

文章编号:1001-5078(2024)07-1063-06

· 激光应用技术 ·

一种新型抗畸变激光光斑检测算法研究

吴启元, 李武森, 陈文建

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究大坝内部的沉降和水平位移, 设计了一种精密的微位移测量装置。其中, 基于二维图像处理的激光光斑位移检测算法为该装置重要的组成部分。本文提出了一种抗畸变激光光斑中心检测算法, 通过对原始光斑进行阈值分割, 得出光斑发散部分的图像, 并通过闭操作和高斯滤波对之进行降噪和平滑。然后, 用 sobel 算子对其进行边缘检测, 从而得出较为光滑的边缘轮廓。最后, 对其进行抗畸变激光光斑中心检测算法的处理, 确定光斑中心。同时, 又通过实验装置来采集一系列激光光斑图像, 并用传统激光光斑中心检测算法和抗畸变激光光斑中心检测算法对其进行了处理并进行比较。结果表明, 抗畸变激光光斑中心检测算法精度最高, 有效消除了远距离光斑的畸变对光斑中心计算的影响。

关键词: 大坝监测; 激光光斑中心检测; 微位移测量

中图分类号: TH74; TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.009

Research on a new anti-distortion laser spot detection algorithm

WU Qi-yuan, LI Wu-sen, CHEN Wen-jian

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the settlement and horizontal displacement inside the dam, a precise micro displacement measurement device is designed. Among them, the laser spot displacement detection algorithm based on two-dimensional image processing is an important component of the device. In this paper, an anti distortion laser spot center detection algorithm is proposed, in which the image of the divergent part of the spot is derived by threshold segmentation of the original spot, which is denoised and smoothed through closed operations and Gaussian filtering. Then, edge detection is performed using the sobel operator to obtain a smoother edge contour. Finally, the anti-distortion laser spot center detection algorithm is processed to determine the spot center. At the same time, a series of laser spot images are collected through experimental equipment, and processed and compared with the traditional laser spot center detection algorithm and the anti-distortion laser spot center detection algorithm. The results show that the anti-distortion laser spot center detection algorithm has the highest accuracy and effectively eliminates the influence of the aberration of the remote spot on the spot center calculation.

Keywords: dam monitoring; laser spot center detection; micro-displacement measurement

1 引言

在负载下, 大坝内部会发生沉降与位移, 因此,

需要对大坝内部进行检测。但是, 随着坝高的增加, 传统的测量方法逐渐不适用于高面板堆石坝。

作者简介: 吴启元 (1997 -), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测技术方面的研究。

通讯作者: 李武森 (1968 -), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光电传感图像采集及处理系统相关的硬件及软件方面的研究。E-mail: liwusen@njjust.edu.cn

收稿日期: 2023-11-07

双江口水电站砾石土心墙堆石坝使用引张线式水平位移计来测量内部位移,但是由于超长的水平位移计线体存在不均匀变形易引起线体回缩、线体沿程阻力增加等问题,导致监测数据误差偏大^[1];相关研究表明,引张线式水平位移计监测管线长度400~500 m已经是材料和工艺极限,更长的管线已经不能满足监测精度要求^[2]。水管式沉降仪检测较高的土石坝所安装的管路长度可能达到300~400 m,埋设困难,且大坝变形可能造成管路损坏,引起测量异常^[3];同时,设备测量时间也将成倍增加^[4]。

鉴于上述原因,相关学者设计了一系列的新型大坝内部监测方法:文献[5]提出了一种基于管道机器人技术的大坝内部测量方法,通过在大坝内部铺设一条可随大坝同步变形的监测管路,使机器人在其内部使用倾角测量方法计算沉降、高分辨率光学照相技术测量水平位移,在1000 m的管道中误差分别可以达到6.763 mm和1.034 mm;文献[6]~[7]提出了利用高精度惯导和多里程计测量机器人的运动轨迹,进而得到管道三维曲线的方法,且已在两河口大坝中得到应用,其高程测量精度达到了0.32 mm。

为了适应更高高度的堆石坝内部变形的有效检测,本文提出一种基于激光光斑图像处理及识别技术的大坝内部变形检测方法。此方法拟在大坝内部铺设一条水平管道,让搭载激光光源和激光检测装置的小车在管道内遍历,所检测到的光斑中心坐标的变化即可反映管道内沉降和水平位移的信息。与引张线和水管式方法对比,该方法能获得更高的测量精度。本文主要对与该测量方法相关的激光光斑中心检测技术进行研究。

2 激光光斑中心检测算法

不同的算法在处理不同特征的光斑的精度也不同,因此需要选择一个适合的光斑中心检测算法。图1和图2分别为近距离激光光斑图像和它对应的灰度三维分布图。观察可知,光斑图像大体可以分为三部分,分别是最外围的背景部分、光斑边缘发散部分和光斑亮度中心部分。并且,近距离的光斑灰度的分布大体上符合高斯分布的特点,而灰度重心法^[8]、圆拟合法^[9]、高斯拟合法^[10]等传统光斑中心检测算法对接近圆形的高斯光斑的处理具有较高的精度。但是,如图3所示,随着激光源和靶标距离的增加,激光光斑会发生畸变,从而使传统光斑中心检测算法所计

算出的光斑中心偏离理想光斑中心位置,并且,激光光斑的畸变随着激光源和靶标距离的增大而增大。这种畸变是由多种因素导致的,其中包括光学系统的像差影响^[11]、激光器内部结构对高斯光束的偏移角的影响等。为了消除远距离光斑边缘畸变的影响,本文提出了一种抗畸变激光中心检测算法。

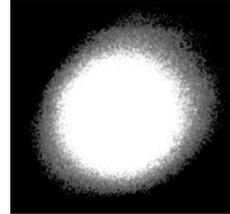


图1 近距离激光光斑图像

Fig. 1 Close-up laser spot image

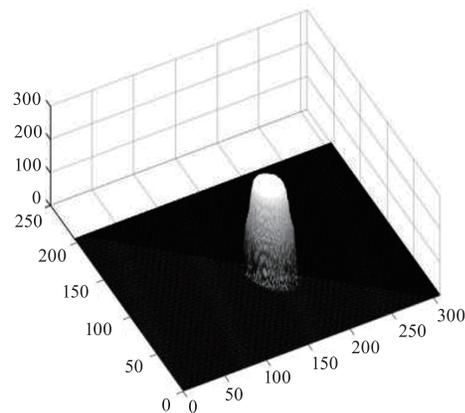


图2 近距离激光光斑灰度三维分布图

Fig. 2 Close-up laser spot gray level 3D distribution

由图3观察可知,不仅仅是边缘发散部分,光斑亮度中心部分也很大程度上发生了畸变。理想的高斯光斑的应该是一个理想的圆环状,假设包含光斑边缘发散部分的光斑半径为 R ,仅留存亮度中心部分的光斑半径为 r ,那么,在理想光斑的任何一个方向上,边缘发散部分的环宽 $R-r$ 一定为一个固定不变的值。由图三可知,光斑的畸变较大的方向所对应的 $R-r$ 的值较大,光斑的畸变较小的方向所对应的 $R-r$ 的值较小。因此,可以求出 $R-r$ 最小的值,从而得出光斑畸变最小的方向。首先,将激光光斑进行阈值分割。选择一个可以滤除环境光并且保留光斑边缘发散部分的灰度值作为阈值 a ,滤除灰度小于 a 的环境光;然后将灰度值为255的光斑亮度中心部分滤除,这样就得到了光斑发散部分的图像,如图4(a)所示。接着,对之做闭操作填补环状结构中缺失的像素,并用高斯滤波减小图像中的噪声,使图像更加平滑。然后,用sobel算子计算图像中每个

像素点的梯度值来识别像素的边缘,得出激光光斑轮廓,如图4(b)所示。

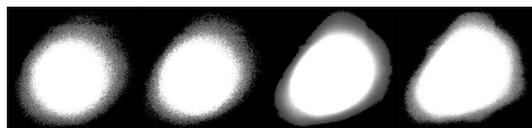


图3 激光光斑随着激光源到靶标距离增加的变化
Fig. 3 The change of laser spot as the distance from laser source to target increases

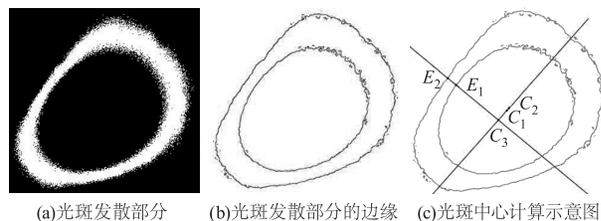


图4 抗畸变激光光斑检测算法计算过程
Fig. 4 Calculation process of anti-distortion laser spot detection algorithm

最后,遍历外部边沿所有像素,计算与内部边沿所有像素的距离 D :

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

其中, $E_1(x_1, y_1)$ 为内轮廓上的点, $E_2(x_2, y_2)$ 为外轮廓上的点。

当 D 最小的时, E_1, E_2 即为光斑受到畸变影响最小的方向所对应在内轮廓上的点,光斑中心位于这两个点所在的直线上。使用灰度重心法计算光斑亮度中心部分的重心 C_1 和包含边缘发散部分的光斑重心 C_2 。

$$\begin{cases} x_{3,4} = \frac{\sum x \cdot f(x,y)}{\sum f(x,y)} \\ y_{3,4} = \frac{\sum y \cdot f(x,y)}{\sum f(x,y)} \end{cases} \quad (2)$$

其中, (x_3, y_3) 为 C_1 坐标, (x_4, y_4) 为 C_2 坐标, x, y 为光斑图像每个像素的坐标, $f(x, y)$ 为每个像素坐标所对应的灰度值。

由于亮度中心部分对比于整幅光斑图像少了边缘发散部分畸变的影响,所得到的重心更加接近于理想中心,而 C_2 到 C_1 的变化即为重心随着光斑受畸变影响变小而变化的趋势。将 E_1, E_2, C_2, C_1 相连并作延长线,两个延长线的相交点 C_3 即可视为远距离畸变光斑的近似或更接近理想的中心位置,如图4(c)所示。

3 实验装置

本系统的实验装置包括:激光光源、微位移台、透光靶标、cmos 摄像机、上位机。将激光器、靶标、相机成一条直线放置,激光器安装在微位移台上,通过旋转旋钮可以控制激光器的高低和水平位移。控制 cmos 相机所拍摄的画面正对靶标,排除靶标外像素的影响,并将所采集的图片传输至上位机并进行算法处理。分别进行激光器距离透光靶标 L 为 10 m、20 m、30 m、40 m 的实验。图5 是实验装置总体示意图。

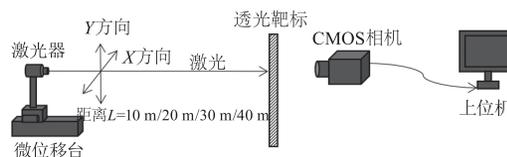


图5 实验装置
Fig. 5 Experimental device

图6 是搭载激光器的微位移台,位移台的旋钮每旋转一周,激光器位移 0.5 mm。图7 是拍摄激光光斑的海康网络工业相机,输出灰度图像,通过网络接口连接上位机。图8 是白色透光亚克力材质的光屏,用来当作激光靶标,实验时激光器从一边发射激光,相机在靶标另一边采集光斑。如果使用不透光的靶标投射激光光斑,相机在激光器附近采集距离较远的靶标上的光斑,则光斑在整个采集到的图像中只占据很少的像素,形状和光斑的位移相较于透射法不明显,不利于抗畸变光斑中心定位算法的计算,因此选用透射靶标。

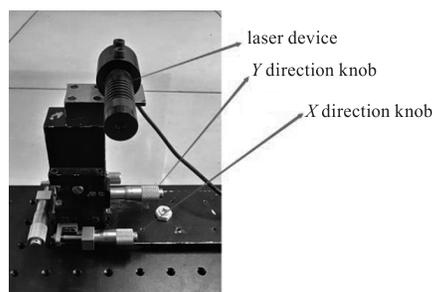


图6 微位移台
Fig. 6 Micro displacement table



图7 相机图
Fig. 7 Camera



图8 激光靶标

Fig. 8 Laser target

4 实验结果分析

激光光斑中心检测方法的精度分为同一位置上所测坐标和理想光斑中心坐标之间的误差和不同位置的线性度误差。

首先,保持实验装置 X 、 Y 方向的位置不变,仅改变激光源和靶标之间的距离 L ,并采集不同距离下激光光斑的图像。然后,使用传统激光光斑中心算法和抗畸变激光光斑中心算法对近距离和远距离的光斑分别处理并比较。实验中,将激光源距离靶标 0 m 处所采集的光斑图像视为理想光斑,将各算法对理想光斑所计算出的中心点视为各算法的理想中心点,并计算出激光源和靶标在不同距离下的光斑图像使用各算法所计算出的光斑中心位置,然后求出和理想中心点的距离。所得数据如图 9 所示。

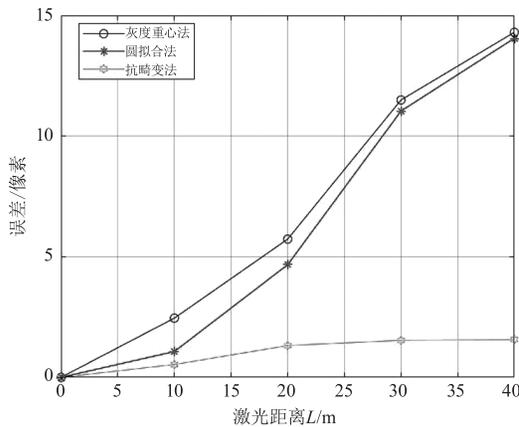


图9 不同距离下各算法的误差对比

Fig. 9 Comparison of errors among different algorithms at different distances

由图 9 可知,随着距离的增加,灰度重心法和圆拟合法所计算的坐标偏离理想光斑中心坐标的距离也会随之增加,而抗畸变激光光斑中心算法大大减小了畸变所带来的影响。

除了测试不同距离下各算法的误差,还需要模

拟大坝内部激光测位移的过程。通过控制位移台向 x 或 y 方向移动,使得激光光斑的位置随之变化。为了消除随机噪声对图像的影响,在每个位移点停顿数秒,记下当前位移台的位置作为实际位移值,再连拍 30 张图像,分别用三种光斑中心算法求解并平均,然后得到每种算法所对应的光斑中心坐标 (x 或 y) 的估值。为了提高拟合的准确性,每组实验采集 20 个点。以 30 m 距离处三种激光光斑中心检测算法所得到的 x 坐标的测量结果为例, y 方向类似,不再赘述。

由图 10 可粗略看出抗畸变激光光斑中心定位算法的线性度最好。为了更直观的对比,本文使用拟合优度 R^2 来判断线性度的优劣,即拟合方程对观测值的拟合程度。 R^2 的取值范围是 $[0, 1]$ 。 R^2 的值越接近 1,拟合程度越好;反之, R^2 的值越接近 0,说明拟合程度越差。 R^2 的公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中, x_i 表示单次坐标, \hat{x}_i 表示拟合值, \bar{x} 表示平均值。最大绝对误差 MAE 公式为:

$$MAE = \max(|x_i - \hat{x}_i|) \cdot \left| \frac{L}{k} \right| \quad (4)$$

其中, k 为拟合直线的斜率; L 为激光器每次移动的距离,即 0.5 mm 。均方根误差 RMSE 公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{(x_1 - \hat{x}_1)^2 + (x_2 - \hat{x}_2)^2 + \dots + (x_{20} - \hat{x}_{20})^2}{20}} \cdot \left| \frac{L}{k} \right| \quad (5)$$

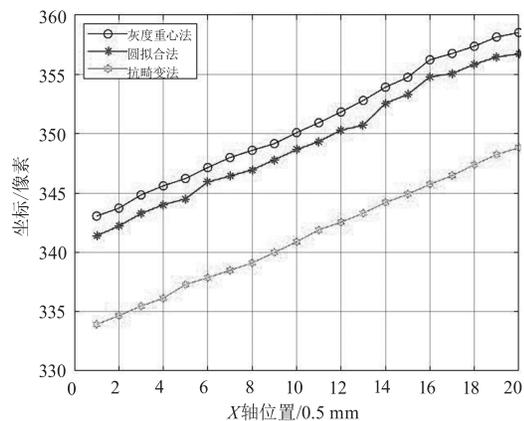


图10 30 m 距离处光斑实际位移与三种算法测量位移之间的关系

Fig. 10 The relationship between the actual displacement of the spot at a distance of 30 meters and the displacement measured by three algorithms

使用公式(3)、(4)、(5)来处理利用三种算法所得的光斑数据并对它们进行比较,结果如表1所示。表中给出了激光器离靶标10 m、20 m、30 m、40 m的距离处,仅改变水平方向位移所得测量数据经上述公式所计算的结果。

由表1可得:在相同距离下,用抗畸变激光光斑中心检测算法计算所得的坐标线性度最好,最大

绝对误差和均方根误差均小于其他两种算法。当测量1000 m长度的管道时,整个管道可以分为33个30 m距离的管道单元,按抗畸变法,30 m下 $RMSE = 0.171$,根据误差传播定律^[5],整个管道的综合均方根误差 $RMSE_z = RMSE \sqrt{n} = 0.171 \times \sqrt{33} = 0.982$ mm。

表1 不同距离处光斑算法处理结果比较

Tab.1 Comparison of processing results of spot algorithms at different distances

评价标准	灰度重心法				圆拟合法				抗畸变法			
	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m
距离	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m
R^2	0.998	0.992	0.983	0.971	0.996	0.991	0.977	0.954	0.998	0.992	0.987	0.976
MAE/mm	0.145	0.275	0.439	0.509	0.144	0.372	0.517	0.778	0.129	0.255	0.417	0.497
RMSE/mm	0.080	0.138	0.177	0.261	0.076	0.213	0.363	0.501	0.063	0.114	0.171	0.256

5 结论

(1)在40 m以内使用透射法所采集到的半径为100像素左右的光斑图像中,抗畸变激光光斑中心检测算法所计算出的光斑中心相对于理想光斑中心的距离误差可以达到2像素以内,误差远小于传统灰度重心法和圆拟合法的误差,有效减小了光斑畸变对光斑中心定位的影响。

(2)在激光测位移实验中,抗畸变激光光斑中心检测算法的误差小于灰度重心法和圆拟合法。在40 m距离以内的情况下,其均方根误差可达0.2 mm左右。

(3)从实验室结果来看,基于激光光斑图像处理及识别技术的精度优于其他方法获得的精度,是一种大坝内部变形新的检测方法,下一步的工作就是在原型检测中进行实际测量效果的检验,并且对检测方法进行进一步的优化和改进。

参考文献:

- [1] Yan Bo, Xiong Xiaohu. Research on measurement accuracy of 500 m-level super long tensile line horizontal displacement meter[J]. Water Power, 2021, 47(8): 120-124. (in Chinese)
严波,熊小虎.500 m级超长引张线式水平位移计测量准确度研究[J].水力发电,2021,47(8):120-124.
- [2] Zou Qing. Progress and prospect of key technologies in

safety monitoring of high face slab rockfill dams in China [J]. Dam & Safety, 2016(1): 50-56. (in Chinese)

邹青.中国高面板堆石坝安全监测关键技术进展与展望[J].大坝与安全,2016(1):50-56.

- [3] Tang Hongjie, Li Jun. Study on ultra-long distance deformation monitoring technology of extra-high earth-rock dam[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2023, 44(2): 66-72. (in Chinese)
汤洪洁,李俊.特高土石坝超长距离变形监测技术研究[J].水利水电快报,2023,44(2):66-72.
- [4] Zhang Libing, Zou Qing. Prospect of new technology for safety monitoring of 300 m high face rockfill dam[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5(6): 41-45. (in Chinese)
张礼兵,邹青.300 m级高面板堆石坝安全监测新技术展望[J].水电与抽水蓄能,2019,5(6):41-45.
- [5] He Bin, Sun Rujian, He Ning, et al. The measuring method of the inner deformation for high concrete faced rockfill dams with pipe-robot monitoring system[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(5): 78-82. (in Chinese)
何斌,孙汝建,何宁,等.基于管道机器人技术的高面板堆石坝内部变形测量方法[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):78-82.
- [6] Li Qingquan, Zhang Dejin, Wang Chisheng, et al. Technology and applications of dynamic and precise engineering surveying[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sini-

- ca,2021,50(9):1147-1158. (in Chinese)
李清泉,张德津,汪驰升等. 动态精密工程测量技术及应用[J]. 测绘学报,2021,50(9):1147-1158.
- [7] Yin Yu, Li Qingquan, Yu Jianwei, et al. Measuring method for internal settlement of high rockfill dams based on pipeline measuring robot[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(10):1951-1958. (in Chinese)
殷煜,李清泉,余建伟,等. 基于管道测量机器人的高堆石坝内部沉降测量方法[J]. 岩土工程学报,2022,44(10):1951-1958.
- [8] Chen Qingshan, Lu Naiguang, Yan Bixi, et al. Analysis to the methods for calculating the center position of gaussian-distributed beam spot adopted in a laser alignment system [J]. Computer Measurement & Control,2004,(5):486-488. (in Chinese)
陈青山,吕乃光,燕必希,等. 激光准直高斯光斑中心位置计算方法分析[J]. 计算机测量与控制,2004,(5):486-488.
- [9] Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering,2002,(3):275-279. (in Chinese)
孔兵,王昭,谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. 红外与激光工程,2002,(3):275-279.
- [10] Wang Lili, Hu Zhongwen, Ji Hangxin. Laser spot center location algorithm based on Gaussian fitting[J]. Journal of Applied Optics,2012,33(5):985-990. (in Chinese)
王丽丽,胡中文,季杭馨. 基于高斯拟合的激光光斑中心定位算法[J]. 应用光学,2012,33(5):985-990.
- [11] Di Xu, Yu Weili, Liu Zhiying, et al. Research on the method of calculating laser spot center [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Nature Science Edition,2008,31(3):9-12. (in Chinese)
邸旭,于伟莉,刘智颖,等. 激光光斑中心位置计算方法的研究[J]. 长春理工大学学报:自然科学版,2008,31(3):9-12.