

基于仿射变换矫正相机抖动的数字图像相关测量方法

李明^{1,2}, 苏志龙^{1,2**}, 张东升^{1,2*}¹上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444;²上海市应用数学与力学研究所上海市能源工程力学重点实验室, 上海 200444

摘要 随着数字图像相关方法被逐渐应用于远距离工程结构多点挠度监测等任务中, 户外等非控制测量场景中的相机抖动成为影响测量精度的主要原因之一。为了消除相机抖动对目标点位移测量的影响, 基于描述针孔相机运动的投影模型, 建立了远距离下表征相机扰动运动的仿射变换模型, 并结合稳定参考点, 对相机运动后的图像点坐标进行了校正。为了验证仿射模型的有效性, 进行了三组平移实验。实验结果表明, 在工作距离大于 2 m 的情况下, 仿射变换模型以较为简单的形式有效消除了相机扰动引起的测量误差, 而且不受参考点和目标点深度分布的影响。

关键词 测量; 数字图像相关; 多点位移测量; 相机抖动; 仿射变换模型

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0912002

Methods for Digital Image Correlation Measurement with Camera Shake Correction Based on Affine Transformation

Li Ming^{1,2}, Su Zhilong^{1,2**}, Zhang Dongsheng^{1,2*}¹ School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;² Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200444, China

Abstract As the digital image correlation technique is gradually applied to the tasks such as long-distance multi-point deflection monitoring of engineering structures, camera shake in the non-controlled measurement scenarios such as outdoor scene has become one of the main reasons that affect the measurement accuracy. In order to eliminate the influence of camera shake on target displacement measurement, this study firstly establishes an affine transformation model that represents the camera disturbance movement at a long distance based on the projection model of the pinhole camera movement, and then combines the stable reference points to correct the image point coordinates after the camera movement. To verify the effectiveness of the affine model, three sets of translation experiments are carried out. The experimental results show that when the working distance is greater than 2 m, the affine transformation model effectively eliminates the measurement errors caused by camera shake in a simple way and is not influenced by the depth distributions of the reference and target points.

Key words measurement; digital image correlation; multi-point displacement measurement; camera motion; affine transformation model

OCIS codes 120.3940; 150.1135; 150.3045; 100.4999

1 引言

作为一种非接触的全场光学变形测量方法, 数

字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)^[1]通过比较物体变形前后的图像得到目标点的运动和变形信息。相比于实验力学领域中的其他变形测量技

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-11-20; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01014200)、国家自然科学基金(11727804, 51732008, 11672347, 12002197, 12072184)、中国博士后科学基金(2020M671070)、上海市“超级博士后”资助计划(2019192)

* E-mail: donzhang@staff.shu.edu.cn; ** E-mail: zhilong8845@shu.edu.cn

术, DIC 在科学研究和工程应用方面备受关注, 已被广泛地应用到了诸如结构健康监测、材料科学和生物力学测量等领域^[1-5]。

近年来, 研究人员从图像匹配算法、亚像素插值、散斑优化、计算效率和误差分析等方面对 DIC 方法进行了广泛而深入的研究^[6-12], 可控环境下 DIC 的测量精度高达 0.01 pixel^[13]。然而, 在不可控的测量环境(如野外测量)中, DIC 仍然面临着很多挑战。其中, 最为严重的是环境运动引起的相机抖动问题。有研究人员指出, 相机抖动是非控制环境下 DIC 测量的主要误差来源之一, 因此需要在实际测量中注意相机抖动对测量精度的影响^[14-16]。

现有消除相机运动影响的方法主要分为两类: 一类是基于稳定参考点的方法, 另一类需要额外相机的辅助。基于稳定参考点的方法采用运动模型建立起相机运动前后图像坐标之间的关系, 根据参考点的坐标求解运动模型的参数, 然后使用运动模型对目标点运动后的图像坐标进行修正, 从而达到消除相机抖动的目的。在视觉测量领域, 现有方法大多采用的是简单的平移模型^[17-20], 也有文献基于较为复杂的仿射变换模型^[21]和投影模型^[22-24]来消除相机抖动对 DIC 测量影响。另外一类方法需要增加一个额外相机, 使其与测量相机刚性连接成一个双相机系统^[25-27], 从而消除相机的运动扰动。在双相机系统经过标定之后, 额外相机可以通过追踪人工标识点的方式对测量相机进行运动误差补偿。尽管该方法不需要在测量场景中寻找稳定的参考点, 但是引入了相机系统标定和同步测量等问题, 从而增加了测量系统的成本及复杂度。相对于增加额外相机, 基于稳定参考点的相机扰动方法仅依赖于测量图像, 仍然是补偿相机运动误差的首选方法。然而, 很少有文献对不同运动模型的修正效果进行对比, 也缺少关于基于参考点的修正方法的系统研究。

本文针对基于稳定参考点的相机扰动修正方法, 详细推导了用于相机扰动估计的运动模型, 从理论上说明了运动模型用于多点 DIC 测量的可行性。利用仿射变换模型校正相机抖动对二维多点 DIC 测量结果的影响, 并通过实验验证了该模型的修正精度。不同于文献[21]中的 IAME(Iterative Affine Motion Estimator)算法, 本文介绍的修正方法直接利用参考点坐标解析计算模型参数, 可以很方便地应用于实时测量中。

2 基本原理

对于多点 DIC 测量而言, 目标点位移的计算往往需要在同一个坐标系下建立参考图和变形图之间的空间对应关系, 因此一个基本的要求是: 一个连续的测量过程中相机需保持稳定。然而, 在户外等非控制测量环境中, 诸如地面振动和气流扰动等环境干扰难以避免, 因而很难保证相机一直处于稳定状态。尽管相机稳定装置在一定程度上有助于预防相机抖动^[28], 但当相机抖动无法避免或相机抖动已经产生时, 借助图像信息消除相机抖动的影响仍然是保证测量精度的必要手段。当相机在测量期间发生运动时, 观测到的目标点位移不仅包含了物体运动或变形引起的局部运动信息, 还包含了相机扰动造成的全局运动。为了得到准确的位移数据, 就需要从直接获得的目标点位移中去除全局运动位移。因此, 本文从参数运动模型入手, 建立相机运动前后图像坐标之间的关系, 从而达到校正相机抖动影响的目的。

2.1 投影变换模型

在图像和视觉测量中, 不同的运动模型考虑了不同的相机运动模式。考虑到实际测量中环境扰动引起的相机运动往往同时包含位置和视角变化, 因此以下内容主要基于投影变换模型展开, 其他模型可视作投影模型的特例^[29]。本文采用针孔相机模型, 并将世界坐标系对齐到参考图对应的相机坐标系。如图 1 所示, 对于一个稳定的参考点 P , 其在相机(焦距为 f)运动前后的三维坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) , 对应的图像坐标分别为 (u, v) 、 (u', v') , 根据成像模型可以得到

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{f}{z_1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \frac{f}{z_2} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

假设相机运动后的姿态相对于初始姿态的旋转矩阵和平移向量分别为 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} , 则 (x_2, y_2, z_2) 和 (x_1, y_1, z_1) 存在变换关系:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由(1)、(2)式可以得到相机运动前后图像点之间的关系:

$$\begin{cases} \left[\frac{R_{31}z_2}{f(R_{33}z_2+t_3)}u' + \frac{R_{32}z_2}{f(R_{33}z_2+t_3)}v' + 1 \right] u = \frac{R_{11}z_2}{R_{33}z_2+t_3}u' + \frac{R_{12}z_2}{R_{33}z_2+t_3}v' + \frac{f(R_{13}z_2+t_1)}{R_{33}z_2+t_3} \\ \left[\frac{R_{31}z_2}{f(R_{33}z_2+t_3)}u' + \frac{R_{32}z_2}{f(R_{33}z_2+t_3)}v' + 1 \right] v = \frac{R_{21}z_2}{R_{33}z_2+t_3}u' + \frac{R_{22}z_2}{R_{33}z_2+t_3}v' + \frac{f(R_{23}z_2+t_2)}{R_{33}z_2+t_3} \end{cases} \quad (3)$$

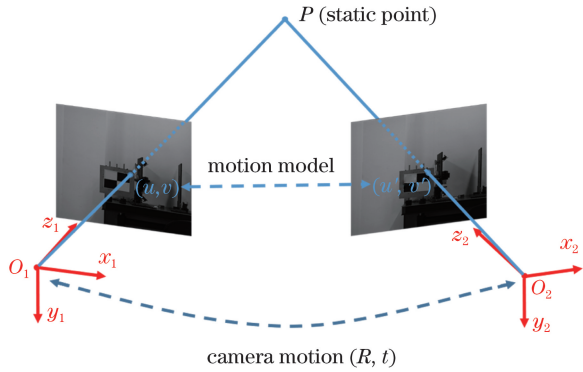


图 1 相机运动造成的相机坐标系与图像坐标系之间的变化
Fig. 1 Change between image and camera coordinate systems caused by camera shake

令 $a_1 = \frac{R_{11}z_2}{R_{33}z_2+t_3}$, $a_2 = \frac{R_{12}z_2}{R_{33}z_2+t_3}$, $a_3 = \frac{f(R_{13}z_2+t_1)}{R_{33}z_2+t_3}$, $a_4 = \frac{R_{21}z_2}{R_{33}z_2+t_3}$, $a_5 = \frac{R_{22}z_2}{R_{33}z_2+t_3}$, $a_6 = \frac{f(R_{23}z_2+t_2)}{R_{33}z_2+t_3}$, $a_7 = \frac{R_{31}z_2}{f(R_{33}z_2+t_3)}$, $a_8 = \frac{R_{32}z_2}{f(R_{33}z_2+t_3)}$, 则可以将相机运动前的图像点表示为相机运动后对应图像点的函数:

$$\begin{cases} u = \frac{a_1u' + a_2v' + a_3}{a_7u' + a_8v' + 1} \\ v = \frac{a_4u' + a_5v' + a_6}{a_7u' + a_8v' + 1} \end{cases} \quad (4)$$

(4)式是投影模型的一般形式,含有 8 个独立参数。由于一对图像点可以提供两个约束,因此至少需要 4 个参考点才能确定该模型。此外,不难看出,模型的 8 个系数在包含编码相机旋转和平移运动信息的同时,还包含了参考点的深度信息,因此参考点必须与目标点在同一个平面上才能保证模型的有效性。

2.2 投影模型的简化估计

(4)式是投影变换的一般形式,其对参考点共面的要求限制了投影变换模型的适用范围。因此,以下将对一般投影模型进行简化,建立一种不受参考点深度限制的实用模型。

通过观察(4)式中投影模型的 8 个参数,可以发现,如果分子和分母同时乘以 $1/z_2$,可以将这 8 个参数变换为

$$\begin{cases} a_1 = \frac{R_{11}}{R_{33} + t_3/z_2} \\ a_2 = \frac{R_{12}}{R_{33} + t_3/z_2} \\ a_3 = \frac{f(R_{13} + t_1/z_2)}{R_{33} + t_3/z_2} \\ a_4 = \frac{R_{21}}{R_{33} + t_3/z_2} \\ a_5 = \frac{R_{22}}{R_{33} + t_3/z_2} \\ a_6 = \frac{f(R_{23} + t_2/z_2)}{R_{33} + t_3/z_2} \\ a_7 = \frac{R_{31}}{f(R_{33} + t_3/z_2)} \\ a_8 = \frac{R_{32}}{f(R_{33} + t_3/z_2)} \end{cases} \quad (5)$$

考虑到实际测量过程中,环境扰动引起的相机平移量通常远小于被测物体到投影中心的距离,即有 $t_1, t_2, t_3 \ll z_2$,从而 $t_1/z_2, t_2/z_2, t_3/z_2$ 近似为 0,因此(4)式中的 8 个未知参数可以被简化为

$$\begin{cases} a_1 = \frac{R_{11}}{R_{33}} \\ a_2 = \frac{R_{12}}{R_{33}} \\ a_3 = \frac{fR_{13}}{R_{33}} \\ a_4 = \frac{R_{21}}{R_{33}} \\ a_5 = \frac{R_{22}}{R_{33}} \\ a_6 = \frac{fR_{23}}{R_{33}} \\ a_7 = \frac{R_{31}}{fR_{33}} \\ a_8 = \frac{R_{32}}{fR_{33}} \end{cases} \quad (6)$$

这说明在相机工作距离比较大的情况下,可以通过忽略相机的小平移扰动,对投影模型进行简化,模型参数仅与相机的旋转和焦距有关。由于简化后的投影模型与参考点的深度信息无关,允许在视场内选

择远离目标点且具有不同深度的稳定点作为参考点,投影模型在相机扰动消除中的实用性和有效性得到提高。

此外,可以发现,焦距 f (以 pixel 为单位) 出现在参数 a_7 和 a_8 的分母上,而旋转矩阵分量 R_{31} 和 R_{32} 往往比 R_{33} 小,从而可以将这两个参数近似为零。因此,(4)式中的投影模型可简化为一个仿射变换模型。不同于 IAME 算法,简化后的仿射模型允许直接利用 DIC 匹配计算得到的参考点坐标计算模型参数,简单易操作。

3 实验

3.1 仿射变换模型修正精度的验证

本节通过一组面内平移实验验证第 2.2 节中

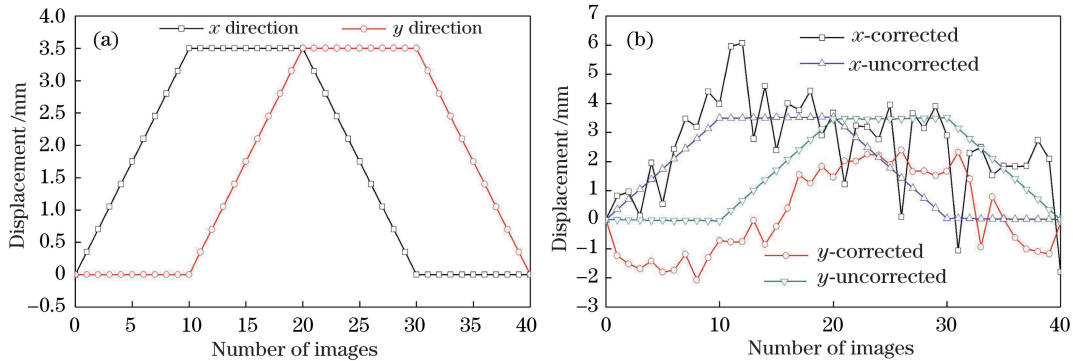


图 2 目标点位移。(a)施加的位移;(b)基于 DIC 方法的修正前后的位移

Fig. 2 Displacements of target point. (a) Applied displacements; (b) displacements before and after DIC-based correction

比较图 2(a)和图 2(b)可以看出,未修正的位移曲线(x -uncorrected 和 y -uncorrected)与真实位移曲线之间有着明显的差异: x 方向位移误差的绝对值从 0.164 mm 变化到 3.548 mm,误差绝对值的标准差为 0.896 mm; y 方向位移误差的绝对值从 0.715 mm 变化到 3.383 mm,误差绝对值的标准差为 0.523 mm。而修正后的位移曲线(x -corrected 和 y -corrected)基本与真实的位移曲线相吻合, x 方向位移误差绝对值的最大值为 0.053 mm,标准差为 0.015 mm; y 方向位移误差绝对值的最大值为 0.054 mm,标准差为 0.017 mm。结果验证了仿射变换模型修正相机运动影响的可行性。为了对比仿射变换模型和投影模型的修正效果,使用相同的参考点计算投影模型参数,并用于修正目标点位移。结果表明,投影模型和仿射变换模型在 x 方向上的修正位移均方根误差(RMSE)皆为 0.026 mm, y 方向的 RMSE 分别为 0.030 mm 和 0.028 mm。由此可知,两种运动模型几乎具有相同的修正效果,也证明了第 2.2 节中简化假设的合理性。此外,根据每

仿射变换模型的修正精度,其中通过人工干扰的方式对相机施加运动扰动。实验采用分辨率为 2448 pixel \times 2050 pixel 的 Baumer TXG50 相机,镜头焦距为 25 mm。将目标点设置在距离相机 3.771 m 的二维移动平台上,用于修正模型估计结果的参考点选取在距离二维移动平台后方 0.335 m 的金属板上。通过调节二维移动平台,使目标点沿 x 和 y 方向交替移动,每个方向移动 10 次,每次移动的位移步长为 0.350 mm。目标点移动一次,相机拍摄一次图像,再随机移动三脚架,相机产生扰动后进行下一次测量。目标点移动的真实位移如图 2(a)所示,利用 DIC 方法直接得到的实际测量位移和修正后的位移数据如图 2(b)所示。

张变形图像计算了投影参数 a_7 和 a_8 ,结果显示,二者的绝对值均不大于 10^{-6} ,这说明通过忽略参数 a_7 、 a_8 ,将投影模型简化为仿射变换模型是合理的。相比于投影模型,仿射变换模型具有线性形式,在不影响修正精度的前提下更容易求解。所以,在 DIC 实际测量中,可以用仿射变换模型取代投影模型以消除相机抖动对测量的影响。

3.2 工作距离对仿射变换修正效果的影响

当相机平移分量远小于参考点深度时,投影模型的一般形式可进一步简化为与深度信息无关的仿射变换模型。为了验证这一点,本节在工作距离分别为 0.5,0.75,1.0,1.5,2,2.5,3,3.5 m 情况下各进行了一组实验,实验使用与第 3.1 节相同的相机和测量目标。在每组实验中,使用二维平移台使目标分别在 y 和 x 方向移动,每个方向移动 10 次,位移步长为 0.350 mm,并在移动中对相机施加人为扰动。之后,对目标点的位移进行计算,并从视场内的固定区域(位于移动平台两侧)中选择参考点,应用仿射变换模型修正相机扰动。对于每一个测试的

工作距离,可以得到 20 组相对于 x 和 y 方向真实平移值的绝对误差,通过计算这些绝对误差的均方根,得到衡量仿射模型修正性能的总体均方根误差,结果如图 3 所示。可以看出,随着工作距离的增加,经仿射变换修正后位移测量结果的 RMSE 呈现下降的趋势,且在工作距离达到 2 m 以后趋向于稳定。该结果说明,当工作距离比较大时,可以将相机平移量与场景点深度的比值近似为 0,使用简明的仿射变换模型修正相机抖动对测量结果的影响。同时,该实验也给出了仿射变换模型适用的工作距离建议值为 2 m。

3.3 参考点和目标点深度不同时相机运动修正效果的验证

根据第 2.2 节可知,只要相机运动的平移分量远小于参考点的深度,一般投影模型可简化为不受深度约束的仿射模型,本节通过图 4 所示的实验展示了参考点和目标点深度不同时仿射模型的修正效果。验证实验包括 T1 和 T2 两组,相机工作距离皆为 7.252 m,但是目标点与参考点之间的距离不

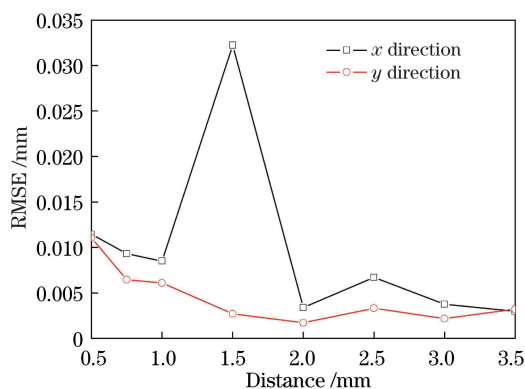


图 3 仿射变换模型修正误差随工作距离的变化
Fig. 3 Correction error of affine transformation model versus working distance

同。在 T1 中,参考点和目标点分别设置在不同的防振平台上,二者之间的距离为 4.516 m;在 T2 中,参考点和目标点在同一个防振平台上,二者之间的距离为 0.332 m。在实验中,通过调整平移台,目标点分别沿着 x 和 y 方向移动,每次移动 0.35 mm,共移动 20 次。

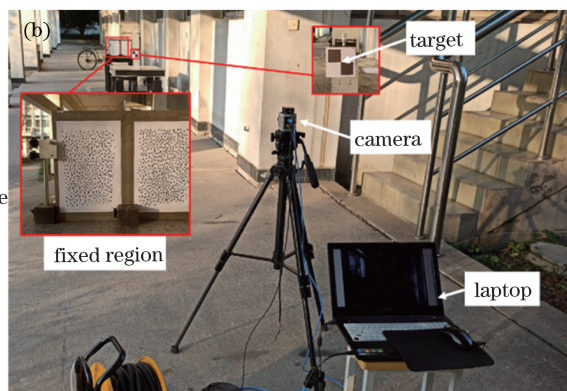
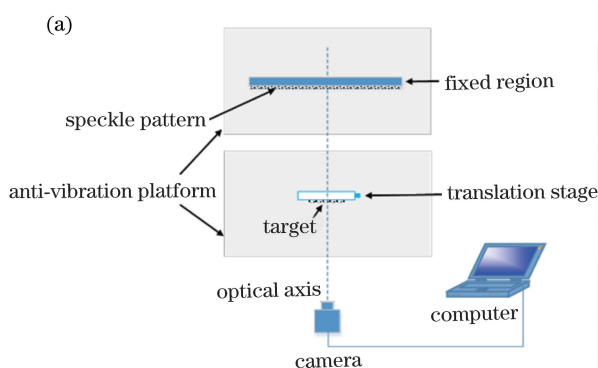


图 4 实验装置。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 4 Experimental setup. (a) Schematic; (b) physical map

参考点和目标点的匹配均由 DIC 算法完成,两组实验测量结果如图 5 所示。可以看出,在进行相机运动修正之前,两组实验测量的目标点位移(T1-uncorrected 和 T2-uncorrected)与目标点的真实位移有着十分显著的差异;然而在使用仿射变换模型修正之后,无论参考点距离目标点远(T1-corrected)

还是近(T2-corrected),由相机抖动引起的测量误差基本可以被有效地消除。表 1 对两组实验的误差进行了比较,可以看出,两组实验在两个方向上的误差绝对值的均值和标准差非常接近(差值 ≤ 0.01 mm)。该实验结果说明,当相机运动的平移分量远小于测量场景深度时,即使所选择的参考点

表 1 两组实验中误差绝对值的最大值、均值和标准差

Table 1 Maximum value, mean value and standard deviation of absolute value of error in two experiments unit: mm

| Absolute value of error | T1 | | T2 | |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | x displacement | y displacement | x displacement | y displacement |
| Maximum | 0.101 | 0.112 | 0.157 | 0.100 |
| Mean value | 0.060 | 0.030 | 0.057 | 0.038 |
| Standard deviation | 0.029 | 0.028 | 0.039 | 0.028 |

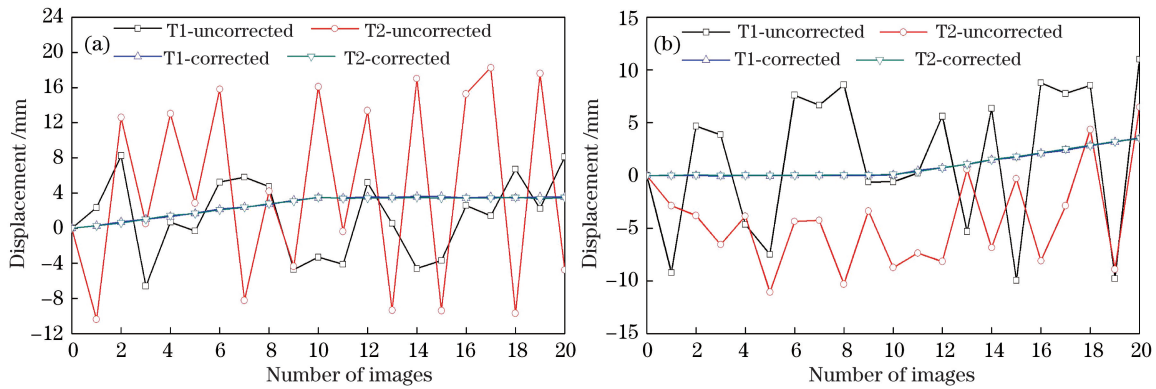


图 5 两组实验修正前后的位移。(a) x 方向位移;(a) y 方向位移

Fig. 5 Displacements before and after correction for two test experiments. (a) Displacements in x direction; (b) displacements in y direction

和目标点不在同一深度,仿射变换模型仍然具有良好的扰动修正作用,进而进一步证明了在实际测量中采用仿射变换模型进行相机扰动修正的可行性。

4 结 论

为了消除相机抖动对多点 DIC 测量的影响,基于针孔相机投影模型,建立了用于校正相机扰动误差的仿射变换模型。直接使用参考点坐标求取描述相机运动的仿射变换模型参数,然后使用模型消除相机扰动引起的图像点位移,最终得到准确的位移测量。仿射变换模型修正精度验证实验表明,所提方法可以有效消除相机抖动引起的位移测量误差,验证了仿射变换模型修正的可行性;与一般的投影模型对比发现,仿射变换具有与投影模型相同的扰动误差修正效果,而且模型更为简单、高效。几组不同工作距离下的测试结果表明,当工作距离大于 2 m 时,仿射变换模型的修正误差趋于稳定。此外,实验验证了目标点和参考点具有不同深度时仿射变换模型的性能,结果表明,在相机工作距离比较大的情况下,选择的参考点可以远离目标点且不受深度范围的影响。因此,仿射变换模型在修正相机抖动方面具有较高的实用性,且在工程结构挠度在线监测和实时测量中具有良好的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Su Z L, Lu L, Yang F J, et al. Geometry constrained correlation adjustment for stereo reconstruction in 3D optical deformation measurements[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 12219-12232.
- [2] Yang L Y, Wang G D, Xu L N, et al. Model test of roadway surrounding rock deformation by digital image correlation method[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(5): 76-81.
- [3] Zhang S Q, Zhang Y C, Chen M, et al. Characterization of mechanical properties of aluminum cast alloy at elevated temperature[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2018, 39(7): 967-980.
- [4] Zhang D S. Digital image correlation: theory and applications[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2009, 24(2): 85-88, 93.
张东升. 数字图像相关测量技术及其应用[J]. 医用生物力学, 2009, 24(2): 85-88, 93.
- [5] Du J X, Zhao J Q, Wang H T, et al. Regularized global digital image correlation method for crack tip deformation field measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1112001.
杜鉴昕, 赵加清, 王海涛, 等. 一种针对裂尖变形场测量的正则化全局 DIC 方法[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1112001.
- [6] Su Z L, Lu L, He X Y, et al. Recursive-iterative digital image correlation based on salient features[J]. Optical Engineering, 2020, 59(3): 034111.
- [7] Su Y, Zhang Q C, Xu X H, et al. Theoretical estimation of interpolation bias error in digital image correlation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(2): 495-510.
苏勇, 张青川, 徐小海, 等. 数字图像相关技术中插值偏差的理论估计[J]. 力学学报, 2016, 48(2): 495-510.
- [8] Pan B, Wu D F, Xia Y, et al. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(2): 120-129.
潘兵, 吴大方, 夏勇, 等. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. 实验力学, 2010, 25(2):

- 120-129.
- [9] Xi T. Two dimensional digital image correlation acceleration method and GPU high-speed implementation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
席涛. 二维数字图像相关加速方法与 GPU 高速实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [10] Bornert M, Brémand F, Doumalin P, et al. Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results [J]. *Experimental Mechanics*, 2009, 49(3): 353-370.
- [11] Zhu F P, Lu R Z, Bai P X, et al. Enhancement of strain measurement accuracy of two-dimensional digital image correlation based on dual-reflector imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212002.
朱飞鹏, 陆润之, 白鹏翔, 等. 双反射镜成像用于二维数字图像相关应变精度提升[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212002.
- [12] Wang X B, Dong W, Yang M, et al. Inhomogeneous strain measurement based on least absolute deviation fitting for digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0312001.
王学滨, 董伟, 杨梅, 等. 基于最小一乘拟合的非均匀应变的数字图像相关测量[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0312001.
- [13] Tong W. Formulation of Lucas-Kanade digital image correlation algorithms for non-contact deformation measurements: a review [J]. *Strain*, 2013, 49(4): 313-334.
- [14] Feng D, Feng M Q, Ozer E, et al. A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement [J]. *Sensors*, 2015, 15(7): 16557-16575.
- [15] Alipour M, Washlesky S J, Harris D K, et al. Field deployment and laboratory evaluation of 2D digital image correlation for deflection sensing in complex environments [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(4): 04019010.
- [16] Wang S, Zhang S Q, Li X D, et al. Development of monocular video deflectometer based on inclination sensors [J]. *Smart Structures and Systems*, 2019, 24(5): 607-616.
- [17] Olaszek P. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method [J]. *Measurement*, 1999, 25(3): 227-236.
- [18] Chen J G, Davis A, Wadhwa N, et al. Video camera-based vibration measurement for civil infrastructure applications [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2017, 23(3): B4016013.
- [19] Murray C, Hoag A, Hoult N A, et al. Field monitoring of a bridge using digital image correlation [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering*, 2015, 168(1): 3-12.
- [20] Xing L, Dai W J. Method and application research on vision measurement for deformation monitoring [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(3): 315-320.
邢磊, 戴吾蛟. 视觉变形测量方法及应用研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38(3): 315-320.
- [21] Abolhasannejad V, Huang X M, Namazi N, et al. Developing an optical image-based method for bridge deformation measurement considering camera motion [J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2754.
- [22] Yoneyama S, Ueda H. Bridge deflection measurement using digital image correlation with camera movement correction [J]. *Materials Transactions*, 2012, 53(2): 285-290.
- [23] Jo B W, Lee Y S, Jo J, et al. Computer vision-based bridge displacement measurements using rotation-invariant image processing technique [J]. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1785.
- [24] Lee J, Jeong S, Lee Y J, et al. Stress estimation using digital image correlation with compensation of camera motion-induced error [J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 5503.
- [25] Gauthier L R Jr, Jansen M E, Meyer J R, et al. Method for separating video camera motion from scene motion for constrained 3D displacement measurements [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9202: 92021V.
- [26] Lee J, Lee K C, Jeong S, et al. Long-term displacement measurement of full-scale bridges using camera ego-motion compensation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 106651.
- [27] Wheeler L N, Take W A, Hoult N A, et al. Measurement of rail deflection on soft subgrades using DIC [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2016, 169(5): 383-398.
- [28] Ribeiro D, Calçada R, Ferreira J, et al. Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system [J]. *Engineering Structures*, 2014, 75: 164-180.
- [29] Dufaux F, Konrad J. Efficient, robust, and fast global motion estimation for video coding [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(3): 497-501.