

文章编号: 1000-7598-(2008)05-1329-05

基于亚像素角点检测的试样变形图像测量方法

邵龙潭¹, 董建军^{1,3}, 刘永禄², 孙益振¹(1.大连理工大学 工程力学系/工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024; 2.大连理工大学 物理与光电工程学院, 大连 116024;
3.燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 作为一种数字图像测量方法, 亚像素角点检测能够在数字图像中可以发现角点的亚像素精度的位置 (简称亚像素角点检测方法)。在土工三轴试验中应用该方法使得试样的变形测量更加简便。通过使用高精度标定板, 对该数字图像测量方法进行了精度分析, 结果表明亚像素角点检测方法的轴向和径向测量的标准差都达到了 0.02 个像素, 相对测量精度达到 10^{-4} 数量级。在三轴压缩试验条件下, 同时使用高精度位移传感器和该测量方法对小变形的干性试样进行了变形测量, 证明亚像素角点检测方法对试样变形的测量结果是精确可靠的。

关 键 词: 数字图像测量; 亚像素; 角点检测; 三轴试验; 应变

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Digital image measurement method of measuring triaxial specimen deformation based on sub-pixel accurate corner locator

SHAO Long-tan¹, DONG Jian-jun^{1,3}, LIU Yong-lu², SUN Yi-zhen¹(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: As a digital image measurement method, the sub-pixel accurate location of a corner can be found in digital image by sub-pixel accurate corner locator. The purpose of this paper is to introduce digital image measurement method for measuring triaxial specimen deformation based on sub-pixel accurate corner locator. The distortion target of high precision is used to analyze the precision of the method. The results show that both axial and radial measurement precisions achieve 0.02 pixel and the magnitudes of relative measurement precision achieve 10^{-4} . The high precision distance transducer and sub-pixel accurate corner locator method are simultaneity used to measure the small deformation of dry-specimen in triaxial compression test; and the accuracy and reliability of the method are proved.

Key words: digital image measurement; sub-pixel accurate; corner locator; triaxial test; strain

1 前 言

三轴试验中轴向应变的测量主要使用位移传感器, 而径向应变测量是通过测量试样中水体积的变化结合轴向位移换算得到的。当前对径向应变测量已发展出很多技术, 普遍使用接触式的传感器进行局部测量, 如霍尔效应传感器 (hall effect transducer) 和局部位移传感器 (local displacement transducer), 但这些接触式的传感器都不可避免地会对试样径向变形产生约束。接触式的传感器由于受自身体积与试

样体积的限制, 只能测量极少数的径向截面, 其测量结果不能够全面反映试样局部的变形特性。

数字图像测量技术是最近十几年发展起来的, 这种方法很好地解决了三轴试验中传统变形测量方法及接触式传感器的不足。Emir 等^[1]1993 年为配合 NASA 研究在失重条件下三轴试样的应力-应变特性提出用数字图像技术测量三轴试验试样的体积变形。Alshibli 和 Sture^[2]在 1996 年 NASA 在太空中进行的石英砂常规三轴试验试样变形测量中实际应用了这项技术, 并对测量试样体积变化的估算进行了

收稿日期: 2006-07-19

基金项目: 国家自然科学基金专项基金项目 (No. 50527803)。

作者简介: 邵龙潭, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学测试技术与设备、水土保持、岩土工程灾害与防治方面的研究工作。

E-mail: shaolt@dlut.edu.cn

研究,但之后这一技术没能被推广到实验室常规土工三轴试验中。邵龙潭等^[3-5]经多年努力在 2001 年成功研制开发了土工三轴试验试样变形计算机数字图像测量技术,创造性地将数字图像测量技术应用于实验室常规土工三轴试验中,解决了常规土工三轴试验传统变形测量中的一系列难题,也为非饱和土试验中试样的变形测量提供了一种新方法。针对硬件及算法的新发展,在已有研究成果的基础上,将基于亚像素角点检测的数字图像测量方法(简称亚像素角点检测方法)应用于土工三轴试验试样变形测量中。本文介绍了该方法在土工三轴试验中的应用,重点对该方法进行了精度分析,通过试验比较检验了其测量结果的精确性和可靠性。

2 测量原理及系统组成

2.1 亚像素角点检测基本原理^[6,7]

亚像素角点检测是通过迭代运算法则,在灰度图像中确定角点的亚像素精度位置,如图 1 所示。其基本原理是:假设角点的精确位置在 q 点,任意一个从 q 到指向其邻域中的另一点 p_i 的向量,都与 p_i 处的图像灰度梯度垂直。由于噪声的存在,这两个正交矢量的点积不等于 0,而存在误差,

$$\varepsilon_i = \nabla(I)_{p_i}^T (q - p_i) \quad (1)$$

式中: $\nabla(I)_{p_i}^T$ 为 p_i 处的图像灰度梯度; q 点的值是使 ε_i 最小的那点的坐标。将含有角点的检测区域内所有 p_i 点(假设 n 个点)的方程联立,则问题转化为求 x 使得 $Ax - b$ 最小化,这里 A 为由 $\nabla(I)_{p_i}^T$ 组成的 $n \times 2$ 矩阵, b 为 $\nabla(I)_{p_i}^T$ 构成的 $n \times 1$ 的列向量。当 $x = (A^T A)^{-1} A^T b$ 时, $\|Ax - b\|$ 范数最小。运算法则将新的 q 点作为区域的中心,继续使用这个方法进行迭代运算,获得很高的亚像素精度。迭代运算直至确定这个中心 q 保持在一个给定的阈值范围内时,则该角点被定位。

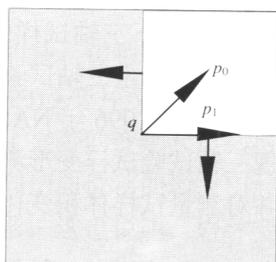
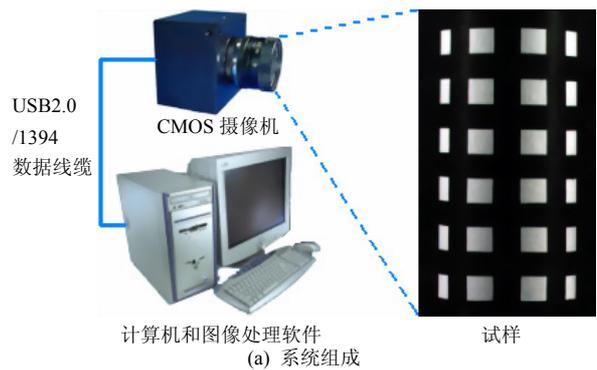


图 1 亚像素角点检测原理
Fig.1 Sub-pixel accurate location of a corner

2.2 系统组成

基于亚像素角点检测的数字图像测量系统由基于 USB2.0/1394 数据传输技术的 CMOS 摄像机(分辨率为 1 280×1 024 像素)、计算机和计算机图像处理软件组成,如图 2(a)所示。土工三轴试验设备也做了相应改进(图 2(b)):将三轴试验中用于包裹试样的橡皮膜加工成黑色并在表面印刷白色方块状标志;压力室改造成立方体形状,4 个面皆安装透明平板钢化玻璃;采用平面光源照明;安装黑色背景。采用的摄像机镜头的焦距为 16 mm,在最小视场为 165 mm×124 mm 时,镜头的畸变率非常低,最大值只有 -0.1%,因而镜头畸变对变形测量精度影响很小,所使用的 CMOS 摄像机的每个像素物理尺寸为 5.2 μm×5.2 μm,纵向和横向具有相同的测量精度。采用 CMOS 摄像机不但可以满足实验技术要求,而且与采用 CCD 摄像机相比使设备成本大大降低,更有利于技术推广。



计算机和图像处理软件
(a) 系统组成



(b) 立方体压力室

图 2 亚像素角点检测方法数字图像测量系统组成和立方体压力室图像

Fig.2 Digital image measurement system based on sub-pixel accurate corner locator method

基于亚像素角点检测的数字图像测量方法,通过捕捉黑色橡皮膜上白色方块状标志的角点的位移来测量试样变形,如图 3 所示,这种方法使得试样局部的轴向变形和径向变形测量的数据信息更加丰富,精度也相对较高。

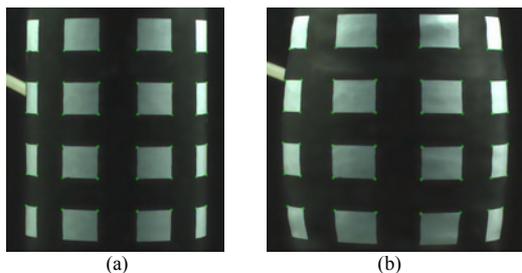


图 3 试验前后试样局部图像
Fig.3 Specimen local image before and after test

2.3 应变计算方法

试验中所测试样区域内角点的分布如图 4 所示，根据各个时刻角点的像素坐标可以计算出试样的径向应变、轴向应变以及估算体积应变。

由于试样表面是一个曲面，在计算应变时，只选取要求获取变形结果的试样区域边界上处，同一纵向轴线两边缘点位置和同一径向截面两边缘点位置的 2 个角点的相应数据，计算轴向应变和径向应变，方法如下：

对于计算试样变形所测量的目标区域，轴向应变可通过计算各个时刻 Y 方向所有处，同一纵向轴线两边缘点位置的 2 个角点纵坐标的差值相对于初始时刻的变化量与初始时刻的之比求和取平均值求得，则 t 时刻的平均轴向应变为

$$\epsilon_a^t = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{(y_{nj}^0 - y_{1j}^0) - (y_{nj}^t - y_{1j}^t)}{(y_{nj}^0 - y_{1j}^0)} \quad (2)$$

径向应变则可通过计算各个时刻 X 方向所有处，同一径向截面两边缘点位置的 2 个角点横坐标的差值相对于初始时刻的变化量与初始时刻的之比求和，取平均值求得，则 t 时刻的平均径向应变为

$$\epsilon_r^t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_{im}^0 - x_{i1}^0) - (x_{im}^t - x_{i1}^t)}{(x_{im}^0 - x_{i1}^0)} \quad (3)$$

具体的应变计算根据选取的测量区域中截面的数量而定，局部应变测量通常以选取试样中间 1/3 区域测量较为适宜^[8]，在这个区域内试样受端部约束的影响相对较小，应力分布也比较均匀。

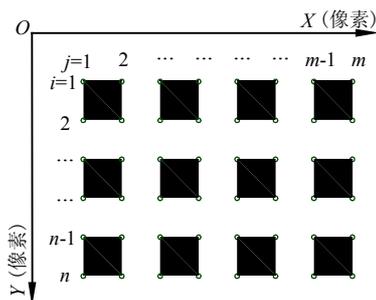


图 4 角点位置分布图
Fig.4 Distribution of corner location

3 测量精度分析

精度是对同一量的重复观测值之间的密集或吻合的程度^[9]，如果重复观测值密集在一起，其精度就高；如果它们之间分散得很开，则精度就低。精度是通过概率分布的离散度表现出来的，分布越狭窄，精度就越高，反之则低。精度常用标准差 σ 衡量，精度越高， σ 值越小，反之则大。本文通过考察该方法测量结果的标准差 σ 来分析其测量精度。

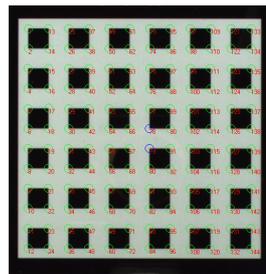


图 5 亚像素角点检测试验中的高精度标定板图像
Fig.5 Image of distortion target of high precision in sub-pixel corner locator test

为了获取亚像素角点检测方法的测量精度，通过测量高精度标定板（图 5），对测量精度进行检定。该标定板选用玻璃材质，由中国科学院微电子研究所制作，其制作工艺精度为 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 。虽然试样是一个曲面与平面的标定板完全不同，但由于在应变计算时，只选取要获取变形结果的试样区域边界上，同一纵向轴线两边缘点位置和同一径向截面两边缘点位置的 2 个角点的相应数据计算轴向应变和径向应变，不存在曲面造成的像距误差问题，因而由平面标定板确定的测量精度能对试样应变的测量精度。

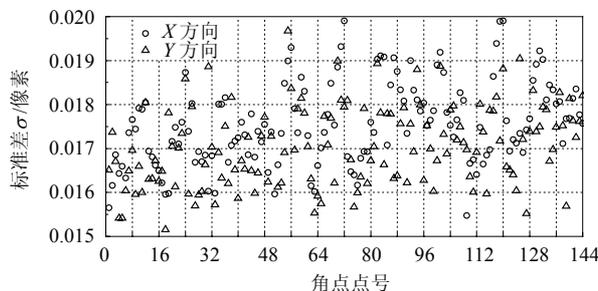


图 6 标定板各角点重复测量(1000 次)结果的标准差
Fig.6 Repeated measurement results (1000 times) standard deviation of every corner of distortion target

设定检定测量的视场为 $165 \text{ mm} \times 124 \text{ mm}$ ，温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，试验光照及室内温度环境保持稳定，标定板水平放置。首先，对标定板进行静止状态下

的多次重复测量(1 000次),测量结果如图6所示,可见标定板上各个角点测量结果的标准差基本都分布于0.02个像素以下,表明该方法测量精度具有很好的稳定性。

像素当量值 δ ,即一个像素所代表的实际长度。本文采用最小二乘法拟合计算出当前条件下的 δ ,如图7中拟合直线结果所示当前条件下的像素当量: X 方向, $\delta=0.127\ 463$ 毫米/像素; Y 方向, $\delta=0.127\ 502$ 毫米/像素。

测量的实际值 L (mm)可由下式计算:

$$L = \delta l \quad (3)$$

式中: δ 为像素当量(毫米/像素); l 为测量的像素值(像素)。

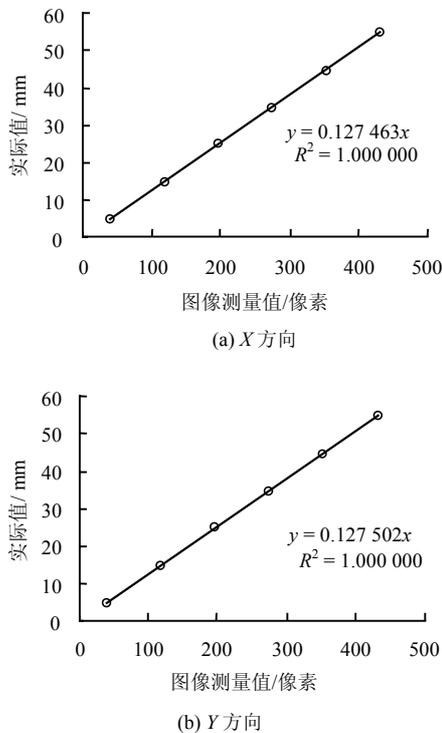


图7 像素当量的最小二乘法拟合直线
Fig.7 Fitting line of pixel parameter on least-square method

最后本文分别对视场 X 方向及 Y 方向中轴线上距离为55, 45, 35, 25, 15 mm和5 mm的2个角点距离进行了换算,结果如表1所列。由数据可以看出,对于多次测量结果与实际值的误差相当小,表明该方法具有非常稳定的测量精度。实际测量的值,最大绝对误差 X 方向为0.008 5 mm,最大相对误差为0.05%; Y 方向最大绝对误差为0.008 4 mm,最大相对误差为0.09%。对于土工三轴试验而言,能够满足变形测量的精度要求。

表1 X 、 Y 方向测量结果

Table 1 Measurement results of X , Y direction

测定方向	标定板两角点距离/mm	测量值/像素	标准差/像素	测量值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
X	55	431.529 0	0.022	55.004 0	-0.004 0	-0.01
	45	353.074 4	0.022	45.003 9	-0.003 9	-0.01
	35	274.656 2	0.024	35.008 5	-0.008 5	-0.02
	25	196.156 3	0.021	25.002 7	-0.002 7	-0.01
	15	117.744 3	0.024	15.008 0	-0.008 0	-0.05
	5	39.196 7	0.023	4.996 1	0.003 9	0.01
Y	55	431.342 8	0.021	54.997 1	0.002 9	0.01
	45	353.001 6	0.024	45.008 4	-0.008 4	-0.02
	35	274.561 6	0.024	35.007 1	-0.007 1	-0.02
	25	196.133 5	0.022	25.007 4	-0.007 4	-0.03
	15	117.709 3	0.024	15.008 2	-0.008 2	-0.05
	5	39.251 9	0.023	5.004 7	-0.004 7	-0.09

4 试验检验与结果

在土工三轴试验条件下,对一在加载条件下变形为小变形的干性试样进行三轴压缩变形测量,以验证亚像素角点检测方法对小变形测量的适用性。试样尺寸为土工试验标准试样尺寸,直径为39.1 mm,高80 mm。设定试验条件为无围压,加载速度为0.36 mm/min,采用岛津电子万能试验机加载,位移传感器的测量精度为 ± 0.01 mm。

为了与位移传感器的测量结果进行比较,本次试验中选取整个试样作为图像测量区域,计算试样的整体轴向应变和径向应变。

由图8可以看出,亚像素角点检测系统可对试样的加卸载变形过程很好的跟踪捕捉。明显比较出该图像测量方法与位移传感器测量方法的差异。结果表明,图像测量方法所测得的轴向应变明显小于使用位移传感器测得的结果,这是因为轴向位移传感器所测得的变形并不完全是试样变形,还包括由于加载部件的不完全刚性所产生的变形和试样人工安装时试样帽与试样接触不严密而产生的变形。这两种影响因素使得试验时试样的应变特性难以正确的获得,特别是对于小应变范围的试验,而图像测量方法所测量的结果完全是试样的实际变形,与使用位移传感器测量相比具有显著的优点。

由于基于亚像素角点检测原理应用于土工三轴试验试样变形测量的数字图像测量方法仍然处于研发阶段,因而通过对算法及设备的进一步改进,其测量精度还将有进一步提高。

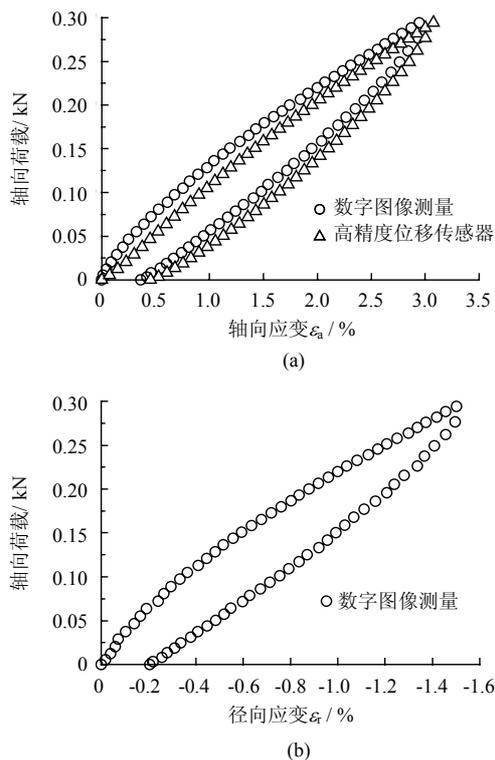


图8 干性试样整体应力-应变曲线

Fig.8 Curves of stress and strain of whole dry-specimen

5 结论

(1) 基于亚像素角点检测的数字图像测量方法, 通过对角点的捕捉跟踪对试样变形进行测量, 测量结果能够很容易达到亚像素精度, 使得应变测量的精度可以达到 10^{-4} 数量级。通过对算法及设备的进一步改进, 其测量精度还将有进一步提高。

(2) 亚像素角点检测方法在三轴试验的应用, 为三轴试验试样变形测量提供了一项新的技术方法, 也为三轴试验试样变形三维测量及立体重构的实现奠定了基础。

(3) 本文方法使 CMOS 摄像机也完全满足图像测量的要求, 简化了数据采集方式, 降低了设备成本, 使土工三轴试验试样变形数字图像测量技术便于推广。

上接第 1324 页

[2] SASAKI Y, TANIGUCHI E. Shaking table tests on gravel drains to prevent liquefaction of sand deposits[J]. *Soil and Foundations*, 1982, 22(3): 1-14.

[3] AKIYOSHI T, FUCHIDE K, MATSUMOTO H, et al. Liquefaction analyses of sandy ground improved by sand compaction piles[J]. *Dynamics and Earthquake Engineering*, 1993, (12): 299-307.

参考文献

- [1] EMIR J M, NICHOLAS C C, JOEY K P. Digital image techniques for volume change measurements in triaxial tests[C]//Proceedings of The Conference on Digital Image Processing Techniques and Applications in Civil Engineering, [s. l.]: [s. n.], 1993: 211-219.
- [2] KHALID A, ALSHIBLI, MOHAMMAD Z, et al. Estimating volume change of triaxial soil specimens from planar images[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2001, 16(6): 415-421.
- [3] 邵龙潭, 王助贫, 韩国城, 等. 三轴试验土样径向变形的计算机图像测量[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(3): 337-341.
- SHAO Long-tan, WANG Zhu-pin, HAN Guo-cheng, et al. Digital image processing technique for measurement of the radial deformation of specimen in triaxial test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(3): 337-341.
- [4] 邵龙潭, 王助贫, 刘永禄. 三轴土样局部变形的数字图像测量方法[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(2): 159-163.
- SHAO Long-tan, WANG Zhu-pin, LIU Yong-lu. Digital image processing technique for measurement of the local deformation of soil specimen in triaxial test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(2): 159-163.
- [5] 王助贫. 三轴试验土样变形的数字图像测量方法及其应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [6] CHRISTOPH STOCK, ULRICH MÜHLMANN. Sub-pixel Corner Detection for Tracking Applications using CMOS Camera Technology[C]//26th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition (ÖAGM/AAPR), Graz Austria: [s. n.], 2002: 191-199.
- [7] SHAO LONGTAN, LIU YONGLU, DONG JIANJUN. Strain measurement of soil specimen in triaxial test with digital image processing technology[C]//6th International Symposium on Test and Measurement, [s. l.]: [s. n.], 2005: 4368-4371.
- [8] 陈春霖, 张惠明. 饱和砂土三轴试验中的若干问题[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(6): 659-663.
- CHEN Chun-lin, ZHANG Hui-ming. Some problems in triaxial test on saturated sands[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(6): 659-663.
- [9] (加)格雷斯西(Gracie G), (加)米克黑尔(Mikhail E M). 测量数据分析与平差[M]. 游祖吉等译. 北京: 测绘出版社, 1987.
- [4] 宣伟丽. 碎石桩复合地基抗液化分析[硕士论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [5] ZIENKIEWICZ O C, CHANG C T, BETTESS P. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils[J]. *Limits of Validity Geotechnique*, 1980, 30: 385-395.
- [6] 张艳美, 张鸿儒. 碎石桩复合地基抗液化性能数值模拟及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.