (\Delta y_{S_i} - \Delta y_{C_i} - d_{S_i}^G \cdot \sin \theta_{C_i}) \\ h_{M(i+1)}^G = k_{M(i+1)}^G (\Delta y_{M(i+1)} - \Delta y_{C_i} - d_{M(i+1)}^G \cdot \sin \theta_{C_i}) \\ h_{S(i+1)}^G = k_{S(i+1)}^G (\Delta y_{S(i+1)} - \Delta y_{C_i} - d_{S(i+1)}^G \cdot \sin \theta_{C_i}) \end{cases} \quad (14)$$

h 可由标志点图像坐标的变化得到, 根据公式可以列出 $4n$ 个方程, 且存在 $4n+2$ 个未知数, 如果串联网

络中存在 2 个稳定点,通过主成分分析方法可以精确求解 $2n+2$ 个标志点和 n 个双头相机的竖向位移以及 n 个双头相机的俯仰角变化。

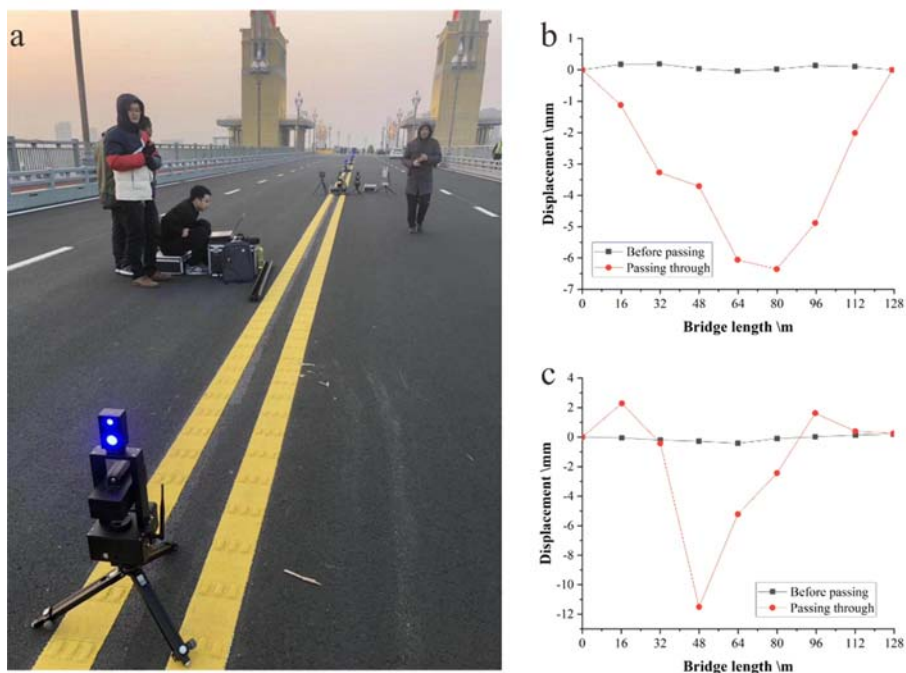


图 11 串联相机网络测量南京长江大桥挠度:(a)实验现场;(b)14:44 火车通过时简支跨挠度;
(c)15:18 火车通过时简支跨挠度

Fig. 11 Deflection measurement of Yangtze river bridge with camera series network: (a) experimental site
(b) measured deflection as train passes at 14:44; (c) measured deflection as train passes at 15:18

本课题组根据串联网络摄像测量方法研制了桥梁挠度动态变形测量系统,并将该系统用于南京长江大桥的多点动态挠度的实时测量(图 11)。图 11(b)和(c)给出了大桥北侧某一跨的挠度测量值。该跨的总长为 128m,共布置了 9 个测点,每个测点之间的距离为 16m。通过实验结果可以看到,火车通过时,该测量系统可以很好地测量大桥实时挠度,实际测量系统噪声小于 0.5mm。该系统具有多点、高分辨、动态测量的优势,在桥梁挠度多点动态测量上具有应用前景。

3 影响因素

3.1 相机自身因素

相机自身硬件因素引起的误差主要是两方面:(1)图像噪声。相机在将光信号转化为电信号并形成图像的过程中会产生噪声。可以通过采取这些方法减小误差:一是选择高信噪比的相机来采集图像;二是使用多幅图取平均的方法来降低图像噪声引起的位移测量误差;三是可以选择合理的计算参数来抵抗噪声的影响^[34]。(2)相机自热。相机内部的电子器件在工作时会发热,从而引起相距发生微小的变化,导致虚变形。马少鹏等研究了相机发热对应变测量的影响^[35],并提出了三种减小误差的方法:一是在测量前将相机预热 1 至 2 小时,使之达到热平衡阶段;二是若无法预热,则可以使用相应的温度对应变的影响曲线对测量结果进行校正;三是可以在测量的同时,观测待测区域附近热变形为零的固定点,进行温度补偿。文献[36]研究了相机发热对基于数字图像相关方法的桥梁挠度仪的测量结果的影响,指出由温度引起挠度测量的误差与相机温度变化存在线性关系,可以通过使用拟合直线的方法进行温度补偿。

3.2 标定因素

相机标定因素导致的误差主要来源于:(1)镜头畸变,对于二维单相机测量,若没有标定镜头畸变,则会引起测量误差。在镜头畸变标定后,可以通过引入畸变系数对图像坐标系中的点进行畸变校正来

减小误差。(2)相机运动导致相机标定参数失效。在相机外参标定后,通常直接使用标定好的外参进行后续的测量。但在实际桥梁挠度测量中,由于相机自身受到风或地面振动等影响产生运动,导致相机外参失效。一般的解决方法是确保待测桥梁在相机视野内的同时寻找不动点(如桥墩),通过待测区域内点的位移减去所测得的不动点的位移即可消除相机运动的影响^[37]。对于双目系统中两个相机的相对外参,则可以通过1.1.3节中的方法实时计算相机外参。

3.3 算法因素

算法因素主要指在特征匹配过程中产生的误差。主要包括:(1)特征匹配算法。选择不同的特征匹配算法的精度也是不同的。与基于特征点的匹配算法相比,基于灰度的亚像素匹配算法通常可以达到更高的精度。(2)基于灰度的亚像素匹配算法的插值误差。可以采用如下方法减小误差:一是可以通过高阶插值的方法减小误差^[38];二是可以通过图像预滤波处理^[39]或是其他插值误差消除的算法^[40-42]。

3.4 环境因素

环境因素对测量的影响主要来源于:(1)环境温度。文献[35]中通过对2小时的挠度测量结果进行分析,指出环境温度对挠度测量值的影响不大,基本可以忽略不计。但文献[43]中通过半年多的间断性测量指出环境温度对位移测量的误差呈每日波动趋势,且随时间增加呈累计趋势。(2)热流扰动。相机与测量目标之间的空气会因为温度不均产生流动,使得相机所采集图像发生扭曲。Luo等人^[44]通过建立热浪畸变基,寻找与有热浪畸变图像最相似的匹配样本,对畸变图像的畸变系数进行估计,再用畸变参数对畸变图像进行校正,然后反复匹配与矫正,从而实现对热浪畸变的过滤。(3)雨雪雾影响。在测量过程中,如果相机与被测物之间有雨雪雾遮挡,则相机成像将出现模糊甚至错误,使特征检测与匹配产生困难。Ye等人^[45]通过在室内用加湿器模拟实际雾气环境,研究了雾气因素对位移测量结果的影响,并采用红外光源来减小测量误差。(4)光线明暗变化。测量环境亮度变化会影响所采集图像的质量,同时会影响特征的检测与匹配。可以通过人为添加光源^[29]来减小光线的影响。(5)大风或地面振动影响。在测量过程中,大风和地面振动将引起相机的晃动与抖动,由于相机与待测桥梁的距离大多情况下较远,光杠杆效应造成的误差往往很大。

4 结语

本文从桥梁挠度测量的必要性出发,介绍了基于视觉的挠度测量方法的相机标定、三维立体视觉、单目摄影测量及特征检测与匹配的原理,分析了单相机二维测量、双相机三维测量、基于摄影测量的准静态测量和位移传递串联网络多点动态测量四种测量方式的优缺点,并对当前测量结果的影响因素进行了详细阐述,同时总结了相关学者的研究成果。基于视觉的桥梁挠度测量方法仍未完全成熟,如何减小各种影响因素带来的误差是未来研究的主要方向。此外,如何在保证精度的条件下提高计算速率,从而实现工程实时监测,也是后续研究的重点。我们相信,通过减小各种影响因素带来的测量误差^[46,47]以及测量精度^[48]和效率^[49]的进一步提升,基于视觉的桥梁挠度长期监测必将在桥梁健康监测中发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] Paultre P, Proulx J, Talbot M. Dynamic testing procedures for highway bridges using traffic loads[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(2):362-376.
- [2] Park K, Kim S, Park H, et al. The determination of bridge displacement using measured acceleration[J]. *Engineering Structures*, 2004, 27(3):371-378.
- [3] Nassif H, Gindy M, Davis J. Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration[J]. *NDT & E International*, 2004, 38(3):213-218.
- [4] Xia H, De Roeck G, Zhang N, et al. Experimental analysis of a high-speed railway bridge under thalys trains[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 268(1):103-113.
- [5] Brown C, Karuna R, Ashkenazi V, et al. Monitoring of structures using the global positioning system[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 1999, 134(1):97-105.

- [6] Yi T, Li H, Gu M. Recent research and applications of GPS based technology for bridge health monitoring[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(10):2597—2610.
- [7] Pieraccini M, Parrini F, Fratini M, et al. Static and dynamic testing of bridges through microwave interferometry[J]. NDT & E International, 2007, 40(3):208—214.
- [8] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009 (YU Qifeng, SHANG Yang. Image based precise measurement and motion measurement[M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese))
- [9] 张靖, 朱大勇, 张志勇. 摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法[J]. 光学学报, 2008(8):1552—1557 (ZHANG Jing, ZHU Dayong, ZHANG Zhiyong. Nonmetric calibration of camera lens distortion[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8):1552—1557 (in Chinese))
- [10] 关棒磊, 孙祥一, 尚洋, 等. 晃动平台上对空拍摄大视场摄像机的标定方法[J]. 光学学报, 2015, 35(7):0712003 (GUAN Banglei, SUN Xiangyi, SHANG Yang, et al. A camera calibration method for large field camera pointing at sky on sway platform[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7):0712003 (in Chinese))
- [11] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications[M]. Springer Science & Business Media, 2009:27—28.
- [12] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330—1334.
- [13] Nistér D. An efficient solution to the five-point relative pose problem[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(6):756—770.
- [14] Shao X, Dai X, Chen Z, et al. Calibration of stereo-digital image correlation for deformation measurement of large engineering components[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(12):125010.
- [15] Dong S, Shao X, Kang X, et al. Extrinsic calibration of a non-overlapping camera network based on close-range photogrammetry[J]. Applied Optics, 2016, 55(23):6363—6370.
- [16] Tong W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications[J]. Strain, 2005, 41(4):167—175.
- [17] Pan B, Xie H, Xu B, et al. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(6):1615—1621.
- [18] 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.
- [19] Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65:73—80.
- [20] Shao X, Dai X, He X. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss-Newton algorithm in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 71:9—19.
- [21] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]. Alvey Vision Conference, 1988.
- [22] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91—110.
- [23] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-Up Robust Features (SURF)[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2008, 110(3):346—359.
- [24] Ullah F, Kaneko S. Using orientation codes for rotation-invariant template matching[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(2):201—209.
- [25] Fukuda Y, Feng M, Narita Y, et al. Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 13(12):4725—4732.
- [26] Yoneyama S, Kitagawa A, Iwata S, et al. Bridge deflection measurement using digital image correlation[J]. Experimental Techniques, 2007, 31(1):34—40.
- [27] 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(12):04015023.
- [28] 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.
- [29] Tian L, Pan B. Remote bridge deflection measurement using an advanced video deflectometer and actively

- illuminated LED targets[J]. *NDT & E International*, 2016, 16(9):1344.
- [30] Yu S, Zhang J, He X. An advanced vision-based deformation measurement method and application on a long-span cable-stayed bridge[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31:065201.
- [31] Feng W, Zhang S, Liu H, et al. Unmanned aerial vehicle-aided stereo camera calibration for outdoor applications[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(1):014110.
- [32] Jiang R, Jauregui D. Development of a digital close-range photogrammetric bridge deflection measurement system[J]. *Measurement*, 2010, 43:1431—1438.
- [33] Yu Q, Jiang G, Shang Y, et al. A displacement-relay videometric method for surface subsidence surveillance in unstable areas[J]. *Science China-Technological Sciences*, 2015, 58(6):1105—1111.
- [34] Wang Z, Li H, Tong J, et al. Statistical analysis of the effect of intensity pattern noise on the displacement measurement precision of digital image correlation using self-correlated images[J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(5):701—707.
- [35] Ma S, Pang J, Ma Q. The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(2):025403.
- [36] 蔡友发, 傅星, 李飞. 数字图像相关方法的桥梁挠度仪的温度补偿[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(7):88—92 (CAI Youfa, FU Xing, LI Fei. Temperature compensations for bridge deflection meter by using of digital image correlation method[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2019, 33(7):88—92 (in Chinese))
- [37] Yoneyama S, Ueda H. Bridge deflection measurement using digital image correlation with camera movement correction[J]. *Materials Transactions*, 2012, 53(2):285—290.
- [38] Schreier H, Braasch J, Sutton M. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(11):2915—2921.
- [39] Pan B. Bias error reduction of digital image correlation using Gaussian pre-filtering[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(10):1161—1167.
- [40] Su Y, Zhang Q, Zheng F, et al. Elimination of systematic error in digital image correlation caused by intensity interpolation by introducing position randomness to subset points[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 114:60—75.
- [41] Wang D, Jiang Y, Wang W, et al. Bias reduction in sub-pixel image registration based on the anti-symmetric feature[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(3):035206.
- [42] Heng W, Huo B, Shao X, et al. Digital image correlation with reduced bias error based on digital signal upsampling theory[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(15):3962—3973.
- [43] Zhou H, Lu L, Li Z, et al. Performance of videogrammetric displacement monitoring technique under varying ambient temperature[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(16):3371—3384.
- [44] Luo L, Feng M. Vision based displacement sensor with heat haze filtering capability[C]// *Structural Health Monitoring*, 2017.
- [45] Ye X, Yi T, Dong C, et al. Vision-based structural displacement measurement; System performance evaluation and influence factor analysis[J]. 2016, 88:372—384.
- [46] 马沁巍, 顾昊, 马少鹏. 成像光路布置对数字相机热致测量误差影响规律的研究[J]. *实验力学*, 2016, 31(2):217—223 (MA Qinwei, GU Hao, MA Shaopeng. On the influence of imaging light path layout on thermo-induced measurement error of digital camera[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(2):217—223 (in Chinese))
- [47] 苏勇, 张青川. 数字图像相关的噪声导致系统误差及散斑质量评价标准[J]. *实验力学*, 2017, 32(5):699—717 (SU Yong, ZHANG Qingchuan. Noise-induced bias and evaluation criterion of speckle quality in digital image correlation [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(5):699—717 (in Chinese))
- [48] 邵新星, 陈振宁, 戴云彤, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. *实验力学*, 2017, 32(3):305—325 (SHAO Xinxing, CHEN Zhenning, DAI Yuntong, et al. Research process of several key problems in digital image correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(3):305—325 (in Chinese))
- [49] 席涛, 熊宸, 许峰, 等. 基于时序变形预测的数字图像相关加速方法[J]. *实验力学*, 2014, 29(6):711—718 (XI

Tao, XIONG Chen, XU Feng, et al. Acceleration method of digital image correlation based on timing deformation prediction [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(6):711—718 (in Chinese))

Measurement method and Recent progress of vision-based deflection measurement of bridges

SHAO Xinxing¹, HUANG Jinke¹, YUAN Fang¹, WEI Kang¹, HOU Shitong¹,
REN Xiangyun¹, XU Xiangyang¹, DONG Shuai⁴, XU Yingjun³, WANG Chengfei²,
YANG Fujun¹, WU Gang¹, HE Xiaoyuan¹

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. School of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

3. Electrical and Electronic Experiment Center, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

4. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: The deflection is the most direct way to evaluate the carrying capacity and health of bridges. In the past 20 years, the methods of computer vision-based bridge deflection measurement have been gradually applied to the actual measurement due to the advantages of non-contact measurement, simple experimental setup and easy installation. In this paper, the research progress of vision-based bridge deflection measurement is introduced from three aspects: measurement principles, measurement methods and influence factors. In terms of measurement principles, camera calibration, three-dimensional vision, photogrammetry, feature detection and matching are introduced. In terms of the measurement methods, this paper introduces the single-camera two-dimensional measurement, the dual-camera three-dimensional measurement, the quasi-static measurement based on photogrammetry and the multi-point dynamic measurement based on the displacement-relay videometrics series network. In terms of influence factors, this paper introduces the influence of camera imaging factors, calibration factors, algorithm factors and environmental factors on the measurement results, and summarizes the research results at home and abroad. Finally, the future development trends of vision-based bridge deflection measurement are expected.

Keywords: deflection of bridges; videogrammetry; camera calibration; feature detection; feature matching; computer vision