

摄像机与激光相融合的地表沉降监测方法*

郑野风¹, 陈海南², 黄林冲¹

1. 中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107
2. 浙江理工大学信息学院, 浙江 杭州 310018

摘要: 图像包含丰富的场景环境信息, 激光具有极佳的测距精度和可靠性, 可以补足二维图像中场景的深度信息。利用图像信息与激光的互补性, 文章提出了一种摄像机与激光融合的监测方法。该方法基于目标平面方程和摄像机视场偏转角, 建立了目标对象的二维像素坐标到三维空间坐标的转换方法, 实现了基础设施结构健康监测任务中对目标地表沉降的自动化监测。最后, 通过实验对提出的自动化地表沉降监测方法进行了验证。实验结果的平均相对误差为 4.6%, 并且在不同监测距离上都能够获得稳定的监测结果。

关键词: 地表沉降; 结构健康监测; 相机激光融合; 摄影测量; 图像处理

中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 06-0123-06

Surface subsidence monitoring method based on camera and laser fusion

ZHENG Yefeng¹, CHEN Hainan², HUANG Linchong¹

1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China
2. School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310018, China

Abstract: The image contains rich scene environment information. The laser has excellent ranging accuracy and reliability, which can be used to supplement the depth information of the scene in two-dimensional image. A monitoring method of camera and laser fusion is proposed by the complementarity of image information and laser in this paper. Based on the target plane equation and the deflection angle of the camera field of view, the conversion method from the two-dimensional pixel coordinates of the target object to the three-dimensional space coordinates is established. The automatic monitoring of target surface subsidence is realized in the health monitoring task of infrastructure structure. The proposed automatic surface subsidence monitoring method is verified by experiments. The average relative error of the experimental results is 4.6%, and stable monitoring results can be obtained at different monitoring distances.

Key words: surface subsidence; structural health monitoring; camera and laser fusion; photogrammetry; image processing

公路、铁路、桥梁、隧道等基础设施在建设
和运营维护过程中会不可避免地遭受到人为破坏、
气候环境、往复载荷、周边施工影响以及突发灾

害等因素的耦合作用, 产生不同程度的地表沉降
问题, 造成经济损失和安全危害^[1-3]。研究人员对
基础设施地表沉降、结构构件变形进行了大量的

* 收稿日期: 2021-12-21

录用日期: 2022-01-10

网络首发日期: 2022-05-07

基金项目: 深圳市自然科学基金(JCYJ20190807162401662); 深圳市可持续发展科技专项(KCXFZ202002011008532)

作者简介: 郑野风(1998年生), 男; 研究方向: 结构健康监测; E-mail: zhengyf56@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 黄林冲(1980年生), 男; 研究方向: 岩土工程; E-mail: hlinch@sysu.edu.cn

监测和控制方面的研究。对于大型结构的沉降监测,主要是对垂直方向上的位移进行实时监测^[4],例如:基于水准仪和全站仪的监测方法。随着图像全站仪^[5]的出现,测量速度、精度以及结果的稳定性不断提升。现代测量方法包括基于GPS技术的测量方法和数字摄影测量方法。GPS监测方法^[6]能够全天候随时进行监测,测点布设方便,容易实现自动化监测。但存在基准点稳定性差、垂直方向精度低等问题。

随后,数字摄影测量技术在高清晰数码相机和高分辨率测量仪器投入使用后兴起。于起峰等^[7]针对不通视目标的位置、姿态及其变形测量问题,提出了位姿传递像机串联网摄像测量的概念和方法,并且将其应用在船体变形测量上。刑敬宏等^[8]以激光光源代替沉降监测点,通过光斑位移来计算路基沉降量。于起峰等^[9]提出了位移传递像机串联网摄像测量的概念和方法,并开展了大型工程结构沉降位移监测方法及监测预警系统研究。肖和华^[10]提出一种基于光笔式机器视觉测量系统的非接触式沉降监测方法,实现了较大范围的沉降监测。闵永智等^[11]通过解算摄像机与靶面的位姿关系得到摄像机的移动轨迹,提高了摄像机间位姿标定的精度。

现有数字摄影测量方法计算规模大,对硬件质量要求高,设备成本昂贵,且对监测人员的技术手段要求较高^[12-14]。因此,亟需一种计算效率高、精度高、成本低、操作简单的地表沉降监测方法。本文提出了一种将单目摄像机和单线激光融合的地表沉降监测方法,并且在室内模拟环境中对标靶的垂直沉降量进行了监测,并通过实验验证了该方法的可行性。

1 地表沉降监测方法的总体框架

地表沉降监测方法采用摄像机与激光融合的方式来获取目标的位置信息。摄像机采集图像信息后,从图像信息中捕捉环境的语义信息。单线激光采集距离信息来补足图像信息中缺失的深度信息。

本文的测量方法由3部分组成:①目标对象识别。通过数字图像处理技术从摄像机采集的图像中提取特征信息,获取监测目标区域范围以及目标的像素坐标集;②目标空间定位。使用激光测量目标区域的深度信息,结合激光的姿态角计算出目标平面的平面方程;③目标坐标转换。整

合已知数据,结合视场偏转角和目标平面方程,将目标像素坐标集进行物理尺度转换,得到目标对象的三维空间坐标。具体如图1所示。

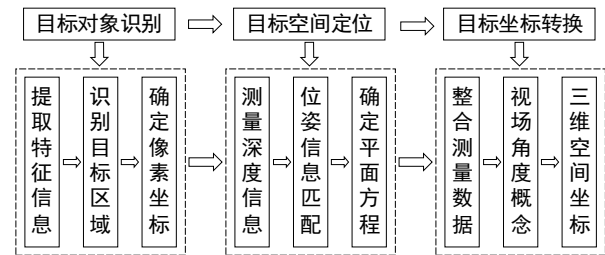


图1 地表沉降监测方法的总体框架

Fig. 1 Overall framework of surface subsidence monitoring method

2 监测原理与方法

2.1 目标对象识别

首先,对图像数据进行处理,提取图像语义信息。利用图像处理技术识别出原始图像中的目标对象区域以及目标像素点集。目标对象检测方法分为2个部分:首先通过OpenCV图像识别算法检测出目标区域 P ,识别出靶标区域;然后在目标区域内进行特征提取,提取出目标标识物,获得目标标识物的像素点坐标集 R 。

2.2 目标空间定位

在获得目标标识物的区域范围 P 后,使用单线激光雷达在区域 P 内选取3个不共线的目标点,并测量其深度信息。测量得到目标点距离 d ,同时记录测量时的激光垂直姿态角 α 和水平姿态角 β ,得到目标点的三维空间坐标 $P_1(x, y, z)$ 。目标空间定位如图2所示。

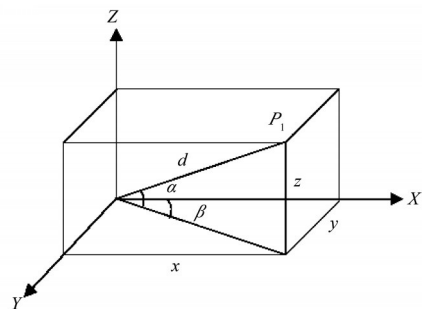


图2 空间定位示意图

Fig. 2 Diagram of spatial positioning

计算得到3个在激光坐标系下的目标点坐标 $P_{L1}(X_{L1}, Y_{L1}, Z_{L1}), P_{L2}(X_{L2}, Y_{L2}, Z_{L2}), P_{L3}(X_{L3}, Y_{L3}, Z_{L3})$ 。为得到摄像机坐标系下的目标平面方程,利用坐

标系转换公式得到目标点在摄像机坐标系下的坐标 $P_{C1}(X_{C1}, Y_{C1}, Z_{C1}), P_{C2}(X_{C2}, Y_{C2}, Z_{C2}), P_{C3}(X_{C3}, Y_{C3}, Z_{C3})$.

通过公式(1)和(2), 空间内不共线的三点 P_{C1}, P_{C2}, P_{C3} 能够确定目标区域 P 所在平面的空间位置。

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= p_1 p_2 \times p_1 p_3 = \begin{vmatrix} x & y & z \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \\ &= a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} a = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1)(z_2 - z_1), \\ b = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - x_1), \\ c = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1), \\ d = -ax_1 - by_1 - cz_1. \end{cases} \quad (2)$$

监测方法利用激光雷达测量得到的深度信息和激光姿态角, 计算得到空间3个目标点的坐标; 得到3点所在的平面方程, 确定了目标区域范围对应平面的空间位置。

2.3 目标坐标转换

获取目标对象的空间位置, 需要将图像中的二维像素坐标转换为三维空间坐标。地表沉降监测方法利用2.2节得到的目标区域平面方程, 补足了图像信息中缺失的深度信息, 再结合摄像机的视场偏转角, 将像素点在图像中的二维像素坐标进行物理尺度转换, 生成了三维空间坐标。

如图3所示, 视场角又称为视场, 是以光学仪器的镜头为顶点, 被测目标的物像可通过镜头最大范围的两条边缘构成的夹角^[15]。视场角的大小决定了光学仪器的视野范围^[16], 并且摄像机的视场角的大小与焦距 f 相关。

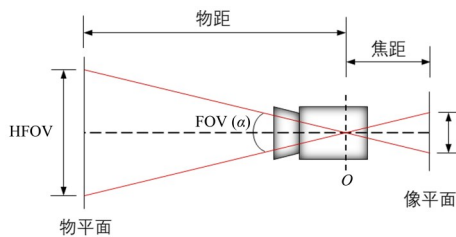


图3 视场角示意图

Fig. 3 Diagram of field of view

固定焦距镜头, 是指具有固定视场角的透镜。地表沉降监测方法选用焦距固定的摄像机, 确保摄像机的视场角不变。视场角可以通过计算或者视场角测量实验确定。横向视场角 $AFOV_H$ 和纵向视场角 $AFOV_V$ 分别为

$$\begin{cases} AFOV_H = 2 \times \arctan \frac{W\mu}{2f}, \\ AFOV_V = 2 \times \arctan \frac{H\mu}{2f}. \end{cases} \quad (3)$$

式中 W 和 H 为测量摄像视野范围中水平和垂直方向的幅值, f 为摄像机焦距, μ 为畸变系数。摄像机成像平面的成像范围与视场角的视野范围相对应。若成像平面的分辨率为 $w \times h$, 那么对于每一行的像素而言, 每个像素将相机横向视场角 α_c 进行切分, 得到单位视场角为 α_c/w 。同理, 对于每一列的像素而言, 每个像素对应的单位视场角为 β_c/h 。如图4所示, 摄像机采集图像信息中目标区域 P 内任意像素点 $N(d_x, d_y)$, 能得到其横向视场偏转角 α_N 和纵向视场偏转角 β_N 。进一步计算, 得到像素点 N 所对应的视线方程 L 。

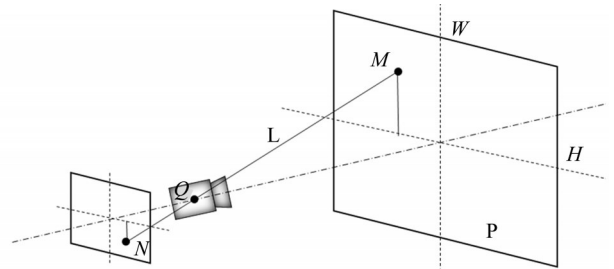


图4 坐标转换示意图

Fig. 4 Diagram of coordinate transformation method

根据公式(4), 将像素坐标进行物理尺度变换, 视线方程 L 与目标平面 P 的交点即为像素点 N 对应的空间坐标点 $M(x, y, z)$ 。

$$\begin{cases} \frac{x}{\cos \alpha_N \times \cos \beta_N} = \frac{y}{\cos \alpha_N \times \sin \beta_N} = \frac{z}{\sin \alpha_N}, \\ \alpha_N = d_x \times \frac{\beta}{h}, \\ \beta_N = d_y \times \frac{\alpha}{w}, \\ ax + by + cz + d = 0, \end{cases} \quad (4)$$

μ 为畸变系数; d_x, d_y 为像素点相对于成像平面中心点的距离; α_N 和 β_N 分别为横向视场偏转角和纵向视场偏转角; 平面方程系数 a, b, c, d 由公式(2)得到。

3 实验

3.1 监测设备与场景

为了验证地表沉降监测方法的可行性和精度, 设计了监测实验系统, 包括监测设备原型机和实验场景, 如图5所示。监测设备原型机包含数据采

集单元、姿态调整单元、控制模块单元。数据采集单元由中间的摄像机和左右两边的单线激光雷达组成,可以采集图像信息和空间距离信息。姿态调整单元位于激光下方,由两个伺服舵机组成,具有两个旋转自由度,能够作为一个简易机械臂来调整激光姿态。控制模块单元安置在设备底部,

包括舵机控制板和树莓派。舵机控制板控制舵机调整激光姿态角,树莓派控制其余硬件单元以及对采集的数据进行传输和预处理。监测设备原型机所用零部件具体型号如表1所示。实验场景中的监测对象为带有十字形标识图像的标靶。

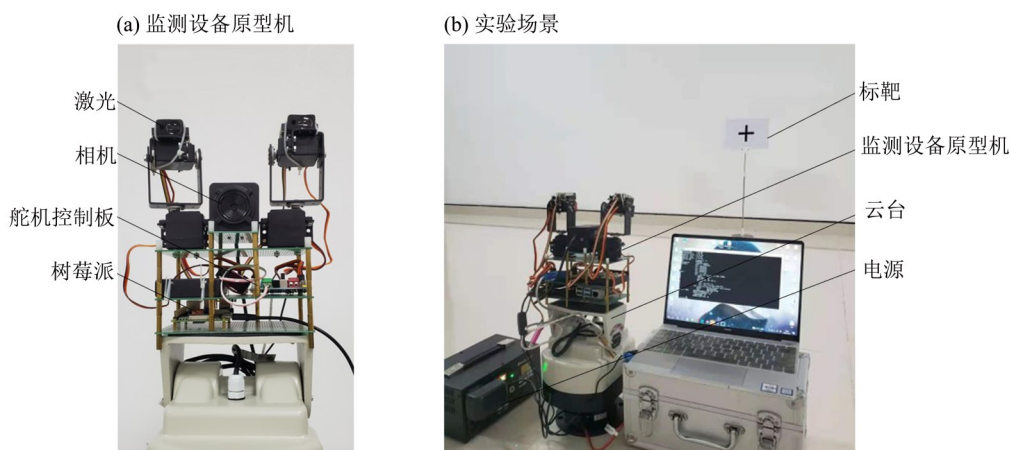


图5 监测设备原型机及场景

Fig. 5 Monitoring prototype and scene of experimental equipment

表1 监测设备原型机的部件型号

Table 1 Component type of monitoring prototype

组件	型号
摄像机	Ontop X2S
激光	KLH-01
伺服舵机	DS3115MG
舵机控制板	ALSROBOT RB-01C013
处理器	Raspberry Pi 4B

图5中,所示设备作为数据采集终端,只进行数据采集、预处理和传输。另外,设置对应的服务器端,在服务器端通过webpy框架部署网络框架,并且搭建控制面板平台通过局域网对数据终端进行远程实时控制。通过TCP连接服务器端和数据采集终端,实现指令和数据的传输。主要算法的运算过程在服务器端进行。因此,数据采集和运算处理能够同时进行,具有较高的效率和较好的实时性。

3.2 实验参数校准

在进行实验之前,需要确定各部件参数,其中最为关键的是摄像机的相关参数。为了确定摄像机的视场角,依照视场角的测量方法进行了测量实验。将摄像机以垂直方向对准平面,测量摄像视野范围中水平和垂直方向的幅值 W 和 H 以及镜

头到平面的距离 l ,结果如表2所示。综合3次测量结果,最终确定横向视场角 $\alpha_c=39.91^\circ$,纵向视场角 $\beta_c=19.44^\circ$ 。摄像机的分辨率为 $1\ 280\times 720$,图片输出格式为MJPEG,帧数为30。单线激光雷达的测量范围为 $0.03\sim 80\text{ m}$,测量精度为 $\pm 1\text{ mm}$ 。舵机的测量范围为 180° ,驱动方式为PWM,脉宽范围为 $500\sim 2\ 500\ \mu\text{s}$,控制精度为 $3\ \mu\text{s}$ 。

表2 摄像机视场角测量结果

Table 2 Camera field of view angle measurement results

序号	H/mm	W/mm	l/mm	$\alpha_c/(\circ)$	$\beta_c/(\circ)$
1	162.6	287.4	226.4	19.753 1	32.404 0
2	127.8	225.2	181.4	19.405 3	31.829 0
3	85.7	152.1	123.4	19.149 2	31.645 0

3.3 实验结果

为验证地表沉降监测方法的准确性,使用原型机对标靶垂直方向沉降量进行测量。标靶放置按照测量距离分为A、B、C、D、E共5组,测量距离每组间隔 0.8 m ,最小 2.4 m ,最大 5.6 m ,如图6所示。实验中人为控制沉降,手动调整标靶下方的可伸缩杆,改变标靶高度。每个位置调整5次,每次降低 20 mm 。这种控制沉降的方式便于实际操作且具有一定的可靠性,能真实反映测量方

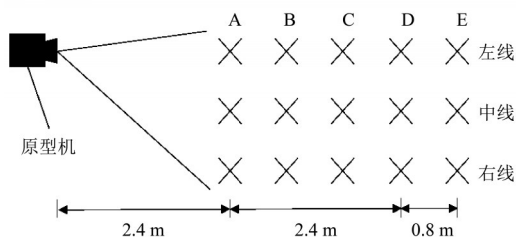


图6 测量系统布局

Fig. 6 Layout of measurement system

法的准确性。

为量化所提测量方法的准确性, 计算实验中沉降监测值的绝对误差 d 和相对误差 σ 分别为

$$d = D - D', \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{|D - D'|}{D} \times 100\%, \quad (6)$$

式中 D 为实际沉降量; D' 为沉降监测值。

表3为测试结果。由表3可知, 中线3个点点位的

表3 5组沉降监测值 D' 测量结果

Table 3 Measurement results of five groups of settlement monitoring value D'

mm

项目	A	B	C	D	E
左线	19.18	20.66	18.29	18.24	20.82
	18.17	18.14	19.89	19.30	18.46
	20.14	19.16	19.25	18.33	20.71
	21.52	20.71	20.35	21.42	19.36
	20.10	19.18	19.22	24.52	18.32
中线	19.49	21.81	18.52	19.70	19.56
	18.24	19.86	20.30	18.72	19.76
	19.34	18.26	19.03	19.42	19.93
	20.44	20.65	24.80	20.44	20.25
	20.17	18.98	21.33	26.13	20.14
右线	20.78	21.87	17.54	20.75	21.33
	18.61	20.92	21.25	19.42	19.64
	21.28	19.59	18.16	21.03	20.98
	20.84	26.21	27.24	19.62	21.53
	22.32	19.75	19.75	19.44	20.40

测量误差要小于左右两线的测量误差。这是因为中线点位处于成像平面中间位置, 左线和右线点位处于两侧位置, 两边的镜头畸变更严重, 从而导致测量误差偏大。

实验监测数据误差如图7所示。根据公式(5)和(6)得到实验结果的平均误差为0.92 mm, 平均相对误差为4.6%。由此可知, 所述监测方法的精度与实际沉降较为吻合, 能够得到稳定的监测数据。对比图7中的5组数据结果, 其平均误差分别为1.08、0.58、1.10、0.94和0.68 mm。5组数据没有呈现出明显的差异性和规律性, 这说明该监测方法的误差与测量距离无关。因此, 该方法能够适用于大型基础设施体积大、面积广的特点, 保证测量精度。

另外, 测量误差主要来源于: ① 测量设备的硬件精度导致的系统误差, 包括激光的测量精度、

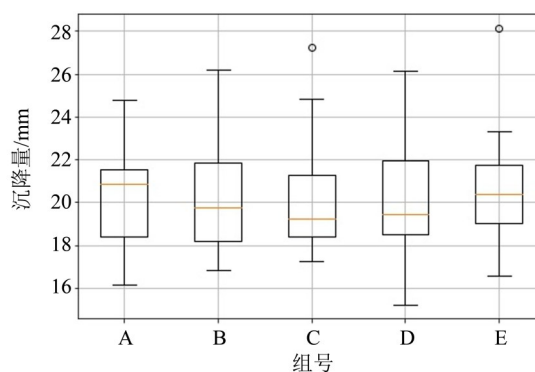


图7 沉降监测值误差

Fig. 7 Settlement Monitoring value error

控制姿态角度的舵机控制精度等都会直接影响最终的测量精度。值得注意的是摄像机的分辨率对监测结果的影响, 分辨率越高, 像素点越多, 图像就更加精细, 能够直接提升该监测方法的测量精度。② 测量过程中产生的人为误差, 例如: 控制

标靶沉降、测量激光与摄像机坐标系空间位置关系等都会无法避免产生读数误差。③ 摄像机的镜头畸变导致的误差。镜头畸变对测量结果影响最大的是径向畸变, 径向畸变沿着镜头半径方向分布, 光轴中心畸变为 0, 越靠近边缘位置畸变越严重。

4 结 论

针对基础设施地表沉降的长期实时监测问题, 本文提出了一种基于摄像机和激光融合的沉降摄影测量监测方法。并开发了监测设备原型机、搭建实验场景, 对该监测方法进行了实验验证。实验结果表明, 该方法能够稳定获取有效的监测值数据。主要结论如下:

1) 利用计算机视觉技术主动选取感兴趣的的目标对象和区域, 只对其进行局部测量。因不必对周围环境进行全局扫描, 大大减少了工作量, 提高了监测效率。

2) 引入视场角的概念, 利用单线激光补足了图像数据缺失的深度信息, 直接对目标平面进行空间定位, 相较于其他监测方法更加简单高效。

3) 搭建了实现该监测方法的软硬件平台, 测量工作能够自动化完成。但这项研究虽验证了室内模拟场景下监测结果的准确性。因实际情况往往更为复杂, 下一步需要保证情况复杂场景多变的现场环境中能够准确地识别出目标对象, 提高监测结果的稳定性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 许国辉, 张新长. 卡尔曼滤波模型粗差的探测及其在施工变形测量中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003(3): 89-91.
- [2] 王子昂, 王武斌, 苏谦, 等. 新建铁路大临线临沧站站场路基沉降评估分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1688-1698.
- [3] 崔迪. 高速公路路基表面沉降光学测量方法及应用[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
- [4] WANG Y Q, WANG Z F, CHENG W C. A review on land subsidence caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2019, 78:2851-2863.
- [5] 章后甜, 郑勇, 陈冰, 等. 图像全站仪及图像测量发展与展望[J]. 测绘通报, 2021(6): 50-53.
- [6] BIESSY G, MOREAU F, DAUTEUIL O, et al. Surface deformation of an intraplate area from GPS time series[J]. *Journal of Geodynamics*, 2010, 52(1):24-33.
- [7] 于起峰, 姜广文, 丁晓华, 等. 测量大型船体变形的折线光路摄像测量方法与系统研究[C]// 中国力学学会学术大会. 北京:中国力学学会, 2007:1.
- [8] 邢敬宏, 张明新, 赵浪涛, 等. 基于嵌入式机器视觉的路基沉降监测系统研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2013(4): 28-29.
- [9] YU Q F, JIANG G W, SHANG Y, et al. A displacement-relay video metric method for surface subsidence surveillance in unstable areas[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(6):1105-1111.
- [10] 肖和华, 金鼎沸. 基于机器视觉的路基沉降监测方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1365-1368.
- [11] 闵永智, 胡捷, 孙天放. 图像式路基监测系统中站内多相机间位姿标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 461-469.
- [12] 邱明明, 杨果林, 申权, 等. 深厚富水砂层排桩挡墙深基坑施工变形特性研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(3): 107-117.
- [13] 雷鹰, 刘丽君, 郑翥鹏. 结构健康监测若干方法与技术研究进展综述[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(3): 630-640.
- [14] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [15] 王彩玲, 侯嘉乐. 步进扫描方法的激光视场角检测系统设计与实现[J]. 信息技术与信息化, 2021(4): 41-43.
- [16] PANG W, BRADY D J. Field of view in monocentric multiscale cameras [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(24):6999-7005.

(责任编辑 王海蓉)

(终校 本刊编辑部)