

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230529

# 基于机器视觉的大坝表面位移智能监测方法研究

李 艺<sup>1</sup>, 刘成栋<sup>1</sup>, 刘检生<sup>2</sup>, 沈光泽<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 余姚市水库管理服务中心, 浙江 余姚 315400)

**摘要:** 常规大坝位移监测方法中, 人工监测方法通常误差大、效率低且不能实时连续监测, 而自动化监测方法如全站仪机器人和 GNSS 面临受天气影响大和垂直位移精度低等问题, 故提出一种基于机器视觉的新型大坝位移智能监测方法。该方法采用物联网及智能灾变识别算法将图片数据转化为变形数据, 实现对大坝的超高精度非接触式实时测量。以梁辉水库为例, 应用研究表明该监测系统运行稳定, 水平和垂直方向的监测精度均为 1.5 mm, 可在其他水利工程表面位移监测中推广应用。

**关键词:** 大坝表面位移; 自动化监测; 机器视觉; 梁辉水库

中图分类号: [TV62<sup>+</sup>1]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0093-04

## 1 引言

大坝表面位移监测能够准确直观地反映大坝运行状态, 是大坝安全监测的重要内容<sup>[1]</sup>。现有的大坝表面位移监测方法大多为人工监测方法, 一般通过人工监测水准仪、经纬仪和全站仪等仪器进行位移测量, 传统接触式位移监测需要在结构上布置传感器并设置相对独立稳定的位移参考系, 考虑到真实结构的复杂性, 接触式测量和稳定参考系的做法限制了结构位移监测的工程应用<sup>[2]</sup>。近年来非接触式传感器测量结构位移发展趋势显著, 利用 GNSS 进行大坝位移监测是目前常用的一种监测手段, 该技术可同时监测大坝的轴向、上下游方向和垂直方向位移。但 GNSS 对水平位移监测精度较高, 对垂直位移监测精度却较低, 差分解算软件算得 GNSS 水平位移监测精度  $2.5 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ , 垂直位移监测精度  $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ 。随着计算机视觉技术的快速发展, 基于机器视觉的结构位移监测方法因人为干预程度低、高精度和低成本等优点受到广泛关注<sup>[3]</sup>, 并在大跨度桥梁<sup>[4]</sup>、深基坑<sup>[5]</sup>及民用基础设施<sup>[6]</sup>等多个领域应用成功。鉴此, 本文依托梁辉水库, 提出一种基于机器视觉的大坝表面位移智能监测方法,

并与 GNSS 系统的监测结果进行对比分析, 数据显示该方法可将大坝表面位移监测的水平和垂直精度提高至 1.5 mm, 为机器视觉技术在水利工程中的应用提供了依据。

## 2 基于机器视觉的表面位移监测

### 2.1 机器视觉原理

机器视觉智能测量系统是基于机器视觉测量技术, 结合物联网和智能灾变识别算法等技术形成的一套智能化系统。目前, 机器视觉主要通过人工神经网络和卷积神经网络进行机器学习(包括识别和测量)<sup>[7]</sup>。机器视觉智能测量系统由机器视觉智能测量仪、靶标、数据采集与传输系统和数据管理平台组成(图 1)。该系统可对水工建筑物的表面位移进行高精度连续监测, 其监测精度达毫米级。机器视觉是在需要监测的结构物上设置靶标, 通过相机和摄像头等电子设备代替人眼对靶标进行追踪, 利用一系列的算法处理图像数据以计算结构物的位移, 并在数据平台上传输位移数据。

### 2.2 机器视觉算法

利用机器视觉进行位移监测的主要步骤包括

收稿日期: 2023-03-06, 修回日期: 2023-04-23

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3005405); 国家自然科学基金项目(51979176); 云南省重点研发计划项目(202203AA080009); 宁波市水利科技项目(NSKA202232)

作者简介: 李艺(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水利水电工程, E-mail: lyiili@163.com

通讯作者: 刘成栋(1979-), 男, 正高级工程师、硕导, 研究方向为大坝安全监控、安全评估和智慧管理, E-mail: LCD\_DAM@163.com

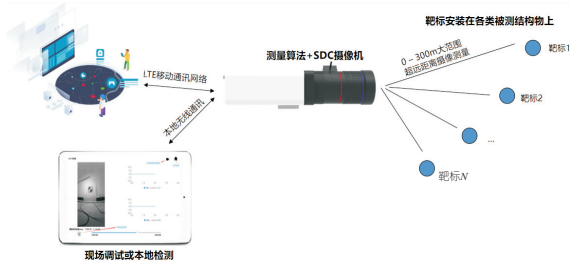


图 1 机器视觉智能测量系统物理拓扑图

Fig. 1 Physical topology of the intelligent monitoring system based on machine vision

相机标定、特征提取、目标追踪及位移计算,监测结果传至云端保存。

(1)相机标定。三维坐标在投影图像中会发生畸变,相机标定就是对畸变图像校正的过程,影响标定结果误差的因素有监测精度、噪声、相机分辨率及标定优化算法等。相机畸变一般只考虑径向畸变  $k$  和切向畸变  $p$ :

$$X_{\text{distorted}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \quad (1)$$

$$Y_{\text{distorted}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 xy + p_1 (r^2 + 2y^2) \quad (2)$$

其中  $r^2 = x^2 + y^2$

式中,  $X_{\text{distorted}}$ 、 $Y_{\text{distorted}}$  均为畸变校正后的实际点坐标;  $x$ 、 $y$  为图像中的坐标;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $p_1$ 、 $p_2$  均为畸变系数。

(2)特征提取。相机对结构物进行监测时拍摄照片需要目标捕捉。目标捕捉需要特征提取,即通过训练样本获得对机器学习任务有帮助的多维度数据,之后通过一系列的算法进行识别。相机在拍摄图像时会由于各种原因产生噪声,因此还需要对图像预处理,常见的预处理方法有图像二值化、图像降噪和图像增强等。

(3)目标追踪。识别到目标后,需要按照时间维度对目标逐帧追踪,以得到位移或其他需要监测的数据。目前有大量动态实时目标追踪算法的研究,目标追踪算法主要是基于目标模型建模和基于搜索进行追踪。

(4)位移计算。位移计算时需要把三维坐标转换为二维坐标,转换公式为:

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$s \mathbf{x} = K \mid \mathbf{R} \mid \mathbf{t} \mid \mathbf{X} \quad (4)$$

其中  $\mathbf{X} = [x \ y \ z \ 1]^T$

式中,  $s$  为尺度因子;  $(x, y)$  为图像中的坐标;  $(x, y, z)$  为世界坐标;  $\gamma$  为镜头斜度系数;  $K$  为相机的内参数;  $C_x$ 、 $C_y$  为图像坐标系原点在像素坐标系下的坐标;  $f_x$ 、 $f_y$  分别为镜头横向和竖向焦距;  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{t}$  为相机外参数向量。

### 3 机器视觉监测大坝工程应用

#### 3.1 工程概况

梁辉水库总库容为  $3.077 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 电站装机容量为 640 kW。水库枢纽建筑物包括拦河坝、侧槽式溢洪道及泄洪闸、导流泄洪隧洞、输水发电隧洞和电站厂房等。拦河坝为钢筋混凝土面板堆石坝, 坝顶长 385 m、最大坝高 35.4 m (图 2)。

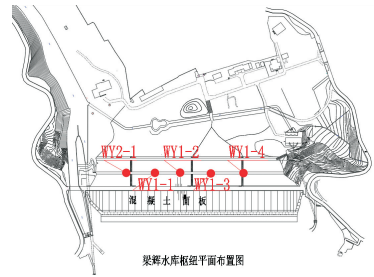


图 2 机器视觉测点示意图

Fig. 2 Points for monitoring of the intelligent monitoring system based on machine vision

#### 3.2 测点布设

原大坝表面位移自动化监测系统在大坝坝顶、背水面 2 个断面设置 9 个 GNSS 监测点。为测试基于机器视觉的位移监测效果,在下游马道布设一排共 6 个机器视觉测量点,其中 3 个测点与 GNSS 测站共用。该系统根据不同镜头组合使用,可以达到 0~400 m 监测范围。其监测精度可达  $\pm 1/50\ 000 \text{ FOV}$ , 即  $0 \sim \pm 2 \text{ mm}$ 。

#### 3.3 软硬件组成

(1)SDC 摄像机。系统共设 2 套 SDC 软件定义摄像机,内置智能化 AI 芯片,芯片内嵌神经网络和深度学习算法以进行大量级的运算处理,实现目标分类和特征识别等功能,根据不同实时场景需求,由软件自动调整有关参数。

(2)靶标。该系统共设 6 个靶标,采用圆形黑底的十字靶标,靶标直径为 180 mm,采用反光贴纸形式,布设补光灯增加夜间测量可见度。

(3)机器视觉智能测量仪。静态机器视觉智能测量仪采用机器视觉专用硬件电路与嵌入式操作系统,内置并行机器视觉算法以识别靶标精准坐标,测量距离在 400 m 之内。当被测结构物发生平面位移时靶标坐标随之变化,机器视觉测量系统测得大坝水平(上下游向)位移和垂直位移。

(4)数据通讯。数据采集与传输系统包括数据采集模块和数据传输模块(图 3),支持感知控制设备和系统通信协议,支持解析制定的感知数据包和控制数据包,支持通过协议转换模块进行数据结构的转换,实现感知控制设备与系统之间的数据互通。机器视觉测量仪搭配电气柜使用,机器视觉测量仪将处理后的数据通过电气柜内的采集设备把数据发送到云平台。

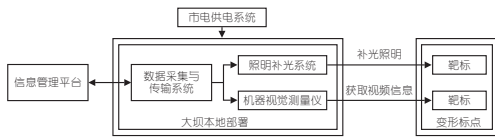


图 3 机器视觉表面位移在线监测系统组成

Fig. 3 The composition of the intelligent monitoring system based on machine vision for dam surface displacement monitoring

(5)信息管理平台。信息管理平台部署在云端,由虚拟主机和数据库组成,包含数据管理与数据分析程序,可实现以下功能:①数据可视化。每 10 min 上传一次测点的坐标至数据库,计算各测点的水平位移(上下游向)和垂直位移,提供存储调度及存储管理可视化功能。②数据分析。数据库采用模块化架构,按功能对结构信息、监测系统信息及监测数据进行分层、分类存储和管理。该平台还对原始数据进行分析整理,并提示最大、最小位移变化量。③监测预警。通过数据监测实时获取大坝的振动频率和振幅,得到大坝位移的变化趋势,结合环境信息及预警指标判断大坝异常状态和风险预兆,提前发出安全警报信息。

### 3.4 监测数据分析

#### 3.4.1 监测结果分析

选择 2022 年 10 月 1 日至 2023 年 1 月 31 日 WY1-1 测点的位移监测数据进行分析。图 4 为 WY1-1 靶标水平和垂直方向的位移曲线图。靶标水平向位移以顺江流向为正,垂直方向位移以向上为正。设备精度为  $\pm 1/50\ 000$  FOV,监测范

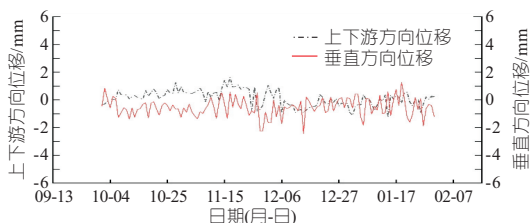


图 4 WY1-1 测点 2022 年 10 月至 2023 年 1 月表面位移测量过程线

Fig. 4 The line about surface displacement of WY1-1 from October 2022 to January 2023

围 300 m,故水平向位移及垂直向位移误差均为 1.5 mm。精度与监测的位移大小无关,因此对于其他水利工程监测的较大位移,该系统精度依旧满足规范要求。由图 4 可知,位移监测图像随时间呈现锯齿状,但长期监测效果较为稳定,本系统能精准捕捉大坝变形,实时发现常规监测中难以发现的变形规律。

根据室外试验结果,系统的综合指标为:①监测物理量。包括水平(上下游向)位移和垂直位移;②测量范围为 0~400 m;③测量精度为 1.5 mm;④上传数据频率为 10 min/次。

#### 3.4.2 监测稳定性和精度对比分析

图 5 为 WY1-3 测点分别由 GNSS 系统和机器视觉监测系统测量的位移过程线图。图 5(a)为两种测量方法的水平位移测量结果对比图。图 5(a)中共 119 个测点,机器视觉相邻位移测值的差值 0~1 mm 的测点共 95 个占比 79.83%,差值 1~2 mm 的测点共 23 个占比 19.33%,差值大于 2 mm 的测点共 1 个占比 0.84%;GNSS 系统相邻位移测值的差值 0~1 mm 的测点共 72 个占比 60.5%,差值 1~2 mm 的测点共 39 个占比 32.77%,差值大于 2 mm 的共 8 个,其中有 3 个点相邻测值的位移差值大于 3 mm。由此可知,机器视觉系统测量的水平位移值更加稳定,GNSS 系统测量的水平位移值存在局部异常点,但整体也相对稳定。

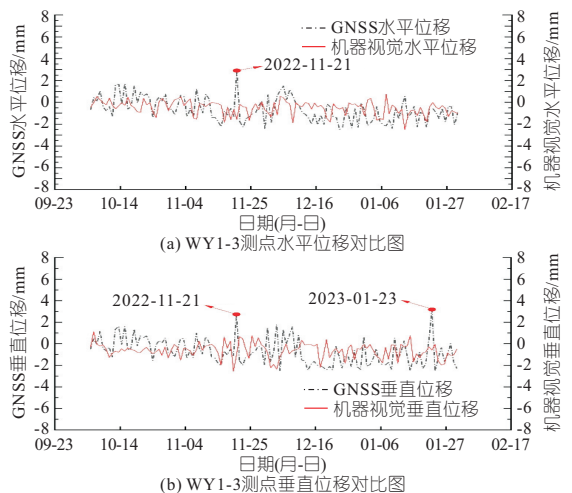


图 5 GNSS 与机器视觉系统测量位移对比图

Fig. 5 Comparison of surface displacement measurement between the system based on GNSS and machine vision

图 5(b)为两种测量方法的垂直位移对比图。图 5(b)中共 119 个测点,机器视觉相邻测值的位移差值为 0~1 mm 的测点共 88 个占比 73.95%,差值 1~2 mm 的测点共 26 个占比 21.85%,差值 2~3 mm 的共 5 个占比 4.20%;

GNSS 系统相邻测值的位移测值差值在 0~1 mm 的测点共 64 个占比 53.78%，差值 1~2 mm 的测点共 34 个占比 28.57%，差值大于 2 mm 的共 21 个，其中有 8 个测点的位移差值大于 3 mm。由上述数据可知，虽然两系统的测值整体趋势基本一致，但 GNSS 垂直位移测量值某些点变幅较大，精度较低。

由图 5 可知，在 2022 年 11 月 21 日，由 GNSS 测量的水平位移和垂直位移值波动均有异常，查询当地天气可知 2022 年 11 月 21 日存在降雨；2023 年 1 月 23 日，由 GNSS 测量的垂直位移值波动异常，查询当天为雨夹雪。图 5(a)、(b) 两图共 238 个测点，由 GNSS 测量相邻位移差值大于 2 mm 的共 29 个测点，查询天气得知，其中 16 个测点的测量日期天气不佳（降雨），占比 55.17%。说明 GNSS 测量数据受天气影响较大，降雨可能会影响测量数据的有效性。

由图 5(a) 与 (b) 对比可知，GNSS 和机器视觉测得的位移在发展趋势和数值上具有较好的一致性。图 5(a) 共计 119 个测点，其中机器视觉和 GNSS 测量的位移差小于 1 mm 的共 68 个测点，1~2 mm 的共 46 个测点，大于 2 mm 的共 5 个测点；图 5(b) 共计 119 个测点，两系统测量的位移差小于 1 mm 的共 65 个测点，1~2 mm 的共 37 个测点，大于 2 mm 的共 17 个测点，其中有 4 个测点大于 3 mm。经计算水平位移测量值的归一化均方根误差为 1.140 1，垂直位移测量值的归一化均方根误差为 1.400 9。可以得出两系统的水平位移数据吻合效果更为理想。

## 4 结 论

a. 梁辉水库实测数据表明，该系统的水平和

垂直位移精度均为 1.5 mm，即机器视觉可有效弥补 GNSS 的垂直位移精度不足的问题，尤其是在天气恶劣的情况下两者可以互相补充验证，提高位移监测数据的稳定性和有效性。

b. 机器视觉在大坝位移监测方面应用较少，有较大的发展空间。机器视觉与 GNSS 方法组建大坝工程监测网的数据平差问题尚需深入研究。

### 参 考 文 献：

- [1] 姚登峰, 徐伙明, 原国伟, 等. GNSS 与激光精密水准自动化监测系统在大坝变形监测中的应用[C]// 国际碾压混凝土坝技术新进展与水库大坝高质量建设管理——中国大坝工程学会 2019 学术年会论文集, 2019.
- [2] 修晟, 张愿, 单伽程. 基于视觉和振动监测数据融合的结构动态位移识别及其试验验证[J/OL]. 工程力学, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20221024.1531.220.html>.
- [3] YE X W, DONG C Z, LIU T. A review of machine vision-based structural health monitoring: methodologies and applications[J]. Journal of sensors, <https://doi.org/10.1155/2016/7103039>.
- [4] YE X W, ZHANG X M, NI Y Q, et al. Bridge deflection measurement method based on machine vision technology[J]. Journal of Zhejiang university, 2014, 48(5):813-819.
- [5] 陈登伟, 郭双喜, 朱旻, 等. 机器视觉技术在地下交通枢纽施工变形监测中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12):3827-3836.
- [6] SPENCERJR B F, HOSKERE V, NARAZAKI Y. Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring [J]. Engineering, 2019, 5(2):199-222.
- [7] 张睿. 高温环境下基于机器视觉的微位移测量[D]. 成都:西南交通大学, 2020.

## Dam Surface Displacement Monitoring System Based on Machine Vision

LI Yi<sup>1</sup>, LIU Cheng-dong<sup>1</sup>, LIU Jian-sheng<sup>2</sup>, SHEN Guang-ze<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Yuyao Reservoir Management Service Center, Yuyao 315400, China)

**Abstract:** Conventional dam displacement monitoring methods are often associated with large errors and low efficiency. Manual monitoring methods cannot provide continuous real-time monitoring, while automated monitoring methods, such as total station robot and GNSS, are affected by weather and have limited accuracy for vertical displacement. To overcome these shortcomings, this study proposes a new intelligent monitoring method for dam displacement based on machine vision. The method utilizes the internet of things and intelligent disaster recognition algorithm to convert picture data into deformation data, enabling ultra-high precision non-contact real-time measurement of the dam. The monitoring system was tested at Lianghui Reservoir, the results demonstrate that the operation of monitoring system is stable, and the horizontal and vertical monitoring accuracy are both 1.5 mm. The proposed method has the potential to be widely applied in other water conservancy projects for surface displacement monitoring.

**Key words:** dam surface displacement; automated monitoring; machine vision; Lianghui Reservoir