

古建筑彩绘梁整像素位移自适应搜索解算方法

刘纲^{1,2†}, 李孟珠², 蒋伟², 张维庆²

(1. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 通过在构件表面喷涂均匀散斑并拍摄变形前后的图片, 采用数字图像相关法(DIC)可实现构件位移的非接触式测量. 针对古建筑木梁彩绘图案灰度不均, 导致传统 DIC 在整像素位移解算时识别效果差、计算效率低的难题, 提出修正的自适应十字模式搜索法(IARPS)进行整像素位移解算. 首先, 预估第一个搜索点的搜索半径, 在该半径内进行穷举搜索; 然后引入自适应十字模式算法, 通过小菱形搜索实现整像素位移的解算. 采用散斑图模拟位移及装饰有彩绘图案的木梁压弯实验, 将 IARPS 与 DIC 中常用粗-细搜索算法进行对比, 结果表明, IARPS 方法能有效克服粗-细搜索算法局部计算不精确的缺陷, 且 IARPS 的计算效率可提高 71.6%, 为将 DIC 应用于古建筑彩绘梁的非接触式位移测量提供了一种新的解算方法.

关键词: 古建筑彩绘梁; 数字图像相关法; 局部穷举; 自适应搜索; 整像素

中图分类号: TP274

文献标志码: A

Adaptive Search Algorithm Method of Whole-pixel Deformation for Ancient Building Painted Beams

LIU Gang^{1,2†}, LI Mengzhu², JIANG Wei², ZHANG Weiqing²

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University)

of the Ministry of Education, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Digital image correlation method (DIC) can realize non-contact displacement measurement of member by spraying uniform speckle on member surface and taking pictures before and after deformation. Considering the problems of poor recognition effect and low calculation efficiency in deformation measurement of traditional integral pixel algorithm for ancient building painted beams caused by painted pattern uneven gray scale, an Improve-Adaptive Rood Pattern Search (IARPS) method is proposed to calculate the entire pixel displacement. Firstly, the search radius of the first search point is estimated, and an exhaustive search is performed within the radius. Then, Adaptive Rood Pattern Search was introduced to search the whole pixel displacement through small diamond search. By using simulated speckle pattern displacement and the bending test of common regular painted pattern decorative wood beam, IARPS is compared with the coarse-fine search method commonly used in DIC. Through comparative analysis, the results show that IARPS method can effectively overcome the imprecision of local computation in the coarse-fine

* 收稿日期:2019-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578095), National Natural Science Foundation of China(51578095); 国家重点研发计划项目(2018YFC0705604), National Key Research and Development Program of China(2018YFC0705604)

作者简介: 刘纲(1977—), 男, 四川达州人, 重庆大学教授

† 通讯联系人, E-mail: gliu@cqu.edu.cn

search method, and the calculation efficiency can be improved by 71.6%, which provides a new method to apply DIC to non-contact deformation measurement of ancient painted beams.

Key words: ancient painted beams; digital image correlation method; local exhaustively search; adaptive search; whole-pixel

中国古建筑具有悠久的历史传统,是当时科学技术水平和人民生活状况的真实见证,具有重要的历史、艺术和科学价值^[1]。在以木结构为主的古建筑中,受木材蠕变、腐蚀、虫蛀和长期荷载作用^[2-3],木质构件变形过大问题较为普遍^[4],木结构变形监测可用于判断变形发展趋势、提供结构受力计算所需变形数据,是古建筑木结构预防性保护的重要手段。

传统上古建筑变形测量以接触式方法为主,例如在结构构件上布置观测点或粘贴光纤传感器^[4-5],这些方法对古建筑构件有一定程度的破坏,不利于古建筑保护。虽然近年来无需在古建筑上布设测试点的免棱镜技术得到快速发展,但是其测试精度受较多因素限制,在部分条件下较难满足工程测试要求。近年来,非接触式变形测量方法得到快速发展,其中,基于数字图像相关(Digital image correlation, DIC)原理^[6]的测试方法随着摄像技术、计算能力的提升得到了大力发展,已在航天、机械和土木工程领域得到实际应用。DIC法最早可追溯到20世纪80年代,美国南卡罗莱纳大学Peters等^[7]针对材料表面均匀拉伸应变测量提出基于DIC进行位移测量的思路;Sutton等^[8]针对全场平面内变形的整像素位移搜索,提出粗-细搜索法,从而提高整像素级图像匹配的计算速度。Gencturk等^[9]将DIC法应用于预应力混凝土位移测量,结果表明该方法可准确测量预应力混凝土变形信息。奥村运明等^[10]应用DIC法进行古建筑墙体裂缝观测,结果显示该方法能满足工程上裂缝测量的要求。

DIC法通过在被测结构表面喷涂具有一定特征的散斑图,然后利用结构位移前后散斑图的变化来识别结构变形^[11],而中国古建筑木结构的表面往往装饰有彩绘图案^[12],故利用彩绘图也可实现位移测量。但应指出的是,与特制散斑图相比,彩绘图灰度梯度分布不均且存在大块灰度近似区,故直接采用现有DIC位移解算方法将无法保证位移测试精度。针对这一问题,在现有自适应十字模式搜索方法(Adaptive Rood Pattern Search, ARPS)的基础上,提出

局部穷举-自适应十字模式搜索方法(Improve-APRS, IARPS),提高整像素位移搜索精度,从而增强古建筑彩绘图位移辨识精度,并提升位移辨识计算的稳定性和效率。通过实验验证所提方法的适用性,并与常用整像素位移解算方法进行对比,为古建筑木结构非接触式位移测量提供新的解算方法。

1 基于 DIC 原理的位移测试

1.1 位移测试原理

基于DIC原理的位移测试技术在被测构件上喷涂特制散斑图,借用数字摄影技术将散斑图在相机感光组件上成像,然后通过匹配变形前后数字图像像素的变化,从而获得被测物体表面各点的位移信息,该方法的位移辨识原理如图1所示。

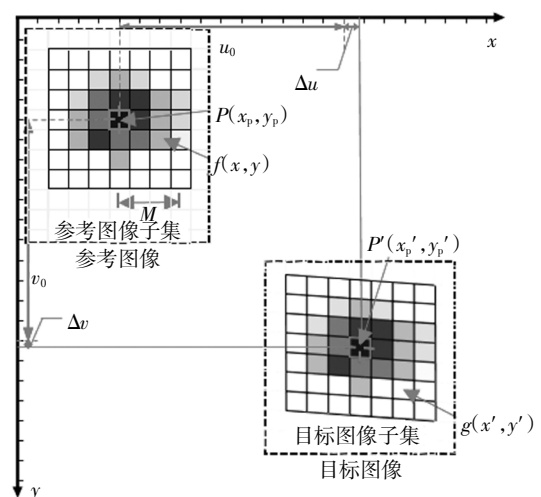


图 1 二维 DIC 位移辨识原理

Fig.1 Displacement identification principle of two-dimensional DIC

在图1中,一个小方格代表数字图像上的一个像素,变形前的图像称为参考图像,变形后的图像称为目标图像。针对参考图像、目标图像建立统一的坐标系 $x-y$, 参考图像中 (x, y) 处像素点的灰度值为 $f(x, y)$; 目标图像中 (x', y') 处的像素点灰度值为

$g(x', y')$. 设参考图像中 P 点坐标为 (x_p, y_p) , 目标图像中与 P 点对应的 P' 点坐标为 (x'_p, y'_p) , DIC 方法计算 P' 点到 P 的距离可分为以下几个步骤:

1) 在参考图像中, 选取整数 M , 然后选择一个计算点 $P(x_p, y_p)$, 以该点为中心选取 $(2M+1) \times (2M+1)$ 像素大小的区域为计算子集, 其中 $2M+1$ 称为子集半径.

2) 在目标图像中, 任选一点并作为搜索点, 以该点为中心, 框选 $(2M+1) \times (2M+1)$ 的计算子集, 再计算相关系数 C_{ZNSSD} :

$$C_{ZNSSD} = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [F(x_p, y_p) - G(x', y')]^2. \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} F(x_p, y_p) = \frac{f(x_p, y_p) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x_p, y_p) - f_m]^2}}, \\ G(x', y') = \frac{g(x', y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y') - g_m]^2}}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_m 表示参考图像子集的灰度平均值; g_m 表示目标图像子集的灰度平均值. 然后, 通过一定的搜索方法计算多个点的相关系数, 并将相关系数最大值点对应的搜索点作为 P' 点的匹配点. 此时, 可确定 P 点整像素 x 向位移 u_p , y 向位移 v_p .

3) 根据求得的匹配点的坐标, 在 $(x_p + u_p, y_p + v_p)$ 像素点相邻 1 个像素范围内通过一定方法进行亚像素位移搜索, 得到 P 点分别在 x 、 y 向亚像素位移 Δu_p 、 Δv_p .

4) 根据求得的整、亚像素位移, 最终解算得到 P 点 x 向位移 u 、 y 向位移 v 分别为:

$$\begin{cases} u = u_p + \Delta u_p, \\ v = v_p + \Delta v_p. \end{cases} \quad (3)$$

从以上步骤可知, DIC 法先执行整像素位移搜索, 并将搜索结果作为亚像素搜索的初始值, 故整像素搜索算法不但决定整像素搜索精度, 也将影响亚像素搜索精度. 因此, 整像素搜索算法对位移辨识精度的影响较大.

需指出的是, 第一次在目标图像中任选一点时, 若该点距图像边缘的距离小于 $2M+1$, 则无法以该点为中心组成计算子集, 称为边缘问题. 为避免这一问题, 可在初次选择计算点时进行预判: 若计算点不存在边缘问题, 则进行以上步骤的搜索; 若不足, 则重新选取计算点, 直至找到不存在边缘问题的计算点.

1.2 整像素粗-细搜索算法

目前, DIC 中最常用的整像素位移搜索算法有粗-细搜索法 (Coarse-Fine Search, CFS)^[13]、三步搜索法^[14]及菱形搜索法^[15]等, 其中 CFS 算法的精度和计算效率相对较高, 其位移搜索的基本思路为: 将整个目标图像视为搜索区域, 首先采用较大的计算步长计算相关系数, 以相关系数极小值对应的搜索点为本轮搜索的匹配点; 然后以此匹配点为中心, 缩小搜索区域及计算步长选取搜索点进行下一轮搜索; 最后, 当计算步长缩小为 1 像素时, 可得 P' 点的匹配点, 进而计算得到该点的整像素位移.

1.3 搜索算法精度评价指标

设参考图像和目标图像的像素均为 $I \times K$, 则两幅图像的均方误差 MES 定义为:

$$MES = \frac{1}{I \times K} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^K [f(i, j) - g(i, j)]^2. \quad (4)$$

两幅图像的峰值信噪比 (Peak-Signal-to-Noise-Ratio, PSNR) 定义为:

$$PSNR = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}_I}{\sqrt{\text{MES}}} \right). \quad (5)$$

式中: MAX_I 表示图像灰度的最大值, 对于采样点用 8 进制表示的灰度图像取 255. 峰值信噪比可评价两幅图像子集的近似性, 近似程度越高, PSNR 系数越高, 即搜索算法的精度越高.

2 修正的自适应十字模式整像素搜索法

2.1 自适应十字模式整像素搜索法

CFS 算法假定每一轮最佳匹配点处的相关函数值 C_{ZNSSD} 单调减小, 即由相关系数组成的二维曲面是单峰的. 通常情况下, 由散斑图得到的二维曲面可能存在几个局部极值现象, 如图 2(a) 所示. 此时, 只要计算步长选择合适, CFS 仍可搜索到正确结果. 但对于彩绘图像, 由于其灰度分布不均, 所得相关函数曲面往往存在多峰现象, 在 CFS 搜索过程中的单调性不复存在, 如图 2(b) 所示. 此时, 初始计算步长对 CFS 算法精度甚至正误影响很大, 而初始计算步长通常由人工主观选取, 具有很大的随机性.

为克服计算步长选取的随机性, Nie 等^[16]提出了自适应十字模式搜索法 (Adaptive Rood Pattern Search, ARPS). 其基本思路是, 假设物体的变形是连续的, 在进行整像素位移搜索时, 采用相邻已知位移像素点的位移作为搜索初值, 其具体搜索步骤为:

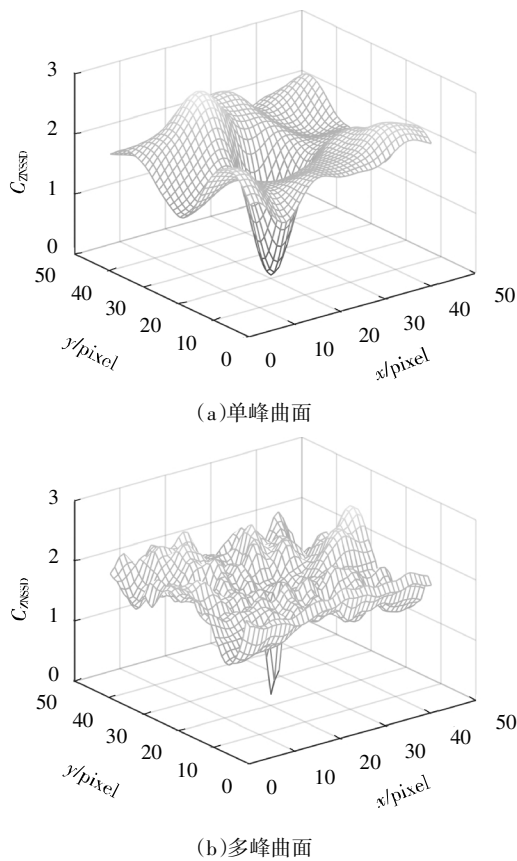


图 2 单峰与多峰曲面示意图

Fig.2 Schematic figure of unimodal and multimodal surfaces

1)对参考图像中的某计算点 P , 设其在 $x-y$ 坐标系中的坐标为 (u_1, v_1) ; 记 P 相邻像素点已知整像素位移为 (u, v) , 记 $R = \max(|u|, |v|)$, $\mathbf{R} = (u, v)$. 在目标图像中, 以坐标 (u_1, v_1) 所在的像素点为中心点 O , 若是第一个计算点, 则在该点沿 $x-y$ 轴向相距 2 像素的上下左右各选 1 个点, 形成十字形搜索模式; 若不是第一个计算点, 则在该点沿 $x-y$ 轴向相距 R 像素的上下左右各选 1 个点, 形成十字形搜索模式, 同时

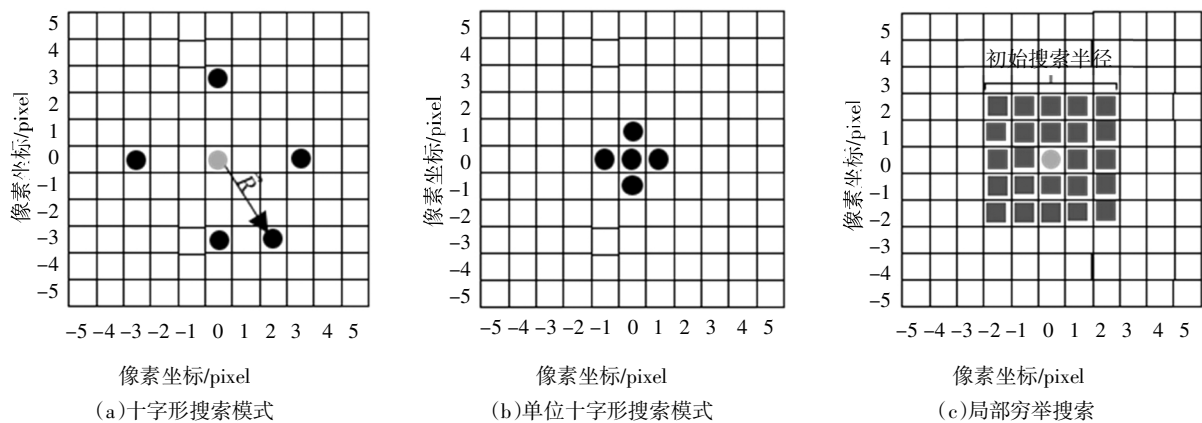


图 3 整像素搜索法示意图

Fig.3 Schematic figure of integer pixel search

选取 \mathbf{R} 为一个搜索点, 共计 5 个搜索点, 如图 3(a) 中黑色小圆点所示.

2)按式(1)计算图 3(a)中 5 个搜索点的相关系数, 选取相关系数最小值所在点为初始匹配点. 以初始匹配点为中心, 选取该点及上下左右 4 个相邻像素点形成单位十字搜索模式, 并将这 5 个点作为新的搜索点, 如图 3(b)所示.

3)按式(1)计算单位十字搜索模式中 5 个搜索点的相关系数, 若最佳匹配位置为单位十字搜索模式的中心点, 则结束搜索, 该点即为计算点 P 的最佳匹配点 $P'(u_2, v_2)$; 否则, 将单位十字中心移至新的相关系数最小点, 重复进行单位十字模式搜索, 直至相关系数最小点为十字搜索模式的中心为止, 此时十字模式的中心点即为计算点的最佳匹配点 P' .

4)根据求得的最佳匹配点 P' 的坐标 (u_2, v_2) , 可解算 P 点的整像素位移 $(u_2 - u_1, v_2 - v_1)$.

当计算参考图像中的第一点时, 其相邻点位移为未知, 故在第 1)步中仅采用十字形搜索模式的 4 个点进行搜索, 其余步骤与以后各计算点的步骤相同.

2.2 基于局部穷举的自适应十字模式搜索法

ARPS 法根据相邻像素已知位移自适应调整步长, 有利于解决相关系数曲面存在多个极值的问题, 但对第一个位移搜索点的位移初值采取零位移假设 (仅采用 4 个搜索点进行计算), 可能带来一定的误差. 为解决该问题, 可先预估第一个位移搜索点的位移最大值, 并将其作为初始搜索半径, 进行局部穷举搜索, 从而为后续各搜索点的位移计算提供准确的初值. 局部穷举搜索具体步骤为:

1)对于参考图形中的某搜索点 P , 已知其在 $x-y$ 坐标系中的坐标为 (u_1, v_1) ; 在目标图像中, 以坐标

(u_i, v_i) 所在的点为中心点,选择一个初始搜索半径,如图3(c)所示,在该方形区域内对每个点进行局部穷举搜索.

2)针对方形区域内的每一个点,计算所有点的相关系数.

3)选取所有搜索点中相关系数最小点为第一个初始计算点的最佳匹配点,然后按照ARPS法的第2)~4)步计算该点位移.

4)按照ARPS方法的第1)~4)步计算剩余各计算点的位移.

采用穷举搜索可确保搜索到精确的位移初始向量,避免陷入图2(b)所示的错误局部最优解,将增加局部穷举搜索后的ARPS法称为修正的自适应十字模式搜索法(Improved-ARPS, IARPS).

3 实验验证

3.1 实验设置

分别通过模拟散斑图发生刚体位移、实验室木梁彩绘图变形实验对比IARPS算法与CFS、ARPS算法的区别.

3.1.1 散斑图位移模拟

采用Zhou等^[17]提出的散斑图生成算法得到 256×256 像素的散斑图作为参考图像,其中高斯光斑数目为1000个,高斯光斑大小为4像素,高斯光斑的中心光强为0.7.将参考图像在 y 向移动6个像素作为目标图像,即目标图像各整像素点的位移向量均为 $(0, 6)$.为模拟测试噪声,在目标图像中加入均值为0,标准差为2的高斯白噪声.为节约篇幅,将参考图像、目标图像分左右两幅给出,如图4所示.

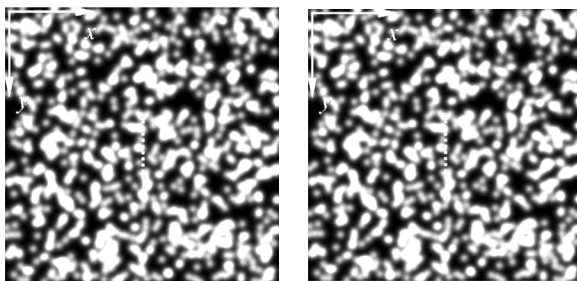


图4 模拟散斑图像

Fig.4 Simulated speckle image

在散斑图中,仅计算图4中虚线所在像素点发生的位移,该虚线由90个像素点组成,其像素坐标自上而下定义为1~90 pixel.

3.1.2 彩绘图实验

在实验室中采用长宽高分别为 $2000 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的木梁进行实验,将规则花纹粘贴于梁中部侧面.采用重物分两次在跨中加载,使梁产生挠度,分别记为工况1和工况2,并在跨中安装千分表对辨识位移的精度进行验证,具体的加载装置如图5所示.实验中采用的图像采集系统为VIC-2D,相机型号为GZL-CL-41C6M-C,其分辨率为 2048×2048 像素.将相机放置在彩绘梁正前方约2 m处,并使其光轴对准梁的形心且与彩绘图案面垂直,将相机与计算机相连并用测试系统的软件进行图像采集.

3.2 实验结果分析

考虑到穷举搜索法(Exhaustive Search, ES)将计算搜索指定范围内所有可能的像素点,其计算精度在所有的搜索算法中最好,故采用该算法作为基准验证其他整像素解算方法的精度.

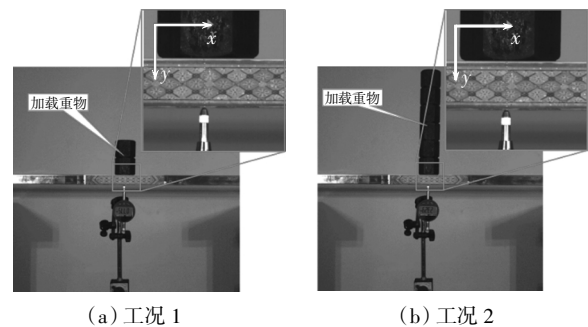


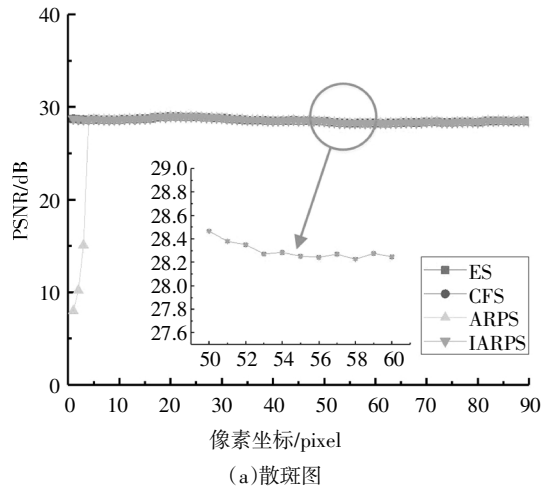
图5 实验加载装置

Fig.5 Experimental loading device

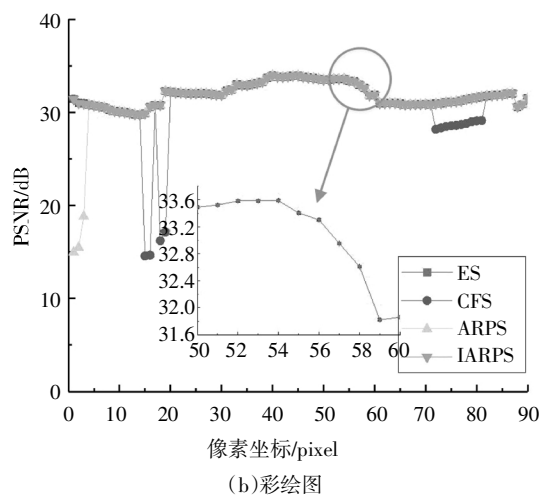
为方便与千分表测试结果对比,取千分表正上方虚线所对应像素进行位移辨识,共包括90个像素点,从上向下依次定义为1~90 pixel.一个像素对应的实际长度为 $25 \text{ mm} / 90 = 0.278 \text{ mm}$.计算子集中 M 取为15,则一个子集包含 31×31 像素.

CFS及IARPS法计算的PSNR结果如图6所示.由图6(a)可知,对于散斑图的整像素位移解算,CFS、IARPS法均可达到与ES法相同的精度,这主要是因为散斑图的灰度分布较均匀,其相关函数组成的二维曲面是单峰的,相关系数往往单调减小,故所有方法均可达到一样的精度;但对于ARPS算法而言,在像素坐标1处的精度较低,这是由于假定的初始假设位移为 $(0, 0)$,不能精确解算第一个搜索点的位移.从图6(b)可看出,在不同像素坐标处,CFS法对彩绘图位移的解算精度会出现降低现象,例如从像素坐标13到20;ARPS法在像素坐标1处的精度也较低,而IARPS法对所有像素坐标的解算精度均

与 ES 法相同,这主要是因为 IARPS 法可精确计算第一个搜索点的整像素位移,且继承了 ARPS 高效的自适应性,因此,可有效克服传统算法局部计算不精确的缺陷,比 APRS、CFS 更适合灰度不均匀彩绘梁位移测量。



(a) 散斑图



(b) 彩绘图

图 6 不同整像素识别算法的 PSNR

Fig.6 PSNR of different integer pixel recognition algorithms

采用算法对相关函数的调用次数作为计算效率的评价指标,调用次数越多,计算效率越低.4 种方法的计算效率比较如图 7 所示,由于 ES 方法是对于全局搜索的,而且 ES 方法只起对比作用,因此为使图像美观,ES 方法也选择跟其他算法一样的 8 像素的搜索半径。

从图 7 可知,穷举法在每个像素点处均需 289 次相关函数运算;CFS 法在不同的搜索点处大约需 43 次相关函数运算;而 IARPS 法除在第一个像素点处需局部穷举计算,需 298 次相关函数运算之外(除局部的穷举搜索外还进行了自适应的搜索,因此搜索次数大于 ES 法搜索次数),其余各像素点则需 9

次相关函数运算.针对 90 个整像素点的位移解算,IARPS 法较 CFS 法的计算效率提高 71.6%,因此 IARPS 法总体上具有较高的计算效率。

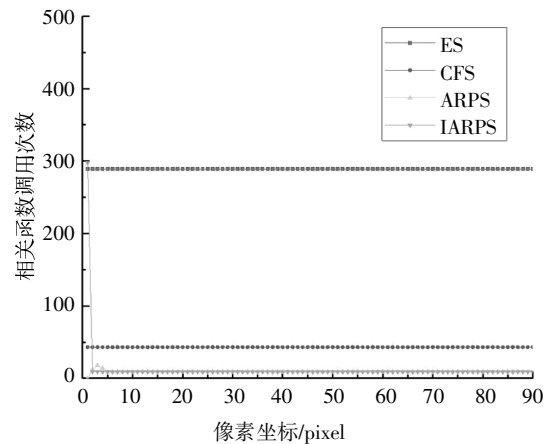


图 7 计算效率对比

Fig.7 Comparison about calculation efficiency

在整像素搜索的基础上,采用常用梯度亚像素搜索法进行亚像素位移辨识,得到的位移识别结果与千分表的测试结果见表 1.当仅采用整像素的识别结果时,相对误差高达 6.05%,这主要是由于 1 个像素对应的位移精度仅为 0.278 mm,而整像素搜索结果误差必然大于该精度,故误差较大.采用亚像素搜索后,相对误差可降低到 0.064%,小于千分之一.因此,所提 IARPS 算法与常规的亚像素识别算法结合后可用于古建筑构件的非接触式位移测试。

表 1 位移识别结果对比

Tab.1 Comparison of displacement recognition results mm

千分表	整像素位移识别		亚像素位移识别	
	IARPS	相对误差/%	梯度法	相对误差/%
1.554	1.648	6.050	1.553	0.064

3.3 参数分析

3.3.1 初始搜索半径大小

对于彩绘图实验,采用 90 个像素点 PSNR 系数之和——SUM-PSNR 来衡量不同初始搜索半径下不同算法的解算精度,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,CFS 法的初始搜索半径要达到 6 像素以上才能有较高的 SUM-PSNR 系数,即初始搜索半径大于像素点实际位移时才能较精确地识别整像素位移.取不同搜索半径时,ARPS 法的识别精度较 IARPS 低,这主要是因为初始计算点假设选取的缘故,IARPS 法的搜索半径仅为 4 像素时就能达到与 ES 相同的精度,这是由于 IARPS 法中尽管第一

步局部穷举方法识别结果存在少许误差,但是之后的自适应搜索部分依然可以进行快速纠正,并保证计算结果的精确性。

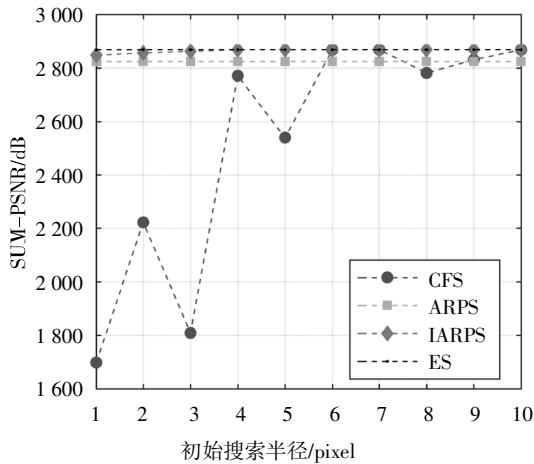


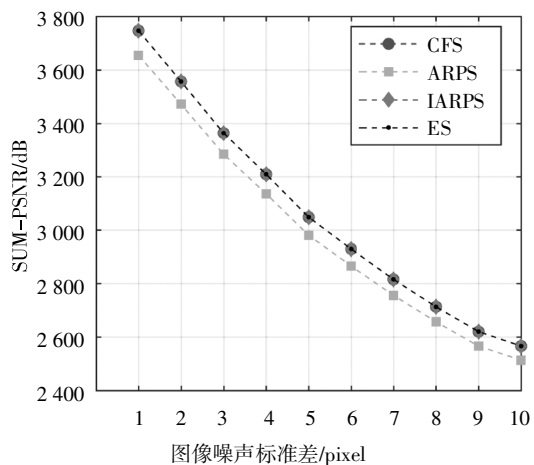
图8 初始搜索半径对识别结果的影响

Fig.8 Effect of initial search radius on the recognition results

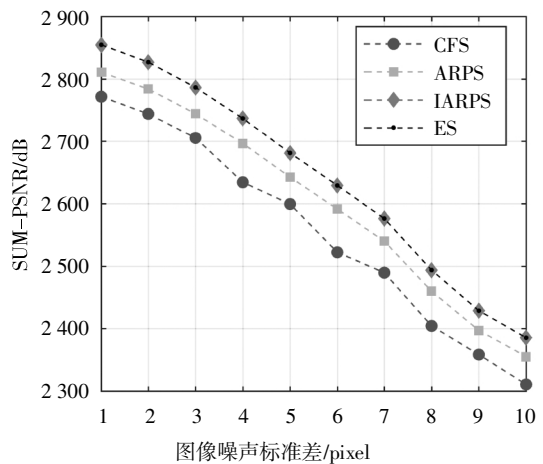
3.3.2 图像噪声分析

采用初始搜索半径为8像素,给模拟散斑图、彩绘图分别添加均值为0,标准差为1~10的高斯白噪声,以测试图像噪声对整像素位移识别的影响,结果如图9所示。

由图9可看出,不管是散斑图还是彩绘图,随着噪声标准差的逐渐增大,SUM-PSNR系数逐渐降低,表明噪声将降低目标图像与参考图像之间的相关性.对散斑图而言,在噪声影响下,CFS、IARPS法的识别精度与ES法相当,这主要是因为散斑图灰度分布较均匀,CFS法可获得较好的解算精度,但ARPS的精度略低,这是由于该方法在计算第一个搜索点位移时有较大误差所致;对彩绘图而言,仅IARPS法与ES法的识别精度相当,且CFS法的精度比ARPS



(a)噪声对散斑图的影响



(b)噪声对彩绘图的影响

图9 测试噪声对位移识别的影响

Fig.9 Effect of test noise on displacement recognition

法更差,这主要是因为相同噪声水平下,灰度分布不均匀导致相关系数曲面出现多峰情况,导致CFS精度大幅下降所致。

4 结论

基于DIC方法基本原理,结合古建筑彩绘梁图案灰度分布不均的特点,引入自适应十字模式搜索法,并针对第一个位移搜索点精度较低的缺点,提出修正的自适应十字模式搜索法(IARPS).模拟散斑图和彩绘梁变形实验表明:

1)在整像素位移搜索方面,IARPS法具有较高的计算精度,在不同的像素坐标以及不同计算步长条件下均能得到正确解算结果,有效克服了CFS法无法适应灰度不均、ARPS法在第一个位移搜索点精度较低的缺陷。

2)IARPS法继承了ARPS法高效计算的优点,在解算90个整像素点位移时,计算效率较CFS法提高71.6%。

3)在不同搜索半径、不同噪声水平下,IARPS法的位移解算能力优于ARPS法和CFS法,且IARPS法的计算精度与精确的完全穷举法相当。

参考文献

[1] JI X,FANG X,SHIM S. Design and development of a maintenance and virtual training system for ancient Chinese architecture [J]. Multimedia Tools and Applications,2018,77(22):29367—29382.
 [2] GUO Z R,YANG Z F. Analysis of aseismic mechanism of wooden

- architecture of ancient Chinese [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 889/890: 1417—1420.
- [3] CHEN L, WANG B. Research on digital reconstruction of Chinese ancient architecture [C]//*Proceedings of 2013 International Conference on Anti-Counterfeiting, Security and Identification*. Shanghai: IEEE, 2014: 136—139.
- [4] 姜绍飞, 唐伟杰, 吴铭昊, 等. 基于 FBG 应变测量的古建筑木梁变形监测方法 [J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(6): 198—206.
- JIANG S F, TANG W J, WU M H, *et al.* A deformation monitoring method of ancient wooden beam based on FBG strain measurement [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(6): 198—206. (In Chinese)
- [5] 时以亮, 施斌, 童恒金, 等. 分布式光纤感测技术在古建筑监测中的应用研究[C]//中国地质学会工程地质专委会. 2014 年全国工程地质学术年会论文集. 太原: 工程地质学报编辑部, 2014: 519—523.
- SHI Y L, SHI B, TONG H J, *et al.* Application research of distributed optical fiber sensing technology in ancient architecture monitoring [C]//*Engineering Geology Commission, China Geology Society. Proceedings of 2014 National Engineering Geology Academic Conference*. Taiyuan: Department of Journal of Engineering Geology, 2014: 519—523. (In Chinese)
- [6] SCHREIER H, ORTEU J J, SUTTON M A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements [M]. Berlin: Springer Publishing Company, 2009: 56—60.
- [7] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experiment stress analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427—431.
- [8] SUTTON M A, WOLTERS W J, PETERS W H, *et al.* Determination of displacement using an improved digital correlation method [M]. London: Butterworth & Co (Publishers) Ltd, 1983: 133—139.
- [9] GENCTURK B, HOSSAIN K, KAPADIA A, *et al.* Use of digital image correlation technique in full-scale testing of prestressed concrete structures [J]. *Measurement*, 2014, 47(1): 505—515.
- [10] 奥村运明, 林颖文, 李宁, 等. 数字图像技术在古建筑裂缝监测中的应用[J]. *河南科学*, 2008, 26(2): 212—214.
- AOCUN Y M, LIN Y W, LI N, *et al.* Applications of digital graphics technology in the monitoring of ancient architecture cracks [J]. *Henan Science*, 2008, 26(2): 212—214. (In Chinese)
- [11] 伍卫平. 图像相关技术的亚像素位移算法与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学力学系, 2009: 28—35.
- WU W P. Sub-pixel displacement algorithm based on image correlation method and experiment study [D]. Wuhan: Department of Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, 2009: 28—35. (In Chinese)
- [12] 林珠龙. 关于中国古建筑油漆彩绘的研究 [J]. *美与时代 (城市版)*, 2018(7): 30—31.
- LIN Z L. Research on the painting of Chinese ancient buildings [J]. *Beauty and Times (City Edition)*, 2018(7): 30—31. (In Chinese)
- [13] 熊磊. 基于数字图像相关方法的材料拉伸变形测量技术 [D]. 长春: 吉林大学机械设计及理论学院, 2012: 13—21.
- XIONG L. The measurement technology of the tensile deformation of material based on digital image correlation [D]. Changchun: College of Mechanical Design and Theory, Jilin University, 2012: 13—21. (In Chinese)
- [14] HASSEN W, AMIRI H. Block matching algorithms for motion estimation [C]//*Proceedings of 7th IEEE International Conference on e-Learning in Industrial Electronics*. Vienna, Austria: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2014: 136—139.
- [15] ZHU S, MA K K. A new diamond search algorithm for fast block-matching motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(2): 287—290.
- [16] NIE Y, MA K K. Adaptive rood pattern search for fast block-matching motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Image Process*, 2002, 11(12): 1442—1449.
- [17] ZHOU P, GOODSON K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613—1620.