

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250433

基于自然标识物的大坝表面沉降机器视觉测量技术研究

王 堃¹, 李登华^{2,3}, 丁 勇¹

(1. 南京理工大学安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
3. 水利部水库大坝安全重点试验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 针对传统机器视觉技术在复杂地形下需要专用靶标辅助测量大坝表面沉降的难题, 利用坝体表面已有物体的天然纹路或自然地物(如基岩、山体等)作为标识物, 提出了一种大坝表面沉降机器视觉测量技术, 研发了简化投影模型的不动点区域图像配准方法, 通过对投影模型推导并简化估计拓宽了模型的应用场景, 并可有效修正图像, 融合了加速稳健特征变换算法, 提取自然标识物的特征, 精准匹配图像特征点阵, 进而计算标识物的平均像素位移, 通过获取像素距离与物理距离的比例关系, 计算得到标识物的真实位移。试验结果表明, 在70 m监测距离内, 测量精度 $\leq \pm 1.00$ mm, 有效解决了大坝表面沉降低成本广域监测的难题, 可应用于实际工程中。

关键词: 机器视觉; 投影模型; 大坝表面沉降; 位移测量

中图分类号: TV698.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0193-05

Research on Machine Vision Measurement Technology for Dam Surface Settlement Based on Natural Markers

WANG Kun¹, LI Deng-hua^{2,3}, DING Yong¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Key Laboratory of Reservoir Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

Abstract: In response to the problem of traditional machine vision technology requiring specialized targets to assist in measuring dam surface settlement in complex terrain, this study proposes a machine vision measurement technology for dam surface settlement using the natural patterns or natural features (such as bedrock, mountain body, etc.) of the existing objects on the dam surface as markers. A fixed point region image registration method that simplifies the projection model has been developed. By deriving and simplifying the estimation of the projection model, the application scenarios of the model have been extended, and the image can be effectively corrected. An accelerated robust feature transformation algorithm is integrated to extract the features of natural markers, accurately match the image feature lattice, and then calculate the average pixel displacement of the markers. By obtaining the proportional relationship between pixel distance and physical distance, the true displacement of the markers can be calculated. The experimental results show that within a monitoring distance of 70 m, the measurement accuracy is in the range of -1.00 mm and 1.00 mm, effectively solving the problem of low-cost wide area monitoring of dam surface settlement, which can be applied in practical engineering.

Key words: machine vision; projection model; dam surface settlement; displacement measurement

1 引言

大坝作为水利工程的重要基础设施,其长期

安全运行直接关系到下游区域的生命财产安全和社会稳定,表面变形监测是反映大坝安全状况的核心指标之一,能够及时发现潜在隐患,为灾害防

收稿日期: 2025-03-10, 修回日期: 2025-04-02, 接受日期: 2025-04-15

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

作者简介: 王堃(2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为结构健康检测, E-mail: njust2023@163.com

通讯作者: 李登华(1980-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为岩土工程与水利水电工程, E-mail: dhli@nhri.cn

范提供科学依据。近年来,基于机器视觉的图像处理技术^[1]在土木水利等方面的应用已愈发普遍。通过人工布置靶标技术及在坝面布置反光标志或其他人工标记,结合摄影测量或激光扫描技术实现监测。李艺等^[2]验证了机器视觉技术在工程应用中的可行性;许孝臣等^[3]以靶标为标志物进行不同距离下的室内试验,在百米内的精度可达亚毫米级;李明等^[4]通过 DIC 测量技术和仿射变换实现了室内近距离的毫米级精度。虽然这些方法在特定环境下能够实现高精度测量,但需在现场布置靶标,且成本高、测量点位有限,无法充分发挥机器视觉广域测量的技术优势。对此,本文提出一种基于自然标识物的大坝表面沉降机器视觉测量技术,即利用坝体表面现有物体的天然纹理特征或自然地物作为标识物,求解前后标识物特征点的相对位移来得出目标物体的沉降;同时利用投影模型原理简化模型对坐标系进行修正,并通过室外试验验证该方法的有效性与可靠性。

2 基于自然标识物的机器视觉变形测量技术

2.1 基本原理

将大坝表面变形测量的问题分解为对各个自然标识物的特征识别与测量。通过提取坝体表面已有自然标识物的特征点并对前后图像进行特征点匹配,将大坝表面的变形测量转化为特征点对的相对位移测量,并将近坝山体基岩作为不动点阵区域,通过简化后的投影模型对前后图像进行坐标修正以提升测量精度。

2.2 沉降测量算法

位移测量算法的流程见图 1,其具体步骤如下。

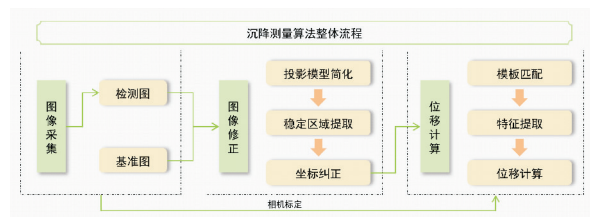


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flowchart

步骤 1 标定相机。

步骤 2 输入含有自然标识物的基准图和检测图。

步骤 3 修正图像,消除检测图与基准图在空间上的误差。

步骤 4 模板匹配。

步骤 5 对匹配目标进行特征点的提取与匹配,计算特征点的平均图像位移,换算出标识物的实际位移量。

2.2.1 相机标定

为降低图像畸变对计算产生的不利影响,需分别对相机进行标定,消除图像的径向畸变和切向畸变。径向畸变由镜头形状引起,切向畸变源于镜头与成像平面不平行,径向畸变、切向畸变校正公式分别为:

$$\begin{cases} x_d = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_d = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_d = x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_d = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy] \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中 } r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

式中, x_d 、 y_d 均为发生畸变的归一化像素坐标; k_1 、 k_2 、 k_3 均为径向畸变系数; p_1 、 p_2 均为切向畸变系数; x 、 y 均为未发生畸变的归一化像素坐标; r 为点到图像中心的距离。

2.2.2 简化投影模型的图像修正技术

为消除由拍摄角度、位置和其他外部因素引起的几何变形,本文提出了一种基于简化投影模型的图像修正技术。设定空间中的一个稳定参考点 O ,其在相机坐标系下的初始位置为 (x_1, y_1, z_1) ,相机运动后位置变为 (x_2, y_2, z_2) ,图像平面上的对应像素坐标为 (u, v) ,经过运动后图像坐标值为 (u', v') ,相对于运动前的旋转矩阵为 R ,平移向量为 t ,具体见图 2。根据成像原理,点的

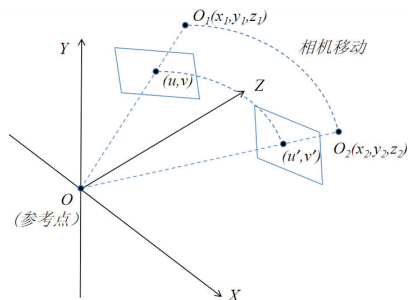


图 2 相机变化运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of camera movement changes
坐标在图像上的映射关系表达式为:

$$\begin{cases} u/f = x_1/z_1 \\ v/f = y_1/z_1 \\ u'/f = x_2/z_2 \\ v'/f = y_2/z_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

联立式(4)、(5)可得到相机运动前后之间的关系:

$$\begin{cases} u = \frac{R_{11}z_2 + R_{12}y_2 + R_{13}x_2 + t_1}{R_{33}z_2 + t_3} \\ v = \frac{R_{21}z_2 + R_{22}y_2 + R_{23}x_2 + t_2}{R_{33}z_2 + t_3} \end{cases} \quad (6)$$

将 x_2, y_2 分别利用式(4)中的 z_2 来替换,可得到下式:

$$\begin{cases} u = \frac{z_2 \left(R_{11} + \frac{R_{12}v'}{f} + \frac{R_{13}u'}{f} \right) + t_1}{R_{33}z_2 + t_3} \\ v = \frac{z_2 \left(R_{21} + \frac{R_{22}v'}{f} + \frac{R_{23}u'}{f} \right) + t_2}{R_{33}z_2 + t_3} \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)所示,求解变化前后的坐标关系不仅需要获得相机的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和焦距 f ,还需知道参考点的深度信息 z ,即目标区域需要与稳定区域处在同一平面,这极大限制了应用空间。考虑到在实际工程中,监测区域到相机投影中心的距离通常远大于由于人为或自然因素导致的相机平移,可近似认为 $t_i/z_2 (i=1,2,3)$ 为 0,则式(7)可简化为:

$$\begin{cases} u \approx \frac{R_{11} + \frac{R_{12}v'}{f} + \frac{R_{13}u'}{f}}{R_{33}} \\ v \approx \frac{R_{21} + \frac{R_{22}v'}{f} + \frac{R_{23}u'}{f}}{R_{33}} \end{cases} \quad (8)$$

此时图像坐标的前后变化关系仅与相机的旋转和焦距有关,所以在模型使用过程中,可选取与目标点深度不同的参考点进行图像修正。修正后的检测图即可与基准图在图像坐标系上对齐,能够避免因图像采集设备抖动而造成的误差影响。

为进一步提升测量精度,通过计算相机相对于稳定点区域的沉降位移,修正目标点的沉降位移。这样就最大程度减小了相机姿态变化带来的影响。如图 3 所示,若测得目标区域相对相机沉降为 ΔX ,相机相对于稳定区域的沉降为 ΔX_i ,则

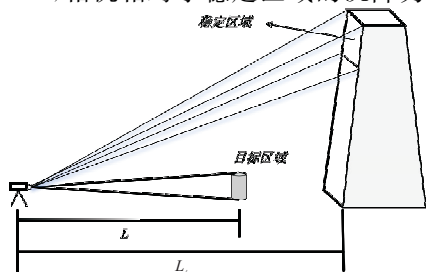


图 3 误差修正示意图

Fig. 3 Schematic diagram of error correction

修正后的目标区域相对于稳定区域的位移 X 可用下式计算:

$$X = \Delta X - \Delta X_i = \Delta X(1 - L_i/L) \quad (9)$$

2.2.3 模板匹配

为消除检测图像中的干扰信息,采用归一化的相关系数匹配方法^[5](NCC)来实现模板精准匹配,从而锁定特征点提取和匹配区域。该方法通过计算模板图像与目标图像局部区域之间的相关性,找到与模板最为匹配的位置。

2.2.4 特征点匹配

经模板匹配过程后,自然标识物的模板区域已完成一一对应,使用加速稳健特征^[6](Speeded Up Robust Features)算法对每个模板区域进行特征点提取,提升视角变化和不同光照下的适应能力,提高算法的鲁棒性。采用最近邻搜索算法进行特征点初步匹配,并融合了 LO-RANSAC^[7](Local Optimization Random Sample Consensus)算法进一步筛选和优化匹配点。

2.2.5 位移计算

在自然标识物的特征点成功配对并完成筛选后,取其所有特征点对的像素差值的均值作为目标区域的像素位移,通过获取像素距离与物理距离的比例关系,计算得到标识物的真实位移。

3 室外试验

3.1 试验设计

试验场地为南京市某体育场,图像采集设备为佳能 D3100 单反相机,相机像素 $1\,420 \times 10^4$,焦距 55 mm,拍摄角度始终保持水平,使用红白相间的隔离墩来替代实际工程中上坝公路的防撞墩进行试验,使用升降滑台结合电子百分表测量隔离墩的实际沉降,试验装置见图 4。



图 4 试验布置图

Fig. 4 Experimental layout

3.2 试验过程及结果分析

(1)图像修正对比试验。在试验场地放置一座隔离墩,以球场后方的建筑物墙体来模拟实际

工程中的基岩进行图像修正,拍摄距离 70 m,具体试验设计见表 1。图例修正前后试验结果见图 5。由图 5 可知,未进行图像修正的结果与真实位移偏差较大,而修正后的图像试验结果与实际位移较为接近,验证了以远处基岩为不动点对图像进行修正的可靠性与有效性。后续试验均以修正后的结果进行讨论分析。

表 1 精度试验设计方案
Tab. 1 Precision test design scheme

每次沉降增量/mm	沉降次数	试验组数
1	10	3

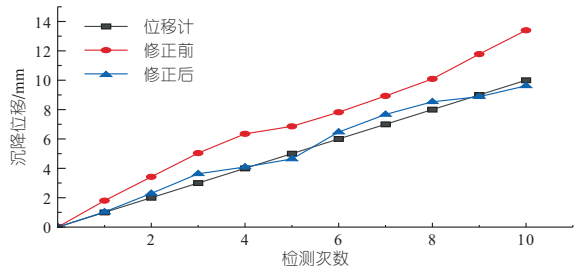


Fig. 5 Comparison before and after image correction

(2)精度验证试验。为验证算法在不同沉降变化下的精度和稳定性,设计试验方案见表 1。沉降位移变化试验结果见图 6。由图 6 可知,测量位移与实际变化量趋势一致,三组试验的绝对误差均值分别为 0.64、0.47、0.42 mm。

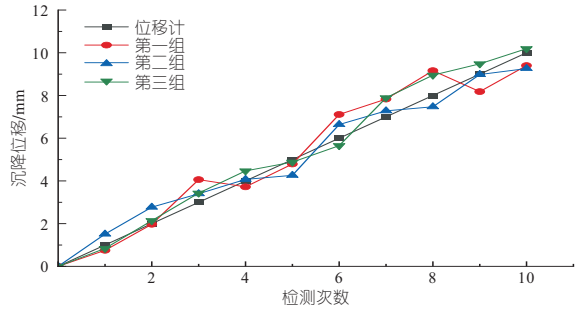


图 6 沉降位移变化
Fig. 6 Changes in settlement displacement

(3)测量范围验证试验。通过调整不同拍摄距离,验证算法的适用范围试验方案见表 2,从距离 35 m 开始拍摄,测得试验结果见图 7。由图 7 可知,当试验距离达到 70 m 时,最大误差为 0.88 mm,当试验距离达到 80 m 时,最大误差为 1.38 mm,且误差增大明显,所以本文技术在 70 m 范围内的测量误差 $\leq \pm 1.00$ mm,测值波动幅度小,三组的绝对误差平均值分别为 0.55、0.75、0.49 mm。

表 2 不同距离拍摄条件下试验设计
Tab. 2 Experimental design under different distance shooting conditions

物体沉降/mm	相机每次移动/m	相机移动次数	试验组数
5	5	10	3

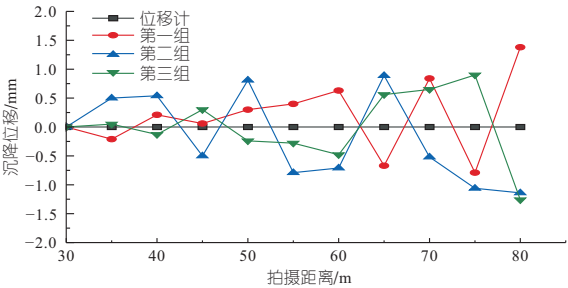


图 7 不同拍摄距离下的测量精度
Fig. 7 Measurement accuracy at different shooting distances

(4)不同环境条件下鲁棒性与适用性试验。考虑现场环境较为复杂,分别设计了日间不同光照、傍晚弱光线和雨天条件下三组试验验证不同环境条件下本文技术的鲁棒性与适用性,拍摄距离 70 m,试验设计方案同表 1。在不同光照条件下试验,以测试算法的鲁棒性,选择正常光照的日间进行试验,基准图不受阳光直射,检测图均受到不同时间不同角度的阳光直射,试验结果见图 8。由图 8 可知,最大误差为 0.97 mm,最小误差为 0.14 mm,整体的差值趋势在 0 mm 上下波动,并未因光照的变化出现明显偏差。通过弱光线和雨天条件试验验证本文技术的适用性,分别选择傍晚弱光 and 下雨环境进行试验,试验结果见图 9。由图 9 可知,傍晚弱光试验下最大误差为 0.67 mm,最小误差为 0.24 mm,虽因光线问题特征点检测数量较少,但仍可正确匹配,且误差未因特征点多少的变化出现增大,而雨天条件试验下最大误差为 0.86 mm,最小误差为 0.29 mm。雨天条件下的试验误差对比傍晚和正常条件略有增大,其原因是由于雨天条件下基准图和检测图的部分

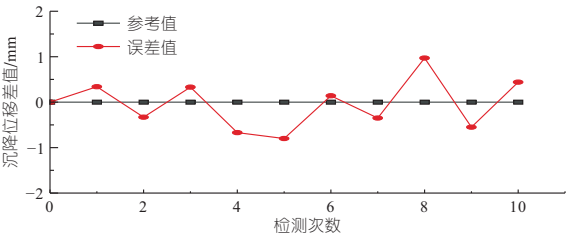


图 8 鲁棒性验证
Fig. 8 Robustness test verification

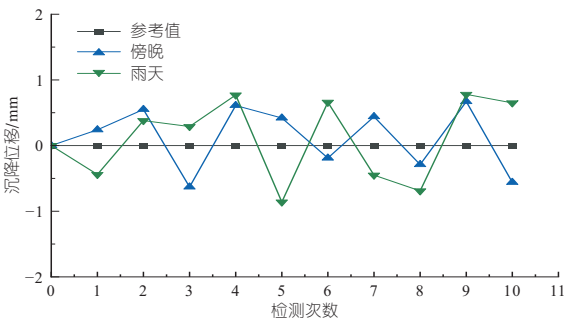


图 9 适用性验证
Fig. 9 Applicability test verification

特征点检测不一致导致,但所有试验结果误差均 ≤ 1.00 mm,验证了本文技术的适用性。

本文试验结果均有不同程度的误差,产生误差的主要原因是算法自身的假设条件引起,特征点提取时并不能保证所有特征点均是正确匹配,个别错误匹配会影响算法结果,次要原因为本文试验采用的位移计有 ± 0.007 mm 的示值误差,由于其误差值远小于试验误差,可忽略不计。但测量结果仍具有较高的精度和稳定性,满足工程监测的需要。

4 结论

a. 利用坝体表面已有物体的天然纹理特征或自然地物作为测量标识物,通过求解标识物特征点对的相对位移计算得到坝体表面沉降。具有无接触、对现场环境依赖度低等优点,尤其适用于难以布置标识物的场景。

b. 提出了一种基于简化投影模型的图像修正技术,通过推导并简化投影模型变换解决了传统投影模型的限制性,提高了其应用范围。利用远处受工程影响小的基岩作为稳定参考区域,对图像进行修正,有效提升了监测精度。

c. 试验表明,本文测量范围为 70 m,测量精度 $\leq \pm 1.00$ mm,且在不同环境下具有较好的鲁棒性,可用于实际工程中。

参考文献:

- [1] 叶肖伟,董传智. 基于计算机视觉的结构位移监测综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 21-39. (YE X W, DONG C Z. Review of computer vision-

(上接第 142 页)

- [3] 邹超英,曾海军,江兆强. 基于 LHS-CPO-BP 神经网络的大坝渗透系数反演分析方法[J]. 价值工程, 2025, 44(4): 96-100. (ZOU C Y, ZENG H J, JIANG Z Q. Inversion analysis method of dam permeability coefficient based on LHS-CPO-BP neural network[J]. Value engineering, 2025, 44(4): 96-100. (in Chinese))
- [4] 李永超,沈振中,熊汉野,等. 基于 LHS-ISSA-SVR 的心墙堆石坝渗流参数反演方法及应用[J]. 水电能源科学, 2024, 42(7): 109-113. (LI Y C, SHEN Z Z, XIONG H Y, et al. Inversion method of seepage parameters of core rockfill dam based on LHS-ISSA-SVR and its application[J]. Water resources and power, 2024, 42(7): 109-113. (in Chinese))
- [5] 肖时辉,王峰,何柏延,等. 基于 LHS-WOA-ELM 的隧道围岩参数反演分析[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(3): 91-100. (XIAO S H, WANG F, HE B Y, et al. Inversion analysis on surrounding rock

based structural displacement monitoring[J]. China journal of highway and transport, 2019, 32(11): 21-39. (in Chinese))

- [2] 李艺,刘成栋,刘检生,等. 基于机器视觉的大坝表面位移智能监测方法研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 93-96. (LI Y, LIU C D, LIU J S, et al. Dam surface displacement monitoring system based on machine vision[J]. Water resources and power, 2023, 41(12): 93-96. (in Chinese))
- [3] 许孝臣,薛磊磊,李峰,等. 机器视觉技术在大坝表面变形监测中的适用性研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(9): 125-129. (XU X C, XUE L L, LI F, et al. Application of machine vision technology in dam surface deformation monitoring[J]. Water resources and power, 2024, 42(9): 125-129. (in Chinese))
- [4] 李明,苏志龙,张东升. 基于仿射变换矫正相机抖动的数字图像相关测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0912002. (LI M, SU Z L, ZHANG D S. Methods for digital image correlation measurement with camera shake correction based on affine transformation[J]. Acta optica sinica, 2021, 41(9): 0912002. (in Chinese))
- [5] SHANTAL M, OTHMAN Z, ABU BAKAR A. A novel approach for data feature weighting using correlation coefficients and Min-max normalization[J]. Symmetry, 2023, 15(12): 2185.
- [6] PIRÓPO M, MORAES F, SANTOS F A N. Surfing on curved surfaces-the maple package surf[J]. Computer physics communications, 2020, 249: 107002.
- [7] KUO C Y, LU Y R, YANG S M. On the image sensor processing for lane detection and control in vehicle lane keeping systems[J]. Sensors, 2019, 19(7): 1665.
- [8] parameters of tunnel based on LHS-WOA-ELM[J]. Mining research and development, 2025, 45(3): 91-100. (in Chinese))
- [6] 叶鹏程,潘光,高山. 一种快速优化拉丁超立方试验设计方法[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(4): 714-723. (YE P C, PAN G, GAO S. Sampling design method of fast optimal Latin hypercube[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(4): 714-723. (in Chinese))
- [7] WANG R B, HU R B, GENG F D, et al. The Animated Oat Optimization Algorithm: A nature-inspired metaheuristic for engineering optimization and a case study on Wireless Sensor Networks [J]. Knowledge-based systems, 2025, 318: 113589.
- [8] HUANG G B, ZHOU H M, DING X J, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part B (cybernetics), 2012, 42(2): 513-529.