

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220476

基于双目视觉的裂缝三向变化检测方法研究

黄佑超¹, 丁 勇¹, 李登华²

(1. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要:为解决传统裂缝三向检测方法成本高、效率低的问题,提出了一种基于双目视觉的裂缝三向变化检测方法。首先建立裂缝三维等效模型,将裂缝变化计算等效为计算标靶间变化情况;然后通过特征点编码匹配、空间坐标系变换、三维坐标计算等对裂缝进行三维重建,量化裂缝三向变化情况;最后通过单轴位移试验验证了该方法的精度。结果表明,裂缝的开合方向和平行于裂缝表面的错动方向最大测量误差在0.2 mm以内,垂直于裂缝表面的错动方向的最大测量绝对误差在0.3 mm以内,满足《土石坝安全监测技术规范》中对于裂缝检测的要求。

关键词: 双目视觉; 裂缝检测; 混凝土面板堆石坝; 三维重建; 编码匹配; ICP算法

中图分类号: TV698.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)01-0147-04

1 引言

混凝土面板堆石坝上的裂缝变形通常具有多维变形特性,因此裂缝的多向变化检测对于保证结构安全运行具有重要意义^[1]。裂缝三向动态变化检测依托于机械式测缝计,该类设备安装复杂、成本昂贵,且会因杆件之间的扭动而使设备卡死导致无法采集数据。随着双目立体视觉的三维测量技术日趋成熟,其被广泛运用于缺陷监测、工件尺寸测量、物体位移测量等方面^[2]。YANG Y等^[3]采用双目视觉技术检测坝面标识来实现对大坝表面位移测量;王琳等^[4]采用双目立体视觉技术得出裂缝的三维坐标,并通过三维欧氏距离计算出桥梁裂缝的宽度和长度;万至达等^[5]等通过仿生双目视觉算法实现了对水下的表面缺陷空间信息的测量。双目视觉技术对裂缝进行检测会存在匹配量大、精度较低的问题,且现阶段采用该方法是为消除单目视觉倾斜拍摄的影响,局限于对裂缝宽度和长度的测量,未对检测裂缝的三向变化检测进行研究。为此,本文提出了一种基于双目视觉的裂缝三向变化检测方法,该方法通过建立裂缝三维等效模型对裂缝进行三维重建并对比

不同时期裂缝的三维坐标变化信息,从而实现裂缝三向变化检测。

2 裂缝变化三维等效模型

裂缝三向变化监测是通过测量裂缝旁板某一固定位置的相对空间位移量,检测裂缝开合、剪切和沉降三个方向上的变形,这些变形是由裂缝两侧面板的相对运动引起。据此提出基于二维码标靶与实心圆阵列标靶的裂缝变化三维等效模型,通过检测标靶间相对位移来量化混凝土构件的裂缝三向变化,并通过捕获不同时期的三维模型信息监测裂缝在不同时间间隔内的三向变化状况。

本文模型按图1所示张贴在裂缝两侧,尽量保证两标靶平行固定且下边缘平齐,设置裂缝的开合方向为 x 轴方向,平行于裂缝表面的错动为 y 轴方向,垂直于裂缝表面的错动为 z 轴方向。选取实心圆矩阵码目的是作为参考平面,通过识别标靶上特征点后经计算将世界坐标系转化到被测裂缝平面。因二维码具有容错能力强、译码可靠性高、特征点易识别等优点,另一侧选取二维码作为裂缝等效模型的主码,通过zbar算法和图像处理技术对二维码进行信息识别和特征识别。

收稿日期: 2022-03-14, **修回日期:** 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979174);浙江省水利厅科技计划项目(RB2035);国家自然科学基金联合基金项目(U2040221);央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y321004)

作者简介: 黄佑超(1997-),男,硕士研究生,研究方向为结构健康监测,E-mail:huangyouchao@njjust.edu.cn

通讯作者: 丁勇(1977-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为结构健康监测,E-mail:njstding@163.com

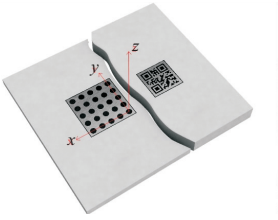


图 1 裂缝变化三维等效模型图

Fig. 1 Three-dimensional equivalent model of crack change

3 裂缝三向变化测量算法

通过捕获裂缝等效模型的特征点和平行双目视觉模型为基础,依据计算机视觉相关的理论和 技术,利用双目摄像头采集图像,对裂缝变化进行 三维重建。基于双目视觉的裂缝变化三维检测算 法包括图像预处理^[6]和裂缝三向变化测量,其技 术路线见图 2。

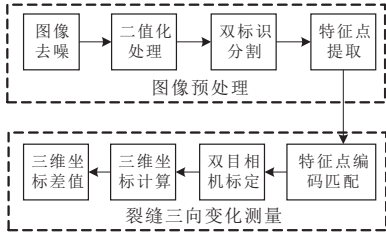


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of algorithm

采用特征点编码方法进行立体匹配,对两幅 图像中(图 3)特征点进行编码,匹配结果只有两 幅图像中同一编码的特征点,数据量极小,方便后 续三维坐标重建。

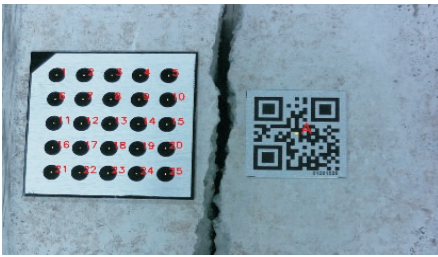


图 3 特征点编码图

Fig. 3 Feature point coding

采用 ZHANG Z 标定方法^[7]标定出摄像头的 内外参数。其中 K_L 为内参,外参由旋转矩阵 R_L 和平移向量 T_L 组成,表示两摄像头之间的空间 关系。由左右两个相机捕捉靶特征点信息,以 左相机为例,物体表面上的某一点与相机中数字 图像中的对应点的关系^[8]可表示为:

$$\lambda \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ 1 \end{bmatrix} = K_L \begin{bmatrix} R_L & T_L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, (u_L, v_L) 为数字图像上特征点的像素坐标; (X_C, Y_C, Z_C) 为特征点的世界坐标。

通过同时计算左右两个摄像机的内外参数矩 阵,得到:

$$\begin{cases} (u_L m_{31}^L - m_{11}^L) X_C + (u_L m_{32}^L - m_{12}^L) Y_C + (u_L m_{33}^L - m_{12}^L) Z_C = m_{14}^L - u_L m_{34}^L \\ (v_L m_{31}^L - m_{11}^L) X_C + (v_L m_{32}^L - m_{12}^L) Y_C + (v_L m_{33}^L - m_{12}^L) Z_C = m_{14}^L - v_L m_{34}^L \\ (u_R m_{31}^R - m_{11}^R) X_C + (u_R m_{32}^R - m_{12}^R) Y_C + (u_R m_{33}^R - m_{12}^R) Z_C = m_{14}^R - u_R m_{34}^R \\ (v_R m_{31}^R - m_{11}^R) X_C + (v_R m_{32}^R - m_{12}^R) Y_C + (v_R m_{33}^R - m_{12}^R) Z_C = m_{14}^R - v_R m_{34}^R \end{cases} \quad (2)$$

式中, m_{ij}^L, m_{ij}^R ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3$) 均为常 数,可通过标定得到。

结合标定后的内外参数,使用最小二乘法计 算式(2)重建出特征点的三维坐标:

$$P_C = [x_c, y_c, z_c]^T$$

经计算可得实心圆阵列码的特征点在相机坐 标系下的三维坐标集 $P = \{p_{c1}, p_{c2}, \dots, p_{cn}\}$ 。 通过所设置的三轴方向在实心圆阵列码上设立世 界坐标系,可知实心圆阵列码特征点在世界坐标 系下的三维坐标集为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 。

使用 SVD 算法求解迭代最近点(ICP)得出 两坐标系的位置信息^[9],该算法计算步骤如下。

步骤 1 分别求解点集 P, Q 的重心 \bar{P}, \bar{Q} 。

步骤 2 以重心为三维坐标系的原点重建坐 标系,即求取

$$\begin{cases} P'_i = P_i - \bar{P} \\ Q'_i = Q_i - \bar{Q} \end{cases}, \text{并以 } P'_i, Q'_i \text{ 作为下一} \\ \text{步的运算数据,以简化运算。}$$

步骤 3 以 P'_i, Q'_i 为基础构造矩阵 $H, H =$

$$\sum_i^N P'_i Q_i^T. \text{利用奇异值分解算法分解矩阵 } H, \text{得} \\ \text{到 } H = U \Lambda V^T, \text{由此得到矩阵 } U, V.$$

步骤 4 由 U, V , 运算 $\begin{cases} R = VU^T \\ T = \bar{Q} - R\bar{P} \end{cases}$ 得到两

坐标系的转化关系 R, T 。

通过式(2)求得已知的二维码上特征点的相 机坐标系下的三维坐标 $P_q = [x_q, y_q, z_q]^T$ 代入:

$$P_w = RP_q + t \quad (3)$$

可得二维码特征点在实心圆矩阵码坐标系下 的三维坐标:

$$P_w = [x_w, y_w, z_w]^T \quad (4)$$

初始阶段主码中心的三维坐标记为 $P_{w0} = [x_{w0}, y_{w0}, z_{w0}]^T$, 不同时间段的主码中心的三维

坐标为 $P_{wi} = [x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}]^T$ 。将不同时间段拍摄所得的三维坐标与初始三维坐标进行对比,裂缝的三向变化值可由基于实心圆矩阵码坐标系下的空间坐标差值计算得出,即:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

4 室内验证试验

本文试验所采用的双目视觉测量系统由树莓派和两个 OV5647 模块摄像头组成,树莓派负责图像采集与推送至服务器,基于 Python 编程语言与 OpenCV 计算机视觉库编写本文所提算法。

摄像头分辨率、焦距和基线是双目视觉测量系统中极为重要的三个参数^[10],传感器类型为 CMOS,摄像头分辨率为 $2\,592 \times 1\,944$ 像素(500 万像素),镜头焦距为 6 mm,基线为 60 mm。其中摄像头的分辨率越大,单位面积像素越多,物理尺寸焦距将会有更长的像素尺寸焦距,精度越高;基线长度越长,焦距越长,精度越高^[11]。但若基线过长会导致两相机的交叉视角减小,焦距过长会导致视场角减小,以致于不能在左右两幅图像中同时观察到标靶;随着所需量程的增大,摄像头离拍摄物体的距离也要增大;拍摄角度过大将会导致标靶变形严重,特征点识别精度下降。

为验证该裂缝三向变化检测算法的可行性和精度,本文试验设计了一套三轴位移装置,以模拟混凝土构件裂缝开展部位两旁的刚体位移并检测位移变化。该装置由两个滑台(横向和纵向)、一个竖向滑轨(径向)、三个百分表和设备安装台等组成,三个百分表分别安置于三轴滑台一端并保持指针与滑台位移方向平行(图 4)。

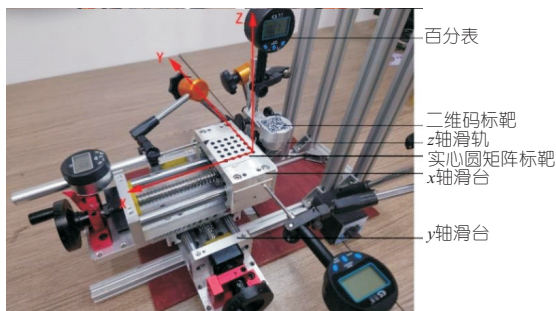


图 4 三轴位移装置图

Fig. 4 Three-axis Displacement device

将实心圆阵列标靶和二维码标靶固定于三轴位移装置,进行单向位移试验。使用三方向的百分表记录各轴移动距离,同时使用双目视觉测量

系统采集单向位移图像,推送至服务器使用本文所提方法计算变化情况。设置百分表所测得的变化值为参考值,对比分析算法所测得测量值和百分表所测得参考值的绝对误差量。

本文方法针对混凝土面板堆石坝中清晰可见并带有错动的接缝和大裂缝进行监测,经过一些实地走访和资料采集,发现所研究的裂缝沉降量均在 10 mm 以上,本次试验旨在模拟这类裂缝,因此设置 Z 轴方向初始距离为 10 mm(两标靶间相对高差为 10 mm)。本文检测对象变化量级较大,需对其大量程变化进行分析,因此设置单轴方向每次位移 2 mm, x-y 轴总移动量为 30 mm, z 轴总移动量为 20 mm。将每次移动的三维坐标值与初始三维坐标值进行对比,所得单轴位移试验结果见图 5~7。

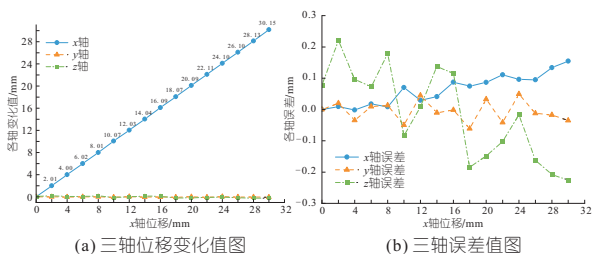


图 5 x 轴单向位移试验

Fig. 5 x-axis displacement test

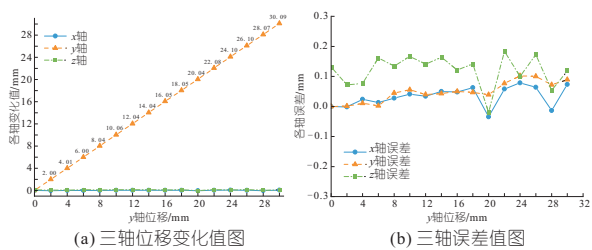


图 6 y 轴单向位移试验

Fig. 6 y-axis displacement test

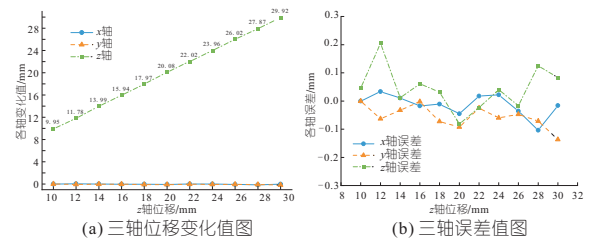


图 7 z 轴单向位移试验

Fig. 7 z-axis displacement test

由图 5(a)~7(a)可知,当单轴发生位移时,变化轴测量值与百分表所测得参考值呈线性变化,且非变化轴的数值变化趋于零,表明本文所提算法能精确提取变化信息。由图 5(b)~7(b)可知,变化轴误差是由变化测量值与百分表所测得参考值进行对比所得,非变化轴误差是由单轴位移时该非变化轴的测量坐标值与初始测量坐标值

进行对比所得。由于系统误差和图像预处理产生的随机误差等因素的影响,最终所计算出来另两个非变化轴的数值变化在误差允许范围内有所波动。

表 1 为三坐标轴值误差分析。由表 1 可知,三轴测量值的均方根误差和平均数很小,说明该方法所测得的值较稳定,但 z 轴方向的误差对测量系统的误差相较于 xy 方向更为敏感。由误差最大值可得, xy 方向的最大测量误差在 0.2 mm 以内, z 轴方向的最大测量绝对误差在 0.3 mm 以内,该误差满足《土石坝安全监测技术规范》^[12] 中的对于裂缝检测的要求。分析其中出现偏离实际值过大的原因是图像处理中所使用的自适应方法的随机误差过大导致特征点的识别出现偏差。

表 1 三坐标轴值误差分析

Tab. 1 Error analysis of three coordinate axes

| 坐标轴 | 平均数/mm | 最大值/mm | 均方根误差/mm ² |
|-----|--------|--------|-----------------------|
| x | 0.049 | 0.155 | 0.061 |
| y | 0.045 | 0.137 | 0.055 |
| z | 0.110 | 0.226 | 0.126 |

5 结论

本文基于双目视觉设备,通过建立裂缝等效模型结合基于最小二乘法和 ICP 算法的三维坐标计算方法,能够精确提取裂缝变化信息,误差能够满足裂缝检测要求,实现了裂缝三向变化的检测。

参考文献:

[1] 刘宇飞,樊健生,聂建国,等. 结构表面裂缝数字图像法识别研究综述与前景展望[J]. 土木工程学报, 2021, 54(6):79-98.
 [2] 单宝华,申宇,戚贵军. 立体视觉在 UV-GFRP 加固

混凝土梁静载试验中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(3):97-103.
 [3] YANG Y, SANG X, YANG S et al. High-precision vision sensor method for dam surface displacement measurement [J]. IEEE sensors journal, 2019, 19(24): 12475-12481.
 [4] 王琳,赵健康,夏轩,等. 基于双目立体视觉技术的桥梁裂缝测量系统[J]. 计算机应用, 2015, 35(3): 901-904.
 [5] 万至达,张学武,盛金保,等. 水下结构物表面缺陷的仿生双目视觉测量[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 71-78.
 [6] 张社荣,时铮,王超,等. 基于深度学习的渡槽裂缝类型判定方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 149-152.
 [7] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]//Seventh IEEE International Conference on Computer Vision IEEE,1999.
 [8] SHI W, ZHANG Q, XIE H et al. A binocular vision-based 3d sampling moiré method for complex shape measurement[J]. Applied sciences, 2021, 11 (11): 5175.
 [9] BESL P J, MCKAY H D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
 [10] 余慧杰,韩平畴. 双目视觉系统的测量误差分析[J]. 光学技术, 2007(S1): 157-159.
 [11] 杨海燕,汤国建. 立体视觉系统的目标可见性及测量精度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34 (9):1889-1894.
 [12] 中华人民共和国水利部. 土石坝安全监测技术规范:SL551-2012[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.

Research on Three-way Crack Change Detection Method Based on Binocular Vision

HUANG You-chao¹, DING Yong¹, LI Deng-hua²

(1. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: To solve the disadvantage of high cost and low efficiency in the traditional three-way crack detection methods, a three-dimensional crack change detection method based on binocular vision was proposed. Three-dimensional equivalent model of crack change was established, and the calculation of crack changes was equivalent to the calculation of changes between targets. Three-dimensional reconstruction of cracks was carried out through feature point code matching, spatial coordinate system transformation, three-dimensional coordinate calculation, and the three-dimensional situation of the fracture change was obtained. To verify the accuracy of the method, a unidirectional displacement test was carried out. The results show that the maximum measurement error of the opening and dislocation of the crack is within 0.2 mm, and the maximum measurement absolute error of settlement of the crack is within 0.3 mm, which meets the requirements for crack detection in technical specification for earth-rockfill dam safety monitoring.

Key words: binocular vision; crack detection; concrete face rockfill dam; three-dimensional reconstruction; code matching; ICP algorithm