

基于角点相关匹配识别的试样变形测量方法研究

邵龙潭^{1,2}, 唐孝强^{1,2}, 郭晓霞^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 将数字图像测量技术应用于常规土工三轴试验, 成功解决了传统变形测量中的诸多难题, 显著提升了测量精度与效率。但高像素图像中灰度阶层的多样性和渐变特性使得梯度迭代计算变得复杂, 角点附近存在多个潜在的角点候选位置, 直接影响了亚像素角点定位精度。为了解决亚像素角点检测算法的定位偏差问题, 针对已研发的土工三轴试验试样全表面变形数字图像测量系统, 提出了基于角点相关匹配识别的亚像素角点检测方法。该方法首先运用 Harris 检测算法从原始图像中提取整像素角点坐标, 随后以这些角点为中心构建固定尺寸的灰度子区。通过子区间的相关匹配迭代处理, 获取了初始整像素角点在变形后的亚像素级位移。在模拟试样仿射变形试验中, 改进后的算法在继承角点特征稳健识别的基础上, 具有良好的仿射不变性, 平均绝对误差降低了 80.5%, 大幅度提高了三轴试验试样全表面变形测量精度。

关 键 词: 角点相关匹配; 数字图像测量; 定位偏差; 灰度子区

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 02-665-08

Specimen deformation measurement method based on corner point correlation matching identification

SHAO Long-tan^{1,2}, TANG Xiao-qiang^{1,2}, GUO Xiao-xia^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The application of digital image measurement technology to conventional geotechnical triaxial tests has successfully solved many issues in traditional deformation measurements, significantly enhancing measurement accuracy and efficiency. However, the diversity and gradient of gray level strata in high-pixel images complicate gradient iteration calculations. Additionally, multiple potential corner candidate locations near corner points directly affect sub-pixel corner point localization accuracy. To address the localization bias problem of the sub-pixel corner detection algorithm, a sub-pixel corner detection method based on corner correlation matching identification is proposed for the digital image measurement system developed for full-surface deformation of geotechnical triaxial test specimens. The method initially extracts whole-pixel corner coordinates from the original image using the Harris detection algorithm, then constructs fixed-size grayscale sub-areas centered on these corner points. Subpixel-level displacements of the initial whole-pixel corner points after deformation are obtained through an iterative process of correlation matching between subregions. In the simulated specimen affine deformation test, the improved algorithm has good affine invariance on the basis of inheriting the robust identification of corner features. The average absolute error is reduced by 80.5%, substantially improving the measurement accuracy of full-surface deformation of the specimen in triaxial test.

Keywords: corner-point correlation matching; digital image measurement; localization bias; grayscale subregions

1 引 言

三轴试验在土工试验中占据重要地位, 它为理解和预测土壤在各种工程条件下的力学行为提供了

一种有效的试验手段。

目前, 三轴试验变形测量方法主要可划分为接触式测量和非接触式测量两类。传统三轴试验通过接触式位移传感器实现试样整体轴向应变的测量,

饱和土样的径向应变和体应变则通过变形过程中土样吸入或排出水量的变化计算得到,而非饱和土的体积变形无法直接计算。

相较于传统接触式测量方法,数字图像测量技术具有非接触、全场测量、无辐射、低成本及强适用性等显著优势,不仅提升了测量精度,更拓宽了常规三轴试验的应用范围。基于图像特征识别,数字图像测量技术可分为两类:①直接利用土样表面的自然纹理或人工散斑进行图像灰度信息的相关匹配以跟踪图像点的空间坐标,即数字图像相关(digital image correlation,简称 DIC)法^[1-2];②对土样表面的边缘、角点等显著特征进行检测和跟踪匹配。目前,数字图像测量技术已被应用于三轴试验土样的变形测量。例如,Bhandari 等^[3]利用三维折射模型实现了光线追踪处理不同界面折射导致的图像畸变,将三维数字图像相关(3D-DIC)技术联合试样环绕的三相机拍摄土体不同时刻的图像进行土样表面变形测量,并与线性可变差动变压器(linear variable displacement transducer,简称 LVDT)对比验证了所测数据的可靠性。Leib 等^[4]利用 3D-DIC 技术研究砂土在排水三轴剪切试验中的局部变形行为,探究了初始相对密度、颗粒形态、端部约束对应变局部化演变的影响。Wang 等^[5]将 3D-DIC 技术和立体视觉系统应用于改进的三轴装置,并将亚像素边缘检测算法和 3D-DIC 技术结合,研究了砂土在不同围压下的径向应变和体积应变。Zhang 等^[6]结合摄影测量、光线追踪和最小二乘方法对试样表面编码点识别提取,实现了土样总体积和局部体积变化的测量。张红日等^[7]通过双目相机采集膨胀土裂隙图像,利用三维数字图像相关技术量化裂隙扩展机制和发育特性。蔡阳等^[8]利用摄影测量方法提取试样表面标记点重建三维点云,对点云进行三角网格划分、端部截断、插值及橡皮膜体积扣除以计算试样的绝对体积变化。邵龙潭等^[9-11]发展了基于图像测量的三轴土样全表面测量技术,利用亚像素角点检测技术提取追踪了试样表面的显著角点,结合压力室内置的反光镜测量土样侧面,最后对像素进行当量归一化处理,将成像平面的标记点展开在同一二维平面坐标系中,实现了单相机全表面变形测量。

然而,上述数字图像技术在实际应用方面仍存在以下问题:①数字图像相关法和摄影测量法在多相机拍摄时难以实现完全同步;②试样大变形时,DIC 方法可能因散斑剧变而失效,摄影测量法可能因编码点脱落或扭曲变形而无法识别,角点识别法

受角点变形影响精度;③DIC 方法和摄影测量法均计算繁琐且耗时长。因此,本文在已有的图像特征点识别测量三轴土样全表面变形的基础上,提出了将特征点检测与图像子区匹配识别相结合的土样变形测量方法,即角点相关匹配法,该方法融合了角点检测算法和牛顿迭代算法,以精确待测试样表面角点的像素位移,实现高精度、高效、高适用性的非接触测量。本文通过刚体位移试验和仿射变形位移试验,利用角点相关匹配法和亚像素角点梯度法深入分析试验结果,以验证该方法的可靠性。

2 亚像素角点梯度法原理及其局限性

2.1 亚像素角点梯度法原理

在图像测量中,实现精确测量结果的核心在于运用算法对标记角点进行高精度定位。这一过程涉及两个主要步骤:①利用 Harris 角点检测算法^[12]对图像角点进行初步定位;②通过亚像素角点梯度法进行更高精度的定位。亚像素角点梯度法是指通过最小二乘法和角点区域灰度梯度正交迭代运算法则,在灰度图像中通过迭代计算,最终确定角点位置,如图 1 所示。

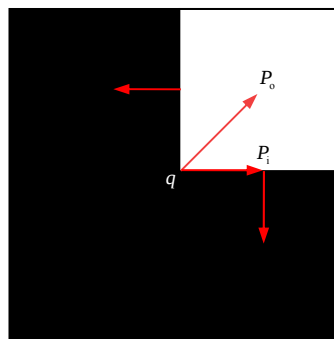


图 1 亚像素角点梯度法检测原理

Fig.1 Principle of sub-pixel corner point gradient detection

图 1 中,假设起始角点 q 在实际亚像素角点附近, P_o 点在 q 点附近的邻域中,若 P_o 点在均匀灰度区域内部,则 P_o 点的灰度梯度为 0;若 P_i 点在边缘区域,则 P_i 点的梯度方向垂直于边缘方向,此时向量 $\overrightarrow{qP_i}$ 与 P_i 点梯度 ∇I 互相垂直,二者的点积为 0,即从起始角点 q 指向领域内另一点 P_i 的任何向量垂直于 P_i 点的灰度梯度。

然而,在实际应用中,由于初始角点位置存在误差以及图像噪声的干扰,这两个本应正交的矢量其点积往往不为 0,这种偏差我们称之为定位误差,

用 ε_i 表示：

$$\varepsilon_i = P_i^T \nabla(I)_{P_i}^T \cdot \overline{qP_i} \quad (1)$$

显然，当误差 ε_i 取得最小值，对应的角点 q 为最精确亚像素角点位置。此时，将初始角点领域附近的多组点 P_i 和相关向量 $\overline{qP_i}$ 方程联立，该问题将转化为 $Ax=b$ 形式，即求解 x 使得 $\min \|Ax-b\|$ ，式(1)表达为最小二乘形式：

$$\nabla(I)_{P_i}^T \cdot q = \nabla(I)_{P_i}^T \cdot P_i \quad (2)$$

式(2)的最优解 q 为

$$q = (\nabla(I)_{P_i}^T \cdot \nabla(I)_{P_i})^{-1} \cdot (\nabla(I)_{P_i}^T \cdot P_i) \quad (3)$$

利用最小二乘法将新的 q 点作为角点，继续采用该方法进行迭代运算，以逐步逼近更为精确的亚像素级角点位置。在迭代过程中，设定一个特定的结果精度作为终止条件，当迭代结果的变化量小于某一预设阈值，比如设定误差 $\varepsilon_i = 10^{-6}$ ，如果当 $q_n - q_{n-1} \leq \varepsilon_i$ ，即认为寻找到最精确角点位置。

2.2 亚像素角点梯度法存在的局限性

在土工三轴试验中，通常使用高分辨率的相机来捕捉详尽的局部角点信息来提高图像测量精度。但基于亚像素角点识别的变形测量方法仍存在局限。一方面，高像素条件下角点邻域的灰度过渡带中像素个数增加，图像边缘灰度阶层也增加，表现为多个灰度阶层的渐变过程，如图2所示。这种灰度阶层的多样性和渐变过程会使梯度迭代计算更为复杂，导致角点附近存在多个潜在的角点候选位置，使亚像素角点梯度法在角点定位时产生偏差或不稳定性，从而影响精度。

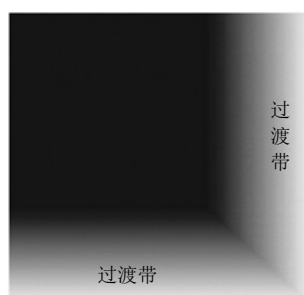


图2 高像素角点示意图

Fig.2 Schematic of high pixel corner point

另一方面，在三轴试验中，当试样发生大变形时，表面角点会呈现出显著的尺度变形和仿射变形（见图3），这显著影响了亚像素角点梯度法的检测精度。经分析，我们发现亚像素角点梯度法对尺度变形和仿射变形具有较高的敏感性，这意味着，在三轴

试验中当试样发生大变形时，基于亚像素角点梯度识别的方法可能无法准确地检测出角点的真实位置，进而影响土的强度指标及应力-应变性质的研究。

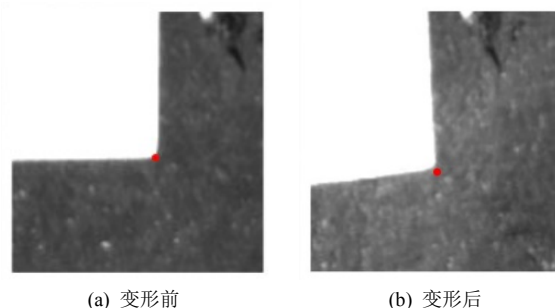


图3 角点检测结果

Fig.3 Corner point detection results

3 改进后的角点相关匹配识别方法

局部特征检测识别和图像子区检测识别共同构成图像变形测量的基石，二者均可独立应用于变形图像的坐标追踪。图像子区识别是基于灰度子区的相关性匹配^[13]，依赖于变形前后被测物表面散斑的相关搜索匹配，通过引入形函数实现仿射不变性的子区匹配。然而，当被测物体经历大变形时，散斑场易出现去相关现象，从而影响测量精度。与此同时，基于局部特征检测识别的方法因其在在大变形条件下仍能稳健检测角点的显著特征，而被广泛应用于岩土领域变形测量。亚像素角点梯度法可通过相机采集变形前后的角点图像序列，测量角点像素坐标的变化，从而计算试样表面变形场。为了克服现有技术的局限性，本文拟提出一种结合特征检测与子区相关匹配的新方法，不仅可以解决原有角点梯度法存在的变形敏感问题，而且保证大变形条件下特征的稳健检测。

该方法的基本思想是利用 Harris 算法检测出角点的整像素位移，以整像素角点为子区中心点进行灰度子区相关匹配迭代计算，得到初始整像素角点变形后的亚像素位移，用于被测物体表面的位移场和应变场的计算。通过将参考角点图像与变形角点图像进行相关匹配，可以获得变形前后角点的坐标信息。子区相关牛顿迭代法是数字图像相关法中最常用的亚像素搜索方法，通过不断迭代求出相关函数的极值点，进而得到灰度子区变形后的亚像素位移信息，数字图像相关原理示意如图4所示。

为评价角点变形前后子区域的相似性，本文采用综合性能卓越的零均值归一化平方差相关函数 C_{ZNSSD} 作为评价指标：

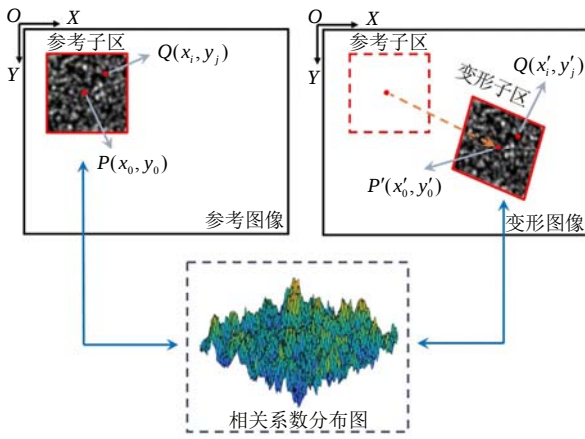


图4 数字图像相关原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of digital image correlation principle

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right\} \quad (4)$$

式中: $f(x_i, y_j)$ 和 $g(x'_i, y'_j)$ 分别为参考子区和变形子区的灰度函数; $(-M, M)$ 表示搜索区域的范围; f_m 和 g_m 为参考子区和变形子区内所用像素点的平均灰度值; Δf 和 Δg 表征参考子区和变形子区内所有像素点灰度值的离散程度, 表达式如下:

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2} \quad (5)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2} \quad (6)$$

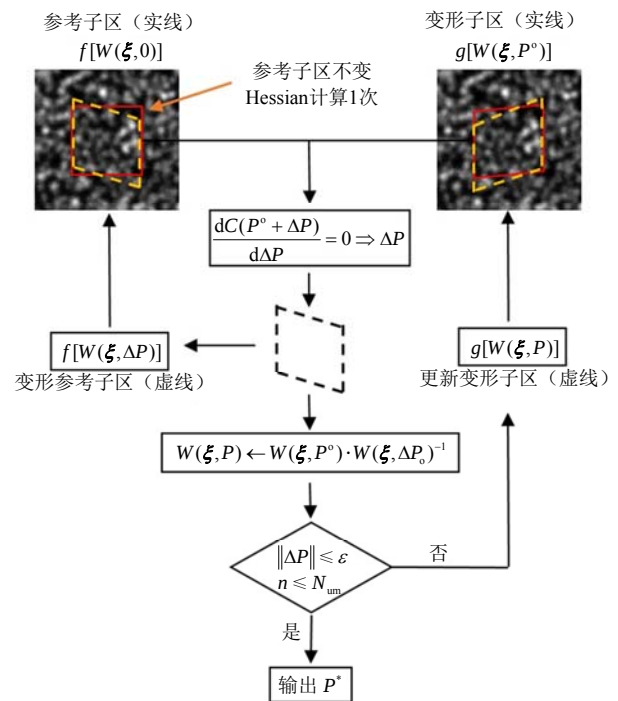
土工三轴试验过程中试样主要发生剪切变形, 同时综合考虑计算效率, 本文采用在图像子区位移模式中应用最为广泛的一阶形函数 α 和 β , 该函数能够精确地描述子区的刚体位移、旋转、拉伸、剪切变形以及各种组合, 其表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \alpha(x_i, y_j) &= u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ \beta(x_i, y_j) &= v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $\Delta x = x_i - x_0$ 和 $\Delta y = y_j - y_0$ 为变形前后图像子区的中心点 P 在 x 和 y 方向上到点 Q 的距离; u 和 v 为子区变形前后的中心点位移量; $\partial u / \partial x$ 、 $\partial u / \partial y$ 、 $\partial v / \partial x$ 和 $\partial v / \partial y$ 为图像子区的一阶位移梯度。

通过 C_{ZNSSD} 准则 (详见式 (4)) 与形函数结合迭代优化求解变形参数, 实现参考子区任意像素点

$Q(x_i, y_j)$ 与对应变形子区映射点 $Q'(x'_i, y'_j)$ 的匹配。亚像素级子区相关匹配迭代计算是以时间成本为代价得到精确结果。为了均衡时间成本和精度, Lucas 等^[14]提出了前向高斯牛顿累加算法 (forward additive Gauss-Newton method, 简称 FA-GN 算法)。但由于其非线性优化算法本身的特性, 在 FA-GN 算法流程中, 需要不断迭代参考子区与形函数参数初值以逼近最优解, 每次迭代涉及 Hessian 矩阵逆的重新计算、变形图像亚像素位置的灰度强度和灰度梯度重建, 计算量仍然很大。针对该问题, 本文采用 Pan 等^[15]提出的逆向高斯牛顿累加算法 (inverse compositional Gauss-Newton method, 简称 IC-GN 算法)。相较 FA-GN 算法, IC-GN 算法只需计算 1 次 Hessian 矩阵, 更为简单高效, 其算法流程如图 5 所示。



注: $f[W(\xi, 0)]$ 和 $g[W(\xi, P^\circ)]$ 分别为参考子区和变形子区的灰度函数; $W(\xi, 0)$ 为形函数; $\xi = [\Delta x \ \Delta y \ 1]^T$; P° 为初次计算的形函数参数; ΔP 为参考子区与变形子区的形函数参数增量; ε 为给定阈值; $N_{\max}$ 为给定的最大迭代次数; P^* 为最优形函数参数。

图5 IC-GN 算法流程图

Fig.5 Flow chart of IC-GN method

4 刚体位移试验及分析

在探讨高像素成像条件下 (未考虑角点变形) 角点检测精度时, 对角点梯度法与角点相关匹配法进行对比分析显得尤为重要。为探究这两种方法在角点检测位移方面的准确性, 本文设计了室温环境下的静态刚体位移试验。试验借助三轴位移平台,

实现了对角点平板在不同方向上位移的精确控制。对角点平板的位移量分别采用角点梯度法和角点相关匹配法测量，并将所得结果与三轴位移平台的标准位移量进行对比分析，从而验证两种方法的精度。

室温环境下光学平台上构建了一套刚体位移测量系统，详细配置如图6所示。系统中包含了工业相机（2 000万像素）、三维位移平台、光学底座固定支杆、角点平板以及光源等关键设备。



图6 刚体位移测量系统

Fig.6 Rigid body displacement measurement system

本研究采用高平整度、半透明亚克力板作为角点平板，通过丝网印刷技术将角点特征图案精确印制在平板表面。在试验前，固定并校准三维位移台、角点平板及相机，确保平板被测面与位移平台 X 方向平行、相机与平板正面对轴平行，以保证中央区域成像清晰。同时，调节光源位置和强度，保证相机成像质量。将试验中初始状态下的平板位置作为参考图像，设定水平和垂直方向的位移总量均为10 mm，以1 mm为间隔在水平方向上匀速移动并拍摄静态图像，直至位移量达到10 mm。此过程重复3次后复位，完成水平方向位移试验，再以相同步骤进行垂直方向位移试验。

试验后，对每一位置的图像进行灰度平均处理。以初始位置图像为基准图像，将其他图像视为变形图像。通过比较图像中距离最远的两角点的像素距离与实际距离，标定每个像素代表的实际物理尺寸，随后运用角点梯度法（corner-point gradient method，简称CGM）和角点相关匹配法（corner-point correlation method，简称CCM）计算每次图像移动所产生的位移，并与标准位移值进行对比分析，结果如表1、2所示。同时，将试验总位移行程与标准位移之间存在的一定范围的误差作为试验中的系统误差。

从表1、2可以看出，无论是水平方向还是垂直方向的位移测量，CGM和CCM两种方法产生的绝

对误差均小于0.1 mm，角点相关匹配法的误差小于角点梯度法，说明角点邻域灰度阶级的渐变对角点梯度迭代检测产生了影响，而基于灰度相关迭代的角点匹配方法检测不受影响且效果较好。

表1 CGM刚体位移试验结果

Table 1 Experimental results for rigid displacements by CGM

标准位移值 / mm	水平位移 测量值 / mm	水平绝对 误差 / mm	垂直位移 测量值 / mm	垂直绝对 误差 / mm
1	1.008	0.008	1.027	0.027
2	2.018	0.018	2.040	0.040
3	3.026	0.026	3.052	0.052
4	4.028	0.028	4.070	0.070
5	5.036	0.036	5.073	0.073
6	6.040	0.040	6.086	0.086
7	7.050	0.050	7.087	0.087
8	8.059	0.059	8.081	0.081
9	9.064	0.064	9.079	0.079
10	10.070	0.070	10.080	0.080

表2 CCM刚体位移试验结果

Table 2 Experimental results for rigid displacements by CCM

标准位移值 / mm	水平位移 测量值 / mm	水平绝对 误差 / mm	垂直位移 测量值 / mm	垂直绝对 误差 / mm
1	1.009	0.009	1.026	0.026
2	2.015	0.015	2.038	0.038
3	3.023	0.023	3.050	0.050
4	4.024	0.024	4.067	0.067
5	5.033	0.033	5.071	0.071
6	6.035	0.035	6.082	0.082
7	7.044	0.044	7.084	0.084
8	8.053	0.053	8.078	0.078
9	9.058	0.058	9.075	0.075
10	10.064	0.064	10.076	0.076

图7、8显示了两种算法在垂直方向和水平方向上绝对误差的对比。从图可以看出，垂直方向绝对误差增长曲线先增大，后缓慢减小并趋于平稳；水平方向绝对误差随位移量的增加而持续增大，这可能是相机平面与被测平面未能绝对平行或旋钮的微弱振动造成的，但这一结果符合图测技术对位移测量的一般规律。

图9、10为垂直方向和水平方向上相对误差的对比。由图可以看出，垂直方向上的相对误差在 $\pm 3\%$ 范围内，可能是受到了微弱振动的影响。但随着位移量的不断增大，垂直方向相对误差逐渐降低至1%以下。值得注意的是，水平方向上的相对误差始终保持在1%以下。

为进一步分析位移误差，对提取到的角点位移

与标准位移进行比较分析。在垂直方向上, CCM 的 10 mm 刚体位移累计绝对误差为 0.076 3 mm, 而 CGM 的刚体位移累计误差为 0.080 2 mm, 修正后绝对误差降低了 4.9%。在水平方向上, CCM 的刚体位移累计绝对误差为 0.064 29 mm, CGM 的刚体位移累计误差为 0.069 90 mm, 修正后绝对误差降低了 8.0%。由图 9 可以看出, 随着总位移的增加, CCM 的相对误差从 2.6% 逐渐减小至 0.76%, 可能是该方向位移旋钮齿轮不稳定产生的随机误差。相比之下, 水平方向上的相对误差波动始终保持在较

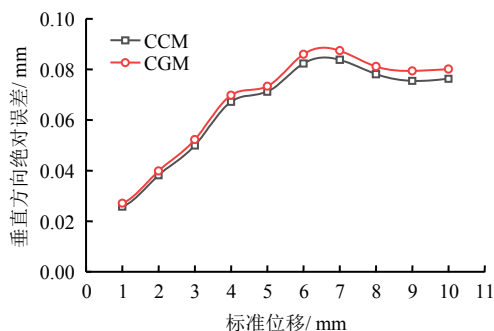


图7 垂直方向绝对误差
Fig.7 Vertical absolute errors

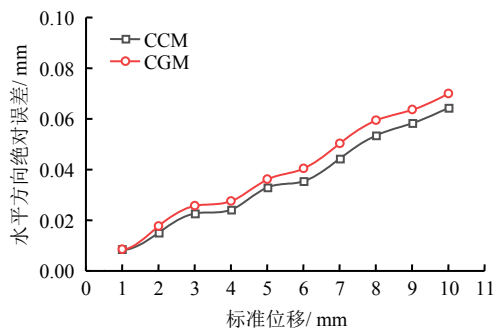


图8 水平方向绝对误差
Fig.8 Horizontal absolute errors

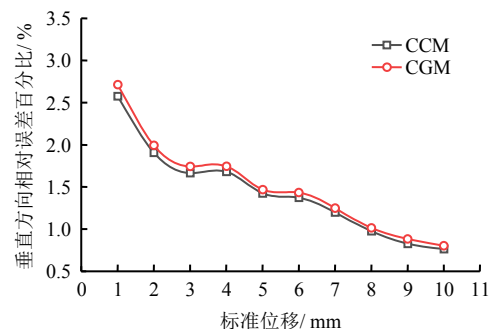


图9 垂直方向相对误差
Fig.9 Vertical relative errors

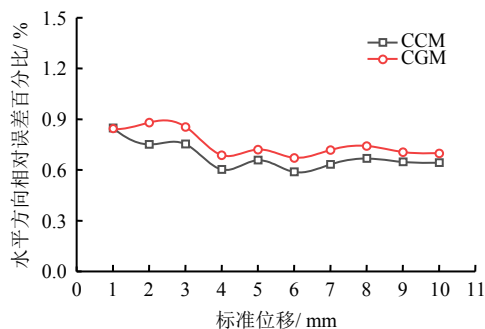


图10 水平方向相对误差
Fig.10 Horizontal relative errors

低水平, 相对误差由 0.85% 减小至 0.64%。因此, 角点相关匹配法在整体精度方面, 比角点梯度法有小幅提升, 能够实现较高精度的位移场变形测量。

5 仿射变形位移试验及分析

根据亚像素角点梯度法原理, 角点定位在旋转和平移变换条件下具有良好的鲁棒性, 但对仿射变换较为敏感。在三轴试验中试样表面角点区域不可避免地会发生缩放和倾斜变形, 导致角点梯度法无法准确地检测出角点的位置。为验证角点相关匹配法对于提高应变测量精度的有效性, 开展了一系列相关精度测量试验。

考虑电阻式应变片所测有效标准值范围存在局限性, 而计算机仿真可以较好控制变形信息、便于量化和评估算法的性能, 因此, 采用工业相机 (分辨率 5 496 像素×3 672 像素) 拍摄未变形状态下印有 8 行 4 列方格标记的平板, 对未变形图像进行仿射变形图像处理。预设仿射矩阵表达式为

$$T = \begin{bmatrix} s_x & \beta & 0 \\ \alpha & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: s_x 为水平方向缩放系数, $s_x=1$; α 为水平方向剪切系数, $\alpha=0$; s_y 为垂直方向缩放系数, $s_y=1.1$; β 为垂直方向剪切系数, β 分别取 0.03、0.06、0.09、0.12、0.15、0.18。坐标等式为 $x=w$, $y=\beta w+1.1z$, w 、 z 表示像素坐标。

在垂直方向发生伸缩和剪切变形, 水平方向不变。试验过程中对参考图像垂直方向上施加 6 档剪切变形和拉伸 1.1 倍的组合变形作为目标图像, 获得了 6 张不同变形程度的图像。图 11(a)~11(f)是剪切系数 β 分别为 0.03、0.06、0.09、0.12、0.15、0.18 的变形图像。使用两种算法搜索未变形状态下初始

角点的像素坐标，分别记录垂直方向 y 坐标值，依次计算 $y = \beta w + 1.1z$ 作为理想状态标准值，对变形图像使用上述两种算法进行角点定位，计算变形图像与实际位移之间的偏差。

使用角点相关匹配法和角点梯度法对不同变形程度的角点进行位移测量，结果如表3和图12所示。由表3和图12可知，对比理论值，角点梯度法的最大绝对误差和平均绝对误差分别为5.637、4.833像素；

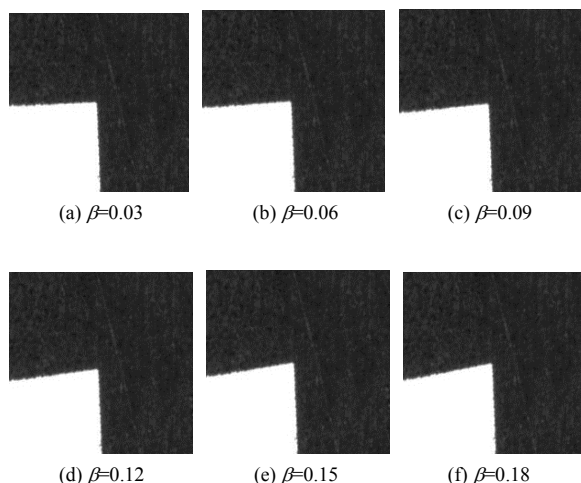


图11 仿射变形前后图像
Fig.11 Images before and after affine distortion

表3 仿射变形位移测量试验结果
Table 3 Test results of affine deformation displacement measurement

序号	剪切系数 β	CGM 绝对误差 / 像素	CCM 绝对误差 / 像素
1	0.03	4.973	0.799
2	0.06	4.784	0.580
3	0.09	5.637	1.379
4	0.12	5.399	1.172
5	0.15	4.271	0.962
6	0.18	3.933	0.747

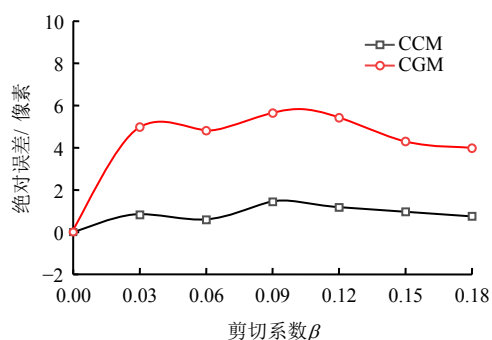


图12 不同仿射变换下的绝对误差结果
Fig.12 Absolute error results for different affine transformations

角点相关匹配法的最大绝对误差和平均绝对误差分别为1.379、0.940像素。相较角点梯度法，角点相关匹配法最大绝对误差降低了77.5%；整体精度提升了80.5%。故在拉伸和剪切组合大变形条件下，角点相关匹配法测量优势显著。此外，两种算法的绝对误差波动趋势始终一致，一方面证明所采集数据的可靠性；另一方面证明在大变形情况下角点相关匹配法测量精度始终优于角点梯度法。因此，使用本文所提角点相关匹配法测量大变形更具稳定性和准确性。

6 结 论

为解决亚像素角点梯度法对角点边缘灰度阶层和尺度变化、仿射变化敏感的问题，提高基于特征点识别测量三轴土样全表面变形精度，本文提出了一种基于角点相关匹配的方法。通过开展刚体位移试验和仿射变形位移测量试验，验证了所提方法在准确性和可靠性方面的显著优势。本文主要研究结论如下：

(1) 在高像素成像条件下，角点领域灰度阶层渐变性对角点梯度法检测精度影响较小，而角点相关匹配法不受灰度阶层渐变影响。从刚体位移试验结果来看，两种方法的10 mm位移误差都小于0.1 mm，均具有较好的稳定性和一致性。对比角点梯度法，角点相关匹配法在垂直方向上绝对误差降低了4.9%；水平方向上绝对误差降低了8.0%。

(2) 在大变形条件下，角点相关匹配法在继承角点梯度法对角点特征稳定检测识别的基础上，最大绝对误差降低了77.5%，平均绝对误差降低了80.5%。

参 考 文 献

- [1] PETERS W, RANSON W. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. **Optical Engineering**, 1982, 21(3): 427-431.
- [2] CHU T C, RANSON W F, SUTTON M A, et al. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics[J]. **Experimental Mechanics**, 1985, 25(3): 232-244.
- [3] BHANDARI A R, POWRIE W, HARKNESS R M. A digital image-based deformation measurement system for triaxial tests[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2012, 35(2): 209-226.
- [4] LEIB A R, SHARMA A, PENUMADU D. Visualization of localized deformations of sand in drained triaxial

- compression using digital image correlation[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2021, 44(3): 782-798.
- [5] WANG P P, GUO X X, SANG Y, et al. Measurement of local and volumetric deformation in geotechnical triaxial testing using 3D-digital image correlation and a subpixel edge detection algorithm[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15(10): 2891-2904.
- [6] ZHANG X, LI L, CHEN G, et al. A photogrammetry-based method to measure total and local volume changes of unsaturated soils during triaxial testing[J]. **Acta Geotechnica**, 2015, 10(1): 55-82.
- [7] 张红日, 杨济铭, 徐永福, 等. 基于数字图像相关技术的膨胀土三维裂隙扩展特性研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊 1): 309-323.
- ZHANG Hong-ri, YANG Ji-ming, XU Yong-fu, et al. Study on three-dimensional crack propagation characteristics of expansive soil based on digital image correlation technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 309-323.
- [8] 蔡阳, 李林, 路毅. 三轴试样绝对体积测量方法研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2300-2307.
- CAI Yang, LI Lin, LU Yi. Measuring absolute volume of triaxial soil specimens[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(12): 2300-2307.
- [9] 邵龙潭, 董建军, 刘永禄, 等. 基于亚像素角点检测的试样变形图像测量方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1329-1333.
- SHAO Long-tan, DONG Jian-jun, LIU Yong-lu, et al. Digital image measurement method of measuring triaxial specimen deformation based on sub-pixel accurate corner locator[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1329-1333.
- [10] 邵龙潭, 郭晓霞, 刘港, 等. 数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 669-684.
- SHAO Long-tan, GUO Xiao-xia, LIU Gang, et al. Application of digital image processing technique to measuring specimen deformation in triaxial test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Suppl.1): 669-684.
- [11] 邵龙潭, 刘潇, 郭晓霞, 等. 土工三轴试验试样全表面变形测量的实现[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 409-415.
- SHAO Long-tan, LIU Xiao, GUO Xiao-xia, et al. Whole surface deformation measurement of triaxial soil specimen based on digital image processing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(3): 409-415.
- [12] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//The 4th Alvey Vision Conference. [S. l.]: Plessey Company, 1988: 147-151.
- [13] SUTTON M A, ORTEU J J, SCHREIER H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications[M]. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- [14] LUCAS B D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]//IJCAI'81: Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1981: 674-679.
- [15] 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.