

文章编号: 1671-7449(2026)03-0382-09

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(3): 382-390.

基于线结构光的电梯曳引轮磨损检测系统设计

常帅¹, 寇彦飞^{1*}, 吴尚兵², 李红昌³, 龚楠³, 焦少妮⁴, 孙南⁵

(1. 中北大学机械工程学院, 山西太原 030051; 2. 宁夏特种设备检验检测研究院, 宁夏银川 750001;

3. 西安特种设备检验检测院, 陕西西安 710061; 4. 太原理工大学机械工程学院, 山西太原 030024;

5. 陕西省特种设备检验检测研究院, 陕西西安 710001)

摘要: 为了解决传统电梯曳引轮检测方法效率低下、精度不足, 其他检测方法存在成本较高, 对油污、杂光等环境适应性较差等问题, 设计了一套基于线结构光的电梯曳引轮磨损检测系统。先对系统进行相机标定和光平面标定, 接着使用工业相机对线结构光发射器照射在电梯曳引轮绳槽中的形变结构光条图像进行采集, 使用改进的灰度重心法对光条中心线进行提取, 提取完后对区域内光条上各点的三维坐标进行极值点的筛选, 最后, 对极值点的坐标信息进行分析 and 处理, 从而实现对绳槽深度的实时计算。实验证明该系统能够对绳槽磨损情况进行非接触式检测, 且受油污等因素影响较小, 精度可达0.1 mm, 具有较高的实用性和可靠性。

关键词: 线结构光; 曳引轮磨损检测; 自适应阈值分割; 灰度重心法; 非接触式检测

中图分类号: TU857

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026023

引用格式: 常帅, 寇彦飞, 吴尚兵, 等. 基于线结构光的电梯曳引轮磨损检测系统设计[J]. 测试技术学报, 2026, 40(3): 382-390.

CHANG Shuai, KOU Yanfei, WU Shangbing, et al. Design of elevator traction wheel wear detection system based on linear structured light[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(3): 382-390.

Design of Elevator Traction Wheel Wear Detection System Based on Linear Structured Light

CHANG Shuai¹, KOU Yanfei^{1*}, WU Shangbing², LI Hongchang³, GONG Nan³,

JIAO Shaoni⁴, SUN Nan⁵

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Ningxia Special Equipment Inspection and Testing Institute, Yinchuan 750001, China;

3. Xi'an Special Equipment Inspection Institute, Xi'an 710061, China;

4. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

5. Shaanxi Special Equipment Inspection and Testing Institute, Xi'an 710001, China)

Abstract: To solve the problems of low efficiency and insufficient accuracy of traditional elevator traction wheel detection methods, and the fact that other detection methods have high cost and poor adaptability to the

【收稿日期】2025-05-13

【基金项目】山西省研究生教育创新计划(2024SJ253); 山西省科技成果转化引导专项(202304021301029); 宁夏市场监督管理局科技计划项目(2024SJKY0007); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2024BEG02035); 陕西省市场监督管理系统科技研发项目(2024KY26)

【作者简介】常帅(1999—), 男, 硕士生, 主要从事机械工程研究。E-mail: 15235156456@163.com。

*【通信作者】寇彦飞(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事机电液设备监测与控制, 检测仪器及自动化相关研究。E-mail: kouyanfei@163.com。

environments such as oil pollution and stray light, a set of elevator traction wheel wear detection system based on linear structured light is designed in this paper. Firstly, the system is calibrated by camera and light plane, and then the deformation structured light strip image irradiated by the line structured light emitter irradiated in the rope groove of the elevator traction wheel is collected by the industrial camera, and the center line of the light strip is extracted by using the improved gray center of gravity method, and the three-dimensional coordinates of each point on the light strip in the area are screened after the extraction is completed, and then the coordinate information of the extreme point is analyzed and processed, so as to realize the real-time calculation of the depth of the rope groove. Through experiments, it is proved that the system can detect the wear of the rope groove in a non-contact manner, and the degree of oil pollution and other factors is small, and the accuracy can reach 0.1 mm, which has high practicability and reliability.

Key words: linear structured light; traction pulley wear detection; adaptive threshold segmentation; gray center of gravity method; non-contact detection

0 引言

目前,曳引式电梯作为高层建筑上重要的运输设备,保有量处于很高水平^[1]。这种电梯靠曳引轮轮槽与钢丝绳间的摩擦力提供动力,轮槽磨损到一定程度会改变电梯的曳引能力^[2],这种磨损如果不能及时被监测到并加以处理,轻则造成设备运行异常或出现噪声,重则造成电梯轿厢发生冲顶、蹲底等严重安全事故^[3]。

传统的电梯曳引轮绳槽磨损检测方法以人工为主,检测单个曳引轮可能需要 30 min 以上,不仅效率低下,而且受人为因素影响显著,检测精度难以保证。因此,学者们就电梯曳引轮绳槽磨损检测设备进行了大量研究。李继波等^[4]设计了一种电梯绳槽磨损量的测量仪器,但该装置为接触式测量,且测量方式为逐点测量,测量效率低下,难以满足快速、自动化的需求,且探头的磨损会影响测量的精度。张湘泽^[5]通过声发射信号对曳引轮磨损状态进行识别,但是采用声发射的方法仅能定性判断磨损状态,无法对磨损量进行量化,且电梯运行工况不同会导致声发射信号存在一定差异,使得该模型在其他电梯上的识别准确率难以保证。

目前现有的 3D 检测方法主要分为接触式和非接触式技术两种。接触式技术,如坐标测量机,具有高精度的优点,但效率较低,并且可能会损坏被检测物体。非接触式技术,如激光三角测量法、双目视觉和工业计算机体层摄影(Computerized Tomography, CT),可能会受到检测效率、使用成本和环境适应性的限制。结构光测量技术

作为一种先进的光学非接触式测量手段,因其具有非接触、结构原理简单、速度快、精度高、实时性强等优点,近年来在工业测量领域崭露头角,并得到了广泛的应用。闫光绪等^[6]针对小工件设计单目便携式测量系统,实现了快速非接触式三维测量,误差较小。刘今越等^[7]采用面结构光对切削刀具几何参数进行非接触式测量,能准确重建三维模型并反映表面缺陷。在对电梯曳引轮检测方面,林永森等^[8]基于线激光位移法,对电梯曳引轮绳槽的不均匀磨损进行检测,但其检测方法受环境光干扰较大,无法实现多种环境下的测量。

因此,本文设计了一套基于线结构光的电梯曳引轮磨损检测系统。该系统运用线结构光技术对曳引轮绳槽进行照射,并借助工业相机获取形变的光条图像,接着利用改进后的灰度重心法对获取的形变后光条进行中心线提取,获得点云数据后,再根据相机标定和光平面标定双重校准,对其坐标进行处理、分析和计算,从而解决传统方法在如油污、粉尘、杂光等复杂工业环境下检测的精度与效率问题,实现曳引轮绳槽深度的测量。

1 曳引轮磨损检测实验台搭建与标定

1.1 三维成像原理

线结构光系统主要由结构光发射器、工业相机和计算单元组成,在工业领域的应用非常广泛。其原理是结构光发射器发射出一条线状光束,产生一个光平面,当光平面照射到待测物体上时,在物体表面就会形成一条形变的光条。工业相机与发射器按照一定的角度进行安装,调试好拍照参数后,对物体表面的光条进行图像采集,利用

已知的光平面与相机之间的相对位置关系,结合三角测量原理^[9],通过几何计算和相机成像模型,便可利用物体表面光条上各点的三维坐标实现测量目的。

图 1 为三维成像原理示意图,其中, $X-Y-Z$ 为世界坐标系, $X_c-Y_c-Z_c$ 为相机坐标系, $u-v$ 为像素坐标系, $x-o-y$ 为图像坐标系, α 为结构光发射器和相机之间的夹角,本文中设置为 30° 。

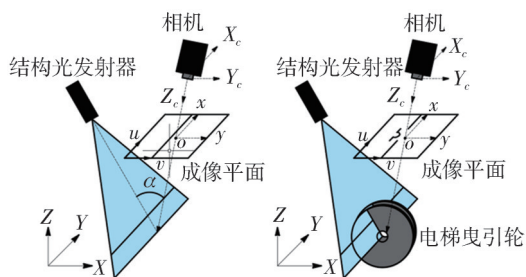


图 1 三维成像原理

Fig. 1 Principles of 3D imaging

1.2 实验台搭建

电梯曳引轮绳槽常见的槽型包括半圆槽、V形槽、带切口半圆槽以及带切口V形槽^[10]。本文以半圆槽轮为研究对象,建立检测系统,主要硬件由 CCD 工业相机、结构光发射器、计算机和支架组成,如图 2 所示。

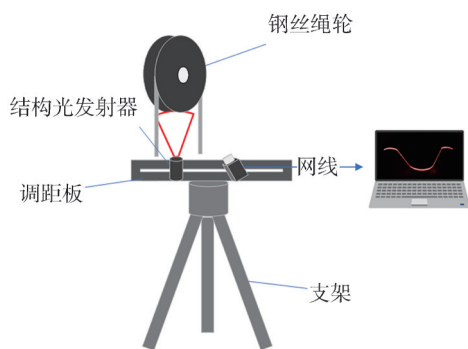


图 2 系统组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of system composition

系统中选择的工业相机为海康威视 MV-CU060-10GC 型号彩色面阵工业相机,参数为:像元尺寸 $2.4 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$, 600 万像素 $1/1.8''$ CCD, 千兆以太网连接, 全局快门, 分辨率为 3072×2048 。镜头选用海康威视 MVL-HF03524M-MP 型号 600 万分辨率 FA 镜头, 焦距 6 mm, 手动调整光圈。结构光发射器选择 MTO-laser 品牌 M-16A648-(10-150)-GLX 型号发射器, 功率 150 mW, 波长 648 nm, 线性为红色一字

线, 手动调焦。工业相机通过网线与计算机连接。支架选择三脚架, 搭配 360° 旋转台以及 400 mm 调距板。由于本文选择的实验对象尺寸较小, 并且无钢丝绳的影响, 因此, 支架选择侧放位置, 在对电梯进行检测的实际情况下, 可选择将支架固定在电梯曳引轮下方, 并对相机与结构光发射器之间的距离、角度进行调整。图 3 即为搭建的实验台。

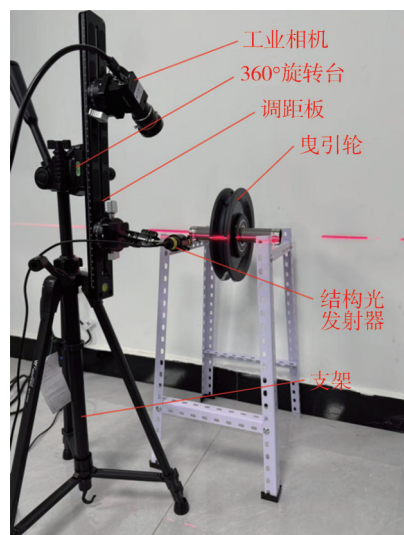


图 3 现场实验图

Fig. 3 Diagram of field experiment

本文提出的电梯曳引轮绳槽磨损检测算法处理流程如图 4 所示。在对图像进行处理前, 需进行系统标定, 成像参数作为像素坐标与世界坐标的转换桥梁, 其精确获取依赖于系统标定, 即通过相机与光平面的标定实验来确定相机参数和光平面方程, 随后利用改进的灰度重心法对采集到的形变光条图像进行中心线提取, 结合标定结果, 便可得到中心线上各点的三维坐标^[11]。对所有的点云坐标进行极值点的筛选, 通过计算可求出曳引轮绳槽的深度, 达到测量目的。

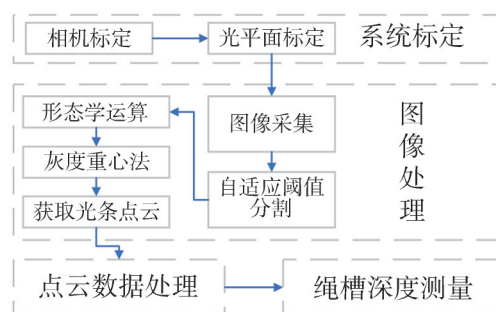


图 4 算法处理流程

Fig. 4 Algorithm processing flow

1.3 相机内外参标定

相机标定一般使用棋盘格标定板进行内外参标定实验,棋盘格标定板如图 5 所示。

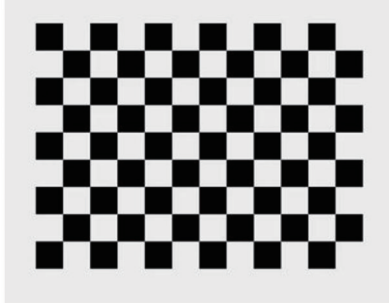


图 5 棋盘格标定板

Fig. 5 Checkerboard calibration board

根据相机成像原理,从二维坐标转换到三维坐标涉及到世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系、像素坐标系 4 个坐标系之间的转化。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + T \Rightarrow \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [t], \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中,物体上一点在世界坐标系下的坐标为 (X, Y, Z) ,通过式(1)转换到相机坐标系下的坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) ,通过式(2)可转换到图像坐标系下的坐标为 (x, y) , f 为焦距,通过式(3)可转换到像素坐标系下的坐标为 (u, v) , (u_0, v_0) 为图像坐标系原点在像素坐标系下的坐标, dx 和 dy 为像素与mm之间的转化关系。联立上述三式,可得

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $f_x = \frac{f}{dx}, f_y = \frac{f}{dy}$,最终完成二维坐标到三维坐标的转换; A 为相机内参; r_1 与 r_2 为旋转矩阵 R 的列向量, R 与平移向量 T 为相机外参^[12]。本文利用 Matlab 的 Camera Calibrator 工具箱对相机进行标定,将标定板按照 5 个不同的位置和角度进行放置,随后调整相机的拍照参数,采集 5 幅图片,图 6 为标定板相对于相机的位姿图。

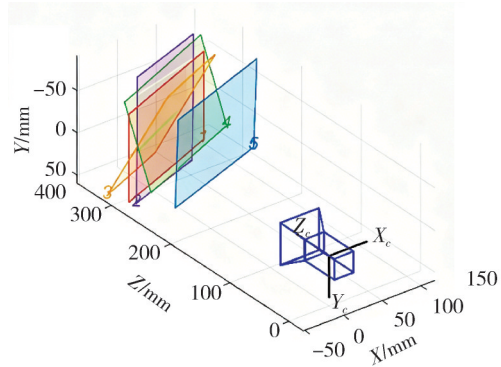


图 6 标定位姿结果

Fig. 6 Pose estimation result

最后求得相机内参为

$$A = \begin{bmatrix} 2610.43 & 0 & 1599.82 \\ 0 & 2610.12 & 997.86 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

1.4 光平面标定

光平面标定是基于线结构光的三维测量系统中另一个不可或缺的步骤。相机标定虽然可以实现二维坐标与三维坐标之间的转换,但无法保证所求点位于结构光发射器所照射的光平面上。结合光平面标定,能够进一步将这些点的三维坐标校正到光平面上,从而提高测量精度^[13]。

在进行光平面标定时,需拍摄多张不同相对位置的标定板图像以及开启结构光后的标定板图像,如图 7 所示。

具体步骤如下:

- 1) 在任意位置拍摄一张标定板的图像;
- 2) 开启结构光发射器,并调整曝光和增益参数,在相同位置拍摄一张结构光照射在标定板上的图像;
- 3) 改变棋盘格标定板的角度和位置,再次重复上述步骤 4 次;
- 4) 对 5 条结构光中心线利用最小二乘法进行光平面拟合。

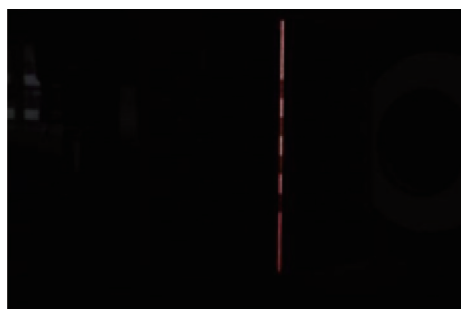
最后,求解出的光平面方程为

$$z = -1.81x - 0.03y + 354.73. \quad (6)$$

拟合出的光平面如图 8 所示。



(a) 位置1标定板



(b) 位置1结构光照射标定板

图7 光平面标定实验图

Fig. 7 Diagram of optical plane calibration experiment

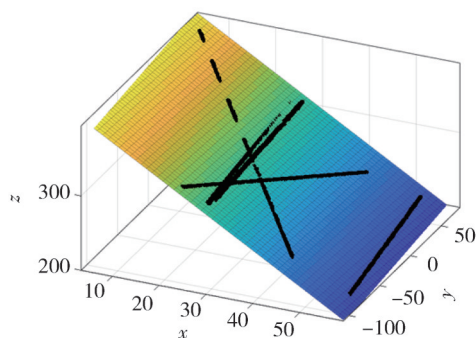


图8 拟合出的光平面

Fig. 8 Fitted light plane

2 图像采集处理及算法分析

2.1 图像采集处理

采集图片时,为了保证精度,需要调整支架高度以使结构光线尽可能水平照射在曳引轮的直径上。随后,利用计算机的MVS软件调整相机的曝光时间及增益参数,并进行图像拍摄,拍摄原图如图9所示。

首先,对图片进行感兴趣区域(Region of Interest, ROI)选择,尽可能使ROI区域贴合结构光线区域。为便于对本次实验的黑色尼龙材质曳引轮绳槽中的结构光进行中心线提取,先对拍摄的光条图像做灰度处理,再进行RGB图层分量处

理。通常,彩色图像由红(R)、绿(G)、蓝(B)3个颜色通道构成^[14]。

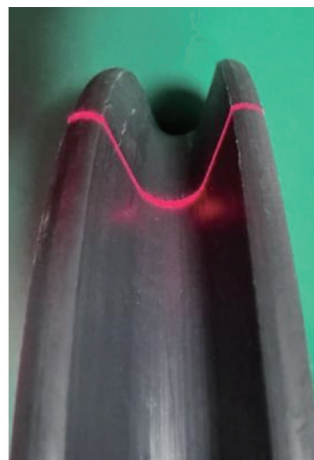
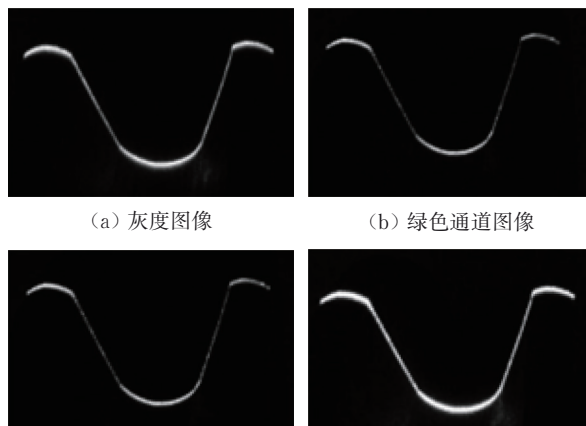


图9 拍摄原图

Fig. 9 Original image

由于本次实验采用的结构光线为红色,所以后续分析选用分解后的红色通道图像,图10为经灰度及RGB分离处理后的图片。



(a) 灰度图像

(b) 绿色通道图像

(c) 蓝色通道图像

(d) 红色通道图像

图10 RGB分离结果

Fig. 10 RGB separation results

2.2 自适应光条中心线提取

检测现场复杂的环境条件,比如阳光散射、曳引轮表面油污及粉尘附着,会导致结构光条灰度分布不均匀、边缘模糊甚至断裂,传统的灰度重心法难以满足检测需求。为此,本文提出一种融合动态阈值分割优化及形态学处理的灰度重心法的自适应光条中心线提取算法,以实现复杂场景下光条中心线的提取。

动态阈值分割是根据所采集图像的各个列的灰度分布确定的。先将ROI区域划分为 3×3 像素的子块,然后逐个对灰度均值(μ)和标准差(σ)进

行计算。

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N G(i, j)}{N}, \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (G(i, j) - \mu)^2}{N}}, \quad (8)$$

式中: N 为子块内像素的总数; $G(i, j)$ 为坐标 (i, j) 处的像素灰度值。

$$T = \mu - k\sigma, \quad (9)$$

式中: k 为波动系数, 可根据实际效果进行调整, 本文取 1.5; T 为求出的分割阈值, 每个区域都按照各自的阈值进行分割^[15]。

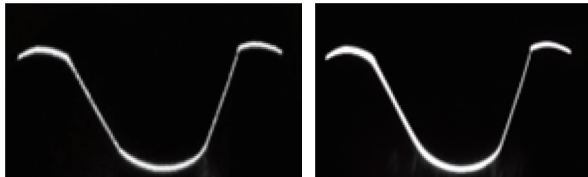
经过阈值分割处理后, 受油污等干扰因素影响, 图像还会存在一些断裂和噪点问题, 需要通过形态学运算进行处理。形态学运算主要分为开运算与闭运算, 所谓开运算, 就是先腐蚀后膨胀, 可以去除光条周围因相机本身噪声或油污反光而产生的孤立亮点; 闭运算是先膨胀后腐蚀, 能够修复例如粉尘遮挡导致的断裂问题。本文采取先闭后开的方式对瑕疵点进行处理, 之后进行中心线提取。

在众多结构光中心线提取算法中, 比较常见的有极值法、灰度重心法和 Hessian 矩阵法 3 种。考虑到灰度重心法提取结构光中心线时运算速度快、实时性好, 将阈值分割后的图像利用灰度重心法对光条中心线进行提取。灰度重心法的计算公式为^[16]

$$\begin{cases} u_j = j, \\ v_i = \frac{\sum_i i G^*(i, j)}{\sum_i G^*(i, j)}, \end{cases} \quad (10)$$

式中: $G^*(i, j)$ 为处理后图片的光条纹图像中第 i 行和第 j 列的灰度值; (u_j, v_i) 为最后所求的中心坐标^[17]。

图 11 为 R 通道图像经过动态阈值分割法和形态学运算处理前后的图像。

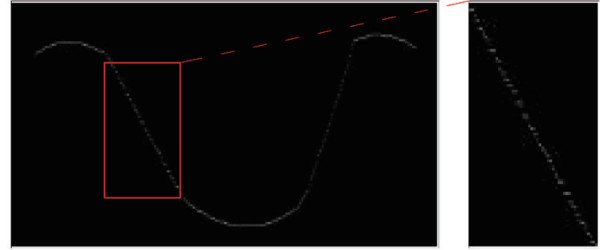


(a) 处理前 (b) 处理后

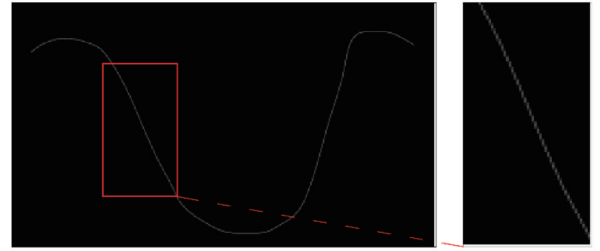
图 11 R 通道图像处理前后对比图

Fig. 11 Comparison of R-channel image before and after processing

按照上述两幅图片分别提取出的中心线如图 12 所示, 可以看到经过处理后的图片提取出的中心线更连续平滑。



(a) 处理前



(b) 处理后

图 12 算法处理前后中心线对比图

Fig. 12 Comparison diagram of center line before and after algorithm processing

2.3 点云分析处理

由于每个光条的中心线是由无数个点组成的, 所以求出光条的中心线后, 结合之前的相机标定及光平面标定结果, 每个点的空间三维坐标已知。

若要求出绳槽深度尺寸, 需要找出结构光线上三维距离最大的两个点, 即图 13 中的 A、B 点。

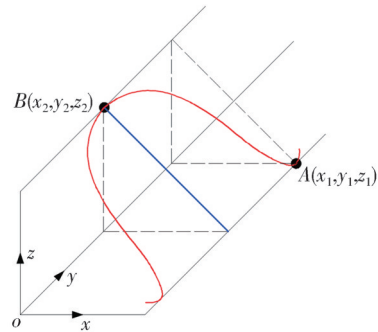


图 13 绳槽深度检测原理图

Fig. 13 Schematic diagram of rope groove depth detection

遍历所有筛选后的点云坐标, 以 A、B 两点的 x 和 z 坐标差值为底和高的直角三角形斜边长即为轮槽的深度 h 。

$$h = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (11)$$

3 绳槽深度检测实验

3.1 深度检测实验

本次实验采用粘贴塑料片的形式代表曳引轮绳槽的不同深度情况, 曳引轮绳槽原深度为

20 mm, 塑料片厚度有0.5、1、2.5 mm 3种, 假设无粘贴为工况一, 粘贴0.5 mm塑料片为工况二, 粘贴1 mm塑料片为工况三, 粘贴2.5 mm塑料片为工况四, 图14分别为4种工况的实验图。

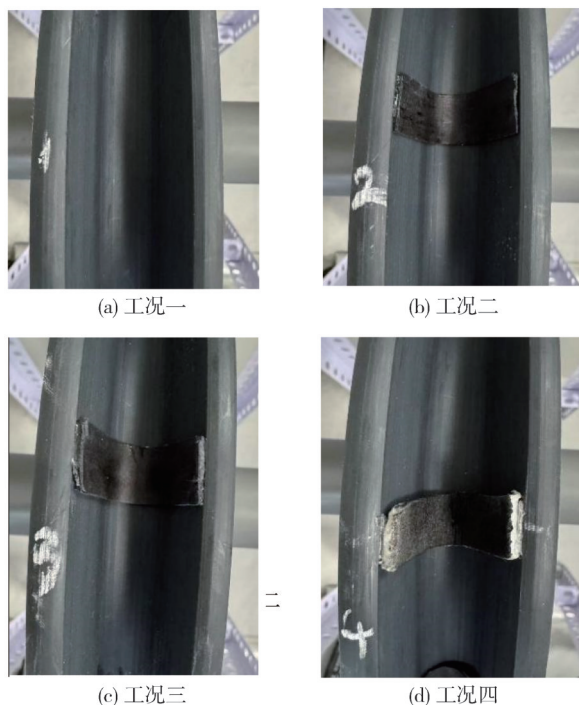


图14 绳槽深度检测实验图

Fig. 14 Experimental diagram of rope groove depth detection

对上述4种工况按照上文中的检测流程分别进行5次实验, 测量出的结果如表1。对5次测量值取平均值, 分别为20.042 0、19.496 7、19.025 6和17.533 4 mm。

表1 线结构光测量结果

Tab. 1 Linear structured light measurement results

	测量值/mm				
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
工况一	19.937 6	19.925 5	20.268 9	19.932 4	20.145 7
工况二	19.487 5	19.493 3	19.502 7	19.501 6	19.498 5
工况三	19.085 2	19.092 4	18.995 5	18.952 3	19.002 5
工况四	17.486 5	17.532 6	17.623 6	17.475 3	17.548 8

3.2 油污干扰实验

为接近真实情况下的检测, 本文设置了工况五, 在钢丝绳轮上涂抹机油以及粉尘来模拟真实油污, 如图15所示。

可以看到油污的存在会对光条纹造成反射和边缘粗糙, 从而影响中心线的提取。故在图像处理前, 首先进行ROI区域的选择, 尽可能规避反射部分的影响, 接着利用1.3中提到的自适应光

条中心线提取算法进行处理, 减小油污的干扰, 处理后的光条纹图片和中心线图片如图16所示。

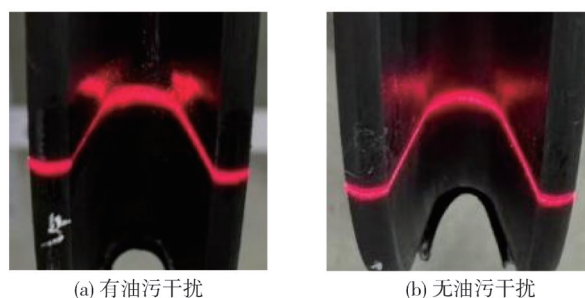


图15 油污对实验造成影响图

Fig. 15 Diagram of influence of oil contamination on the experiment

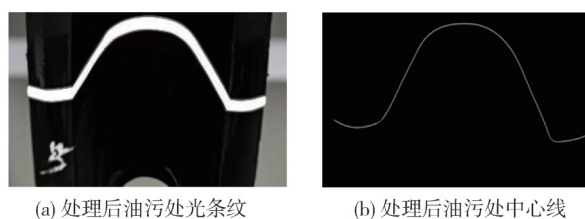


图16 处理后油污处提取结果

Fig. 16 Extraction results of oil-contaminated areas after processing

对上述工况五进行5次实验, 测出的结果如表2所示。对5次测量值取平均值, 结果为19.989 3 mm。

表2 油污处线结构光测量结果

Tab. 2 Measurement results of line structured light in oil-contaminated areas

	测量值/mm				
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
工况五	19.996 8	19.987 7	20.028 3	19.932 4	20.001 4

3.3 测量结果验证

为了对本系统计算的曳引轮绳槽深度进行验证, 本文采用深度尺进行测量验证。深度尺精度可达到0.1 mm, 可以测量0~30 mm内的深度。

图17为5种工况手工测量图片, 由于手工测量可能存在左右偏差, 所以分别对5种工况进行5次测量, 测量结果如表3。

同样对5次手工测量结果取平均值, 5种工况测量值分别为20.06、19.46、18.98、17.50和19.96 mm。与线结构光测量结果平均值20.042 0、19.496 7、19.025 6、17.533 4和19.989 3 mm对比后, 可判定本系统测量精度可达到0.1 mm。

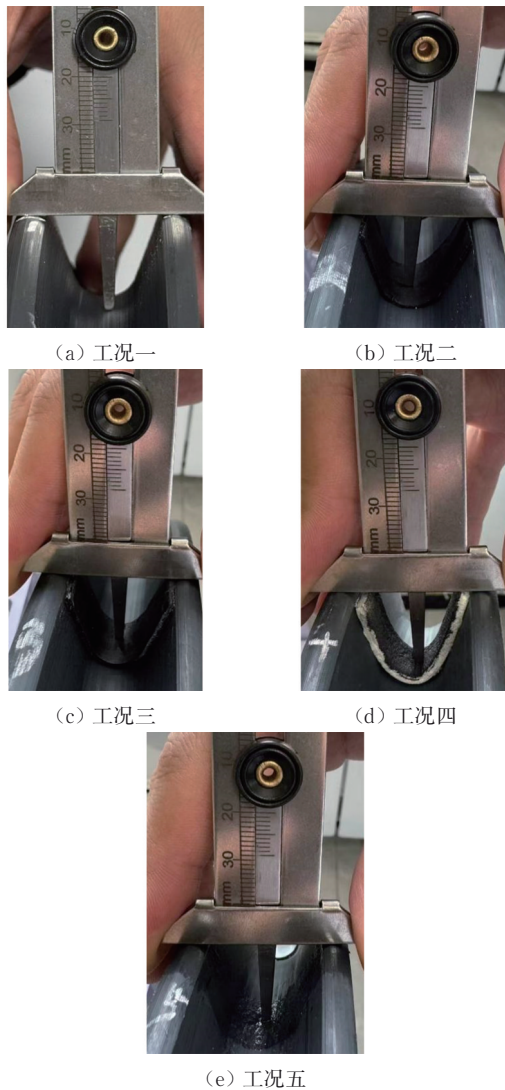


图 17 绳槽深度验证实验图

Fig. 17 Experimental diagram of rope groove depth verification

表 3 深度尺手工测量结果

Tab. 3 Depth gauge manual measurement results

	测量值/mm				
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
工况一	20.4	20.2	19.9	20.0	19.8
工况二	19.6	19.5	19.2	19.5	19.5
工况三	18.9	18.9	19.0	19.1	19.0
工况四	17.4	17.6	17.7	17.4	17.4
工况五	20.1	20.1	19.9	19.8	19.9

4 结 论

本文针对传统的电梯曳引轮检测方法效率低下、精度不足,其他检测方法存在成本较高,对油污、杂光等环境适应性较差等问题,设计了一套基于线结构光的非接触式磨损检测系统。通过相机标定与光平面双重标定建立了精确的三维坐标转换模型,结合自适应光条中心线提取算法快速

提取绳槽内形变的光条中心线,随后对中心线上的点云数据进行处理与计算,得出曳引轮绳槽深度。实验结果表明,该方法受油污干扰程度较小,且测量精度可达0.1 mm,具有较高的实用性和可靠性。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 恩旺, 刘子金, 张森. 中国电梯行业的技术发展与趋势[J]. 建筑科学, 2018, 34(9): 110-118.
EN Wang, LIU Zijin, ZHANG Miao. Technical development and trend of elevator industry in China [J]. Building Science, 2018, 34(9): 110-118. (in Chinese)
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 电梯监督检验和定期检验规则—曳引与强制驱动电梯: TSG T7001—2009[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2023.
- [3] 陈建勋, 梁敏健, 关成文. 电梯曳引轮曳引能力与绳槽磨损深度关系研究[J]. 机电工程技术, 2021, 50(6): 65-67.
CHEN Jianxun, LIANG Minjian, GUAN Chengwen. Research on the relationship between the traction capability and traction wheel groove wear depth of elevator [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(6): 65-67. (in Chinese)
- [4] 李继波, 李文鹏. 电梯曳引轮绳槽磨损量测量仪的研制[J]. 起重运输机械, 2017(1): 71-74.
LI Jibo, LI Wenpeng. Research and manufacture of wear gauge for traction sheave rope-groove of lift [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2017(1): 71-74. (in Chinese)
- [5] 张湘泽. 基于声发射特征的电梯曳引轮磨损识别方法[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
- [6] 闫光绪, 贺赛先. 基于单目便携式激光扫描的小工件测量[J]. 应用激光, 2020, 40(2): 315-322.
YAN Guangxu, HE Saixian. Measurement of small workpiece based on monocular portable laser scanning [J]. Applied Laser, 2020, 40(2): 315-322. (in Chinese)
- [7] 刘今越, 刘佳斌, 贾晓辉, 等. 基于面结构光投影法的刀具几何参数测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1276-1284.
LIU Jinyue, LIU Jiabin, JIA Xiaohui, et al. Research on tool geometry parameter measurement based on sur-

- face structured light projection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1276-1284. (in Chinese)
- [8] 林永森, 陈建勋. 基于线激光位移法的电梯曳引轮轮槽不均匀磨损检测研究[J]. 西部特种设备, 2021, 4(2): 40-43.
- LIN Yongsen, CHEN Jianxun. Research on line laser displacement based inspection for the uneven wear of elevator traction wheel [J]. Western Special Equipment, 2021, 4(2): 40-43. (in Chinese)
- [9] 徐万和, 李忠新, 吴志, 等. 基于激光三角测量原理的自动机运动测试方法[J]. 测试技术学报, 2010, 24(3): 215-218.
- XU Wanhe, LI Zhongxin, WU Zhi, et al. Motion test method based on laser triangulation measurement principle for automatic mechanism [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2010, 24(3): 215-218. (in Chinese)
- [10] 刘士兴, 马登科, 刘光柱. 基于机器视觉的曳引轮磨损检测方法研究[J]. 中国测试, 2022, 48(6): 26-31.
- LIU Shixing, MA Dengke, LIU Guangzhu. Research on detection method of traction sheave wear based on machine vision [J]. China Measurement & Test, 2022, 48(6): 26-31. (in Chinese)
- [11] WANG Z, WANG E, ZHU Y. Image segmentation evaluation: a survey of methods [J]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53(8): 5637-5674.
- [12] GUO X, SHI Z, YU B, et al. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor [J]. Precision Engineering, 2020, 61: 160-169.
- [13] 史浩. 基于单线结构光的焊缝三维测量系统研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2024.
- [14] 李瑶, 涂兴子, 吴娟, 等. 基于线结构光的天轮偏摆监测机器视觉系统设计 [J]. 煤炭工程, 2020, 52(5): 178-182.
- LI Yao, TU Xingzi, WU Juan, et al. Design of machine vision system for head sheave deflection monitoring based on linear structured light [J]. Coal Engineering, 2020, 52(5): 178-182. (in Chinese)
- [15] 陈潇. 基于动态阈值分割法的接触轨图像关键特征点提取方法研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2024(5): 53-58.
- CHEN Xiao. Research on key feature point extraction method for contact rail images based on dynamic threshold segmentation method [J]. Modern Urban Transit, 2024(5): 53-58. (in Chinese)
- [16] 许磊, 庞茂. 基于结构光的轮胎花纹深度测量系统研究 [J]. 激光杂志, 2022, 43(3): 179-183.
- XU Lei, PANG Mao. Research on tire tread pattern depth measurement system based on structured light [J]. Laser Journal, 2022, 43(3): 179-183. (in Chinese)
- [17] XU X, FEI Z, TAN Z, et al. Improved calibration method based on the RANSAC approach and an improved gray centroid method for a laser-line-based structured light system [J]. Applied Optics, 2019, 58(35): 9603-9613.