

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307102

基于线阵相机/扫描仪的轨交隧道病害检测系统设计实现*

石 波¹ 王慧超¹ 杨晓磊² 李国玉² 赵 凯¹ 王 聪¹ 杨 密¹ 林 康¹
(1. 山东科技大学测绘与空间信息学院 青岛 266590; 2. 青岛秀山移动测量有限公司 青岛 266590)

摘 要:隧道维护可以避免隧道病害引发的安全事故,有效的维护依赖于全面和准确的隧道病害检测。传统的隧道病害检测依靠人工巡检,受隧道照明不足、检测时间短等因素的影响,检测效率低下且准确率低。针对这些隧道病害检测中的难题,根据轨交隧道结构均匀、轨道线路固定的特点设计了轨交隧道病害检测系统。系统将激光扫描技术与摄影测量技术相结合,使用激光扫描仪获取隧道三维点云,使用多线阵相机获取隧道影像,借助激光跟踪仪并设计虚拟靶标场对相机和扫描仪进行标定使其坐标基准统一。系统采用分布式的软件架构研发数据采集软件进行传感器交互和数据存储,并采用外触发的方法使传感器采集频率与车速匹配,最后基于 Cesium 框架研发数据管理平台对隧道数据进行管理。将系统应用于某隧道进行数据精度验证,实验表明轨交隧道病害检测系统能够在实际隧道中检测宽度为 0.2 mm 的裂缝和错台量 0.5 mm 的错台,具备轨交隧道病害检测能力。最后,通过将实验采集到的数据应用于隧道裂缝检测、错台检测、变形检测等方面,并对检测出的病害进行定位,证明了轨交隧道病害检测系统的实用性,为轨交隧道病害检测提供了可靠的解决方案。

关键词: 隧道病害;隧道病害检测系统;系统集成;病害识别;病害定位

中图分类号: TN98;U231.94 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.60

Design and implementation of rail crossing tunnel disease detection system combined with linear array camera/scanner

Shi Bo¹ Wang Huichao¹ Yang Xiaolei² Li Guoyu² Zhao Kai¹ Wang Cong¹ Yang Mi¹ Lin Kang¹
(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. Qingdao Xiushan Mobile Measurement Co., Ltd., Qingdao 266590, China)

Abstract: Tunnel maintenance is crucial for averting safety incidents triggered by tunnel structural issues. Effective maintenance depends on thorough and accurate detection of tunnel diseases. Traditional methods of tunnel inspection rely on manual detection, which are hindered by factors like inadequate tunnel illumination and limited inspection time, leading to inefficiencies and inaccuracies. To tackle these challenges in tunnel disease detection, a subway tunnel disease monitoring system has been devised, taking into account the uniformity of tunnel structures and the fixed nature of track lines. This system integrates laser scanning technology with photogrammetry, employing laser scanners to capture three-dimensional point cloud data of tunnels and multi-line array cameras to obtain tunnel imagery. Laser trackers are utilized for calibrating the spatial coordinates of cameras and scanners to ensure a unified coordinate reference system. Adopting a distributed software architecture, the system develops data acquisition software for sensor communication and data storage. In addition, the system uses an external trigger mechanism to synchronize the sensor data acquisition rate with car speed. Finally, a data management platform, built upon the Cesium framework, is employed for the organization and manage of tunnel data. The system is applied to a tunnel to verify data accuracy. The experiment shows that the rail tunnel disease detection system can detect cracks with a width of 0.2 mm and misalignment with a size of 0.5 mm in the actual tunnel, and has the disease detection ability of subway tunnel. Finally, by applying the data collected in the experiment to tunnel crack detection, misalignment detection, deformation detection, etc., and locating the detected diseases, the practicability of the rail tunnel disease detection system is proved, and a reliable solution is provided for the subway tunnel disease detection.

Keywords: tunnel disease; tunnel disease detection system; system integration; disease identification; disease localization

0 引言

随着我国经济快速发展,轨道交通作为交通动脉也进入大发展时期。截至 2022 年底,轨道交通里程达到 10 287.45 公里^[1]。城市轨道交通多采用地下隧道的建设方式,运营过程中产生的裂缝、错台、渗漏水、结构变形作为轨交隧道的主要结构缺陷威胁着隧道结构的安全^[2-3]。因此,隧道病害检测和养护工作对于轨道交通安全运营十分重要。目前,隧道病害检测以人工为主,依赖于检测人员的主观判断,且隧道内部光照环境较差、管线分布复杂,为了保证地铁运营,检查时间被限制在了夜间 2~3 个小时,检测时间紧张。因此,目前隧道检测存在检测时间长、耗费人力资源大且检测精度低的问题,无法满足全方位病害检测的需求^[4-7]。

近些年,随着自动化检测技术获得快速发展,主要包括激光扫描技术及摄影测量技术^[8]。因此,基于相机或激光扫描仪设备的病害检测已成为隧道病害检测的主要方向,许多国家开发了基于相机或激光扫描仪的隧道检测系统。基于相机的隧道检测系统有日本铁道技术研究所开发了 ConSIS 系统,该系统配有 4 台 CCD 线阵相机,实现了对隧道表面和轨道表面等设施的影像采集^[9]。同济大学研制了 MTI-100 隧道裂缝检测系统,搭载了 6 个线阵相机和配套光源,系统可以实现 0.2 mm 的隧道裂缝检测^[10]。基于激光扫描仪的隧道检测系统有瑞士 AMBERG 公司针对轨交隧道检测生产了 GRP5000 测量系统,该系统由激光扫描仪、轮轴编码器等设备组成,实现了隧道内的渗漏水和断面变形等病害的检测^[11]。首都师范大学研发了 CNU-TS 系列移动隧道检测系统,搭载了里程计、激光扫描仪、等传感器和移动平台等硬件以及相应的数据采集、处理软件,实现了隧道断面的变形监测^[12]。基于三维激光扫描仪及相机结合的检测系统有日本计测检查株式会社针对公路隧道开发了一款 MIMM-R 移动式隧道检测系统,搭载了探地雷达、多个线阵相机、激光扫描装置等传感器,可以识别 0.2 mm 的隧道裂缝,同时可以对隧道衬砌空洞、渗漏水及断面变形等病害进行综合化检测^[13]。

虽然针对隧道病害检测系统国内外已经进行诸多研究,能够实现部分隧道病害检测,但是仍然存在的数据类型单一、检测不全面、检测速度慢、自动化程度低等问题。基于摄影测量技术的隧道检测系统仅能完成隧道表面影像采集,缺乏三维信息,无法进行错台、形变等病害检测。基于激光扫描技术的隧道检测系统由于缺乏高精度影像数据,对裂缝的检测精度较低。目前已有的视觉与激光

相结合的检测设备存在体积庞大、检测成本较高且不易组装的问题,仅能在公路隧道检测中应用。

本文以隧道断面变形、隧道表面病害为研究对象,将三维激光扫描技术与摄影测量技术相结合设计实现了轨交隧道病害检测系统,系统搭载激光扫描仪、线阵相机、里程计等传感器。激光扫描仪用于获取隧道三维点云数据,线阵相机用于获取隧道图像,通过系统的多传感器一体化标定将激光扫描仪与线阵相机坐标基准统一。设计线形光源阵列对线阵相机进行补光保证线阵相机的图像清晰,设计多传感器外触发同步装置避免数据压缩或拉伸,基于分布式软件架构研发数据采集软件实现各传感器的同步采集控制与传感器状态实时显示,基于 Cesium 框架研发数据管理平台对隧道数据进行管理。最终形成了具备裂缝检测、错台检测、变形监测等多种检测功能于一体的隧道病害检测系统,解决了已有设备存在的数据类型单一、检测速度慢、病害检测类型不全面等问题,且系统模块化设计运输方便,便于在轨道交通隧道环境下组装与使用。

1 轨交隧道病害检测系统集成

针对轨道交通隧道在运营过程中产生的衬砌变形、错台、开裂、渗漏水、背部脱空等病害,利用轨交隧道轨道线路固定、空间结构均匀的特点设计轨交隧道病害检测系统。系统使用激光扫描仪和线阵相机,并在室内检校场进行参数标定。设计环形线阵光源结构进行补光,设计多传感器外触发装置传感器采集速率与车速匹配。同时为了在有限的检测时间内进行尽可能多的检测,隧道病害检测系统通过模块化的设计使设备轻量化,能够快速组装和搬运。

如图 1 所示本文首先介绍了系统的集成方法,按照所述方法实现了系统集成,对系统采集的图像和点云数据进行了精度验证,最后基于系统所采集的数据在隧道病害检测中进行了应用。

1.1 线阵相机集成方法

高质量的隧道图像有助于更好的识别隧道裂缝。相对于激光扫描仪而言,线阵相机有着更高的分辨率和更快的采集频率,适用于隧道表面病害的快速检测。由于线阵相机工作方式为单线采集,在隧道狭长的环境中,线阵相机工作时连续线扫描序列成像,相对于面阵相机而言在纵向上不需要图像拼接,减少了重叠部分带来的数据冗余。因此本文中的图像传感器选用线阵相机。

然而,单个线阵相机视场范围有限,隧道病害检测需要对隧道壁进行全方位扫描,为了有效扩大多线阵相机

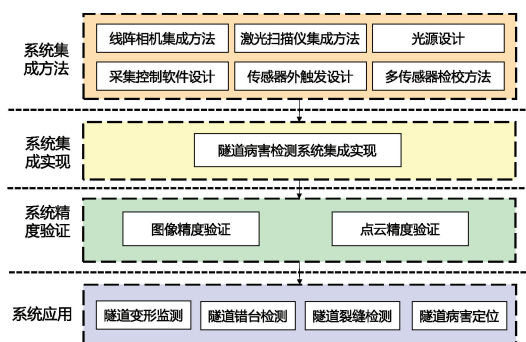


图1 文章结构

Fig. 1 Article structure

的视场范围,本文采用多个线阵相机按照发散式阵列方式安置在一个半圆形的对称架构上,经过精密的机械加工使所有线阵相机视平面近似共面,半圆形架构安置在检测小车上上面,组成多线阵相机系统。

多线阵相机系统的集成需要首先根据隧道检测的实际需求确定相机的像素精度,在确定像素精度后可根据相机视野范围公式(1)计算每个相机的成像区域宽度 W :

$$W = P \times R_c \quad (1)$$

式中: P 为相机分辨率, R_c 为像素精度。

确定相机成像区域宽度后,通过视场角计算公式(2)和焦距计算公式(3)确定相机的视场角 β 和焦距 f 。

$$\beta = 2\arctan\left(\frac{W}{2 \times D}\right) \quad (2)$$

$$f = \frac{S \times P \times D}{W} \quad (3)$$

式中: D 为相机工作距离由隧道设计参数确定, S 为相机的像元尺寸。

为了避免出现漏检的现象,相邻两相机采集到的图像需要有一定的重叠度 p ,在已知设计总视场 α 的情况下,通过相机数量计算公式(4)求得相机数量浮点数 n ,并将 n 向上取整确定相机数量 N 。

$$n = \frac{\alpha - \beta}{\beta(1 - p)} + 1 \quad (4)$$

1.2 激光扫描仪集成方法

激光扫描仪采用激光测距的原理,实现对隧道表面坐标、反射强度等信息的快速、高精度、非接触式获取。快速获取地物目标的三维点云数据和纹理数据,将隧道的结构数据以三维的形式展示,能够实现隧道的360°全方位无遗漏获取隧道数据。

为保持隧道变形监测系统的平衡性,同时避免检测平台车体对激光的遮挡,激光扫描仪被安装在隧道病害检测系统的前部,扫描面垂直于隧道前进方向。如图2

所示,激光扫描仪坐标系以激光发射中心为原点,检测系统前进方向为 X 轴,垂直于前进方向向左为 Y 轴, Z 轴垂直于 X 、 Y 轴向上,遵循右手坐标系。随着系统沿轨道向前运行,其搭载的激光扫描仪以垂直于 X 轴方向进行隧道横断面扫描,形成螺旋线轨迹,实现隧道三维点云数据获取。

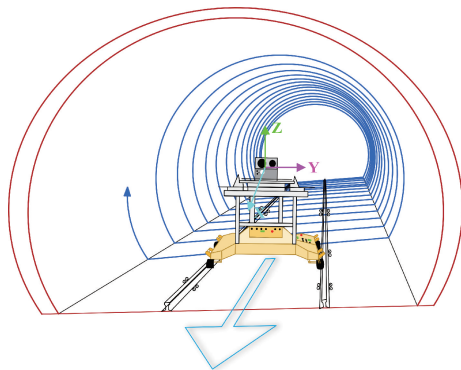


图2 激光扫描仪工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of how the scanner works

1.3 光源设计

在图像处理中,光照起着至关重要的作用,选择合适的光源,并根据被测物的外在环境进行适当的配置,可简化很多后期图像处理的问题^[14-15]。由于隧道内部光线通常较暗,线阵相机的数据采集精度对光线强度要求较高,光照较弱会导致图像清晰度降低,难以发现隧道管片表面出现的细小裂缝。因此为保证图像质量,需要使用光源在相机影像采集时提供足够光照,增加物体被检测部分的对比度。

光源具有随着距离光照区域中心变远光照强度随之减弱的特点,因此为了保证补光均匀且能够覆盖整个隧道衬砌,采用将多个线形光源交叉排列的方式使多线阵相机视场内光照充足且均匀。然而由于光源体积较大,受隧道病害检测系统结构大小的限制,需要将线形光源交叉排列在相机的两侧,通过在光源与支架之间添加垫片的方式调节光源的照射角度,从而使相机两侧的线形光源的光照区域与线阵相机的视野重合。

1.4 传感器外触发设计

系统的线阵相机影像采集模式分为内触发和外触发,内触发模式由系统采集控制软件设置好参数使相机采集影像,采集频率为软件设置的固定值,设置的采集频率与车速需严格匹配,否则会造成采集影像的拉伸或压缩。外触发则在系统采集控制软件发出开始采集指令后,通过接收外部脉冲信号控制相机进行影像采集,采集频率由脉冲信号频率决定,图像采集频率能够实时匹配车速。

因此,为了在移动过程中准确获取隧道影像,系统支

持图像外触发采集模式,设计外触发同步控制装置,通过车速控制影像采集速率。该装置由轮轴编码器以及 1 个主脉冲信号分配器和 3 个子分配器构成,电子编码器安置在移动载体轮轴电机处。如图 3 所示,当车轮转动时触发脉冲信号给主信号分配器,脉冲信号由主信号分配器分出三路给予信号分配器,子信号分配器再分别分出三路给相机,每当相机接收到信号则触发一次拍摄,从而实现多线阵相机的同步采集。

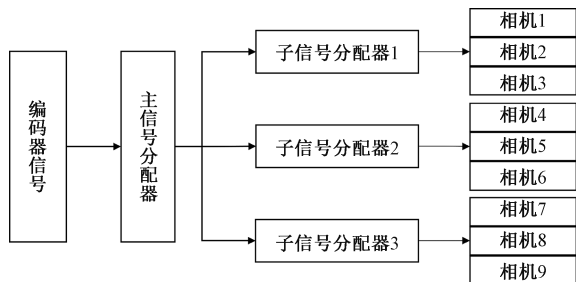


图 3 脉冲分配示意图

Fig. 3 Pulse distribution diagram

为了判断小车的行进方向,如图 4 所示,编码器通过相位上升沿的变化发送脉冲信号,编码器输出脉冲 A、B。A、B 两组脉冲相位差 90° ,通过 A 相触发时 B 相的电平可以判断出旋转方向,若 A 相触发时 B 相为低电平则小车前进,反之后退。

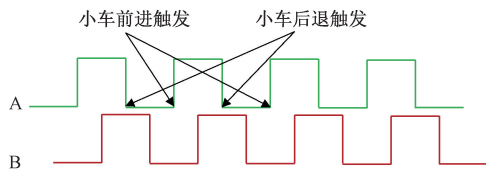


图 4 脉冲触发示意图

Fig. 4 Pulse triggering diagram

1.5 多传感器同步采集控制

由于隧道病害检测系统涉及传感器众多,为了简化系统操作步骤,实现系统整体的传感器控制与监控,设计了系统采集控制软件对系统中多传感器进行交互操作。

系统采集控制软件架构主要分为 4 层:基础层、通信层、服务层和应用层。基础层提供进行软件开发的一些必要组件;通信层提供各个组件之间进行交互的方式和通信协议;服务层提供了传感器交互的通用接口;应用层分为传感器监控模块和传感器控制模块,传感器监控模块实现传感器工作状态监控以及隧道影像数据的实时显示,传感器控制模块实现多传感器的同步控制。

由于隧道病害检测系统支持多种传感器并且消耗的计算机资源较多、数据量巨大,因此采用图 5 所示分布式系统进行数据采集和存储。控制电脑发送控制指令,在

中心路由器将指令一分为三传输给每一个工控机从而实现传感器控制。在传感器数据采集时,所有的数据存储在工控机当中,在工控机中抽取部分数据经过中心路由器传输回控制电脑中,实现传感器数据、状态的实时监控。此外,分布式的采集系统设计使每个传感器的采集进程独立,保证了数据传输效率和系统的稳定性。

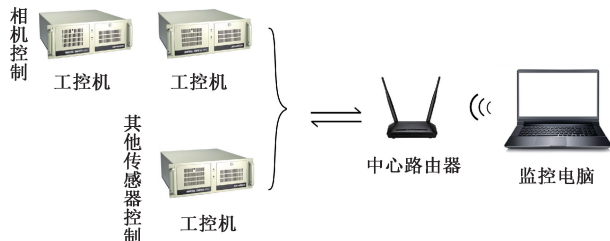


图 5 分布式多传感器采集控制示意图

Fig. 5 Distributed multi-sensor acquisition control diagram

1.6 多传感器一体化标定

轨交隧道病害检测系统中多传感器一体化标定工作目的是将所有线阵相机与激光扫描仪的坐标系统一。其主要分为单线阵相机标定、多线阵相机标定和线阵相机与激光扫描仪标定 3 部分。

1) 单相机标定

在进行高精度标定时,除了需要标定相机内外参数外,还应该考虑相机镜头畸变所带来的影响,由于线阵相机的一维成像特性,仅需考虑 y 轴方向上的一阶径向畸变 k_1 ^[16]。本文使用考虑一阶径向畸变的线阵相机成像模型(5),利用线阵相机特征点共面约束进行非线性优化,解算精确的相机内参数 (f_y, v_0) 和外参数 (R_w^c, t_w^c) ,以及镜头畸变参数 k_1 。

$$\begin{cases} 0 = r_{11}X_w + r_{12}Y_w + r_{13}Z_w + t_x \\ v = v_0 + k_1v_e^3 + f_y \frac{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + r_{23}Z_w + t_y}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + t_z} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $r_{ij}(i=1,2,3;j=1,2,3)$ 为旋转矩阵 R_w^c 的 9 个元素, t_x, t_y, t_z 为平移向量 t_w^c 的 3 个元素, X_w, Y_w, Z_w 为世界坐标系下空间点坐标。

为解决线阵相机标定过程中像素点与空间点对应关系的难以确定的问题,本文设计了如图 6 所示混合标定靶标,混合标定靶标设计了 8 条平行的竖线 $L_i(i=1,3,5,\dots,15)$ 和 7 条平行斜线 $L_i(i=2,4,6,\dots,14)$,每条直线首尾相接组成了 7 个交比直角三角形,三角形短边 h_p 为 3 cm,长边 w_p 为 16 cm,线宽均为 0.5 mm。对于每张静态采集到的标定图像,线阵相机的视平面与交比三角形共有 15 个交点 $P_1 - P_{15}$,对应图像像素点为 $p_1 - p_{15}$ 。为了方便线阵相机对焦,在两侧设计了宽度为 0.1 ~ 0.5 mm 的实线。

激光跟踪仪是获取待测目标外形尺寸和形位公差等

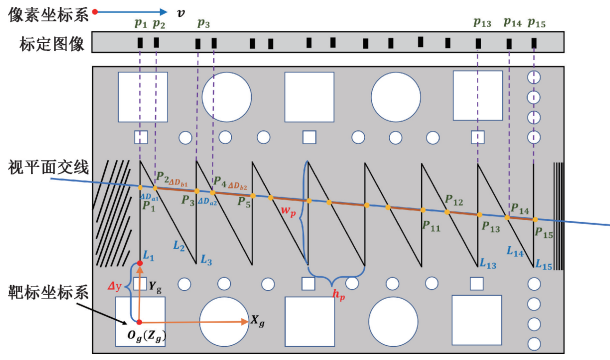


图6 混合标定靶标示意图

Fig. 6 Hybrid calibration target diagram

空间几何数据的常用精密测量仪器^[16]。如图6所示,通过激光跟踪仪的测量建立起以靶标左下角空洞中心为原点的靶标坐标系 $O_g - X_g Y_g Z_g$, 结合线阵相机图像的像素点坐标,基于交比不变性原理,可以计算出视平面与交比三角形的交点在靶标坐标系下的坐标^[17]。

为了得到更高精度的标定结果,提高参数估计的鲁棒性与准确性,准确的估计畸变参数,将靶标摆放了 n 次位置,利用激光跟踪仪建立了如图7所示的虚拟立体靶标场,利用线阵相机成像共面这一约束条件,对推算得到的空间点坐标进行全局优化。

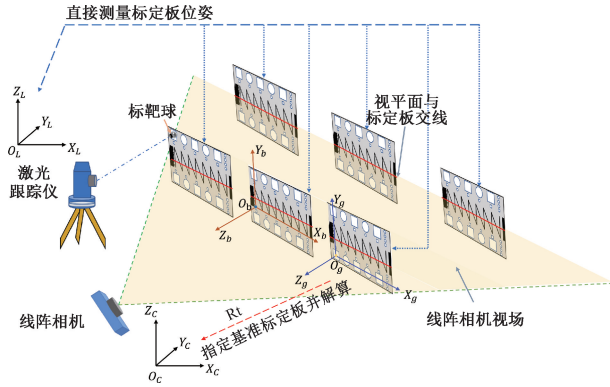


图7 虚拟靶标场

Fig. 7 Virtual target field schematic

将某一位置的靶标坐标系作为基准靶标坐标系记为 n , 其余各位置的靶标坐标系为子靶标坐标系记为 m_j , 可由激光跟踪仪精确测得它们到基准靶标的变换矩阵为 $T_{m_j}^n (j = 1, 2, 3, \dots, n)$, 则子靶标的特征点在基准靶标坐标系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} {}^{20}X_{g_{i,j}} \\ {}^{20}Y_{g_{i,j}} \\ {}^{20}Z_{g_{i,j}} \\ 1 \end{bmatrix} = T_{m_j}^n \begin{bmatrix} {}^{2p}X_{g_{i,j}} \\ {}^{2p}Y_{g_{i,j}} \\ {}^{2p}Z_{g_{i,j}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $({}^{20}X_{g_{i,j}}, {}^{20}Y_{g_{i,j}}, {}^{20}Z_{g_{i,j}})$ 为所有交点在基准靶标坐标系下的坐标, $({}^{2p}X_{g_{i,j}}, {}^{2p}Y_{g_{i,j}}, {}^{2p}Z_{g_{i,j}})$ 为靶标在第 j 个位置上靶标坐标系的第 i 个特征点坐标。

利用特征点共面性作为约束可得:

$$\begin{bmatrix} {}^{20}X_{g_{i,j}} & {}^{20}Y_{g_{i,j}} & {}^{20}Z_{g_{i,j}} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ {}^{20}X_{g_{15,n}} & {}^{20}Y_{g_{15,n}} & {}^{20}Z_{g_{15,n}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{20}A_p \\ {}^{20}B_p \\ {}^{20}C_p \\ {}^{20}D_p \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (7)$$

其中, ${}^{20}A_p, {}^{20}B_p, {}^{20}C_p, {}^{20}D_p$ 为特征点在基准靶标坐标系下平面方程参数,通过奇异值分解求取。

为准确的估计相机参数,采用式(5)描述的精密成像模型对相机参数进行优化。建立以重投影误差最小化的目标函数,使用 LM (Levenberg-Marquardt) 算法进行非线性优化:

$$F_1 = \min_{F_1} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{\| \hat{u}_{i,j}(\mathbf{m}, {}^{20}\mathbf{p}_{g_{i,j}}) \|^2 + \| \hat{v}_{i,j}(\mathbf{m}, {}^{20}\mathbf{p}_{g_{i,j}}) \|^2}{\| \hat{u}_{i,j}(\mathbf{m}, {}^{20}\mathbf{p}_{g_{i,j}}) \|^2 + \| \hat{v}_{i,j}(\mathbf{m}, {}^{20}\mathbf{p}_{g_{i,j}}) \|^2} \right) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{m} = (\psi, \theta, \phi, v_0, f_y, t_x, t_y, t_z, k_1)^T$ 为所有待优化参数构成的向量。所有的空间点的反投影像素点 $(\hat{u}_{i,j}, \hat{v}_{i,j})$, 其具体表达式如下:

$$\begin{cases} \hat{u}_{i,j}(\mathbf{m}, {}^{20}\mathbf{p}_{g_{i,j}}) = r_{11} {}^{20}X_{g_{i,j}} + r_{12} {}^{20}Y_{g_{i,j}} + r_{13} {}^{20}Z_{g_{i,j}} + t_x \\ \hat{v}_{i,j}(\mathbf{m}, {}^{20}\mathbf{p}_{g_{i,j}}) = v_0 + \delta_v(v_e) + \\ \frac{r_{21} {}^{20}X_{g_{i,j}} + r_{22} {}^{20}Y_{g_{i,j}} + r_{23} {}^{20}Z_{g_{i,j}} + t_y}{f_y \frac{r_{31} {}^{20}X_{g_{i,j}} + r_{32} {}^{20}Y_{g_{i,j}} + r_{33} {}^{20}Z_{g_{i,j}} + t_z} \end{cases} \quad (9)$$

2) 多相机标定

在单相机标定中得到了线阵相机的内参数,也得到了各个线阵相机与它的基准靶标之间的外参数,所有靶标坐标系可以统一在激光跟踪仪坐标系下,因此它们的空间转换关系已知。选定系统中的一个相机作为基准相机,以靶标坐标系为中介,间接标定出子相机与基准相机之间的外参数。

如图8所示,选取系统中的某个相机 c 作为基准相机,相机 c_i 为系统中基准相机之外的子相机, b 为基准相机 c 对应的基准靶标, b_i 为子相机 c_i 对应的基准靶标, $T_{b_i}^b$ 为 $b_i \sim b$ 的变换矩阵由激光跟踪仪测量获取,根据变换矩阵运算,可得子相机到基准相机之间的变换矩阵:

$$T_{c_i}^c = T_b^c T_{b_i}^b (T_{b_i}^{c_i})^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^c \mathbf{R}_{b_i}^b \mathbf{R}_{c_i}^{b_i} & \mathbf{t}_b^c + \mathbf{R}_b^c \mathbf{R}_{b_i}^b \mathbf{t}_{b_i}^{c_i} + \mathbf{R}_b^c \mathbf{R}_{b_i}^b \mathbf{t}_{c_i}^{b_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

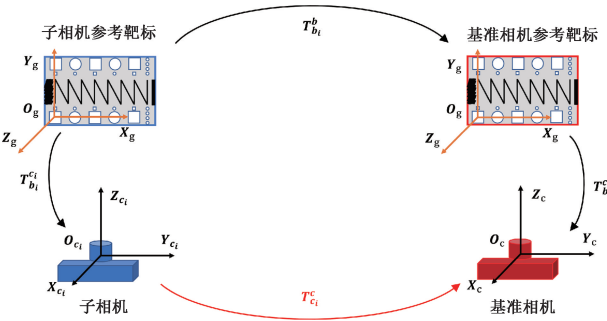


图 8 多线阵相机标定示意图

Fig. 8 Multi-line array camera calibration diagram

3) 激光扫描仪与线阵相机标定

激光扫描仪与线阵相机标定是将激光扫描仪坐标系与相机坐标系统一,在标定时需要激光扫描仪与激光跟踪仪同时对平面标定板进行测量。

假设激光扫描仪所测平面标定板的点坐标为 $p_s = (0, y_s, z_s)^T$,在线阵相机坐标系下的表达为 $p_c = (x_c, y_c, z_c)^T$,则从线阵相机坐标的点坐标到激光扫描仪坐标系的点坐标变换可用式(11)表达。

$$p_s = R_c^s p_c + t_c^s \tag{11}$$

其中, R_c^s 、 t_c^s 分别为线阵相机坐标系到激光扫描仪坐标系的旋转矩阵和平移向量。

使用激光跟踪仪获得激光跟踪仪坐标系下标定板的平面方程,将其转到线阵相机坐标系下的平面方程:

$$a_c x_c + b_c y_c + c_c z_c + d_c = 0 \tag{12}$$

其向量形式的几何约束公式为:

$$n \cdot p_c = \|n\|^2 \tag{13}$$

其中, $n = (n_1, n_2, n_3)^T$, $n_1 = a_c \mid d_c \mid$, $n_2 = b_c \mid d_c \mid$, $n_3 = c_c \mid d_c \mid$,将式(11)代入(13)可得线阵相机与激光扫描仪之间的几何约束模型:

$$n \cdot R_c^{s^{-1}}(p_s - t_c^s) = \|n\|^2 \tag{14}$$

为了便于方程解算需要将几何模型化为线性形式,在此利用激光扫描仪所测的所有点坐标为 $p_s = (0, y_s, z_s)^T$ 这一特点,对点坐标形式改写为 $\hat{p}_s = (y_s, z_s, 1)^T$,则等式(14)可改写如下:

$$n \cdot H \hat{p}_s = \|n\|^2 \tag{15}$$

其中, $H = R_c^{s^{-1}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -t_1 \\ 1 & 0 & -t_2 \\ 0 & 1 & -t_3 \end{bmatrix}$,将测得的坐标代入

式(15)可得线性公式:

$$Ax = b \tag{16}$$

结合旋转矩阵性质,最小二乘求解得:

$$\begin{cases} R_c^s = [h_1 \times h_2 & h_1 & h_2]^T \\ t_c^s = -R_c^s h_3 \end{cases} \tag{17}$$

其中, $h_1 = (h_{11}, h_{21}, h_{31})^T$, $h_2 = (h_{12}, h_{22}, h_{32})^T$, $h_3 = (h_{13}, h_{23}, h_{33})^T$,在参数解算过程中由于在求解时没有考虑旋转矩阵的正交约束, R_c^s 可能会不满足旋转矩阵的性质,采用 SVD 分解近似旋转矩阵,将奇异值矩阵用单位阵代替,重新计算旋转矩阵^[18]。

2 轨交隧道病害检测系统的实现

市面上销售的线阵相机有 4 K、8 K 以及 16 K 等分辨率规格,出于精度与经济综合考虑,本文选用 LA-CM-08K08A-00-R 型号 8K 线阵相机,经过式(1)计算单线阵相机成像区域宽度为 1.638 m,若相机工作距离为 3 m,通过式(3)可得焦距应为 105 mm,选用与焦距计算结果较为相近的 95 mm 长步道 LS9005A 型号镜头,相机和镜头参数如表 1 所示。利用式(2)可得相机视场角为 33°,由于两相机图像间需要 20% 重叠度,隧道总视场角为 210°,通过式(4)计算可得相机数量为 9。

表 1 相机和镜头参数

Table 1 Camera and lens parameters	
指标	参数
相机分辨率	8 192×1 pixels
线频率	80 kHz
像元大小	7.04 μm×7.04 μm
功率	8 W
镜头焦距	95 mm
光圈	4.0~16.0
畸变参数	<0.005%

根据 1.2 节所述方法,本文选用脉冲式激光扫描仪 Z+F9012A,其参数如表 2 所示。

表 2 激光扫描仪参数

Table 2 Scanner parameter	
指标	参数
扫描距离	0.3~119 m
测距分辨率	0.1 mm
最大测点速度/(点/秒)	1 016 000
线性误差	±1mm
垂直视野范围	360°
测角精度	0.02°
测角分辨率	0.008 8°
垂直扫描速度	50~200 Hz

按照 1.3 节所述方法,为保证光照满足隧道图像采集需求,使光源达到相机视野全覆盖,综合考虑价格、功率、光照强度等因素,选用东冠科技 SLP(H)-450 型 LED 线形强光光源对相机进行补光。其光照强度为 800 000 lux 能够给相机提供足够的曝光,光源长度为 450 mm 适用于系统支架设计大小,功率为 260 W 在供电系统负载范围内。

根据 1.4 节方法所述,本文设计的外触发同步装置

如图 9 所示编码器采用 SICK 的 DFS60A 的增量式编码器,并结合车轮直径,计算编码器的相应分辨率,使小车每移动 0.2 mm 编码器发送一个脉冲信号使相机进行一次拍摄。

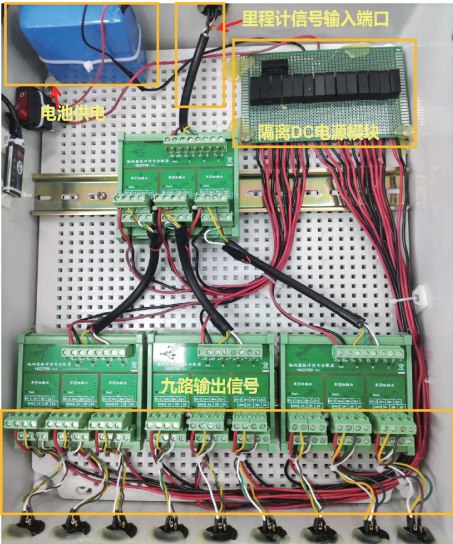


图 9 外触发同步装置

Fig. 9 External trigger synchronizing device

如图 10 所示,最终将多线阵相机、激光扫描仪、光源阵列安置于载体小车,9 个线阵相机呈 180°半圆形排列相邻两相机的主光轴设计夹角为 22.5°,单相机垂直视场角 33°,所有线阵相机的视平面近似共面,总视场角为 210°覆盖整个隧道衬砌表面,11 个线形光源交叉排列于相机两侧使各个相机补光均匀。考虑到设备配重以及扫描线不被遮挡,激光扫描仪安置于小车前方。

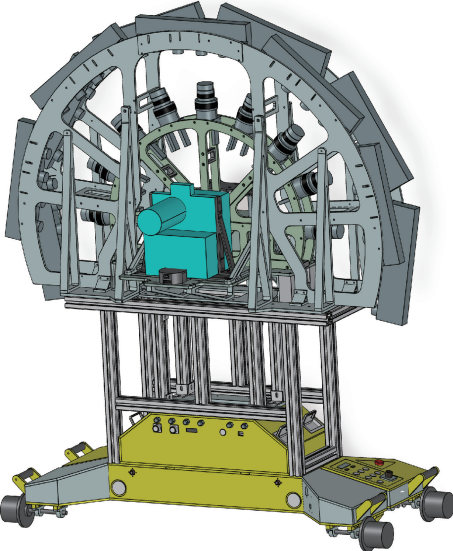


图 10 轨交隧道病害检测系统

Fig. 10 Rail tunnel disease detection system

在相机与扫描仪安装完成后,为使多传感器数据能够在统一基准下进行表达,按照 1.6 节所述方法,以五号相机为基准进行多传感器标定,标定场景如图 11 所示,传感器一体化标定结果如表 3 所示。

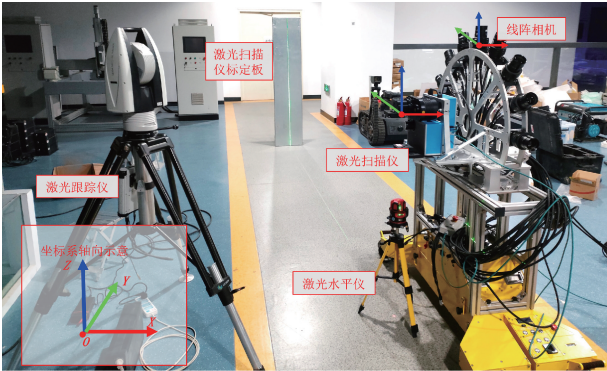


图 11 标定场景图

Fig. 11 Calibration scene diagram

表 3 一体化标定结果

Table 3 Integrated calibration result

	旋转角/(°)			平移向量/mm		
	绕 Z 轴	绕 Y 轴	绕 X 轴	X	Y	Z
相机 1	0.30	-0.02	90.78	0.36	-0.46	-460.00
相机 2	0.34	0.04	67.50	-0.52	-0.42	-282.18
相机 3	0.10	-0.04	45.38	0.62	-0.32	-132.34
相机 4	0.34	0.07	22.80	-0.05	-0.17	-40.46
相机 6	0.25	-0.09	-22.19	-0.54	0.17	-33.17
相机 5	0	0	0	0	0	0
相机 7	0.31	-0.15	-45.01	-1.09	0.32	-133.45
相机 8	0.32	-0.14	-67.42	-0.94	0.42	-279.94
相机 9	0.54	-0.61	-90.20	0.48	0.46	-457.15
扫描仪	-0.06	-0.18	0.20	-377.08	42.48	-368.09

系统采集控制软件使用 Qt5.12 进行开发,运行于 Windows 系统。如图 12 所示,软件包含工具栏、图像实时显示、日志模块、传感器状态监控。工具栏中提供了系统采集的常用功能;图像实时显示用来查看当前各个相机所采集的图像;日志模块用于记录设备运行过程中对传感器的操作;传感器状态监控用于查看各个传感器的运行状态。

在数据采集完成之后,为了更为直观的展现隧道病害,基于 Cesium 框架设计了图 13 所示盾构隧道数据管理系统。实现了人机交互、信息输入输出、平面展示、三维展示以及动态演示的功能。该系统设计为双屏模式,其中左屏为点云显示模块,左侧为该模块的功能栏,主要包括隧道简介、研究区域、点云数据、三维漫游以及二三维转换等功能;屏幕右侧为病害数据和影像数据加载的模块,右侧为主要功能栏,实现病害数据的加载,并以分图层式的形式进行显示的;当加载影像数据时,该系统能够在右屏中再分出一个视图,用于加载显示二维隧道影



图 12 采集控制软件
Fig. 12 Acquisition control software

像数据。

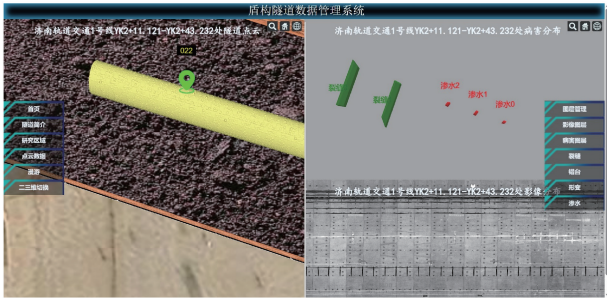


图 13 隧道数据管理系统
Fig. 13 Tunnel data management system

3 轨交隧道病害检测系统精度验证

隧道病害检测系统搭建完毕后,需验证系统是否能够满足图像精度 0.2 mm 与点云精度 0.5 mm 的设计精度,选用济南一号线在运营地铁线路作为实验场地,利用地铁运营空窗期,进行隧道病害检测系统的精度验证实验数据采集和分析。

3.1 图像精度验证

本文相机检测系统精度验证采用标准金属丝法,将不同直径的标准铝丝压制在亚克力板内模拟隧道裂缝。系统扫描紧贴隧道壁的亚克力板,通过观察上采集到的最细金属丝,辨别相机的最小分辨率。

如图 14(a)所示,金属丝由下到上分别为 0.1、0.2、0.3 mm,纵置摆放的金属丝由左到右分别为 0.1、0.2、0.3、0.2、0.1 mm,选取距离隧道壁最远的 4 号相机和距离隧道壁最近的 9 号相机进行检测。其中 4 号相机位于 110°方向距离隧道壁约 2.6 m,9 号相机位于 0°方向距离隧道壁约 2.2 m。

相机采集的金属丝影像结果如图 14(b)、(c)所示,观察影像可知 0.1 mm 的金属丝在两个影像中均清晰可见。因此,系统采集的隧道图像精度优于 0.2 mm。

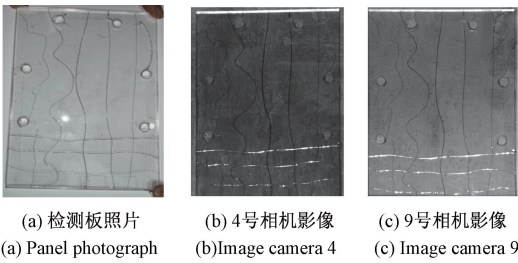


图 14 标准金属丝影像图
Fig. 14 Standard wire image

3.2 点云精度验证

点云精度验证为验证系统点云最小分辨率为 0.5 mm,如图 15 所示设计制造一块台阶状检测板,该检测板共设置 3 层相互平行的台阶,相邻台阶之间的高度差为 0.5 mm,通过对采集到的点云数据进行处理,将每一层台阶平面进行拟合并投影,计算每层台阶平面之间的高度差距是否为 0.5 mm。

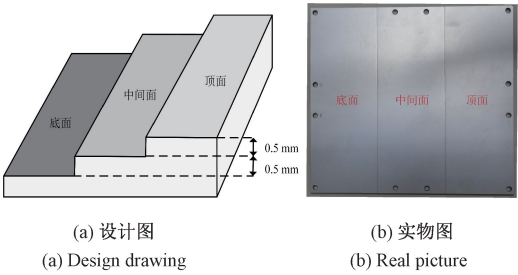


图 15 台阶状检测板
Fig. 15 step detection plate

与图像检测相同,将台阶状检测板紧贴隧道壁放置,选取激光扫描仪距离隧道壁最近的 0°方向和距离隧道壁最远的 110°方向放置。其中在 0°方向激光扫描仪距离隧道表面的距离约为 2.85 m;110°方向激光扫描仪距离隧道表面的距离约为 3.6 m。为检测不同方向的点云精度,检测板分别按横向和纵向摆放,按照相应的角度举升到检测位置,进行数据采集。

由于激光扫描仪在采集点云数据过程中,受外界环境干扰等一系列因素会采集到噪声点,噪声点会对后续点云数据的处理精度造成很大的影响,因此采用统计滤波的方法对噪声点进行去除。在去除噪声点后使用最小二乘对台阶状检测板的各台阶进行平面拟合,最后通过平面投影的方式进行高差计算,计算结果如表 4 所示。

由表 4 的实验结果可知,台阶检测板在横向检测中平面平均投影距离为 0.45 mm,平面投影中误差为 0.13 mm;在纵向检测中,平面平均投影距离为 0.39 mm,平面投影中误差为 0.15 mm;总体平面平均投影距离为 0.42 mm,总体平面投影中误差为 0.14 mm,因此系统满

足点云精度为 0.5 mm 的设计要求。

表 4 点云精度验证结果

Table 4 Verification result of point cloud accuracy				
方向	距离/m	检测板投影距离/mm	误差/mm	
横向	2.85	顶面-中间面	0.381	0.119
		中间面-底面	0.336	0.164
	3.6	顶面-中间面	0.650	0.150
		中间面-底面	0.383	0.117
纵向	2.85	顶面-中间面	0.339	0.161
		中间面-底面	0.352	0.148
	3.6	顶面-中间面	0.365	0.135
		中间面-底面	0.318	0.082

4 轨交隧道病害检测系统应用

在使用隧道病害检测系统采集高精度点云、影像

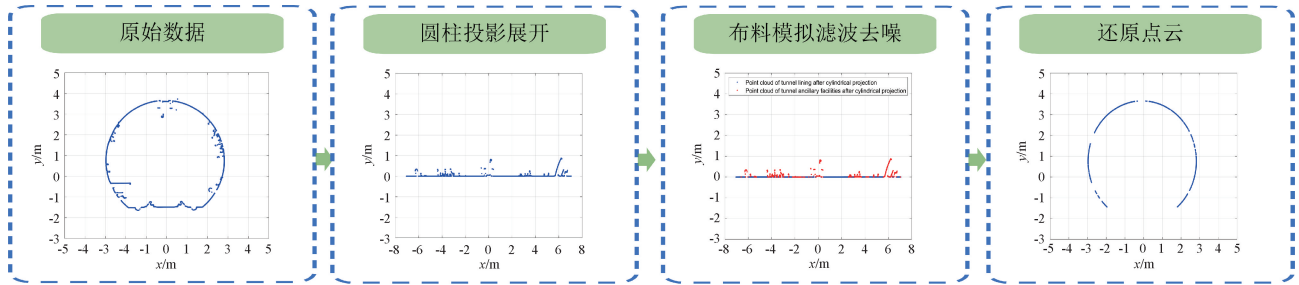


图 16 点云滤波流程

Fig. 16 Point cloud filtering process

在滤波后采取最小二乘拟合的方法进行椭圆拟合，其核心是找到数据点与椭圆之间的距离度量最小化的参数集。隧道椭圆方程如下：

$$F(\mathbf{a}, \mathbf{x}) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (18)$$

式中： $\mathbf{a} = [a, b, c, d, e, f]$ ， $\mathbf{x} = [x, y, z]$ 。 $F(\mathbf{a}, \mathbf{x}_i)$ 为点 (x_i, y_i) 到 $F(\mathbf{a}, \mathbf{x}) = 0$ 的代数距离。

一般二次曲线的拟合通过最小化二次代数距离之和来逼近，为了避免解 $\mathbf{a} = \mathbf{0}_6$ ，采用 Fitzgibbon 所提出的直接最小二乘椭圆拟合方法，施加约束不等式 $4ac - b^2 = 1$ [20]。

利用椭圆拟合后的方程式 (19)，可以求出椭圆的中心坐标，长半轴和短半轴，式 (20) 中的 X_0 和式 (21) 中的 Y_0 分别表示椭圆中心的 x 坐标和 y 坐标。式 (22) 中 a 表示椭圆的长半轴，式 (23) 中 b 表示椭圆的短半轴。式 (24) 计算的椭圆度 T 表示了隧道断面经过变形之后与椭圆的接近程度，椭圆度越大表示隧道的整体形变越大。

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0 \quad (19)$$

$$X_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \quad (20)$$

$$Y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \quad (21)$$

数据后，可利用这些数据进行隧道病害识别，实现隧道实现隧道变形监测、错台检测、裂缝检测、病害定位等应用。

4.1 隧道变形监测

本文隧道变形监测通过隧道病害检测系统获取的点云数据计算隧道变形结果。然而，隧道内的附属设施点云与隧道壁点云紧紧依附在一起，会影响对隧道断面曲线拟合的精度，影响隧道断面收敛变形分析，在进行隧道变形监测之前先将隧道附属物剔除。如图 16 所示，首先基于 RANSAC [19] 算法得到任意一个横断面的圆心，基于此圆心，通过圆柱投影的方式对所有横断面进行坐标变换，所有横断面都被展开后，以环片为单位应用布料模拟滤波算法分离隧道衬砌点云和附属设施点云。

$$a^2 = \frac{2(AX_0^2 + CY_0^2 + BX_0Y_0 - 1)}{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \quad (22)$$

$$b^2 = \frac{2(AX_0^2 + CY_0^2 + BX_0Y_0 - 1)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \quad (23)$$

$$T = \frac{(a - b)}{r} \times 1\,000\% \quad (24)$$

选取济南地铁 1 号线隧道连续 21 环的数据对其进行收敛变形状态分析，图 17 显示了往返测各环的椭圆度情况，从图中可以看出系统在隧道变形收敛分析中表现出较高的重复性，验证了系统在隧道变形分析中的可行性，且所测隧道符合地铁隧道椭圆度不超过 $\pm 6\%$ 的规定。

4.2 隧道错台检测

针对盾构隧道点云数据量大的特点，使用一种基于深度图像识别拼接缝的隧道错台检测方法。基于点云存储顺序特点与深度信息非线性映射方式将隧道三维点云转换为二维深度图像。此基础上使用图像处理算法识别深度图像中的隧道拼接缝，通过映射关系获取拼接缝点云，最后基于断面重叠法实现错台的定量计算。

三维点云坐标与深度图像坐标的转换通过如图 18 所示的像素化方法，从 O 点逆时针方向展开点云横断面，

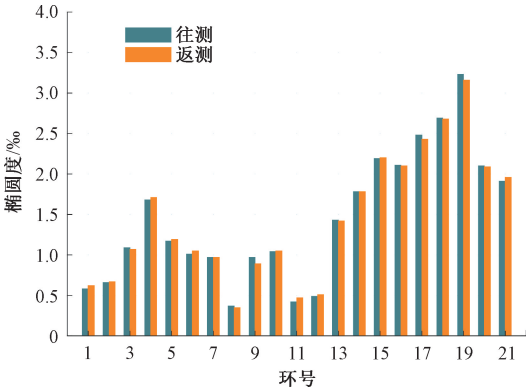


图 17 隧道往返测量椭圆度重复性

Fig. 17 Tunnel round-trip measurement ovality repeatability
横断面点坐标与像素坐标一一对应。

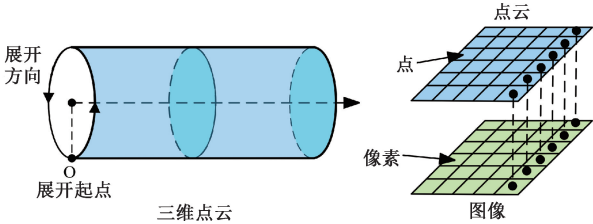


图 18 隧道二维图像展开规则

Fig. 18 Tunnel two-dimensional image expansion rules

二维图像像素值通过非线性函数(25)的映射方式,将隧道横断面点云到该横断面中心点的距离分为 $[d_0, d_1)$ 、 $[d_1, d_2)$ 两段分别映射到 $[g_0, g_1)$ 、 $[g_1, g_2)$ 灰度范

围内,其中第 1 段使用线性变换均匀显示距离变化,第 2 段使用指数变换突出显示环缝信息。

$$g(x) = \begin{cases} (g_1 - g_0) \frac{x}{a} + g_0 & 0 < x < a \\ (g_2 - g_1) \frac{e^x - e^a}{e^b - e^a} + g_1 & a \leq x \leq b \end{cases} \quad (25)$$

图像直线段检测需要对图像进行预处理,以提取直线的特征。常见的预处理操作包括滤波、增强、二值化等,可以使直线在图像中更加明显易于检测。从预处理后的图像中进行特征处理和分析,对边缘图像中的直线段进行检测,最后对检测到的直线进行筛选和优化,得到目标线段。

采用图 19 所示图像滤波、图像增强、二值化、边缘检测、形态学运算和直线检测等图像处理方法进行隧道环间拼接缝识别,有效地提取隧道环间拼接缝的特征,从而实现环间拼接缝的自动化识别和计算。

环间错台检测首先通过环间拼接缝位置,得到相邻两环拼接缝点云,在环缝处的左右两个环片上提取该环缝一定范围内的横断面,并通过滤波的方式将隧道附着物去除。将环绕左、右两侧的横断面进行投影。使用均值漂移法对环缝左右侧每个角度上的截面点聚类,以获取每个角度上的聚类中心作为错台检测点。最后,基于 Taubin 圆拟合方法拟合环缝左侧的错台检测点以获取其圆心位置 O_l ,分别计算左侧点集和右侧点集中每个错台检测点到此圆心位置的距离如图 20 所示,对应检测点的距离差即为该环缝处各角度上的错台量:

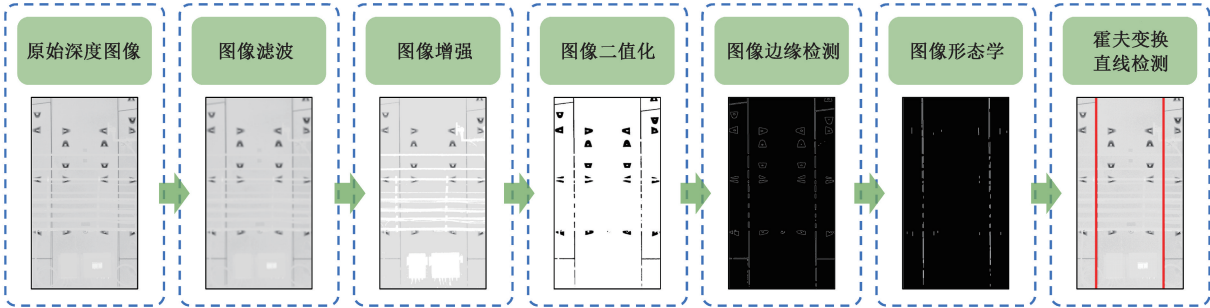


图 19 隧道环缝识别技术路线图

Fig. 19 Tunnel ring gap identification technology roadmap

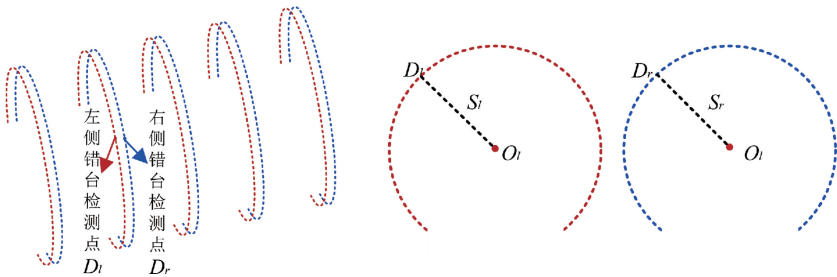


图 20 环间错台计算示意图

Fig. 20 Calculation diagram of inter-ring fault station

$$\Delta S = S_l - S_r \tag{26}$$

环内错台检测首先将图像中识别到的拼接缝对应到相邻两管片的点云拼接位置。如图 21 所示将拼接位置的点云投影,选取投影后的接缝处的点云进行聚类,得到

聚类中心点后将其设置为错台检测点。圆心采用该环片计算环向错台时拟合得到的圆心,圆心与相邻两管片的拼接缝聚类后的错台检测点之间的距离差即为该处接缝处的错台量。

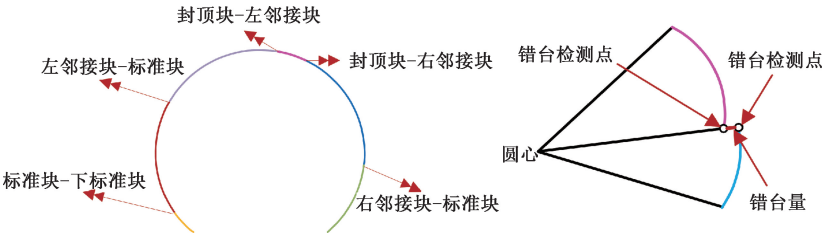


图 21 环内错台计算示意图

Fig. 21 Calculation diagram of misalignment in the loop

利用系统往返观测的数据,选取某一环对其错台量进行分析,环间错台结果如图 22 所示,环内错台结果如图 23 所示,往返数据所计算的错台量变化均具较好吻合,表明系统能够有效应用于错台计算。

4.3 隧道裂缝检测

由于轨道交通综合检测系统图像采集精度较高,图像幅偏小,导致图像数量巨大。因此采用人工识别的方式费时费力,需要借助人工智能技术进行隧道裂缝智能识别。

首先通过对装备采集的轨交隧道图像进行人工筛选,将筛选出存在裂缝的图像使用标注工具 Lanelme 进行人工标注,构建轨交隧道裂缝数据集。由于隧道衬砌裂缝尺度小、灰尘覆盖、涂料反射等影响,导致获取的图像检测数据质量不高。为增强图像质量首先使用限制对比度的自适应直方图均衡化方法进行图像处理,再使用灰度直方图均衡化方法将图像灰度拉伸,强化裂缝区域对比度。利用 YOLOv8 网络对图像质量增强后的图像进行训练,训练周期设置为 60,批训练大小设置为 4^[21],系统所识别裂缝如图 24 所示,表明系统能够用于轨交隧道裂缝检测。

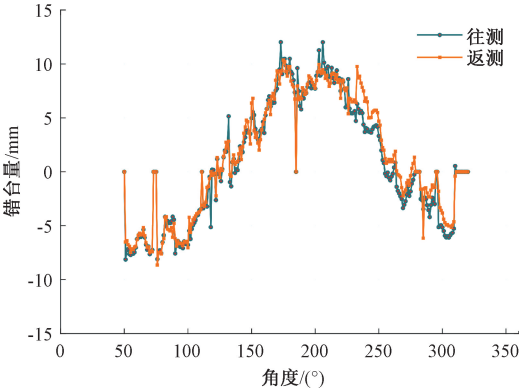


图 22 环间错台分析

Fig. 22 Analysis of inter-ring misalignment

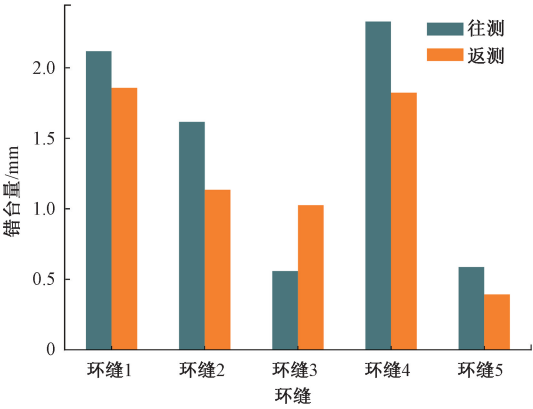


图 23 环内错台分析

Fig. 23 Analysis of misalignment in the loop

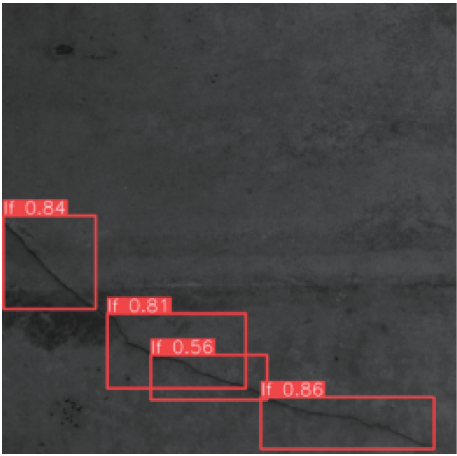


图 24 隧道裂缝识别

Fig. 24 Tunnel crack identification

4.4 隧道病害定位

当隧道内存在病害时,准确地定位病害位置是进行管理维护的前提。系统使用基于隧道环缝和环号信息转换隧道里程的方法,利用盾构隧道中的环片设计宽度值为固定值且加工精度高的特点,定位隧道内病害的位置。

使用图 19 所示方法经过环缝识别后,根据环缝位置信息,对盾构环片按环分割,以单个盾构环片为单元,使用 YOLOv7 目标检测算法对其进行环号识别^[22]。图像按照从左到右的顺序依次进行识别,如果当前环片上识别出环号数字,则将识别的数字标记在对应环片上;如果当前环片未检测到环号数字,则根据检测顺序,推算出其对应的环号数字,将其标记在所在环片上,从而得到每个盾构环片的环号^[23]。

由于轨检小车行驶中受到各种因素的干扰,利用车速分配的点云初始线间距与真实值存在偏差,并且随着扫描距离增加,其误差会累积,从而出现环片的测量宽度值与设计宽度值不符的情况,所以需要点对点云扫描线间的距离进行改正。利用盾构隧道内的环片拼接精度较高,环片宽度值固定的特点,按照式(27)使用环片的设计宽度值对点云扫描线间距进行改正。

$$S = S_0 + \frac{W_0 - W}{T - 1}$$

(27)

其中, S_0 为初始扫描线间距, S 为改正后的点云扫描线间距, W_0 为根据车速得到的环片宽度值, W 为环片设计宽度值, T 为环片内点云扫描线总数。

当系统识别到隧道病害时,计算病害的扫描线信息确定病害所在环号,结合环片设计的宽度值得到初始环片到病害环片的距离 S_1 , 根据病害位置的扫描线和环片内扫描线间距确定病害在该环片内的距离 S_2 , 将两距离相加可得病害在隧道内的相对位置,与隧道起始位置的里程相加,即可得到病害在隧道内的里程值。

在隧道起始环片的起始环缝处粘贴靶标作为起始靶标,该位置的起始靶标里程即为隧道起始里程,在盾构隧道内每隔一定的环片数粘贴反射靶标,总计粘贴 10 处靶标。使用全站仪测出所有靶标的坐标值,计算出各靶标与起始靶标的距离值,通过与起始靶标的隧道里程相加,得到各个靶标在隧道内的里程,并以此里程作为基准里程,对系统计算得到的靶标里程进行验证。

结果如表 5 所示,系统计算的靶标里程与全站仪计算的里程平均误差在 3.75 cm 左右,说明系统定位病害精度较高,证明了系统在定位病害方面的实用性。

表 5 定位结果对比

Table 5 Comparison of positioning results

	全站仪	隧道病害检测系统	误差/cm
A	YK2+64.321	YK2+64.354	3.3
B	YK2+70.214	YK2+70.258	4.4
C	YK2+75.144	YK2+75.181	3.7
D	YK2+80.251	YK2+80.286	3.5
E	YK2+87.632	YK2+87.671	3.9
F	YK2+93.833	YK2+93.869	3.6
G	YK2+99.328	YK2+99.369	4.1
H	YK2+105.458	YK2+105.493	3.5
I	YK2+111.553	YK2+111.590	3.7
J	YK2+117.692	YK2+117.730	3.8

5 结 论

本文设计搭建了激光扫描仪及线阵相机结合的轨交隧道病害检测系统,系统将 1 台二维激光扫描仪、9 台线阵相机、里程计等多个传感器集成于一体,并通过全局标定实现了多传感器坐标系统一。开发了多传感器同步采集控制软件,实现了多传感器的同步采集控制和传感器数据、状态实时显示。通过隧道的实验结果表明,系统能够检测小于 0.2 mm 的裂缝和 0.5 mm 的错台。最后,将数据在隧道变形监测、隧道错台检测、隧道裂缝识别、隧道病害定位的实际应用中证明了系统的实用性,并开发了隧道病害数据管理系统,为轨道交通隧道检测提供了一个可靠的解决方案。

本文研究取得了初步的成果,但是尚有许多需要进一步深入进行的研究工作。本文实现了系统的全局一体化标定,后续的研究中需在全局一体化标定的基础上实现多源数据融合,建立隧道的实景三维,并在实景三维的基础上进一步研究开发病害预警功能。目前本文系统适用于已经铺设轨道的盾构隧道,虽然该类型的隧道建设量较大,但后期仍然需要研究多种类型的隧道的检测算法,以增加系统对于不同类型隧道的适用范围。长期投入运营的隧道受变形的影响会产生管片裂缝、渗漏水、掉块等病害以及线状地物脱落等危险,严重影响行车安全。当前系统运行需要人工跟随,可以利用里程计、点云、图像以及隧道的设计结构等数据进行自主导航定位进而实现系统的无人化运行。

参考文献

[1] 城市轨道交通 2022 年度统计和分析报告[R]. 城市轨道交通, 2023(4): 13-15.
Urban rail transit 2022 annual statistics and analysis report[R]. Urban Rail Transit, 2023(4): 13-15.

- [2] 黄艳华, 吴贤国, 曾明平. 相依性条件下运营地铁结构健康风险感知[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(3): 261-268.
HUANG Y H, WU X G, ZENG M P. Structure health risk perception of operational subway under dependent conditions [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 37(8): 261-268.
- [3] 翟宏亮, 郑干, 梅东, 等. 基于地基 LiDAR 点云和 LPF 算法的盾构隧道病害检测研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(12): 84-88.
ZHAI H L, ZHENG G, MEI D, et al. Research to defects detection of shield tunnel based on terrestrial LiDAR point cloud and LPF algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(12): 84-88.
- [4] 黄震, 张陈龙, 傅鹤林, 等. 隧道检测设备的发展及未来展望[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2): 98-109.
HUANG ZH, ZHANG CH L, FU H L, et al. Development and future prospect of tunnel machine detection equipment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(2): 98-109.
- [5] 黄丹樱, 韦强, 朱椰毅, 等. 智能隧道检测车的现状及改进策略[J]. 现代城市轨道交通, 2022(11): 7-12.
HUANG D Y, WEI Q, ZHU Y Y, et al. Present situation and improvement strategy of intelligent tunnel inspection vehicle [J]. Modern Urban Transit, 2022(11): 7-12.
- [6] MONTERO R, VICTORES J G, MARTINEZ S, et al. Past, present and future of robotic tunnel inspection[J]. Automation in Construction, 2015, 59(11): 99-112.
- [7] 陈子正, 行鸿彦, 王瑞, 等. 一种铁路隧道衬砌掉块声音检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 134-140.
CHEN Z ZH, XING H Y, WANG R, et al. Sound detection method for lining falling block in railway tunnels [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 134-140.
- [8] HUANG H, SUN Y, XUE Y, et al. Inspection equipment study for subway tunnel defects by grey-scale image processing [J]. Advanced Engineering Informatics, 2017, 32: 188-201.
- [9] AI Q, YUAN Y. Rapid acquisition and identification of structural defects of metro tunnel[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4278.
- [10] HUANG H, LI Q, ZHANG D. Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77: 166-176.
- [11] 沈至毅, 谭周. GRP5000 隧道检测车在上海地铁的应用研究[J]. 山西建筑, 2013, 39(27): 158-159.
SHEN ZH Y, TAN ZH. Application of GRP5000 Tunnel detection Vehicle in Shanghai Metro [J]. Shanxi Architecture, 2013, 39(27): 158-159.
- [12] DU L, ZHONG R, SUN H, et al. Study of the integration of the CNU-TS-1 mobile tunnel monitoring system [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(2): E420.
- [13] 日本开发智能移动检测系统可用于隧道衬砌病害快速诊断[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1432.
The intelligent mobile inspection system developed in Japan can be used for the rapid diagnosis of tunnel lining diseases[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(8): 1432.
- [14] 朱宝伟. 机器视觉中的光源照明设计[J]. 电子科技, 2013, 26(3): 80-82.
ZHU B W. Lighting design in machine vision [J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(3): 80-82.
- [15] 孙万利, 屈佳艺, 春兰. 基于 PLC 的隧道内 LED 照明系统设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(6): 30-33.
SUN W L, QU J Y, CHUN L. Design of LED lighting system in tunnel based on PLC [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(6): 30-33.
- [16] 邱启帆, 王博, 张佳, 等. 面向激光跟踪仪跟踪恢复的伺服运动角度计算方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 93-100.
QIU Q F, WANG B, ZHANG J, et al. Calculation method of servo motion angle for laser tracker tracking recovery [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 93-100.
- [17] SUN B, ZHU J, YANG L, et al. Calibration of line-scan cameras for precision measurement[J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 6836-6843.
- [18] FANG S, XIA X, XIAO Y. A calibration method of lens distortion for line scan cameras [J]. Optik, 2013, 124(24): 6749-6751.
- [19] 张旭辉, 杨红强, 白琳娜, 等. 基于改进 RANSAC 特征提取的掘进装备视觉定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 168-177.
ZHANG X H, YANG H Q, BAI L N, et al. Research on the visual positioning method of tunneling equipment based on the improved RANSAC feature extraction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 168-177.

- [20] SHI B, YANG M, LIU J, et al. Rail transit shield tunnel deformation detection method based on cloth simulation filtering with point cloud cylindrical projection [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 135: 105031.
- [21] 吴文涛, 何赞泽, 杜旭, 等. 融合相机与激光雷达的目标检测与尺寸测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6): 169-177.
- WU W T, HE Y Z, DU X, et al. Fusing camera and Lidar for object detection and dimensional measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6): 169-177.
- [22] 刘健, 解全一, 吕成顺 等. 公路隧道衬砌裂缝图像质量增强方法研究[J]. 山东建筑大学学报, 2023, 38(4): 108-116.
- LIU J, XIE Q Y, LYU CH SH, et al. Research on image quality enhancement method of highway tunnel lining crack image[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2023, 38(4): 108-116.
- [23] 林康, 石波, 杨密, 等. 基于激光点云环缝环号识别

的盾构隧道病害定位方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(12): 4835-4847.

LIN K, SHI B, YANG M, et al. Disease location method of shield tunnel based on laser point cloud ring seam ring number identification[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(12): 4835-4847.

作者简介



石波(通信作者), 2002年于山东科技大学获得学士学位, 2005年于山东科技大学获得硕士学位, 2008年于山东科技大学获得博士学位, 现为山东科技大学教授, 主要研究方向为移动测量。

E-mail: shibo@sdust.edu.cn

Shi Bo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2002, M. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2005, and Ph. D. degree from Shandong University of Science and Technology in 2008, respectively. Now he is a professor in Shandong University of Science and Technology. His main research interest includes mobile measurement.