

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518404

# 多重坐标系融合的裂缝三向测量方法研究<sup>\*</sup>

胡宇<sup>1</sup> 李登华<sup>2,3</sup> 丁勇<sup>1</sup>(1.南京理工大学安全科学与工程学院 南京 210024; 2.南京水利科学研究院 南京 210029;  
3.水利部水库大坝安全重点实验室 南京 210024)

**摘要:**单目视觉测量存在深度信息缺失,无法准确计算裂缝三向变形的问题。为解决该问题,本文提出了一种多重坐标系融合的裂缝三向测量方法。通过设计同心圆点阵标靶,建立裂缝等效位移模型,将测量裂缝三向变形问题转化为测量标靶主板与副板的三向变形问题。通过相机拍摄,对图片进行密度聚类和偏心修正后获得特征点集,再通过EPnP算法求取投影矩阵,利用最小二乘法对副板点集进行三维重建,获得副板点集在给定世界坐标系下的坐标,计算副板前后坐标变化量,即裂缝三向变形值。通过三轴滑台试验,验证了本文方法的精度、鲁棒性、泛化能力,结果表明算法在室内条件下最大偏差0.35 mm,三向测量误差均在±0.35 mm之内,现场试验条件下仍能保持±0.4 mm的测量精度,满足规范对裂缝测量的要求(±0.5 mm)。

**关键词:**单目视觉;裂缝测量;三维重建;投影矩阵

中图分类号: TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.6099

## Research on multi coordinate system fusion algorithm for three directional measurement of cracks

Hu Yu<sup>1</sup> Li Denghua<sup>2,3</sup> Ding Yong<sup>1</sup>(1. School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210024, China;  
2. Nanjing Institute of Water Resources, Nanjing 210029, China;  
3. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Monocular visual measurement suffers from a lack of depth information, making it difficult to accurately calculate the three-dimensional deformation of cracks. To address this issue, this paper proposes a three-dimensional crack measurement method that integrates multiple coordinate systems. By designing a concentric circle array target and establishing an equivalent displacement model for cracks, the problem of measuring the three-dimensional deformation of cracks is transformed into the problem of measuring the three-dimensional deformation of the main and auxiliary plates of the target. By taking photos with a camera, density clustering and eccentricity correction are performed on the images to obtain a set of feature points. Then, the EPnP algorithm is used to obtain the projection matrix, and the least squares method is used to reconstruct the sub panel point set in three dimensions. The coordinates of the sub panel point set in a given world coordinate system are obtained, and the change in the front and rear coordinates of the sub panel, that is, the three-dimensional deformation value of the crack, is calculated. The accuracy, robustness, and generalization ability of the proposed method were verified through three-axis sliding table tests. The results showed that the algorithm had a maximum deviation of 0.35 mm under indoor conditions, and the measurement errors in all three directions were within ±0.35 mm, can still maintain a measurement accuracy of ±0.4 mm under on-site test conditions, meeting the requirements of crack measurement standards (±0.5 mm).

**Keywords:** monocular vision; crack measurement; 3D reconstruction; projection matrix

## 0 引言

钢筋混凝土结构和构件都是非常重要的组成部分<sup>[1]</sup>。目前裂缝信息采集最为常见的方式还是人工采集,需要监测人员利用裂缝测量仪器进行测量,对于长期监测,人工测量主

收稿日期:2025-03-21

\*基金项目:国家重点研发计划资助项目(2024YFC3210703)、国家自然科学基金长江水科学研究联合基金(U2240221)、国家自然科学基金资助项目(51979174)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y724011)项目资助

观因素的影响太大,测量结果准确性难以保证,且伴随着巨大的人力成本和时间成本<sup>[2]</sup>。随着计算机科学的发展,利用计算机视觉技术对裂缝进行非接触式测量逐渐成为裂缝测量领域的研究热点。

贺玉彬<sup>[3]</sup>提出利用 Unet 分割裂缝图像,结合激光测距传感器计算像素比例尺,得到裂缝信息,该方法对数据集的初始质量要求高;张昊宇等<sup>[4]</sup>通过深度学习,建立三维模型,实现裂缝三向测量,但建立模型需要耗费大量时间,且其依赖垂直墙体和立体标靶,在工程应用中受限;为提高效率,薛志林<sup>[5]</sup>提出了基于双坐标系的立体视觉三维位移测量方法,胡贺南<sup>[6]</sup>通过提取长短程的时域特征,将运动特征和深度信息整合,采用深度学习求取物体三向位移变化量,这两种方法对相机位置有严格要求;黄佑超等<sup>[7]</sup>利用双目摄像头,建立等效模型,构建了裂缝测量系统,该方法依赖于特殊设备,在工程现场的普及率不高;Li 等<sup>[8]</sup>提出一种基于梯度特征的立体匹配和时空散斑投影的新技术,可以实现高分辨率的实时三维测量,但依赖现场光学投影;Wang 等<sup>[9]</sup>提出利用激光扫描获取物体三维形貌,通过对高差曲线进行分析,结合 RANSAC 算法构建表面特征,但应用于大型建筑时扫描时间久,运行效率低;为提高适用性,刘磊等<sup>[10]</sup>提出利用单目相机拟合双目相机,通过人工解算两相机的相对位姿实现三维重建,求得裂缝相对位移情况,但对初始特征点缺乏优化过程;这些方法或是对样本量有要求且运算时间长,或是对设备和拍摄姿态有要求,均无法良好地适应于现场裂缝测量。

为提高裂缝三向测量算法的准确性和现场适用性,本文提出了一种仅需单目相机进行自由位置拍摄的裂缝测量方法,该方法通过同心圆的偏心修正对初始特征点进行优化,指定世界坐标系,以 EPnP<sup>[11]</sup> 算法建立其与像素坐标系之间的联系,构建投影矩阵,进行三维重建的方式,规避单目视觉中深度信息缺失的问题。以建立裂缝三向位移等效模型的方式,观察副板坐标在世界坐标系下的变化情况,实现裂缝三向位移测量。

## 1 基于多重坐标系融合的裂缝三向测量基本原理

### 1.1 裂缝三向位移测量原理

裂缝的三向位移即 X 方向的开合,Y 方向的错动,Z 方向的沉降。通过算法设计,可以将其等效为标靶坐标在三维坐标系下的变化情况。传统三向位移测量需要大量的数据,而且必须对不同图像中的特征点进行匹配,因此会影响测量效率。

本文自主设计了同心圆标靶,将同心圆圆心点集作为特征点集,一方面可以通过同心圆自带的约束条件提高特征点的提取精度,另一方面通过排序可以消除因特征点匹配错误造成的误差。

以图 1 为例,试验标靶由两个  $5 \times 5$ ,圆心间距为 10 mm 的同心圆点阵组成,其中大圆半径 3 mm,小圆半径

1 mm。以左侧标靶左上角的同心圆圆心为坐标原点,建立坐标系,通过观测右侧标靶在此坐标系下的坐标变化,建立裂缝测量等效模型,即可求得裂缝的三向位移情况。标靶布置如图 1 所示。

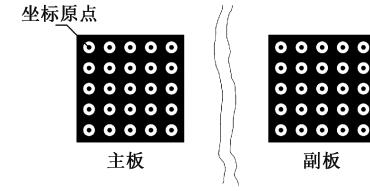


图 1 标靶布置图

Fig. 1 Target layout diagram

### 1.2 多重坐标系转换原理

世界坐标系下点  $D(x_w, y_w, z_w)$  和像素坐标系下点  $P(u, v)$  的坐标转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{KP} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{K}$  为相机的内参矩阵,  $\mathbf{P}$  为外参矩阵,  $\mathbf{Z}_c$  为相机坐标系下 Z 轴的坐标。

单目相机无法直接获得  $\mathbf{Z}_c$ , 因此需要进行三维重建,才能将像素坐标系下的点转移到相机坐标系下。三维重建所需变量根据如下步骤求取:1)求相机内参矩阵  $\mathbf{K}$ ;2)求取像素特征点集;3)通过 EPnP 求解特征点集与给定世界坐标的联系, 获取投影矩阵。

## 2 三向位移变化测量算法

基于以上裂缝测量原理和坐标转换原理,本文提出了裂缝三向位移变化测量算法,该算法基于裂缝等效模型,拍摄两张图片,拟合双目相机,将所识别的特征点坐标转化到设定的世界坐标系下,观察副板的坐标值变化,获得裂缝三向位移变化信息,具体步骤如图 2 所示。

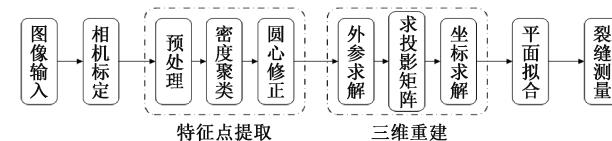


图 2 整体流程图

Fig. 2 Overall flowchart

### 2.1 特征点提取

输入裂缝图像后,首先会对图像进行二值化,图像滤波等预处理,后利用 canny 算子<sup>[12]</sup> 提取同心圆边缘信息,用于密度聚类,用 DBSCAN 密度聚类<sup>[13]</sup> 求取同心圆的圆心,构成初始特征点集  $P'$ 。由于现场拍摄往往并非平行拍摄,物体平面上的圆在投影到图像平面时会呈现为椭圆形状,导致圆心与实际的圆心与实际投影点之间存在误差,即偏心误差。为消除偏心误差,本文运用交比不变性<sup>[14]</sup> 对圆心

进行畸变修正,排序后,即可构成特征点集  $p = \{(u_1, v_1), (u_2, v_2), (u_3, v_3) \dots\}$ 。

## 2.2 三维重建

单目相机相比较双目相机缺少两相机间的位姿关系,导致其无法通过几何关系直接获得深度信息,因此,本文通过规定主板的三维坐标,利用 EPnP 建立主板特征点与设定三维坐标之间的关系,得到主板相对于相机的外参  $R, T$ ,构建投影矩阵,即可在未得知深度信息的情况下,通过最小二乘法求得副板的三维坐标,将副板坐标转换到以主板左上角同心圆圆心为原点的世界坐标系中。

相较大多数非迭代的 PnP 算法,EPnP 规避了对图像深度的求解,通过设置 4 个控制点的方式,将二维到三维的对应关系转化为世界坐标系到相机坐标系的对应关系求解。在初始估计的基础上,通过 Levenberg-Marquardt 法来迭代优化相机的旋转矩阵和位移向量,直到重投影误差值<sup>[15]</sup>小于给定阈值 0.1 时停止迭代,过程如下:

1) 将外参表示为 6 维参数向量:

$$\mathbf{x} = [R^T, t^T]^T = [R_1, R_2, R_3, t_1, t_2, t_3]^T \quad (2)$$

2) 对于每个 3D-2D 点对,定义 2 维残差:

$$f_i(\mathbf{x}) = \pi(K, D, R(\mathbf{r}), \mathbf{t}, P_i) - p_i \quad (3)$$

所有残差组成  $2n$  维残差向量:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_1^T, \dots, f_n^T]^T \quad (4)$$

3) 计算雅可比矩阵:

$$\mathbf{J}_k = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{x=x_k} \quad (5)$$

构建正规方程:

$$(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \lambda_k \text{diag}(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k)) \Delta_k = -\mathbf{J}_k^T \mathbf{F}(\mathbf{x}_k) \quad (6)$$

4) 求解得到  $\Delta_k$  后更新  $\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{x}_k + \Delta_k$ 。

5) 当满足阈值 0.1 或迭代次数超过 30 次时停止。

得到以主板为世界坐标系的相机 1 和相机 2 的投影矩阵后,即可根据投影矩阵求得副板在此坐标系下的相对位置,对于两个相机,分别有:

$$s_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$s_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中,  $\mathbf{M} = K[R | t]$  为投影矩阵,  $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$  为像素坐标系下两次拍摄得到的坐标,  $s_1, s_2$  为影响因子。

展开矩阵,消除影响因子,可得:

$$\begin{aligned} u_1 M_1^{(3)} - M_1^{(1)} \cdot X &= 0 \\ v_1 M_1^{(3)} - M_1^{(2)} \cdot X &= 0 \\ u_2 M_2^{(3)} - M_2^{(1)} \cdot X &= 0 \\ v_2 M_2^{(3)} - M_2^{(2)} \cdot X &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

将上述方程转换为矩阵:

$$\mathbf{A} \mathbf{X} = 0 \quad (9)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} u_1 M_1^{(3)} - M_1^{(1)} \\ v_1 M_1^{(3)} - M_1^{(2)} \\ u_2 M_2^{(3)} - M_2^{(1)} \\ v_2 M_2^{(3)} - M_2^{(2)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $M_i^{(i)}$  为投影矩阵的第  $i$  行。

采用 SVD 奇异值分解,令  $\mathbf{A} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T$  求解该方程,得到初始三维坐标点集  $P' = [(X_0, Y_0, Z_0), (X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2) \dots]$ 。

## 2.3 平面拟合

由于位姿推导是基于理想状况下,在三维重建后,必须对得到的坐标点集进行优化,以消除噪声等干扰项影响。考虑到标靶平面基本水平,理论求解得到的三维点集也应位于同一平面,因此,可以利用平面拟合<sup>[16]</sup>,对图像畸变进行补偿,最终得到优化的三维坐标点集。

为防止平面拟合时陷入局部最优情况,本文在平面拟合前,采用 RANSAC 算法<sup>[17]</sup>进行预拟合,对点云数据进行筛选。首先,通过在点云数据中随机选取三个点建立平面,计算点云集中所有点距离平面模型的距离,以 0.5 作为阈值判断边界。当模型内部点数目满足要求时用所有在平面上的点(局内点)基于最小二乘原理  $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min$  重新计算平面参数,如此迭代十次完成初步拟合。

通过 RANSAC 预拟合后,参照标靶设置的真实距离,利用 PCA 算法<sup>[18]</sup>将与三维点云中相邻点距离较远的点剔除后,再次进行平面拟合,拟合结束后,将原先剔除的点重新投影到拟合平面。迭代直至平面内所有点到平面的距离小于设定阈值 0.3 或迭代情况发散,拟合完成后,即可得到新的坐标点集  $P_w = \{P_{w1}, P_{w2}, P_{w3} \dots\}$ 。平面拟合结果如图 3 所示。

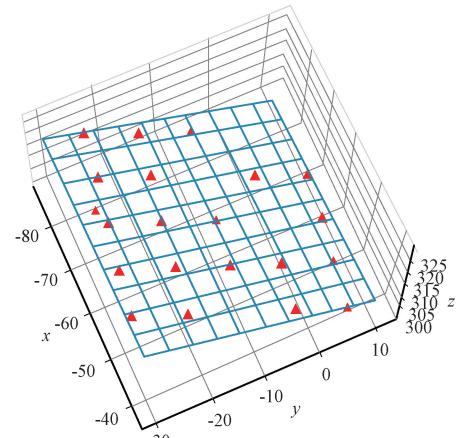


图 3 平面拟合结果

Fig. 3 Plane fitting results

根据前后两次测得的右侧标靶左上角同心圆坐标坐标

$P_{w1} = [X_0, Y_0, Z_0]$ ,  $P'_{w1} [X'_0, Y'_0, Z'_0]$  相减, 即可得知裂缝的三向位移变化。

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_0 - X_0 \\ Y'_0 - Y_0 \\ Z'_0 - Z_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 3 裂缝三向位移测量试验

#### 3.1 试验设备

本文采用相机进行多角度拍摄, 用于拟合双目相机的拍摄过程, 得到两张图片后输入计算机终端, 计算所需的试验参数, 最终得到试验结果。相机型号为 Nikon D3100, 像素为 1 420 万, 有效像素为  $4608 \times 3702$ , 传感器尺寸  $23.1 \text{ mm} \times 15.4 \text{ mm}$  图像处理器 EXPEED 2, 焦距  $18 \sim 55 \text{ mm}$ 。

为验证算法的精确度和稳定性, 本文以固定滑台为基础, 设计了三向位移精确度和稳定性检测装置, 该装置由横轴滑轨, 纵向滑轨, 坚向滑轨以及百分表组成。将左右试验标靶分别固定在移动端和固定端上, 于滑动水平方向布置电子百分表, 利用滑轨移动标靶, 以模拟裂缝三向变化, 试验设备详情如图 4 所示。

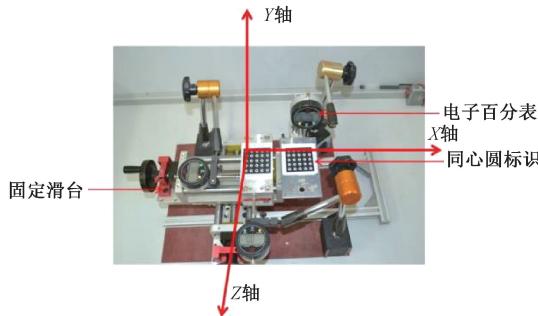


图 4 试验设备图

Fig. 4 Experimental equipment diagram

#### 3.2 试验方案

试验时, 采用相机对试验设备进行多角度拍摄, 拍摄时尽量将标靶置于中心。本文通过移动可移动端的标靶, 模拟裂缝两侧的相对位移, 以电子百分表的读数作为位移的参考值。每次移动后采集图像用作数据处理, 得到的三维坐标与起始拍摄时的坐标差值即为裂缝的变化情况。具体试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案

Table 1 Protocol

验证目标	试验环境	移动距离	试验次数
精确度	室内	0~10 mm, 每次 1 mm	3
稳定性	室内	0~10 mm, 每次 1 mm	3
鲁棒性	室外	0~20 mm, 每次 2 mm	5
泛化能力	水库现场	—	5

### 3.3 试验结果

由图 5 可知, 单向移动 X 轴时, 测量位移与实际位移的误差值均控制在  $\pm 0.35 \text{ mm}$  之内, 同时, X 向误差范围在  $\pm 0.25 \text{ mm}$  以内, 表明算法的精确度和稳定性可靠, 且未随着参考位移增大而造成误差波动性增强。

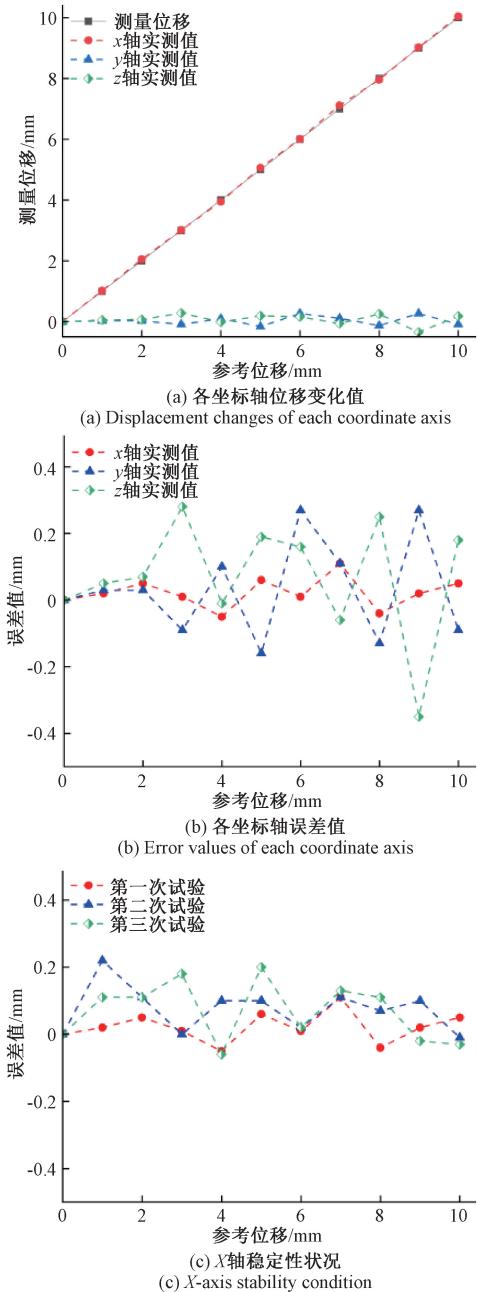


图 5 单向移动 X 轴结果

Fig. 5 Unidirectional movement X-axis results

由图 6 可知, 单向移动 Y 轴时, 测量位移与实际位移的误差值均控制在  $\pm 0.3 \text{ mm}$  之内, 同时, Y 向误差范围在  $\pm 0.3 \text{ mm}$  以内, 表明算法的精确度和稳定性可靠, 且未随着参考位移增大而造成误差波动性增强。

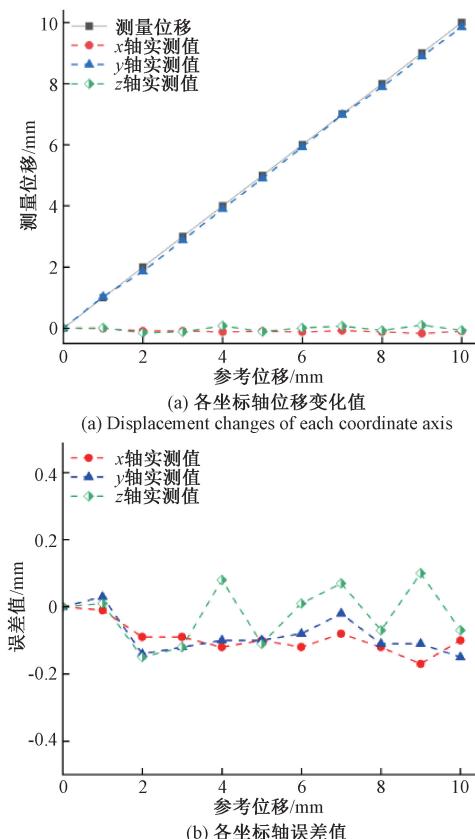
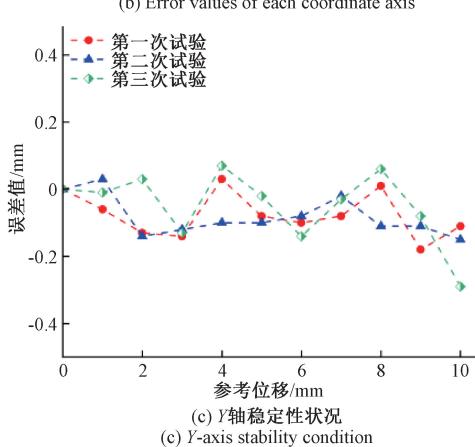
(a) 各坐标轴位移变化值  
(a) Displacement changes of each coordinate axis(b) 各坐标轴误差值  
(b) Error values of each coordinate axis(c) Y轴稳定性状况  
(c) Y-axis stability condition

图 6 单向移动 Y 轴结果

Fig. 6 Unidirectional movement Y-axis results

由图 7 可知,单向移动 Z 轴时,测量位移与实际位移的误差值均控制在  $\pm 0.35$  mm 之内,同时,Z 向误差范围在  $\pm 0.3$  mm 以内,表明算法的精确度和稳定性可靠,且未随着参考位移增大而造成误差波动性增强。

由于实际情况下裂缝不止会发生单向位移,因此三轴移动试验同样存在必要性。图 8 为同时移动 XYZ 三轴的情况下的试验结果。

由图 8 可知,三轴移动时,测量位移与实际位移的误差值均控制在  $\pm 0.3$  mm 之内,同时,三向误差范围在  $\pm 0.3$  mm 以内,表明算法的精确度和稳定性可靠,且各轴误差变化范围

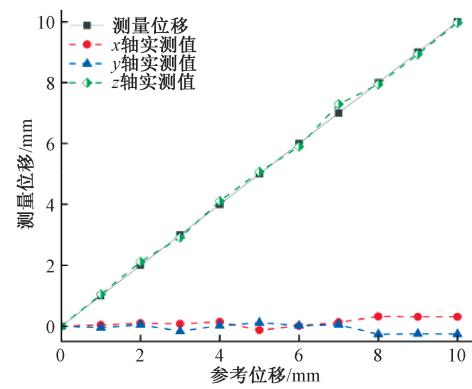
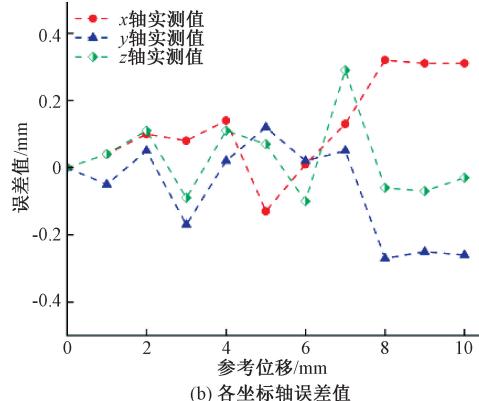
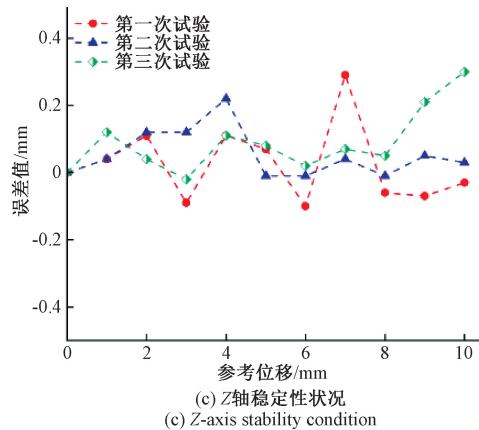
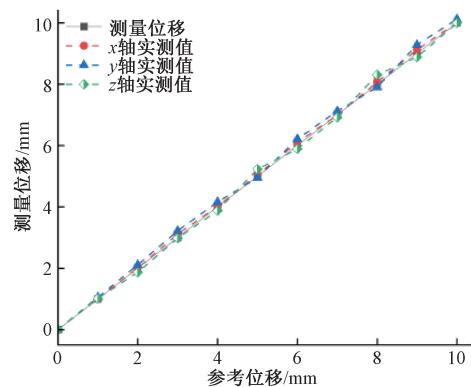
(a) 各坐标轴位移变化值  
(a) Displacement changes of each coordinate axis(b) 各坐标轴误差值  
(b) Error values of each coordinate axis(c) Z轴稳定性状况  
(c) Z-axis stability condition

图 7 单向移动 Z 轴结果

Fig. 7 Unidirectional movement Z-axis results

均在同一水平之内,说明算法测量效果良好。

由图 9 可知,本文测量算法的精确性受不同光照条件的影响,雨后和阴天的精确度最高,误差范围均控制在  $\pm 0.3$  mm 之内。正午的精确度受影响最大,但误差范围仍保持在  $\pm 0.35$  mm 之内。说明算法的鲁棒性良好。此外,试验发现在正午光照强烈的情况下,标靶反光会导致图片的识别效果会变差。因此,在清晨或阴天等光线柔和的环境中,可适当减少采样图片数量,在实践中拍摄四张不同角度图片即可满足需求,而如正午等阳光强烈的时段,则可以将图片采样数增加到 8 张。



(a) 各坐标轴位移变化值

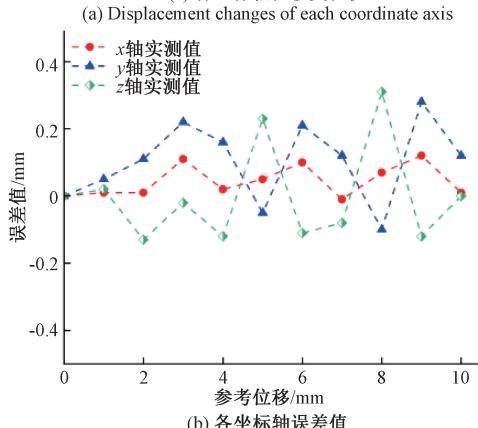


图 8 移动全坐标轴结果

Fig. 8 Results of moving the full coordinate axis

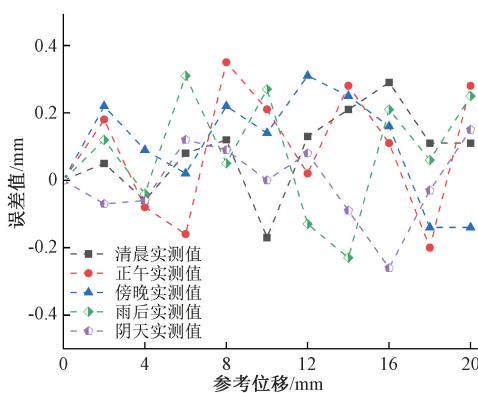


图 9 室外不同光照试验结果

Fig. 9 Results of outdoor different lighting tests

为验证测量算法的泛化能力,本文在浙江省长兴县合溪水库大坝进行试验,该水库总库容量 11 062 万 m<sup>3</sup>,为大Ⅱ型水库,拦河坝总长 752 m,坝顶高程 32.2 m,宽 6 m。混凝土重力坝总长 39.5 m,最大坝高 47.2 m。黏土心墙砂砾石坝总长 712.2 m。现场试验图如图 10 所示。试验方案为在大坝裂缝两侧张贴金属标识,定时利用相机拍摄采集图像,将算法处理得到的结果与用游标卡尺测量得到的结果进行对比验证。



图 10 现场试验图

Fig. 10 On site test diagram

由图 11 可知,在时间跨度为一个月的泛化试验中,三向测量的结果误差均保持在±0.4 mm 内,与室内试验和室外试验的误差相比增加幅度较低,说明算法泛化能力良好。

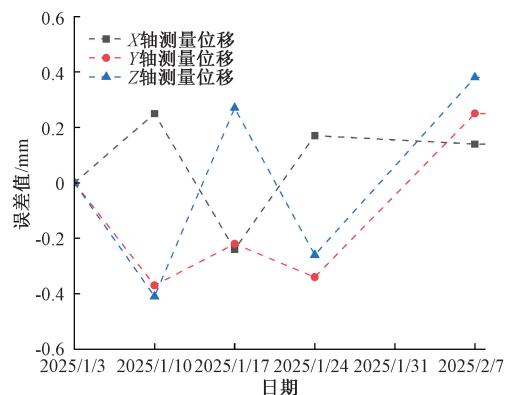


图 11 现场试验结果

Fig. 11 On site test results

### 3.4 结果分析

分析上述试验结果,可知,在单轴移动试验时,算法测得的移动轴位移距离与实际移动距离呈线性变化趋势,且固定轴的绝对误差保持在与测量轴相近的水平,均在±0.35 mm 内波动,表明算法对移动轴的变化情况能够进行准确判断。在三轴移动试验时,误差仍保持在±0.3 mm。

由表 2 可知,试验中,三向绝对误差都在±0.35 mm 以内。满足《土石坝安全监测技术规范》中对裂缝测量的要求(±0.5 mm)。

表 2 算法精度分析

Table 2 Accuracy analysis of the algorithm

评价标准	测量轴		
	x	y	z
绝对误差/mm	±0.35	±0.35	±0.35

由表 3 可知,算法的最大偏差为 z 轴出现的 0.35 mm,证明本文的重复性可靠。

为检验本文测量算法的性能,本文选取了两种常见的裂缝测量技术,在保持试验条件不变的情况下,对文章算法进行了对比试验,试验结果如表 4 所示。

表 3 算法重复性分析

Table 3 Algorithm repeatability analysis

评价标准	测量轴		
	x	y	z
最大偏差/mm	+0.31	-0.29	+0.35

表 4 对比试验分析

Table 4 Comparative experimental analysis

评价标准	本文算法	文献[5]	文献[6]
最大偏差/mm	+0.35	+0.36	-0.47
波动范围/mm	-0.27~+0.35	-0.32~+0.36	-0.47~+0.38
绝对误差/mm	±0.35	±0.40	±0.50

根据表 4 可知,本文相较文献[6],最大偏差,波动范围,绝对误差都有明显提高。相较文献[5],本文算法要求的硬件仅为普通(非工业)相机,相比双目摄像机的实用性更强,现场应用面更广,故综上所述,本文的算法具有一定的普适性和创新性。

## 4 结 论

本文通过等效模型对裂缝进行三向位移测量,利用多重坐标系之间的转换关系,通过指定主板的世界坐标系,规定了尺度信息,利用 EPnp 算法和最小二乘法实现了深度信息的求取。此外,标靶提供了特征点与给定坐标系的匹配关系,减少了传统三向测量中因特征点匹配产生的误差,实现了裂缝三向位移的精确测量。根据试验结果分析可知,本文算法在室内条件下最大偏差 0.35 mm,三向测量误差均在 ±0.35 mm 之内,满足规范对裂缝测量的要求(±0.5 mm),测量稳定性好。通过不同光照影响试验,验证了本文算法的鲁棒性,试验结果表明,在阴天和雨后等光照柔和的情况下,标靶因反光造成的误差较小,在保障图片质量的情况下可以减少采样图片数量。在现场试验条件下,本文算法在面对复杂的环境因素干扰下,仍能保持 ±0.4 mm 的测量精度,证明本文算法可以应用于实际工程中。

## 参考文献

- [1] 王文斌,王啸霆,王涛,等.基于计算机视觉的混凝土表面裂缝识别和宽度测量[J].地震工程与工程振动,2024,44(3):41-51.  
WANG W B, WANG X T, WANG T, et al. Concrete apparent crack recognition and width measurement based on computer vision[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2024, 44(3): 41-51.
- [2] 李天聪.基于计算机视觉的裂缝平面多参数测量技术研究[D].南京:南京理工大学,2022.  
LI T C. Research on multi parameter measurement technology of crack plane based on computer vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [3] 贺玉彬.基于机器视觉的大坝表面裂缝自动测量方法[J].制造业自动化,2023,45(7):160-163.  
HE Y B. Automatic measurement method for surface cracks of dams based on machine vision [J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(7): 160-163.
- [4] 张昊宇,丁勇,李登华.基于三维重建的结构表面裂缝检测方法[J].工业建筑,2024,54(5): 60-67.  
ZHANG H Y, DING Y, LI D H. Structural surface crack detection method based on 3D reconstruction[J]. Industrial Architecture, 2024, 54(5): 60-67.
- [5] 薛志林.基于双坐标系的立体视觉三维位移测量方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
XUE ZH L. Stereoscopic vision 3D displacement measurement method based on dual coordinate system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [6] 胡贺南.基于单目视觉的三维目标检测技术研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2023.  
HU H N. Research on 3D object detection technology based on monocular vision [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences University (Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [7] 黄佑超,丁勇,李登华.基于双目视觉的裂缝三向变化检测方法研究[J].水电能源科学,2023,41(1):147-150.  
HUANG Y CH, DING Y, LI D H. Research on three dimensional crack change detection method based on binocular vision[J]. Journal of Hydroelectric Energy Science, 2023, 41(1): 147-150.
- [8] 李涛,张爽,郝倩.高分辨率,实时 3D 测量利用梯度特征和空间-时间斑纹投影系统[J].光学与激光工程,2025,191: 108981.  
LI T, ZHANG S, HAO Q. High-resolution, real-time 3D measurement using gradient features and spatial-temporal speckle projection system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 191: 108981.
- [9] 王海,齐思,张涛,等.在 situ 表面检测结合 3D 地形重建、缺陷检测及粗糙度测量[J].光学与激光技术,2025,187: 112871.  
WANG H, QI S, ZHANG T, et al. In-situ surface inspection for wire-arc directed energy deposition integrating 3D topography reconstruction, defect detection and roughness measurement[J]. Optics and Laser Technology, 2025, 187: 112871.
- [10] 刘磊,丁勇,李登华.基于单目视觉下的裂缝三向变化检测[J].激光与光电子学进展,2024,61(18):177-186.  
LIU L, DING Y, LI D H. Three directional crack detection based on monocular vision[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2024, 61(18): 177-186.

- [11] 何帅民, 陈皓, 王振宇. 基于 PnP 算法的单目视觉位移测量方法[J]. 新技术新工艺, 2023(6): 46-52.  
HE SH M, CHEN H, WANG ZH Y. Monocular visual displacement measurement method based on PnP algorithm[J]. New Technology and Process, 2023(6): 46-52.
- [12] RACHIDI O, ED-DAHMANI C, IDRISI B B. Advanced pedestrian distance estimation for ADAS with canny edge detection and stereo vision[C]. E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2025, 601: 00060.
- [13] TU X, QIN T, JI X, et al. DBSCAN clustering model for parameter inversion using laser cutting edge morphology characteristic in Zr-4 alloy[J]. Optics and Laser Technology, 2025, 184: 112461.
- [14] 杨程翔, 丁勇, 李登华. 微距拍摄条件下的裂缝二维变化测量算法[J]. 测绘通报, 2024(1): 115-119, 125.  
YANG CH X, DING Y, LI D H. Measurement algorithm for two-dimensional changes of cracks under macro photography conditions [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2024,(1): 115-119,125.
- [15] 陈天择, 葛宝臻, 罗其俊. 重投影优化的自由双目相机位姿估计方法[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1400-1409.  
CHEN T Z, GE B ZH, LUO Q J. A free binocular camera pose estimation method optimized by reprojection[J]. China Optics, 2021,14(6): 1400-1409.
- [16] 杨少舟, 龙东平, 陈继尧, 等. 基于 M 估计算法的三维点云平面拟合方法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(5):70-76.  
YANG SH ZH, LONG D P, CHEN J Y, et al. Research on 3D point cloud plane fitting method based on M-estimation algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(5): 70-76.
- [17] 叶锦华, 林旭敏, 吴海彬. 基于 DBSCAN 的改进 RANSAC 点云平面拟合算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(2): 76-87.  
YE J H, LIN X M, WU H B. Improved RANSAC point cloud plane fitting algorithm based on DBSCAN [J]. Journal of Hunan University(Natural Science Edition), 2025, 52(2): 76-87.
- [18] 符恬恬, 郑斌琪, 李成娟, 等. 基于 PCA 和非线性映射改进的 MFCC 特征提取方法[J]. 电子测量技术, 2025, 48(10): 93-99.  
FU T T, ZHENG B Q, LI CH J, et al. Improved MFCC feature extraction method based on PCA and nonlinear mapping [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(10): 93-99.

## 作者简介

胡宇, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉在工程上的应用。

E-mail:1343955073@qq.com

李登华(通信作者), 正高级工程师, 主要研究方向为水利工程结构检测。

E-mail:dhli@nhri.cn

丁勇, 副教授, 主要研究方向为结构健康监测。

E-mail:12005048@njust.edu.cn