

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210918

# 基于线结构光的三维垂线位移测量方法\*

梅天灿<sup>1</sup>, 肖尧<sup>1</sup>, 毛索颖<sup>2,3,4</sup>, 黄跃文<sup>2,3,4</sup>, 周芳芳<sup>2,3,4</sup>

(1. 武汉大学电子信息学院 武汉 430070; 2. 长江水利委员会长江科学院 武汉 430010; 3. 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心 武汉 430010; 4. 国家大坝安全工程技术研究中心 武汉 430010)

**摘要:**垂线测量法是观测大坝变形位移的一种简便而有效的方法,在实际大坝变形监测中得到广泛应用。针对现有垂线坐标仪大多只能测量垂线二维位移且结构复杂的问题,本文提出了一种基于线结构光的三维垂线测量方法。基于垂线测量中垂线方向不变,利用线结构光测量原理实现垂线三维位移测量。首先,本文采用线结构光测量获取垂线二维位移,然后基于垂线上固定标志点的成像光线和垂线相交于一点的事实,综合垂线二维测量结果和通过相机内参数恢复的固定标志点成像光线方程,实现垂线三维位移测量。实验结果表明,本方法在水平面内Y方向上的位移测量精度为 $\pm 0.1$  mm,在水平面内X方向和竖直Z方向上的位移测量精度达到 $\pm 0.05$  mm,测量范围为0~80 mm。相较于目前垂线位移测量方法,本文方法垂线位移测量精度和测量范围更高,且测量结构简单。

**关键词:** 三维垂线坐标仪; 机器视觉; 线结构光测量; 大坝变形监测

**中图分类号:** TH113 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

## A three dimension pendulum line displace measurement method based on linear structured light

Mei Tiancan<sup>1</sup>, Xiao Yao<sup>1</sup>, Mao Suoying<sup>2,3,4</sup>, Huang Yuewen<sup>2,3,4</sup>, Zhou Fangfang<sup>2,3,4</sup>

(1. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430070, China; 2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention of MWR, Wuhan 430010, China; 4. Research Center on National Dam Safety Engineering Technology, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The vertical measurement method is simple and effective to observe the displacement of dam deformation, which has been widely used in the actual dam deformation monitoring. To solve the problem that most of the existing pendulum telecoordinometer can only measure the two-dimensional displacement of the pendulum line and the structure is complex, a 3D pendulum line measurement method based on linear structured light is proposed in this article. Based on the fact that pendulum line direction keep constant, this article uses the principle of linear structured light measurement to achieve pendulum line three-dimensional displacement measurement. Firstly, the two-dimensional displacement of the pendulum line is obtained by the linear structured light measurement. Then, based on the fact that the imaging light of the fixed mark points on the pendulum line intersects the pendulum line at one point, the three-dimensional displacement measurement of the pendulum line is realized by synthesizing the two-dimensional measurement results of the pendulum line and the imaging light equation of the fixed mark points recovered by the camera internal parameters. The experimental results show that the displacement measurement accuracy of this method is  $\pm 0.1$  mm in the Y direction of the horizontal plane, and  $\pm 0.05$  mm in the X direction and Z direction of the horizontal plane, and the measuring range is 0~80 mm. Compared with the current vertical displacement measurement method, the vertical displacement measurement accuracy and measuring range are higher, and the measurement structure is simpler.

**Keywords:** 3D vertical coordinate instrument; machine vision; linear structured light measurement; dam deformation monitoring

## 0 引言

垂线坐标仪是一种测量大型工程结构水平位移和垂直位移的传统仪器,广泛用于大坝、建筑物的水平位移和挠度监测,是确保大坝安全运行的重要仪表设备。近年来,随着传感器技术的发展,为实现垂线仪观测数据实时采集、准确可靠、在线监控和快速反馈的目标,采用自动遥测方式替代传统的人工观测模式,已经成为大坝变形安全监测的一种重要发展方向。

自动垂线坐标仪根据工作原理可以分为电容式、涡流式、光电式等类型。传统的电容式垂线坐标仪采用差动电容感应原理实现非接触式测量垂线坐标<sup>[1]</sup>,但当测量环境潮湿、多尘时,电容极板间的凝结水和灰尘分布缓慢变化,电容介电常数改变,导致测量结果失真<sup>[2]</sup>。涡流式垂线坐标仪采用电涡流效应将非电量位移的测量转化为电量电感值的测量,不受潮湿、多尘环境因素的影响<sup>[3]</sup>。但电容式和涡流式垂线坐标仪均容易受到电漂、温漂和电磁辐射的干扰<sup>[4]</sup>,导致测量结果不准。

光电式垂线坐标仪采用电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)实现非接触式自动化垂线位移测量,与其他类型自动垂线坐标仪相比,CCD垂线坐标仪具有抗电磁干扰能力强、测量精度更高、数据处理速度快、长期稳定性好的显著优点。传统的CCD垂线坐标仪读取图像信息,根据垂线的投影在CCD光敏面上暗区的变化,计算得到垂线在 $X$ 、 $Y$ 两个方向上的位移,在两个方向上的测量原理相同,测量电路相互独立,互不干扰<sup>[5]</sup>。针对光学镜头在潮湿工作环境下容易受潮发霉的问题,文献[4]研制出一种大量程无透镜的光电式垂线坐标仪。为克服平行光源非线性对测量精度的影响,文献[6]提出采用3段2次多项式拟合的方法减小非线性误差,提高测量精度。为扩大垂线仪的测量范围,文献[7]采用步进式测量原理,由步进电机驱动光电探头扫描垂线和基准杆,测量电路记录步进电机的驱动脉冲数,通过丝杠行程来计算位移量,给出垂线的 $XY$ 坐标。文献[8]采用光栅尺代替步进电机进行距离测量,克服了步进电机容易发生丢步和测量速度不高的问题。然而,这些光电式垂线坐标仪大都结构复杂,需要在 $X$ 、 $Y$ 方向上布置两套完全相同的CCD相机、平行光源设备,或需要结合电机、丝杠、光栅尺等机构,而且只能实现垂线的二维位移测量。

为实现垂线三维位移测量,文献[9]在垂线上固定一个与其垂直的圆盘作为垂直基准,基于传统CCD垂线坐标仪原理测量垂线三维位移。这种方法需要在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向上布置3套完全相同的CCD相机、平行光源设备,结构复杂、不紧凑,实际安装难度高。对此,本文提出一

种基于线结构光的三维垂线测量方法,仅需使用一个CCD相机和一个线激光发射器,利用垂线测量中垂线方向不变的特性,根据线结构光测量原理实现垂线三维位移测量。

## 1 基于线结构光的三维垂线测量原理

### 1.1 测量原理

基于结构光的三维垂线测量结构如图1所示。测量装置包括计算机、CCD相机、线激光发射器、待测量垂线、支架和小球。CCD相机借助水准仪水平安装,通过网线与计算机连接,实时传输图像数据;线激光发射器放置在CCD相机下方,朝向待测量垂线,发射激光平面;两个小球固定在待测量垂线上,垂线通过支架架设在CCD相机前方。

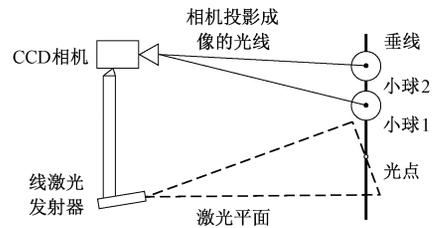


图1 三维垂线测量结构图

Fig. 1 Three dimension pendulum line measurement structure diagram

基于线结构光的三维垂线测量方法通过测量固定垂线上的两个白色小球的三维位移实现垂线三维位移测量。测量原理如图2所示,其中 $O-uv$ 为像素坐标系, $O_c-X_cY_cZ_c$ 为相机坐标系, $O_w-X_wY_wZ_w$ 为测量坐标系,测量坐标系由相机坐标系绕 $X_c$ 轴旋转 $90^\circ$ 得到。两个小球中任一个小球,其中心点 $P_c$ 位于垂线上,投影成像于像平面的 $p(u,v)$ 处,则小球中心点 $P_c(x_c, y_c, z_c)$ 的坐标同时满足其投影成像的光线方程和垂线的解析方程,联立两条直线方程,即可求解小球中心点 $P_c(x_c, y_c, z_c)$ 的坐标。分别测量两个小球中心点的坐标后,取其平均值作为两小球的中点坐标,并转化至测量坐标系下,该坐标值的变化量即为垂线在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 这三个方向上的位移。

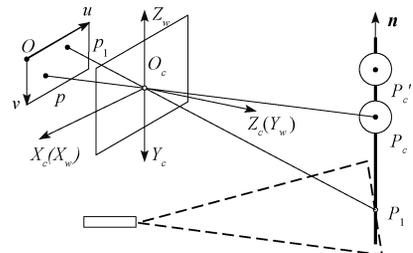


图2 三维垂线测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of three dimension pendulum line measurement

设相机内参为  $M_1$ , 在相机坐标系  $O_c - X_c Y_c Z_c$  中, 小球中心点投影成像的光线方程可由相机成像模型给出:

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

展开并消去  $s$  有:

$$\begin{pmatrix} um_{31} - m_{11} & um_{32} - m_{12} & um_{33} - m_{13} \\ vm_{31} - m_{21} & vm_{32} - m_{22} & vm_{33} - m_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (2)$$

设在相机坐标系  $O_c - X_c Y_c Z_c$  中垂线的方向向量为  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ , 激光平面与垂线相交的光点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  在垂线上, 因此垂线的解析方程可表示为:

$$\frac{x_c - x_1}{n_x} = \frac{y_c - y_1}{n_y} = \frac{z_c - z_1}{n_z} \quad (3)$$

其中, 光点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  的坐标可通过激光三角测量原理求出<sup>[10-11]</sup>, 设相机内参为  $M_1$ ,  $P_1$  通过相机成像于像平面的  $p_1(u_1, v_1)$  处, 设激光平面方程为  $Ax + By + Cz + D = 0$ ,  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  的坐标同时满足相机成像模型和激光平面方程:

$$\begin{cases} s \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \\ Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D = 0 \end{cases} \quad (4)$$

将上式展开并消去  $s$  有:

$$\begin{pmatrix} u_1 m_{31} - m_{11} & u_1 m_{32} - m_{12} & u_1 m_{33} - m_{13} \\ v_1 m_{31} - m_{21} & v_1 m_{32} - m_{22} & v_1 m_{33} - m_{23} \\ A & B & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -D \end{pmatrix} \quad (5)$$

记作  $A_1 X_1 = B_1$ , 则有:

$$X_1 = A_1^{-1} B_1 \quad (6)$$

其中, 相机内参  $M_1$  由相机标定给出, 激光平面方程参数  $(A, B, C, D)$  由激光平面标定给出, 像点  $p_1(u_1, v_1)$  的坐标通过图像处理算法给出, 则光点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  的坐标可通过式(6)求解。

联立式(2)和(3), 整理为矩阵形式:

$$\begin{pmatrix} um_{31} - m_{11} & um_{32} - m_{12} & um_{33} - m_{13} \\ vm_{31} - m_{21} & vm_{32} - m_{22} & vm_{33} - m_{23} \\ n_z & 0 & -n_z \\ 0 & n_z & -n_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ n_z x_1 - n_x z_1 \\ n_z y_1 - n_y z_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

记作  $A X_c = B$ , 根据最小二乘解可得:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (8)$$

其中, 相机内参  $M_1$  由相机标定给出, 垂线方向向量  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$  由垂线方向向量标定给出, 光点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  的坐标由式(6)求出, 像点  $p(u, v)$  的坐标通过图像处理算法给出, 则小球中心点  $P_c(x_c, y_c, z_c)$  的坐标可由式(8)求得。求出两个小球的中心点坐标后取平均值, 转换至测量坐标系下, 该坐标值的变化量即为垂线在  $X, Y, Z$  这3个方向上的位移。

### 1.2 垂线方向向量标定

基于线结构光的三维垂线测量方法通过拟合两个与垂线平行的棋盘格平面实现垂线方向向量标定。将棋盘格悬挂在垂线上, 此时棋盘格平面与垂线平行, 拍摄两次不同角度的棋盘格, 如图3所示。

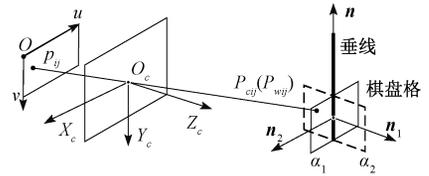


图3 垂线方向向量标定原理图

Fig.3 Schematics diagram of vertical direction vector calibration

对棋盘格平面  $\alpha_1$ , 结合棋盘格图像求解局部棋盘格世界坐标系  $O_{w1} - X_{w1} Y_{w1} Z_{w1}$  到相机坐标系  $O_c - X_c Y_c Z_c$  的旋转矩阵  $R_{cw}$  和平移向量  $T_{cw}$ <sup>[12-14]</sup>, 结合  $R_{cw}$  和  $T_{cw}$  求解棋盘格角点在相机坐标系  $O_c - X_c Y_c Z_c$  下的坐标  $P_{cij}(x_{cij}, y_{cij}, z_{cij})$ , 通过整体最小二乘法拟合全部棋盘格角点<sup>[15]</sup>, 得到棋盘格平面  $\alpha_1$  的平面方程参数  $(A_1, B_1, C_1, D_1)$ , 则棋盘格平面  $\alpha_1$  的法向量为  $\mathbf{n}_1 = (A_1, B_1, C_1)$ 。同样地, 对棋盘格平面  $\alpha_2$ , 得到其法向量为  $\mathbf{n}_2 = (A_2, B_2, C_2)$ 。两个姿态下的棋盘格平面的法向量叉乘即得到垂线的方向向量  $\mathbf{n} = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2$ 。

### 1.3 光点及小球中心点图像坐标检测

测量垂线三维位移时, 通过式(6)和(8)分别计算激光平面与垂线相交的光点  $P_1$  和小球中心点  $P_c$  在相机坐标系  $O_c - X_c Y_c Z_c$  上的坐标, 需要计算机提取光点和小球中心点在图像上的像点坐标  $p_1(u_1, v_1)$  和  $p(u, v)$ 。

小球中心点坐标提取处理过程如图4所示。CCD相机拍摄原始图像如图4(a)所示, 首先根据相机标定的畸变参数对原始图像做畸变矫正, 得到畸变矫正后的图像, 如图4(b); 对畸变矫正后的图像进行自适应阈值的二值化处理<sup>[16]</sup>, 将目标光点和小球与背景分离, 如图4(c); 形态学滤波去除二值化图像中的孤立点, 如图4(d); 对二值化图像进行连通域分析, 计算图像中各个连通域的包围框和面积, 计算每个连通域的长宽比; 筛选面积大于 20 000 pixel、长宽比大于 0.8, 小于

1.2 的连通域,满足上述条件的连通域即为图像中由小球构成的连通域;构造一个比小球连通域长宽各大 40 pixel 的矩形掩膜,如图 4(e) 所示;通过矩形掩膜截取畸变矫正后图像中的对应部分,如图 4(f) 所示,通过高斯滤波、提取 canny 边缘<sup>[17]</sup>、对边缘点进行椭圆拟合<sup>[18-19]</sup>的方法精确提取小球中心点  $p$  的图像坐标  $(u, v)$ , 如图 4(g)、(h) 所示。

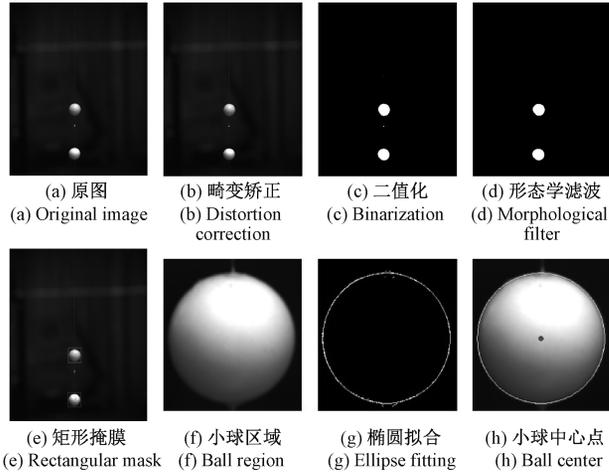


图 4 小球中心点坐标提取

Fig. 4 Coordinate extraction of the center point of the ball

激光光点坐标提取处理过程如图 5 所示。通过上述矩形掩膜,将畸变矫正后图像对应部分的像素置零,此时图像中的高灰度值区域仅由激光平面与垂线相交的光点  $P_1$  (见图 1) 构成,如图 5(b) 所示。光点  $P_1$  是光源线激光发射器发射激光照射在垂线上的一点,在图像中灰度值较大,而图像中背景部分灰度值较低,因此使用较大的阈值进行二值化操作分离光点与背景,得到仅包含光点部分的二值化图像,如图 5(c) 所示;通过滑动窗口搜索二值化图像中平均灰度值最大的窗口,如图 5(d) 所示;计算平均灰度值最大的窗口的灰度质心坐标,即为激光光点  $p_1$  的图像坐标  $(u_1, v_1)$ 。

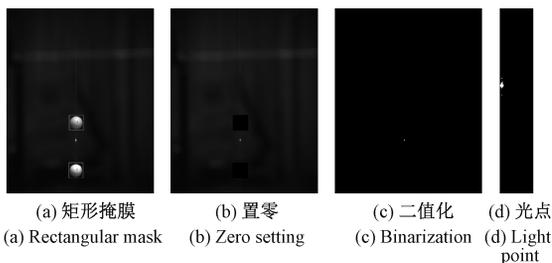


图 5 激光光点坐标提取

Fig. 5 Laser spot coordinate extraction

## 2 测量实验及结果分析

为了验证所提出测量方法的有效性,利用建立的测试装置对垂线三维位移进行了测试。首先介绍测试装置的构成和测量过程。然后完成测试装置参数的标定,并验证标定精度。最后进行将垂线挂设在高精度三维平移台上,在  $X, Y, Z$  这 3 个方向上进行位移测量实验,验证垂线在  $X, Y, Z$  这 3 个方向上的测量精度。

### 2.1 垂线三维测量过程

测试装置结构如图 6 所示。CCD 相机采用 JAI GO-5000M-PGE 相机,配备 25 mm 光学镜头,借助水准仪水平安装,保证相机光轴与水平方向平行。CCD 相机图像分辨率为 2 048 pixel×2 560 pixel,视场为 80 mm×100 mm,测量距离为 250 mm 左右。线激光发射器采用 COHERENT STR-660-10-CW-FL-L01-45-S-TX,波长 650 nm。



图 6 测量装置结构图

Fig. 6 Measuring device structure diagram

垂线三维位移测量过程主要分为两步:标定和测量。其中标定过程需要在测量之前完成,如 1.1 节所述,垂线三维测量系统待标定的参数有相机内参  $M_1$ 、激光平面方程参数  $(A, B, C, D)$  和垂线方向向量参数  $n$ 。具体的,首先组装、固定 CCD 相机和线激光发射器,保证 CCD 相机和线激光发射器的相对位置不再发生改变,调整 CCD 相机的光圈和对焦,保证 CCD 相机采集到的图像中目标光点和小球亮度合适,在工作距离内对焦清晰,然后对相机内参和激光平面方程参数进行标定,将标定结果保存至本地 txt 文档中。然后将 CCD 相机、线激光发射器装置尽量水平地安装固定在测量位置,在 CCD 相机前方通过支架架设垂线与小球,并对垂线方向向量参数进行标定,将标定结果保存至本地 txt 文档中,标定完成后,CCD 相机、线激光发射器装置的位置不能移动。

标定过程完成后,开始进行垂线三维位移的测量。测量过程由上位计算机全自动完成:计算机读取标定数据;控制 CCD 相机采集光点和小球目标图像;对采集图像进行处理,提取光点和两个小球中心点的图像坐标;结合标定参数构建小球中心点投影成像的光线方程和垂线方程;联立求解得到两个小球中心点的坐标;输出垂线三维位移。

### 2.2 标定结果

通过张正友相机标定法进行相机标定<sup>[20-21]</sup>,使用 12×9 的棋盘格标定板,每个棋盘格的大小为 5 mm×5 mm,如图 7 所示,拍摄 17 张棋盘格图像进行相机标定;通过基于棋盘格的线结构光标定方法进行激光平面标定<sup>[22-23]</sup>,使用相同的棋盘格标定板,将线激光打在棋盘格标定板的空白部分,保证不与棋盘格相交<sup>[24]</sup>,如图 8 所示,移动棋盘格,拍摄 18 张图像进行激光平面标定;通过 1.3 节介绍的方法进行垂线方向向量标定。相机内参  $M_1$ 、激光平面方程参数  $(A, B, C, D)$  和垂线方向向量参数  $n$  标定结果如下:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 5\ 255.768\ 06 & 0 & 1\ 050.213\ 99 \\ 0 & 5\ 256.011\ 24 & 1\ 338.921\ 33 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$(A, B, C, D) = (0.025\ 738\ 26, 0.722\ 059\ 45, 0.691\ 352\ 12, -146.465\ 82) \quad (10)$$

$$n = (-0.007\ 168\ 142, 0.999\ 886\ 4, -0.013\ 256\ 843) \quad (11)$$

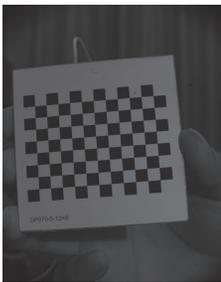


图 7 棋盘格标定板图

Fig. 7 Checkerboard calibration image

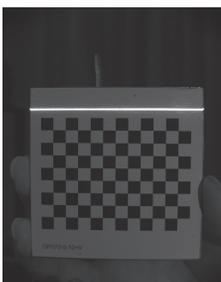


图 8 激光平面标定图像

Fig. 8 Laser plane calibration image

为验证相机标定精度,将相机参数看作已知量,通过相机成像模型计算棋盘格角点的图像坐标,与角点检测得到的图像坐标对比,计算重投影误差。结果如图 9 所示,相机标定的平均重投影误差为 0.016 pixel,最大重投影误差不超过 0.02 pixel,该结果表明相机标定结果可靠。

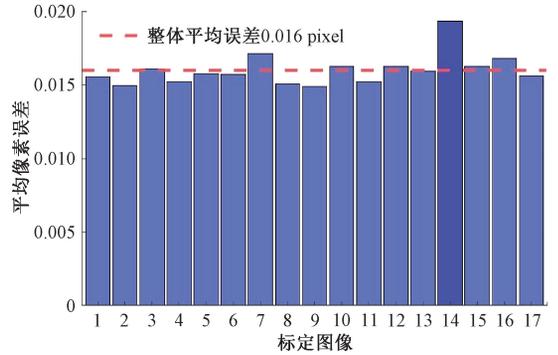


图 9 相机标定重投影误差直方图

Fig. 9 Camera calibration reprojection error histogram

为验证激光平面标定精度,将激光平面参数看作已知量,根据激光三角测量原理计算激光平面特征点的三维坐标,与实际三维坐标对比,得到激光平面特征点的重建误差,如图 10 所示。可以看出,激光平面 X 方向上的重建误差在 ±0.015 mm 以内,激光平面 Y 方向上的重建

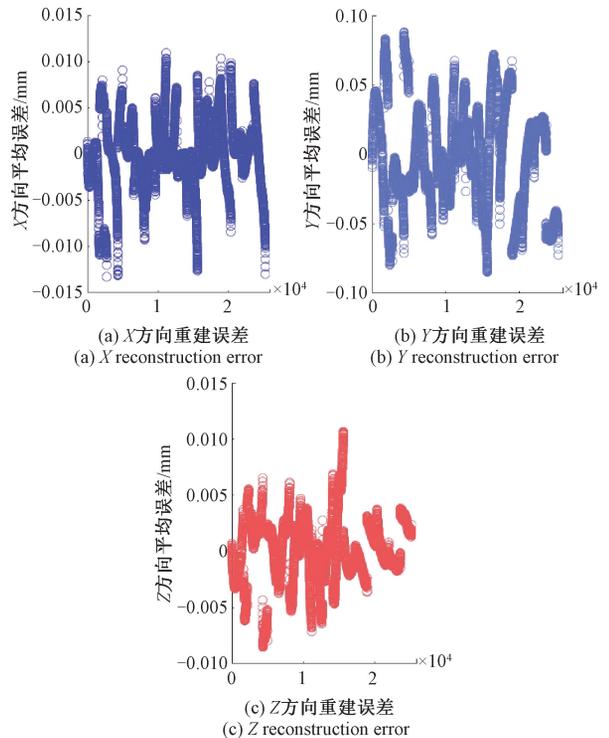


图 10 激光平面特征点的重建误差图

Fig. 10 Reconstruction error of laser plane feature points

误差在 $\pm 0.1$  mm以内,激光平面 $Z$ 方向上的重建误差在 $\pm 0.01$  mm以内。

### 2.3 垂线三维位移测量

为了验证本文三维垂线测量方法的测量精度,本文将垂线挂在精度为 $0.001$  mm的三维平移台上,控制三维平移台分别在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 这3个方向上移动,将测量结果与三维平移台读数对比,得到测量误差如表1~3所示。

表1  $X$ 方向上位移测量实验

Table 1 Displacement measurement experiment in  $X$  direction mm

三维平移台读数	进给距离	测量坐标值	测量位移值	误差
0		-41.21, 254.04, 14.50		
5	5	-36.18, 253.91, 14.46	5.03	0.032 0
10	5	-31.16, 253.90, 14.37	5.03	0.026 0
15	5	-26.14, 253.81, 14.34	5.02	0.019 0
20	5	-21.14, 253.77, 14.32	5.00	0.001 1
25	5	-16.12, 253.76, 14.27	5.02	0.022 0
30	5	-11.09, 253.81, 14.20	5.03	0.027 0
35	5	-6.12, 253.74, 14.19	4.97	-0.027 0
40	5	-1.17, 253.73, 14.12	4.95	-0.047 0
45	5	3.87, 253.76, 14.08	5.03	0.034 0
50	5	8.88, 253.75, 14.08	5.02	0.015 0
55	5	13.86, 253.81, 14.03	4.98	-0.021 0
60	5	18.84, 253.75, 13.99	4.98	-0.022 0
65	5	23.90, 253.82, 13.99	5.04	0.040 0
70	5	28.88, 253.74, 13.92	5.00	0.004 6
75	5	33.85, 253.62, 13.86	4.97	-0.032 0
80	5	38.85, 253.66, 13.83	5.00	-0.002 0

由表1~3可以看出,本文三维垂线测量方法在 $X$ 方向上和在 $Z$ 方向上的测量误差在 $\pm 0.05$  mm以内,在 $Y$ 方向上的测量误差在 $\pm 0.1$  mm以内,其中 $Y$ 方向上测量误差较大与激光平面标定在 $Y$ 方向上的重建误差较大有关。相较目前多数垂线坐标仪标准量程为 $0\sim 50$  mm,测量精度为 $\pm 0.1$  mm,本文提出的三维垂线测量方法可实现更大的测量范围,在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 这3个方向上均达到 $0\sim 80$  mm,而且在水平面内 $X$ 方向和竖直 $Z$ 方向上测量精度达到 $\pm 0.05$  mm。

表2  $Y$ 方向上位移测量实验

Table 2 Displacement measurement experiment in  $Y$  direction mm

三维平移台读数	进给距离	测量坐标值	测量位移值	误差
0		0.41, 183.77, 27.74		
5	5	0.34, 188.82, 27.50	5.06	0.056
10	5	0.26, 193.93, 27.49	5.09	0.088
15	5	0.27, 198.89, 27.46	4.98	-0.016
20	5	0.27, 203.80, 27.39	4.91	-0.089
25	5	0.38, 208.87, 27.36	5.07	0.067
30	5	0.43, 213.78, 27.33	4.91	-0.090
35	5	0.43, 218.89, 27.33	5.09	0.093
40	5	0.44, 223.85, 27.27	4.98	-0.023
56	16	0.48, 239.86, 27.01	16.01	0.011
75	19	0.56, 258.99, 27.10	19.08	0.082
80	5	0.62, 263.91, 27.09	4.97	-0.026

表3  $Z$ 方向上位移测量实验

Table 3 Displacement measurement experiment in  $Z$  direction mm

三维平移台读数	进给距离	测量坐标值	测量位移值	误差
0		0.65, 236.82, -39.32		
5	5	0.64, 236.77, -34.33	5.00	-0.004 40
10	5	0.63, 237.04, -29.37	4.97	-0.031 00
15	5	0.61, 236.86, -24.34	5.02	0.024 00
20	5	0.60, 237.04, -19.36	4.98	-0.016 00
25	5	0.59, 236.93, -14.36	5.01	0.005 90
30	5	0.57, 236.37, -9.34	5.05	0.047 00
35	5	0.56, 236.83, -4.37	4.99	-0.005 20
40	5	0.55, 237.13, 0.62	5.00	0.000 90
45	5	0.54, 237.25, 5.62	5.00	-0.003 70
64	19	0.49, 237.49, 24.58	18.97	-0.033 00
80	16	0.44, 237.63, 40.61	16.03	0.026 00

## 3 结 论

针对现有垂线坐标仪大多只能测量垂线二维位移,现有三维垂线坐标仪结构复杂、冗余的问题,提出了一种基于线结构光的三维垂线测量方法,基于垂线测量中垂线方向不变,利用线结构光测量原理实现垂线三维位移

测量。首先基于线结构光测量原理获取垂线二维位移,然后基于垂线上固定标志点的成像光线与垂线相交于一点的事实,综合垂线二维测量结果和通过相机内参数恢复的固定标志点成像光线方程,实现仅采用一个 CCD 相机和一个线激光发射器对垂线的三维位移进行测量,测量精度更高,测量范围更大,且测量结构简单,在水平面内  $Y$  方向测量精度为  $\pm 0.1$  mm,在水平面内  $X$  方向和竖直方向上测量精度达到  $\pm 0.05$  mm,为高精度三维垂线坐标仪的设计提供一种新的思路。

### 参考文献

- [1] 朱伟宾,鲁结根,宫玉强. 电容式引张线仪和垂线坐标仪在大坝监测应用中的讨论[J]. 水电能源科学, 2010, 28(1): 60-63, 156.  
ZHU W B, LU J G, GONG Y Q. Discussion on application of capacitance wire alignment transducer and capacitance coordinatograph to engineering project [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(1): 60-63, 156.
- [2] 尹国生. 电容式垂线坐标仪异常数据成因分析及预防措施探讨[J]. 四川水力发电, 2021, 40(S1): 14-18, 25.  
YIN G SH. Analysis and study on the causes and preventive measures of abnormal data of capacitive plumb line coordinate instrument [J]. Sichuan Water Power, 2021, 40(S1): 14-18, 25.
- [3] 罗孝兵,蓝彦,刘冠军,等. 新型电涡流感应式垂线坐标仪的研制[J]. 西北水电, 2011(S1): 123-125.  
LUO X B, LAN Y, LIU G J, et al. Study and manufacturing of new electric eddy current induced pendulum coordinatograph [J]. Northwest Hydropower, 2011(S1): 123-125.
- [4] 李学胜,卢欣春,蓝彦,等. 新型光电式垂线坐标仪的研制[J]. 水电自动化与大坝监测, 2011, 35(2): 48-50.  
LI X SH, LU X CH, LAN Y, et al. Photoelectric pendulum telecoordinometer for dam safty monitoring[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2011, 35(2): 48-50.
- [5] 徐乐年,徐成功,员玉良. 基于 CCD 的垂线坐标仪的设计[J]. 工矿自动化, 2010, 36(4): 18-22.  
XU L N, XU CH G, YUN Y L. Design of vertical plumb coordinatograph based on CCD [J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(4): 18-22.
- [6] 董建业,张世中,刘凤秋,等. 采用多项式拟合修正法提高 CCD 垂线仪的测量精度[J]. 地壳构造与地壳应力文集, 2009, 21: 93-98.  
DONG J Y, ZHANG SH ZH, LIU F Q, et al. A method to increase precision of CZ-CCD plumb coordinometer with residual error simulation by polynomial [J]. Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics, 2009, 21: 93-98.
- [7] 毛良明,施海莹. 大量程步进式垂线坐标仪的研制[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006(1): 45-48.  
MAO L M, SHI H Y. Development of a large-scale stepper motor driven pendulum telecoordinometer [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2006(1): 45-48.
- [8] 魏兴云,周云飞,雷佳科. 高速高精垂线坐标仪[J]. 仪表技术与传感器, 2012(9): 18-20, 29.  
WEI X Y, ZHOU Y F, LEI J K. High-speed and high-precision pendulum telecoordinometer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(9): 18-20, 29.
- [9] 周良平,王文华,徐乐年. 基于 CCD 的三维垂线坐标仪设计[J]. 工矿自动化, 2014, 40(1): 97-100.  
ZHOU L P, WANG W H, XU L N. Design of 3D vertical plumb line coordinator based on CCD [J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(1): 97-100.
- [10] 王晓嘉,高隽,王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004(S2): 601-604, 608.  
WANG X J, GAO J, WANG L. Survey on the laser triangulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004(S2): 601-604, 608.
- [11] 孙有春,庞亚军,白振旭,等. 激光三角测量法应用技术[J]. 激光杂志, 2021, 42(4): 1-8.  
SUN Y CH, PANG Y J, BAI ZH X, et al. Application technology of laser triangulation [J]. Laser Journal, 2021, 42(4): 1-8.
- [12] 王平,周雪峰,安爱民,等. 一种鲁棒且线性的 PnP 问题求解方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 271-280.  
WANG P, ZHOU X F, AN AI M, et al. Robust and linear solving method for Perspective-n-Point problem [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 271-280.
- [13] VINCENT L, FRANCESC M N, PASCAL F. EPnP: An accurate  $O(n)$  solution to the PnP problem [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [14] TRIGGS B. Bundle adjustment —— A modern synthesis [J]. Springer Verlag, 1999: 298-372.
- [15] 官云兰,刘绍堂,周世健,等. 基于整体最小二乘的稳健点云数据平面拟合[J]. 大地测量与地球动力

- 学, 2011, 31(5): 80-83.
- GUAN Y L, LIU SH T, ZHOU SH J, et al. Robust plane fitting of point clouds based on TLS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(5): 80-83.
- [16] FABRIS-ROTELLI I N, GREEFF J F. An overview of image segmentation techniques[J]. Annual Proceedings of the South African Statistical Association Conference, 2012(con-1):34-41.
- [17] GIOI R, RANDALL G. A sub-pixel edge detector: An implementation of the canny/vernavay algorithm [J]. Image Processing On Line, 2017, 7: 347-372.
- [18] 郭斯羽, 吴延冬. 去除离群点的改进椭圆拟合算法[J]. 计算机科学, 2022, 49(4): 188-194.
- GUO S Y, WU Y D. Improved ellipse fitting algorithm with outlier removal [J]. Computer Science, 2022, 49(4): 188-194.
- [19] HU C, WANG G, HO K C, et al. Robust ellipse fitting with laplacian kernel based maximum correntropy criterion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30:3217-3141.
- [20] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]. Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, 1999.
- [21] 娄群, 吕钧瀚, 文立华, 等. 基于亚像素边缘检测的高精度相机标定方法[J]. 光学学报, 2022, 42(20): 90-98.
- LOU Q, LYU J H, WEN L H, et al. High-precision camera calibration method based on sub-pixel edge detection [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(20): 90-98.
- [22] 刘红光, 张宏, 石邦凯, 等. 一种基于二维平面靶标的线结构光标定方法[J]. 应用激光, 2022, 42(8): 129-138.
- LIU H G, ZHANG H, SHI B K, et al. A linear structured light calibration method based on 2D planar target[J]. Applied Laser, 2022, 42(8): 129-138.
- [23] 于龙龙, 李艳文, 栾英宝, 等. 基于二维平面靶标的线结构光标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 124-131.
- YU L L, LI Y W, LUAN Y B, et al. Line structured light calibrating based on two-dimensional planar target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 124-131.
- [24] 梁保秋, 张福民, 冯维, 等. 二维搜索与梯度重心相结合的光条提取方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8): 1144-1151.
- LIANG B Q, ZHANG F M, FENG W, et al. Method of extracting light stripes center with combination of two-dimensional search and gradient barycenter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8): 1144-1151.

### 作者简介

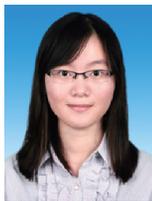


**梅天灿** (通信作者), 2005 年于武汉大学获得博士学位, 现为武汉大学副教授, 主要研究方向为计算机视觉、机器学习、模式识别。

E-mail: mtc@whu.edu.cn

**Mei Tiancan** (Corresponding author)

received his Ph. D. degree from Wuhan University in 2005. He is currently an associate professor at Wuhan University. His main research interests include computer vision, machine learning and pattern recognition.



**毛索颖**, 2011 年于武汉大学获得学士学位, 2013 年于武汉大学获得硕士学位, 现为长江水利委员会长江科学院高级工程师, 主要研究方向为大坝安全监测自动化设备研发。

E-mail: maosuoying@126.com

**Mao Suoying** received her B. Sc. degree from Wuhan University in 2011, and received her M. Sc. degree from Wuhan University in 2013. She is currently a senior engineer at Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission. Her main research interests include research and development of dam safety monitoring automation equipment.