

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240047

网络首发日期: 2024-11-06; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.n.20241105.1720.010>

基于双目线结构光的盾构排土量测量技术

张岚清, 黄 喆, 刘成硕, 李春炎

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘 要: 针对传统人工测量渣土量实时性差、电子皮带秤与激光雷达测量方法精度低等问题, 提出一种基于双目线结构光的盾构排土量测量技术。将线结构光引入双目视觉系统, 处理线结构光成像光条后计算三维坐标以获取点云数据, 并结合渣土截面积与里程计数据实现体积测量。实验结果表明, 该系统在实验室条件下相对误差低于 2.01%, 在传送带运行速度 0.515 m/s 条件下, 测量体积 2 500 cm³ 标准模型的相对重复性测量误差小于 2.39%。该方法受盾构环境影响较小, 测量精度较高, 能够满足现场排土量的测量需求。

关键词: 带式输送机; 非接触式测量; 双目线结构光; 排土量测量

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2025)05-0066-07

Shield Soil Discharge Measurement Technology Based on Binocular Line-Structured Light

ZHANG Lanqing, HUANG Zhe, LIU Chengshuo, LI Chunyan

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor real-time measurement of traditional manual soil volume measurement and low accuracy of electronic belt scale and LiDAR measurement methods, a shield soil discharge measurement technology based on binocular line-structured light is proposed in this article. Line-structured light was introduced into the binocular vision system, three-dimensional coordinates were then calculated after processing the imaging light bar of the line-structured light to obtain the point cloud data, and the volume measurement was finally achieved by combining the cross-sectional area of the soil with the odometer data. The experimental results showed that the relative error of the system was less than 2.01% under laboratory conditions, and the relative repeatability measurement error of the standard model with a volume of 2 500 cm³ was less than 2.39% under the condition that the conveyor belt ran at a speed of 0.515 m/s. The method is less affected by the environment of the construction site and has high measurement accuracy, which meets the needs of on-site soil discharge measurement.

Key words: belt conveyor; non contact measurement; binocular line-structured light; soil discharge measurement

引文格式:

张岚清, 黄喆, 刘成硕, 等. 基于双目线结构光的盾构排土量测量技术[J]. 天津科技大学学报, 2025, 40(5): 66-72.

ZHANG L Q, HUANG Z, LIU C S, et al. Shield soil discharge measurement technology based on binocular line-structured light[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2025, 40(5): 66-72.

随着我国基础设施建设行业的快速发展, 盾构机在基础设施建设工程中的应用越来越多^[1-2]。目前在盾构施工中广泛采用土压平衡盾构, 土压盾构机通过控制排土量保持土舱内的土压与掘进面上的土压、水

压平衡^[3-5]。土压平衡盾构示意图如图 1 所示, 土压盾构机通过前部的刀盘切削开挖面上的渣土, 随后渣土进入土舱, 再由螺旋输送机将土舱内渣土排出, 由皮带机把渣土输送到盾构机尾部的渣车内, 渣车将渣

收稿日期: 2024-03-12; 修回日期: 2024-07-19

作者简介: 张岚清(2001—), 男, 河北人, 硕士研究生; 通信作者: 黄 喆, 讲师, huangzhe@tust.edu.cn

土运至竖井处,再由龙门吊将渣土运至地面。在盾构施工中,如果土舱内的渣土排出过多,土舱压力会变小,土舱土压和掘进面上的土压、水压失衡则可能引起地表过量沉降^[6]。土舱内的渣土排出量过少,土舱压力会变大,土舱土压和掘进面上的土压、水压同样会失衡,前方则可能出现地表隆起^[7]。及时监测排土量并调整盾构参数,以辅助控制压力平衡,对隧道工程的顺利施工至关重要。

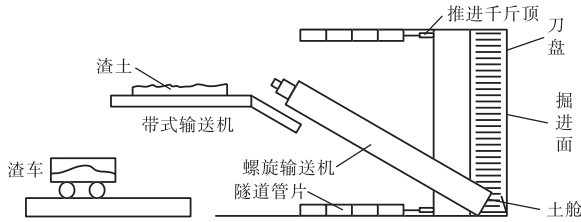


图 1 土压平衡盾构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil pressure balance shield

目前带式输送机上渣土量的测量方法有接触式测量和非接触式测量。接触式测量主要通过电子皮带秤的多种传感器实现渣土质量测量^[8]。但渣土分布不均、盾构掘进速度变化以及输送带的张力变化和抖动会影响质量传感器的准确性,降低测量精度^[9]。非接触式测量有机器视觉测量、激光雷达测量等。传统的机器视觉测量方法^[10]主要依赖图像特征点的提取匹配,这会大量消耗设备算力和计算资源,难以保证实时性^[11]。视觉测量方法还可采用由单目相机、双目相机组成的图像采集系统,通过对传送带上的物料轮廓图像进行采集,结合算法设计,实现物料体积的计算。窦猛^[12]基于三角测距原理,利用单目相机与线结构光组成的测量装置进行图像采集,并利用形态学骨架法完成了光条中心线的提取,最终计算出物料流量。顾振^[13]设计了一种基于双目视觉与深度学习相结合的煤料深度图计算方法,利用深度学习模型进行煤料视差图计算,最终实现对煤流量的监测。与单目相机相比,双目相机能够提供深度信息,配合算法可精确获取物料的三维坐标,因此具有更强的适用性。尤其在需要精确测量物料体积或形状的场所,双目相机的优势尤为明显。在复杂环境中,单一激光扫描技术的测量精度受所测渣土表面反射影响,若不对成像光条进行处理,测量颜色较暗的物体(如渣土、煤炭等)时测量精度会降低^[14]。商学建^[15]通过采用柱面分割、欧氏聚类等方式提取输送带上的物料点云数据,并将基于采样一致性初始配准算法(SAC-IA)的粗配准与基于迭代最近点(ICP)算法的精配准相结合,实

现了激光点云的连续拼接,最终通过积分法实现了物料体积的计算。王付利等^[16]提出激光雷达体积检测方法,在实际应用时,传送带在高速运行过程中存在剧烈振动,使测量得到的数据存在波动,最终导致测量结果出现误差;此外,激光雷达方法存在有效视场范围较小、测量点数较少、扫描频率较低^[17]等问题。针对上述问题,本文提出一种基于双目线结构光的盾构排土量测量技术。将线结构光引入双目视觉系统,通过处理线结构光成像光条计算三维坐标,以获取渣土截面积。结合渣土截面积与里程计数据计算渣土体积,可降低测量过程对现场环境的依赖,提高渣土体积测量精度。

1 测量原理

双目视觉测量原理图如图 2 所示。双目视觉测量原理的测量模型包含了成像平面坐标、相机坐标以及世界坐标 3 个主要坐标系。利用已完成内外参数标定的双目相机捕获特征点的二维图像信息,再由坐标系之间的转换关系,将图像中同名点的成像平面坐标参数转换为对应的空间三维信息。

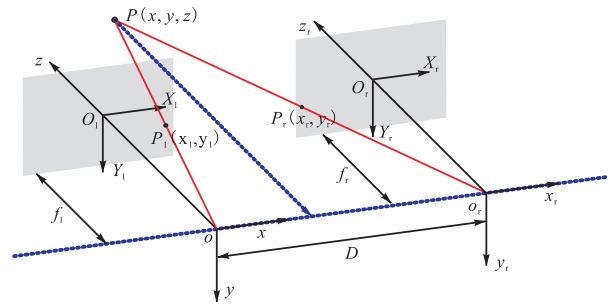


图 2 双目视觉测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of binocular vision measurement

设左相机坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 为世界坐标系,右相机坐标系为 $o_2-x_2y_2z_2$,左、右图像坐标系分别为 $O_1-X_1Y_1$ 、 $O_2-X_2Y_2$ 。若相机安装位置理想,则有 $Y_1 = Y_2 = Y$,选取同焦距相机则可得到 $f_1 = f_2 = f$ 。通过旋转平移矩阵 M 实现左、右相机坐标系间的转换,转换关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} = [R | T] \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$, $T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$, R 为左右相机坐标

系的旋转矩阵, T 为左右相机坐标系的平移矩阵。

可求得两相机图像坐标系 $O_l-X_lY_l$ 与 $O_r-X_rY_r$ 的坐标对应关系

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [R|T] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = \frac{zX_l}{f} \\ y = \frac{zY_l}{f} \\ z = \frac{f^2t_x - fXl_z}{X_lr_7X_l + X_lr_8Y_l + X_lr_9 - fr_4X_l + fr_5Y_l + f^2r_3} \end{cases} \quad (3)$$

由相似三角形原理可知 $X_l = f \frac{x}{z}$, $X_r = f \frac{D-x}{z}$, $Y = f \frac{y}{z}$, 其中 D 为两相机光心之间的基线距离。设两相机采集图像的视差为 $d = X_l - X_r$, 则可得空间点在世界(左相机)坐标系中的坐标为: $x = \frac{DX_l}{d}$, $y = \frac{DY}{d}$, $z = \frac{Df}{d}$ 。

双目视觉结构光测量将结构光引入双目相机。在实际工程测量过程中, 采用线激光投影, 投影光斑在待测物体上形成一条结构光光条, 通过计算获得物体表面的数据^[18]。相机捕捉到的结构光图案经过处理和分析后, 可计算出物体表面的深度信息。通过两个摄像头捕获成像像素点之间的匹配关系, 可计算出物体表面不同点的空间位置和三维坐标。

2 测量系统与算法

2.1 测量系统设计

本文所研究的双目视觉结构光盾构排土量检测方法在如图3所示的系统上进行, 该系统包括双目相机、带式输送机、线激光器、编码器等。编码器安装在下皮带的上表面。相机安装方向与带式输送机平行, 激光器的方向与带式输送机的运行方向垂直, 相机视野和线激光投射长度需大于等于皮带宽度。

系统选用了配备两个 230 万像素、6 mm 定焦的镜头以及 1/2.3 英寸传感器(1 英寸 = 2.54 cm)的双目相机。在传送带运行过程中, 渣土流量监测时测量装置与传送带上表面的距离为 0.5 ~ 1.2 m。系统中所选用的相机需有较大的视场角, 能够保证该系统在进

行渣土流量测量时均能采集到完整图像。所选相机具有低功耗、高速度、高集成度和易于制造等优势, 适用于高速运动、低功耗和高集成度的应用场景; 相机的传感器为 1/2.3 英寸高性能传感器, 同时支持连接嵌入式设备进行实时处理。系统测量最大帧率为 1100 帧/s。双目基线距离为 160 mm。采用线激光辅助的方式, 将传送带的渣土形态学特征转换为结构光光条的线性特征。选择波长为 450 nm 的线激光器, 激光线宽 0.5 mm。选择 BQH12 型编码器, 参数为 360 P/R。线激光器发射出的线激光投影到待测渣土表面上, 形成线结构光光条, 双目相机完成光条图像的采集。

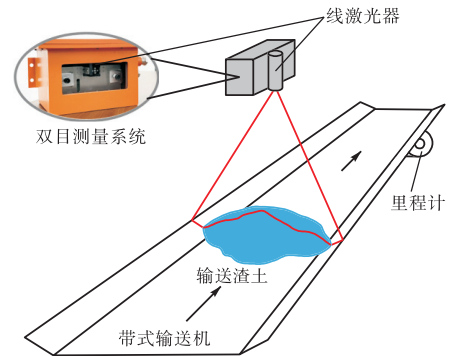


图3 双目测量系统布置图

Fig. 3 Layout of binocular measurement system

2.2 结构光光条处理

线激光照射到传送带、传送带边缘和渣土上时, 其在双目相机中的成像光条存在畸变、不平直、不连贯的现象。精确提取线结构光光条的中心, 是获取被测物体三维点云信息的关键步骤^[19], 因此对双目采集成像图进行图像预处理。设置渣土测量的感兴趣区域(ROI), 采用最大加权投影求解的图像灰度化处理^[20]对左右相机图像进行处理, 以最大化保留原图像对比度, 提升结构光光条中心的提取精度。

$$\text{Gray}(i, j) = 0.299 \times R(i, j) + 0.587 \times G(i, j) + 114 \times B(i, j) \quad (4)$$

考虑到系统中线结构光光条的横向光强分布符合高斯分布规律, 采用基于高斯曲线拟合的方法^[21]实现光条中心线的提取。高斯函数可表示为

$$f(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{\rho^2}} \quad (5)$$

式中: A 为光条图像中的灰度峰值, x_0 为高斯分布曲线尖峰中心的坐标, ρ 为光条的宽度。

将式(5)进行改写, 可得

$$\ln f(x) = \ln A - \frac{x_0^2}{\rho^2} + \frac{2x_0x}{\rho^2} - \frac{x^2}{\rho^2} \quad (6)$$

令 $F(x) = \ln f(x)$, $a_0 = \ln A - \frac{x_0^2}{\rho^2}$, $a_1 = \frac{2x_0}{\rho^2}$, $a_2 = -\frac{1}{\rho^2}$, 代入式 (6) 中, 可得

$$F(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

假设在光条图像中存在 n 个采样点 $[x_i, g(x_i)]$, 由于 $F(x) = \ln f(x)$, 则有 $G(x) = \ln g(x)$, 设置目标函数为

$$M = \sum_{i=1}^n [G(x_i) - F(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [G(x_i) - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2)]^2 \quad (8)$$

根据最小二乘法原理, 令 $\frac{\partial G(x)}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial G(x)}{\partial a_1} = 0,$

$\frac{\partial G(x)}{\partial a_2} = 0$, 可得

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n G(x_i) \\ \sum_{i=1}^n x_i G(x_i) \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 G(x_i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

利用 Householder 变换对式 (9) 进行求解, 即可求得参数 a_0, a_1, a_2 , 进而解算出最终的光条中心点坐标, 为

$$x_c = -\frac{a_1}{2a_2} \quad (10)$$

结合上述高斯曲线拟合算法对光条中心线进行提取, 最终解算出整幅图像中光条的中心点坐标值。处理后的结构光光条如图 4 所示。

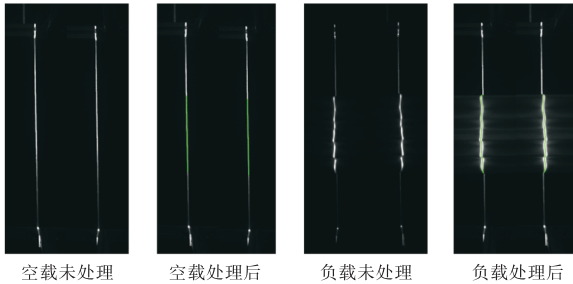


图 4 结构光光条图像

Fig. 4 Structure-light bar image

2.3 体积计算

渣土截面积示意图如图 5 所示。渣土表面存在不规则、不连续分布、空洞等非常规几何形状, 难以

通过点云坐标直接计算体积。排土量测量设备对空载输送带及负载输送带上渣土的上表面进行扫描, 通过对输送带空载时的截面积 S_{emp} 和负载时的截面积 S_{load} 进行求差, 得到渣土某一时刻的截面积。

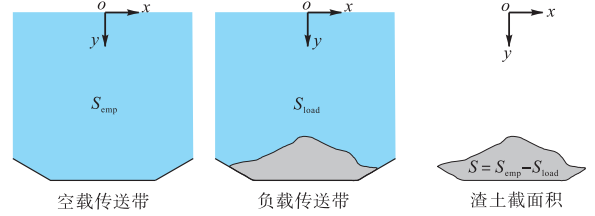


图 5 渣土截面积示意图

Fig. 5 Schematic diagram of soil cross-section area

通过将线性插值法与三次 B 样条插值法相结合的方式实现光条图像的轮廓拟合, 对光条断点进行处理, 进而获取更加平滑、连续的光条图像, 进一步提高光条中心线的提取精度。

线性插值拟合是根据两个已知的数据点计算两者之间的线性关系, 其计算公式为

$$L(x) = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (11)$$

三次 B 样条插值拟合通常由 $n+1$ 个插值点定义一个多项式, 进而拟合出经过所有插值点的曲线, 其表达式为

$$C(t) = \sum_{i=0}^3 p_i \cdot N_{i,k}(t) \quad (12)$$

式中: $t \in [0, 1]$, $p_i (i=0, 1, \dots, n)$ 代表第 i 个插值点, $N_{i,k}(t)$ 为 k 阶 B 样条基函数, 其表达式为

$$\begin{cases} N_{i,0}(t) = \begin{cases} 1, t \in [t_i, t_{i+1}] \\ 0, t \notin [t_i, t_{i+1}] \end{cases} \\ N_{i,k}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k} - t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k+1} - t}{t_{i+k+1} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t), k > 0 \end{cases} \quad (13)$$

根据 $n+1$ 个插值点 p_i , 每相邻 4 个点可拟合出一条三次 B 样条曲线, 表达式为

$$Q_{i,3}(t) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i \\ p_{i+1} \\ p_{i+2} \\ p_{i+3} \end{bmatrix} \quad (14)$$

对式 (14) 进行改写, 即可求得第 i 段三次 B 样条曲线的方程, 为

$$\begin{cases} x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \end{cases} \quad (15)$$

将4个相邻点 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 的坐标代入式(15),即可求得

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{6}(x_0 + 4x_1 + x_2) \\ a_1 = -\frac{1}{2}(x_0 - x_2) \\ a_2 = \frac{1}{2}(x_0 - 2x_1 + x_2) \\ a_3 = -\frac{1}{6}(x_0 - 3x_1 + 3x_2 - x_3) \\ b_0 = \frac{1}{6}(y_0 + 4y_1 + y_2) \\ b_1 = -\frac{1}{2}(y_0 - y_2) \\ b_2 = \frac{1}{2}(y_0 - 2y_1 + y_2) \\ b_3 = -\frac{1}{6}(y_0 - 3y_1 + 3y_2 - y_3) \end{cases} \quad (16)$$

结合线性插值法和三次B样条插值法,通过设置间隔临界值 T 提高拟合精度和效率。相邻断点间隔距离超过临界值时,采用三次B样条插值,否则采用线性插值。该方法既保证了渣土轮廓拟合的精度,又兼顾了拟合运算的效率。

渣土截面积是排土量测量中的核心数据。计算渣土截面积时,基于积分思想,将整个截面积分成若干个小的测量单元,然后计算每个测量单元的面积,最后对测量单元的面积进行累加,即可求得整个截面积^[22]。渣土截面积计算模型如图6所示。

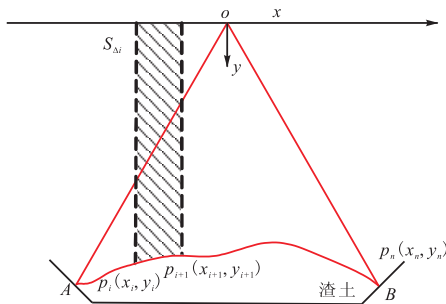


图6 渣土截面积计算模型

Fig. 6 Calculation model of soil cross-section area

利用积分公式对上述拟合函数进行积分运算,可求得该区域的截面积,为

$$S_{\Delta i} = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \quad (17)$$

对细分后的所有截面积进行累加,可求得该时刻扫描所得的截面积,为

$$S_{\text{load}} = \sum_{i=1}^{n-1} S_{\Delta i} \quad (18)$$

则当前时刻传送带上的渣土截面积可表示为

$$S = S_{\text{emp}} - S_{\text{load}} \quad (19)$$

设双目相机获取相邻图像之间的时间间隔为 t ,由编码器获取的传送带运行速度为 v ,则相邻两帧图像的获取时间间隔内传送带位移 l 即可表示为 $v \cdot t$ 。当求得上述两个连续时刻的渣土截面积 S_i 、 S_{i+1} 后,可求得在时间段内传送带上运输的渣土体积 V_i 。

$$V_i = \frac{(S_i + S_{i+1})}{2} l = \frac{(S_i + S_{i+1})}{2} v \cdot t \quad (20)$$

对一段时间内系统测量的体积微元 V_i 进行累加,即可获得总渣土体积 V 。

$$V = \sum_{i=1}^{n-1} V_i \quad (21)$$

3 实验验证

3.1 曝光度影响实验

在测量装置采集光条图像的过程中,相机的曝光度会对图像的成像质量造成一定影响,曝光度过低,所采集图像的细节不清晰;曝光度过高,会导致图像失真或缺失细节。本实验采用调整快门时间的方式对曝光度进行有效控制。

在实验过程中,传送带保持静止状态,将模型1置于双目相机视野范围内,并使线激光器发射的激光投射在模型1上,在 $100 \sim 1200 \mu\text{s}$ 范围内对相机的曝光时间进行调节。实验过程中左相机采集到的部分图像如图7所示。

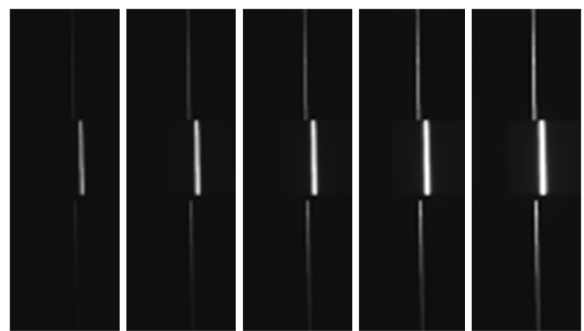


图7 不同曝光时间下的光条图像

Fig. 7 Images of light strips under different exposure times

通过对图像进行处理与计算,即可求得在不同曝光时间下的物体截面积,进而求得实测截面积($S_{\text{测}}$)与物体的真实截面积($S_{\text{真}}$)之间的相对误差值 λ 。

$$\lambda = \frac{S_{\text{测}} - S_{\text{真}}}{S_{\text{真}}} \quad (22)$$

模型1的 $S_{\text{真}}$ 为 $10\,000 \text{ mm}^2$,实验数据见表1。

表 1 不同曝光时间下物体截面积测量实验数据

Tab. 1 Experimental data for cross-section area measurement of objects under different exposure times

曝光时间/ μs	实测截面积/ mm^2	相对误差/%
100	9 850.11	-1.50
300	9 872.65	-1.27
500	9 892.18	-1.08
600	9 923.77	-0.76
700	9 932.64	-0.67
800	9 971.89	-0.28
900	10 023.02	0.23
1 000	10 087.65	0.88
1 100	10 102.75	1.03
1 200	10 143.09	1.43

由实验数据可知, 增加曝光时间, 实测截面积的相对误差绝对值先降后升。低曝光时间减少进光量, 图像边缘不清晰, 测量值偏小; 高曝光时间则导致图像失真, 光条轮廓发散, 测量值偏大。这些因素均影响计算稳定性。因此, 调整曝光时间可将相对误差控制在 1.5% 以下, 但需结合具体工况进行调整。

3.2 现场测试实验

某小型排土现场搭建的排土量测试实验平台如图 8 所示。

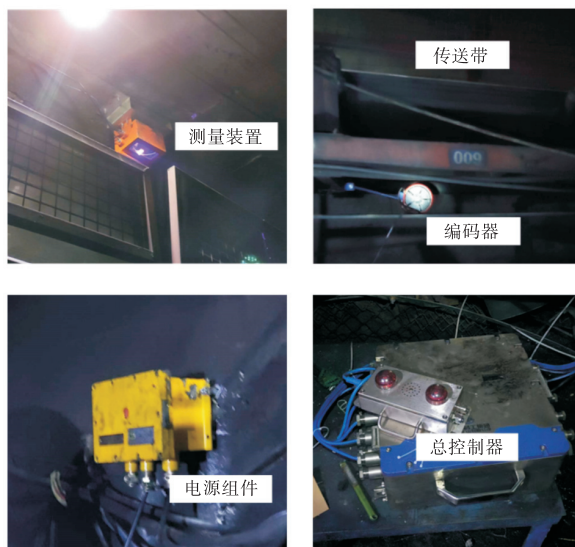


图 8 排土量测试实验平台

Fig. 8 Soil discharge measurement test bench

该设备中双目结构光视觉测量系统安装在传送带平面上方 800 mm 高度的位置。选取不同体积的渣土, 分 10 组用排水法进行测量。带式输送机型号为 US-52, 带面宽度为 0.6 m, 传送带运行速度最高为 1 m/s; 双目相机安装的基线距离为 160 mm。渣土体积测量数据见表 2。10 组渣土数据表明该系统在测试条件下相对误差低于 2.01%。

表 2 渣土体积测量数据

Tab. 2 Measurement data of soil volume

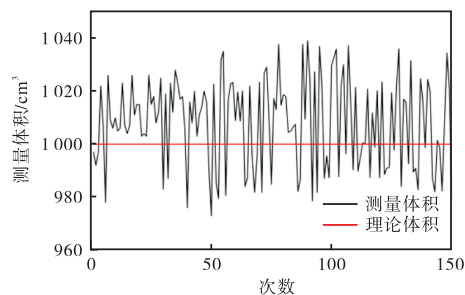
序号	测量值/ cm^3	理论值/ cm^3	误差/ cm^3	误差率/%
1	4 549.71	4 497.00	52.71	1.172
2	4 937.38	4 997.00	-59.62	-1.193
3	5 455.16	5 535.00	-79.84	-1.442
4	29 059.59	28 779.00	280.59	0.975
5	3 653.77	3 611.00	42.77	1.184
6	4 030.66	3 964.00	66.66	1.682
7	15 263.05	15 019.00	244.05	1.625
8	6 644.13	6 582.00	62.13	0.944
9	20 532.50	20 617.00	-84.50	-0.410
10	13 887.88	13 615.00	272.88	2.004

3.3 重复性精度实验

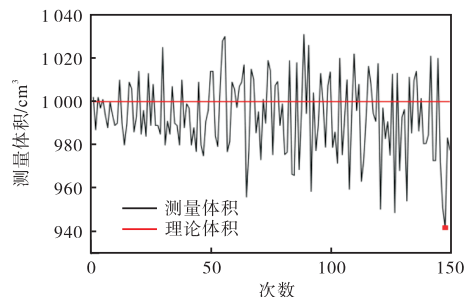
为进一步评估系统的检测性能, 进行重复性精度实验。选取体积为 $1\,000\text{ cm}^3$ (模型 1) 与 $2\,500\text{ cm}^3$ (模型 2) 的 3D 打印模型分别进行两组重复性精度实验。实验室环境中设置帧率为 200 帧/s, 其他参数与前文现场测试参数相同。在保证安全的前提下, 采用 0.280、0.515 m/s 两组速度重复测量两个模型各 150 次, 实验结果如图 9 所示。

实验数据表明, 在体积较小的模型 1 的测量结果中, 个别测量误差出现大于 5% 的情况, 这可能是体积过小、测量过程较短导致的。

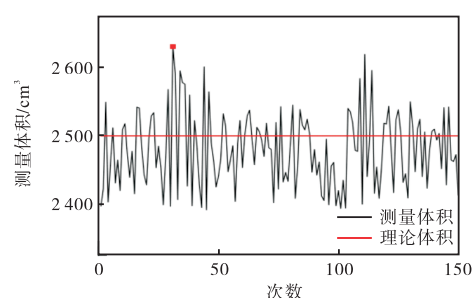
在传送带运行速度为 0.515 m/s 的条件下, 该系统测量 $2\,500\text{ cm}^3$ 标准体积模型的重复性测量误差小于 2.39%。因此, 系统的体积测量误差在可控范围内, 测量精度满足现场排土量测量需求。



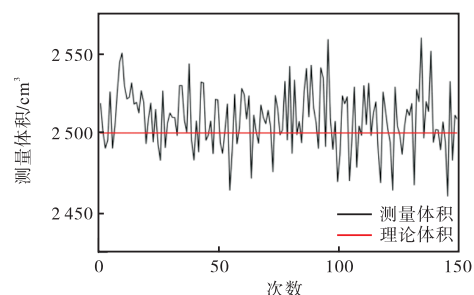
(a) 模型 1 (0.280 m/s)



(b) 模型 1 (0.515 m/s)



(c) 模型 2 (0.280 m/s)



(b) 模型 2 (0.515 m/s)

图 9 重复性测量实验结果

Fig. 9 Experimental results of repeatability measurement

4 现场应用

基于本文方法所研发的双目结构光视觉盾构排土量测量系统已经成功应用于某地铁施工现场, 现场安装示意图如图 10 所示, 现场环境中设置曝光时间为 $1\,000\,\mu\text{s}$, 帧率为 500 帧/s, 传送带速度为 4.9 m/s。

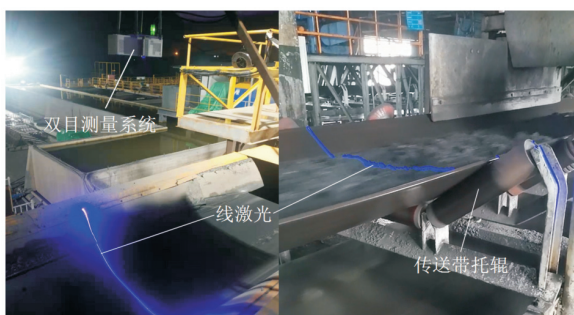


图 10 现场安装示意图

Fig. 10 Schematic diagram of on-site installation

现场测量结果见表 3。在测试的 8d 时间内, 累计测量渣土总体积为 $10\,726.8\,\text{m}^3$, 经过装车称量并去皮后得到现场实际渣土总质量为 $11\,285.26\,\text{t}$, 各车次的称量质量值与实际值的偏差在 5% 以下, 可以作为实际值参与测量精度分析。测得计算密度 (非渣土实际密度) 为 $1.052\,\text{t}/\text{m}^3$, 现场测量结果见表 3。该系统相对误差不高于 3.11%, 能够满足现场排土量测量需求。

表 3 现场测量结果

Tab. 3 On-site measurement results

序号	测量体积/ m^3	质量/t		误差/t	误差率/%
		计算值	实际值		
1	1 660.4	1 746.80	1 740.30	-6.40	-0.37
2	924.4	972.50	999.56	27.06	2.71
3	1 622.4	1 706.90	1 759.32	52.52	2.99
4	571.1	600.80	617.80	17.00	2.75
5	897.4	944.10	959.54	15.54	1.62
6	1 698.8	1 787.20	1 751.18	-36.02	-2.06
7	1 658.6	1 744.90	1 692.36	-52.44	-3.10
8	1 693.7	1 781.90	1 765.20	-16.50	-0.93

产生现场排土量测量误差的主要原因包括: 传送带运行时产生的振动通过岩壁传递到固定在岩壁顶端的测量设备, 影响测量设备的稳定性; 隧道断面的实际形状和尺寸差异较大, 导致测量系统需适应不同的测量距离和角度。

5 结 语

针对现有带式输送机渣土体积测量技术, 本文提出基于双目视觉与线结构光的盾构排土量测量方法。该方法融合机器视觉法和激光测量法的部分优势, 将线结构光引入双目视觉系统, 通过处理线结构光成像光条, 计算三维坐标点, 获取点云数据。通过结合渣土截面积与里程计数据实现体积测量。该系统在实验室条件下相对误差小于 2.01%, 在传送带运行速度为 0.515 m/s 条件下测量 $2\,500\,\text{cm}^3$ 标准体积模型的相对重复性测量误差小于 2.39%, 工程现场测量相对误差不高于 3.11%。基于本方法所开发的设备在现场应用过程中, 受盾构环境影响较小, 测量精度较高, 满足现场排土量测量的使用要求。

本文设计系统的不足之处在于未考虑设备振动对测量精度的影响, 以及未选取不同距离和角度进行实验, 以评定更广泛测量条件下系统的适用性。在后续的研究中, 将进一步结合该系统实现传送带智能调速控制, 围绕提升系统的功能性和适用性开展工作, 如增加减振装置、更换工业防抖相机、拓展测量范围、提高测量精度等, 以适应不同的运输需求; 实现防尘、防水、防抖的结构, 保证设备在长期使用中不受粉尘、污泥、设备振动等干扰因素的影响。

参考文献:

- [1] CHEN R P, ZHANG P, KANG X, et al. Prediction of
(下转第 80 页)

- 45(2):229-241.
- [14] 刘祖润, 陈志飞, 李仁发. 具有非线性参数扰动的时滞控制系统鲁棒稳定性[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19(2):165-168.
- [15] KHARRAT D, GASSARA H, HAJJAJI A E, et al. Adaptive fuzzy observer-based fault-tolerant control for Takagi-Sugeno descriptor nonlinear systems with time delay[J]. Circuits, systems, and signal processing, 2018, 37(2):1542-1561.
- [16] 王铁超, 佟绍成. 一类不确定非线性系统的执行器故障模糊容错控制[J]. 模糊系统与数学, 2011, 25(2):93-105.
- [17] 余莉, 罗洪林. 具有时变时滞的离散 T-S 模糊随机系统的耗散性分析[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(2):7-13.

责任编辑: 周建军

(上接第 72 页)

- maximum surface settlement caused by earth pressure balance (EPB) shield tunneling with ANN methods[J]. Soils and foundations, 2019, 59(2):284-295.
- [2] ZHANG C, FU J Y, YANG J S, et al. Formulation and performance of grouting materials for underwater shield tunnel construction in karst ground[J]. Construction and building materials, 2018, 187:327-338.
- [3] 李建斌. 我国掘进机研制现状、问题和展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6):877-896.
- [4] 周奇才, 沈鹤鸿, 赵炯, 等. 基于排土量与注浆量的盾构施工地表沉降预测[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(5):457-461.
- [5] HU X Y, HE C, PENG Z Z, et al. Analysis of ground settlement induced by earth pressure balance shield tunneling in sandy soils with different water contents[J]. Sustainable cities and society, 2019, 45:296-306.
- [6] 白永学. 富水砂卵石地层盾构施工诱发地层塌陷机理及对策研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [7] 吴昌胜, 朱志铎. 软土地层盾尾注浆压力引起的地面隆起分析[J]. 隧道建设, 2017, 37(9):1114-1119.
- [8] 初琦. 带式输送机动态称重检测理论与试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [9] LI B Y, LI Y X, WANG H T, et al. Compensation of automatic weighing error of belt weigher based on BP neural network[J]. Measurement, 2018, 129:625-632.
- [10] 王才东, 刘丰阳, 李志航, 等. 基于双目视觉特征点匹配的图像拼接方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12):357-365.
- [11] 罗久飞, 邱广, 张毅, 等. 基于自适应双阈值的 SURF 双目视觉匹配算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3):240-247.
- [12] 窦猛. 带式输送机煤流视觉检测与节能控制系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [13] 顾振. 基于深度学习的带式输送机煤流量视觉测量研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [14] LEE K, KI H. Femtosecond laser patterning based on the control of surface reflectance[J]. Applied surface science, 2019, 494:187-195.
- [15] 商学建. 基于激光扫描的移动破碎线物料高度及体积检测技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [16] 王付利, 王建鑫, 朱国力. 基于激光雷达的土压平衡盾构出渣量动态测量系统[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊2):494-501.
- [17] 姜玉峰, 张立亚, 李标, 等. 基于单线激光雷达的带式输送机煤流量检测研究[J]. 煤矿机械, 2022, 43(8):151-153.
- [18] 胡而已. 融合激光扫描与机器视觉的煤流量测量研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11):146-151.
- [19] 曾超, 王少军, 卢红, 等. 线结构光光条中心提取算法[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(10):1772-1780.
- [20] 卢红阳, 刘且根, 熊娇娇, 等. 基于最大加权投影求解的彩色图像灰度化对比度保留算法[J]. 自动化学报, 2017, 43(5):843-854.
- [21] ZHU C, TIAN K Y, GAO Y, et al. Accurate extraction of line-structured optical stripe centerlines under low exposure[C]// SPIE. Proceeding of MIPPR 2023: Pattern Recognition and Computer Vision. Wuhan: SPIE, 2024: 130860A.
- [22] 相健. 基于多传感器的盾构排土量实时测量技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.

责任编辑: 周建军