

基于激光雷达与机载光电成像融合的高速轨道形变检测系统设计

晏雯秀, 谢国坤, 肖焕丽

(西安交通工程学院 机械与电气工程学院, 西安 710300)

摘要: 高速轨道形变是指高速铁路轨道在运营过程中由于列车荷载、温度变化、地基沉降等因素而发生的变形现象, 极大影响了高速铁路车辆的行驶安全性, 为此, 设计了基于激光雷达与机载光电成像融合的高速轨道形变检测系统; 通过激光发射器、激光信号接收器的结构与组装, 实现激光雷达成像模块的设计, 从无人机、光电摄像机、云台等方面, 完成对机载光电成像模块的设计, 实现图像数据的融合处理; 在硬件优化系统的支持下, 生成高速轨道的激光雷达与机载光电图像, 经过去噪、畸变校正、去雾等操作, 完成对初始图像的预处理; 采用加权融合的方式, 得到激光雷达与机载光电融合图像, 并提取融合图像的边缘特征, 计算高速轨道位置坐标, 通过坐标计算结果与轨道初始结构数据的比对, 输出高速轨道形变的检测结果; 实验结果表明: 所设计系统的平均状态误检率为 2.3%, 形变量检测误差平均值为 0.15 mm, 具有良好的检测能力。

关键词: 激光雷达; 机载光电成像; 高速轨道形变; 形变检测系统

Design of High-Speed Orbit Deformation Detection System Based on the Fusion of LiDAR and Airborne Optoelectronic Imaging

YAN Wenxiu, XIE Guokun, XIAO Huanli

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China)

Abstract: High speed track deformation refers to the deformation phenomena caused by train load, temperature changes, foundation settlement and other factors during the operation of high-speed railway track, which greatly affects the driving safety of high-speed railway vehicles. Therefore, a high-speed track deformation detection system based on the fusion of LiDAR and airborne photoelectric imaging is designed. By designing and assembling the laser transmitter and laser signal receiver, the LiDAR imaging module is achieved. The airborne photoelectric imaging module is completed from aspects such as drones, photoelectric cameras, and PTZ, achieving the fusion processing of image data. With the support of the hardware optimization system, the high-speed orbit LiDAR and airborne optoelectronic images are generated, and the initial image is processed through operations such as denoising, distortion correction, and defogging. The weighted fusion method is used to obtain the fusion image of LiDAR and airborne optoelectronics, extract the edge features of the fusion image, calculate the high-speed track position coordinates, and output the detection results of high-speed track deformation by comparing the coordinate calculation results with the initial structure data of the high-speed railway track. Experimental results show that the average state error detection rate of the designed system is 2.3%, and the average error value of deformation detection is 0.15 mm, indicating good detection ability.

Keywords: LiDAR; airborne optoelectronic imaging; high speed track deformation; deformation detection system

0 引言

高速铁路是一种以较高的速度运行的铁路系统, 通过采用先进的技术和设施, 使列车能够以更高的速度行驶, 为人们提供更快速、舒适和可靠的交通方式。从组成结构上来看, 高速铁路由路基、桥涵、隧道和轨道 4 个部分组成, 其中高速轨道由两条平行线构成, 轨道被固定在轨枕上, 轨枕下面为道渣。高速轨道是用钢材制作而成, 其主

要作用是分散钢轨的重量, 维持路轨的轨距。高速轨道的设计与施工需要严格按照铁路施工标准, 并分析轨道上通过高速车辆时的满载情况, 保证铁路可以在高速状态下安全行驶。然而由于高速轨道在长期的使用过程中, 容易受到环境腐蚀、人为破坏等因素的影响, 导致高速轨道出现不同程度的形变, 不仅影响轨道上高速车辆的行驶寿命, 还会降低车辆在该区段内的行驶安全, 因此需要定期对高速轨道形变进行检测, 并针对存在形变的轨道区域进行修

收稿日期: 2023-07-27; 修回日期: 2023-09-12。

基金项目: 2022 年度校级中青年基金项目(2022KY-25)。

作者简介: 晏雯秀(1993-), 女, 硕士, 助教。

谢国坤(1979-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 晏雯秀, 谢国坤, 肖焕丽. 基于激光雷达与机载光电成像融合的高速轨道形变检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 27-33, 39.

复处理。

为此,国内学者展开了深入研究,较为成熟的成果包括:文献[1]自主开发了一套轨道移动激光测量与检测系统,建立系统内部数据采集、处理、分析的限界检测流程,并将各种现行的限界规范标准进行整合,可以同时满足铁路、地铁等不同轨道交通限界检测的需求。文献[2]设计了一种基于复合电磁的高速轨道缺陷检测系统,利用微分绕组对涡流与漏磁进行同步探测设计复合型电磁探测探针,在此基础上,搭建一套复杂的电磁法测试平台,利用高频涡流更适合于表面缺陷探测,而直流漏磁法可以探测到表面开放及隐蔽缺陷,通过对两种探测信号的处理、比较,检测表面和埋藏缺陷的信号。文献[3]设计基于时序 InSAR 技术的形变检测系统,结合均匀网格划分区域的方法,探测分布相对均匀的永久散射体,利用 SBAS InSAR 技术,实现对轨道交通特定路段及沿线地表形变的检测。除了上述检测方法,还有一些有关轨道的图像检测方法,如文献[4]建立了由激光器和 CCD 相机组成的数据信息采集系统,将 2D 和 3D 图像进行融合处理,对融合后图像实施灰度化处理,通过加权融合对轨道实施检测。文献[5]采用 YOLACT 方法分割轨道零部件,引入 Focal Loss 类别损失函数提高图像的拟合度,在此基础之上实施轻量化处理,提高检测效率。然而上述研究成果在实际应用过程中,存在明显的检测误差大的问题,为此引入激光雷达与机载光电成像融合技术。

激光雷达与机载光电成像融合技术中激光雷达是以发射激光束探测目标的位置、速度等特征量的雷达系统。机载光电成像是以无人机作为搭载设备,在光电效应的支持下进行物体成像的过程。而激光雷达与机载光电成像融合则是将激光雷达与光电成像结果经图像处理,最大程度地提取各信道中的有利信息,最后综合成高质量图像的过程,成像融合的最终目的是增加图像信息的利用率,改进机器判读的准确性和可靠性,提高原始图像的空间分辨率。本次研究利用激光雷达与机载光电成像融合技术对高速轨道形变检测系统进行优化设计,以期能够提高系统的形变检测精度,为高速轨道的维修工作提供辅助工具。

1 高速轨道形变检测硬件系统设计

所设计系统将激光雷达技术和机载光电成像技术结合,由 3 部分组成,分别为激光雷达成像模块、机载光电成像模块以及图像数据处理模块。系统架构如图 1 所示。

由图 1 可知,激光雷达成像的执行需要激光发射器、激光信号接收器等元件的支持,其中激光发射器将电脉冲转化为光脉冲并发射,激光信号接收器将被目标反射的光脉冲转换为电脉冲,然后发送给显示器。机载光电成像需要无人机设备、光电摄像机等元件的支持,通过云台与数传电台提高图像质量,并将图像传输至地面终端,结合图像数据处理器和 TVPS150PBS 型号的图像解码器实现图像数据的融合。

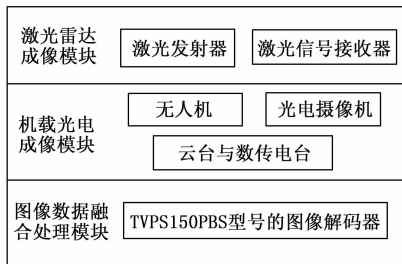


图 1 高速轨道形变检测系统结构图

1.1 激光雷达成像模块

激光雷达成像模块是采集激光雷达图像的元件,该模块由激光发射器、激光信号接收器等部分组成,具体介绍如下。

1.1.1 激光发射器设计

采用脉冲激光发射器用来产生激光信号,脉冲激光发射器的设计结构如图 2 所示。

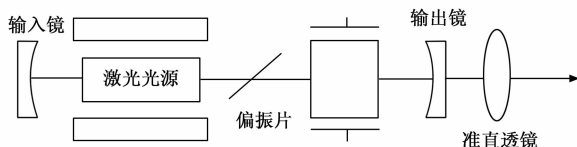


图 2 脉冲激光发射器设计结构图

图 2 为脉冲激光发射器设计结构,该激光器采用半导体侧泵 Nd:YAG,将激光器发射的激光与 Nd:YAG 相干材料相结合,使其在共振腔内产生共振,获得高功率输出。利用偏振元件与普克尔盒构成的电光学调 Q 装置,通过电光学调 Q,可获得窄脉宽、高峰值功率的脉冲激光输出。利用准直透镜对 1 064 nm 波长的激光进行准直,获得了具有小发散角度、接近平行的光束。要实现高精度的测量,激光发射器输出的激光能量必须在 100 mJ 以上,光束质量必须基本上达到衍射极限,而发射激光通常是通过对种子激光进行能量放大而获得的,其输出能量相对较高,为此需要使用主振荡放大结构和多级种子注入能量放大结构。在结构上,主振放大器可分为两个基本部件:主振级和功率放大级组。工作时,主振荡级和功率放大级可以分开进行,主振荡用来产生高品质的主振荡光,其输出功率是可调节的,因此,在工作所需的时域、频域特性上,可以较好地控制光束的质量^[6]。功率放大器的主要功能是对由主振荡引起的中子光进行放大,从而达到高功率高能量输出的目的。

1.1.2 激光信号接收器

使用雪崩光电二极管作为激光反射回波信号的接收器件,激光信号接收器的工作原理如图 3 所示。

在信号接收器的基础上,添加 ABC55001 高电压模组可为 APD 提供反向偏置电压,并具有 0.2 mA 的电流限制保护,可达到 10-SSO V 的调压,采用滑动电阻的调整来实现高电压输出。

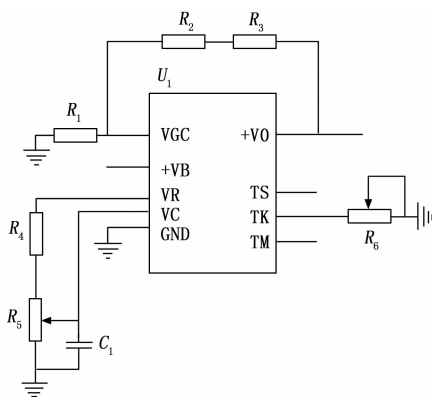


图 3 激光信号接收器工作原理图

1.2 机载光电成像模块

机载光电成像模块主要是利用装设在无人机上的光电摄像机采集目标区域图像, 因此机载光电成像模块由无人机、光电摄像机以及云台等部分组成。

1.2.1 无人机设计

选择四轴飞行器用来装载光电摄像机, 除机身外, 配置有多种通信接口、电源、扩展支架等, 保证可以将光电摄像机安装在无人机上^[7]。在软件上, 需要为无人机提供一套可供用户使用的软件工具, 用于获取飞行数据和进行飞行控制。在优化设计系统中, 需要在无人机内部加设一个信号采集与综合控制单元, 该单元包括两个部分: 一个是综合电源模块, 另一个是综合管理与信号处理模块。其中, 综合电源模块将对机载电源进行变换和分配, 为无人机中的各个有源单元提供电源。综合管理与信号处理模块一是可以与飞行器的控制元件进行互动, 二是可以实现单光电摄像机输出的飞行时间测量, 并将光电信号采集结果与机载惯导数据、扫描角度打包进行传送或存储^[8]。优化设计系统中的无人机采用基于 FPGA 的高精度延时链路, 通过粗、细相结合的检测方式, 实现对多通道、亚纳秒量级的光脉冲到达时间的精确检测。通过同步控制, 实现激光发射单元、光电信号采集单元、伺服单元等工作参数配置、系统采集及同步流程控制。

1.2.2 光电摄像机设计

选择 CCD 型号的光电摄像机, 该设备在接收到输入光后, 发生一定的电荷转移, 形成与输入光强成比例的输出电压。CCD 相机根据芯片的几何结构可以划分为线阵列和面阵列, 在该优化设计系统中, 使用的是面阵列 CCD, 也就是将感光像素排列成一个正方形, 可以直接获得二维图像。

1.2.3 云台与数传电台设计

设置云台的目的是保证光电摄像机在高空高速运动中也能保证图像质量, 满足系统的运行要求, 优化设计系统选择的云台为 FPV 模式^[9]。另外, 数传电台用来将机载光电摄像机采集到的实时图像信号远程传输给地面终端。

1.3 图像数据融合处理模块

图像数据处理器是激光雷达与机载光电成像融合技术

的运行元件, 处理器内部结构如图 4 所示。

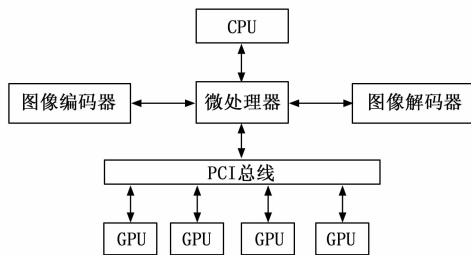


图 4 图像数据处理器内部结构图

在图像数据处理器的基础上添加一个 TVPS150PBS 型号的图像解码器, 解码器可将激光雷达输出的数据信号转换为数字色差检测信号, 且支持多种类型图像同时存在^[10]。检测系统中的图像融合指令可由高通 TVPS150PBS 解码芯片独立完成, 高通 TVPS150PBS 译码芯片和图像编辑装置之间存在多源互馈关系, 所以配合激光雷达的探测信息一直都是 BT-656 的原始格式。

除上述元件外, 高速轨道形变检测系统中的其他元件均沿用原有的系统, 并根据系统内元件的改装结果对连接电路进行调整。通过激光雷达成像模块、机载光电成像模块和图像数据处理模块完成硬件系统设计, 确保整个检测系统的可靠运行。

2 高速轨道形变检测方法设计

在硬件系统的支持下, 设计高速轨道形变检测系统的软件部分, 软件功能的实现原理为: 在激光雷达成像设备与机载光电图像设备的支持下, 获取高速轨道图像, 并对两种途径采集图像进行融合处理, 根据融合图像特征的提取结果确定当前高速轨道各个节点位置上的实际坐标, 并与初始设计轨道数据进行对比, 判断当前高速轨道是否存在形变, 针对存在形变情况的轨道进行形变量计算。具体实现步骤为: 软件部分主要基于成像原理, 生成高速轨道的激光雷达与机载光电图像, 初始化图像并实施去噪、畸变校正、去雾操作, 提高图像质量, 通过加权融合技术融合激光雷达与机载光电图像, 并提取图像特征, 输入特征点确定高速轨道的位置坐标, 计算当前高速轨道与初始轨道之间的位置偏差实现轨道的形变检测。

2.1 生成高速轨道的激光雷达与机载光电图像

在成像设备的支持下, 基于成像原理, 以高速轨道作为成像目标, 获取初始图像的采集结果, 激光雷达与机载光电成像原理如图 5 所示。

激光雷达的成像原理是对高速轨道中任意一个组成节点的位置进行探测, 因此每次只能探测到一个像素, 最终根据各个探测点之间的空间关系, 对其进行组合, 得出激光雷达图像的生成结果^[11]。在实际激光雷达成像过程中, 首先需要设定激光发射器输出激光信号的波长, 波长值如下:

$$\lambda = \frac{\mu_r \mu_f^2}{\delta_q \cdot \delta_f} \quad (1)$$

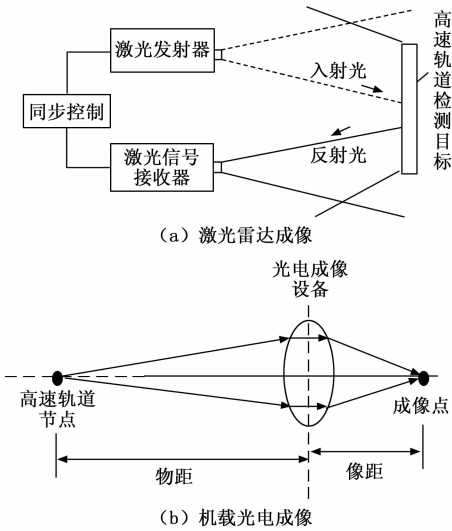


图 5 激光雷达与机载光电成像原理图

式中, μ_r 和 μ_i 分别为探测高速轨道的漫反射率和激光信号在大气环境中的单程透过率, 另外参数 δ_q 和 δ_f 对应的是激光发射器的量子效率和倍频效率。在实际激光雷达成像过程中, 控制激光发射器将发射的激光脉冲指向目标, 利用回波信号来表征被探测对象的反射特征, 激光的往返时间反映目标的距离^[12]。激光发射器根据诸如光栅扫描之类的特定扫描模式, 把固定波长的激光光束射向高速轨道目标的不同位置, 得出高速轨道各节点的成像结果, 高速轨道中第 i 个节点的成像结果可以表示为:

$$\begin{cases} I_i = I_x \otimes I_y \\ I_x = A_x \cos(f_i t - \lambda x_i + \varphi_x) \\ I_y = A_y \sin(f_i t - \lambda y_i + \varphi_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中, I_x 和 I_y 分别为激光雷达图像在水平和竖直方向上的像素值, A_x 和 A_y 分别为发射激光束在水平和竖直方向上分量的幅值, φ_x 和 φ_y 对应的是激光束横向分量与纵向分量的相位值, (x_i, y_i) 为高速轨道中第 i 个节点的实际坐标值, f_i 为激光束的发射频率, t 表示成像时间^[13]。由于优化设计系统对高速轨道形变的检测主要是在水平维度上, 因此在实际成像过程中不考虑 z 轴因素。按照上述方式可以得出高速轨道中所有节点的激光雷达成像结果, 最终通过多像素点的组合, 得出高速轨道激光雷达成像结果, 即:

$$I = \sum_{i=1} I_i \quad (3)$$

通过公式 (3), 即可完成对高速轨道激光雷达图像的采集^[14]。机载光电图像的采集原理就是在高空视角下, 利用光电效应将高速轨道的实物信息全部映射到相机坐标系中, 机载光电图像的生成结果为:

$$I_p(x, y) = Ih \sin\vartheta \begin{bmatrix} \mathbf{R} & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} (x_i, y_i) \quad (4)$$

其中: h 为无人机的飞行高度, ϑ 表示机载光电成像角度, 也就是无人机拍摄位置与目标高速轨道之间的夹角, \mathbf{R} 为旋转矩阵。在机载光电成像过程中, 需要根据高速轨道

位置规划无人机的飞行路线, 保证高速轨道始终在无人机光电成像设备的视野范围内。但生成的图像中往往存在噪声等干扰因素, 影响检测的准确性, 为此, 需要对图像进行预处理。

2.2 初始激光雷达与机载光电图像预处理

初始图像的成像质量直接影响系统的高速轨道形变检测功能, 激光雷达成像过程中容易受到环境中其他信号的影响, 导致生成图像中出现噪声, 降低图像信噪比, 而机载光电图像生成过程中, 由于拍摄距离较长, 容易出现畸变, 受到天气环境影响, 采集光电图像中还可能存在着雾^[15]。因此, 以提高初始图像质量为目的, 对激光雷达图像进行去噪处理, 同时对机载光电图像进行畸变校正和去雾处理。激光雷达图像的去噪处理过程如下:

$$I'_l = I_p(x, y) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{I_p}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

其中: σ 为图像像素值的标准差。在机载光电图像预处理过程中, 畸变校正处理操作可以量化表示为:

$$I'_a(x, y) = (1 - \kappa_a)[(1 - \kappa_i) + \kappa_i] I'_l \quad (6)$$

其中: κ_a 和 κ_i 分别为机载光电图像的畸变系数和光电成像系数, 从公式 (6) 中可以看出, 通过对图像灰度值的内插处理, 得出畸变校正处理结果^[16]。在机载光电图像的去雾处理任务中, 首先需要确定成像环境的大气光值 g 和散射系数 μ_s , 在此基础上, 得出机载光电图像的去雾处理结果为:

$$I''_p = \frac{1}{\mu_s} [I'_a(x, y) - g] \quad (7)$$

将相关参数代入公式 (7) 中, 完成对机载光电图像的去雾处理。处理完成后, 将预处理结果重新赋值给初始图像。通过图像预处理步骤为高速轨道形变检测提供高质量的图像, 减少图像之间的差异, 使得最终融合结果更具可靠性。

2.3 融合激光雷达与机载光电图像

采用空间融合的方式将激光雷达与机载光电图像中的有效信息融合在一起, 在保证图像信息完整性的同时, 降低高速轨道检测的计算量。空间融合是将两种方法得到的目标信息进行精确地匹配^[17]。在此基础上, 利用多层次、多角度的图像处理技术, 对目标的有效信息进行相关性分析和联合评估, 实现目标的精确可信度; 同时, 对目标的形状、距离和材料等特征信息进行优化, 实现目标的精确判别。图像的融合原理如图 6 所示。

在求解了机械光学成像参数的约束方程后, 就可以确定机载光学成像和激光雷达之间的坐标变换关系^[18]。使激光雷达所获得的点云资料能够投影到机载光电图像上, 激光雷达与机载光电图像的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{W} I''_p \begin{bmatrix} d \cos\theta \cos\varphi \\ d \cos\theta \sin\varphi \\ d \sin\theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

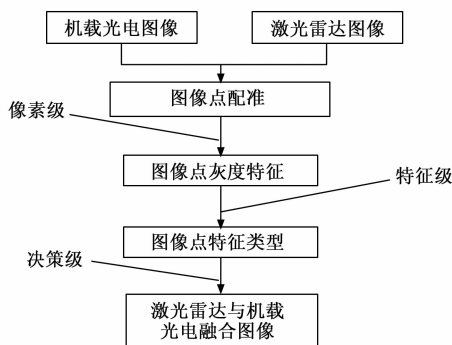


图 6 激光雷达与机载光电图像融合原理图

其中: \mathbf{W} 为转换矩阵, θ 和 φ 对应的是激光雷达与机载光电成像设备的方位角和水平角度偏差, d 为激光束与机载光电成像点之间的距离。通过公式 (8) 的计算, 将两种类型的图像转换成同一形式, 进而得出激光雷达与机载光电图像的融合结果为:

$$I_f = (\omega_l I'_l + \omega_p I''_p)(x_l, y_l) \quad (9)$$

其中: ω_l 和 ω_p 分别为激光雷达与机载光电图像的融合加权值。按照上述方式完成对两种类型图像的融合。融合激光雷达与机载光电图像可以更容易地检测到高速轨道上的障碍物或异常状况, 帮助工作人员尽早发现潜在问题。

2.4 提取高速轨道融合图像特征

高速轨道融合图像提取的特征主要为边缘特征, 根据融合图像在水平和垂直方向上的梯度值, 计算各个像元位置的梯度幅值与方向, 而全局的梯度特征不能直接反映图像的边缘, 为了能够突出边缘点, 必须保留局部区域梯度幅值最大的点, 常采用非极大值抑制方法进行局部最优处理^[19]。选取 3×3 的邻域模板, 将 8 个像素点的轮距分成 4 个方向, 分别为: 水平, -45° , 垂直, $+45^\circ$, 边缘的法线按照其数值大小进行相应的划分, 获取高速轨道融合图像边缘特征的提取结果:

$$\begin{cases} q(x, y) = \sqrt{I_f + \phi(x, y)^2} \\ \phi(x, y) = \arctan\left(\frac{u_y(x, y)}{u_x(x, y)}\right) \end{cases} \quad (10)$$

其中: $u_x(x, y)$ 和 $u_y(x, y)$ 分别为图像在两个方向上的偏导数。根据融合图像特征可以精准计算高速轨道的位置坐标, 确保高速轨道的安全性。

2.5 计算高速轨道位置坐标

将提取的高速轨道融合图像特征以特征点的形式输出, 判断当前特征点对应目标是否为高速轨道, 根据特征点位置确定高速轨道的位置坐标, 计算公式如下:

$$G(x, y) = q(x, y)[f \cos \zeta \tau_x(q, \phi), f \cos \zeta \tau_y(q, \phi)] \quad (11)$$

其中: $\tau_x(q, \phi)$ 和 $\tau_y(q, \phi)$ 分别为边缘特征点在水平和垂直方向上的分量, f 和 ζ 分别为图像焦距和摄影偏角, f 和 ζ 参数的具体取值需综合考虑激光雷达与机载光电成像过程^[20]。按照上述方式可以得出高速轨道区域所有节点的位置坐标计算结果。通过计算高速轨道位置坐标, 可以实现

对轨道形变量的量化和评估, 为轨道形变的检测提供了准确的量化指标。

2.6 实现高速轨道形变检测功能

为判断当前高速轨道是否存在形变情况, 需设置高速轨道的初始设计结构, 得出轨道中各个节点的预期位置, 记为 (x_0, y_0) 。将计算得出的当前高速轨道位置信息与预期位置进行比对计算, 计算公式如下:

$$\begin{cases} \Delta x = |x_i - x_0| \\ \Delta y = |y_i - y_0| \end{cases} \quad (12)$$

将公式 (11) 的计算结果以及设计的预期位置坐标数据代入公式 (12) 中, 即可得出当前高速轨道与初始轨道之间的位置偏差^[21-22]。若计算得出水平位置偏差 Δx 和垂直位置偏差 Δy 的值均为 0, 则说明当前高速轨道不存在形变, 否则认为当前轨道存在形变, 形变量为:

$$\gamma = G(x, y)(\Delta x + \Delta y) \quad (13)$$

最终将形变状态和形变量的检测结果通过硬件系统中的显示器进行输出, 完成系统高速轨道形变的检测功能。

3 系统测试与分析

以测试优化设计系统的高速轨道形变检测功能为目的, 设计系统测试实验。此次系统测试采用白盒测试与对比测试相结合的方式, 在实验开始之前, 对选择的高速轨道进行形变设置, 确定轨道的真实形变情况和形变量。在此基础上, 运行优化设计的形变检测系统, 将输出的检测结果与设置的真实情况进行对比, 得出反映系统检测功能的量化测试结果。对比测试的目的是体现出优化设计系统在检测功能方面的优势, 在对比系统设置与运行过程中, 需保证实验变量的唯一性。

3.1 配置系统开发环境

优化设计的基于激光雷达与机载光电成像融合的高速轨道形变检测系统选择 MFC 作为开发工具, 该工具能提供一组预定义类库, 是使用 Visual C++ 进行编程的基础, 为 Windows 程序提供了一个面向对象的方式, 它包含了许多 Windows API 的功能。在 Visual C++ 的支持下, 利用 MFC 类库, 以及 Visual C++ 中的可视化软件, 可以快速搭建出一个系统的框架。

3.2 选择高速轨道检测对象

此次实验选择高速铁路的某段轨道作为研究对象, 该轨道为有砟轨道, 综合考虑轨道上铁路车辆的行驶速度, 将轨道的平曲线半径设置为 9 600 m, 轨道左右钢轨之间的间距为 2 m, 高速轨道正线最大坡度控制在 35% 以下。在轨道选择过程中, 要求高速轨道不存在明显形变情况, 保证系统测试实验的可操作性。

3.3 设定高速轨道形变检测期望值

高速轨道形变检测期望值的设定就是控制轨道产生不同程度的形变, 通过以下步骤得出:

1) 选择一段无明显形变情况的高速铁路轨道作为研究对象;

2) 轨道需满足高速行驶要求, 包括平曲线半径、轨道间距和轨道坡度等;

3) 将铁路车辆调整至满载状态, 并控制车辆的行驶速度达到 200 km/h;

4) 铁路车辆经过多次往返行驶, 使测试的高速轨道出现明显形变;

5) 按照高速轨道分布区域, 将其分成多个区段, 每个区段的形变检测期望值通过测量高速轨道在该区段上产生的水平形变分量和垂直形变分量得出, 总形变量是水平形变分量和垂直形变分量之和。

部分区段的形变检测期望值设定情况, 如表 1 所示。

表 1 高速轨道形变检测期望值设定表

高速轨道 区段编号	水平形变 分量/mm	垂直形变 分量/mm	形变总量/mm
1	5.4	6.3	11.7
2	7.2	5.9	13.1
3	3.8	11.3	15.1
4	6.5	8.1	14.6
5	11.7	7.6	19.3
6	12.4	4.7	17.1
7	9.6	10.5	20.1
8	8.1	9.2	17.3

按照上述方式可以得出, 选择轨道上所有区段的形变状态设置结果, 实验设置区段数量为 100 个。在实际的高速轨道形变状态与形变量设定过程中, 若经多次铁路车辆运输仍不能达到目标形变效果, 则需要采用人工破坏的方式进行设定。

3.4 安装并校正激光雷达与机载光电成像设备

根据高速轨道形变检测硬件系统的设计情况, 将激光雷达成像设备安装在检测轨道周围, 机载光电成像设备安装在无人机设备上。激光雷达成像设备的装设实景如图 7 所示。



图 7 激光雷达成像设备布设实景

在激光雷达成像设备启动之前, 利用 TSGM N-5Q 型声光调制器和 KG-PM 1550 型光电调制器实现激光信号的

线性调频, 调制带宽为 20 GHz。由于高速车辆行驶, 可能存在振动情况, 因此需要在激光雷达成像设备周围加设一个减振元件。相机的最大分辨率是 $5\,760 \times 3\,840$, 有效像素超过了 230 万, 机身总重量为 950 g, 完全符合无人驾驶飞机的载重要求。相机支持高速连续拍摄, 同时能对曝光量进行精确而高效地控制, 相机和无人机都可以由计算机来控制, 这种性能适用于远程摄影。在一定的焦距范围内, 通过对焦距的确定, 可以有效地避免因对焦而造成的图像主点位置的改变。将提前规划的飞行路线导入到无人机设备中, 保证无人机能够按照指定路线飞行, 进而保证机载光电图像能够被有效采集。在成像之前先对硬件装置进行纵向、横向零点校正。竖向零点校正的步骤为: 先用一台成像装置对竖向墙壁进行扫描; 选择了竖向墙壁点云, 利用 Matlab 软件对其进行了平面拟合; 最后, 求出拟合面与 XOY 面之间的夹角, 该夹角的余角就是需要校正的竖直零点。另外, 还可以根据转盘重置后正、负方转盘所需的转盘步数, 进行转换, 就可以获得水平零点所需的校正角。

3.5 描述系统测试实验过程

利用安装并校正完成的成像设备, 生成激光雷达图像样本和机载光电图像样本, 激光雷达图像样本的生成结果如图 8 所示。

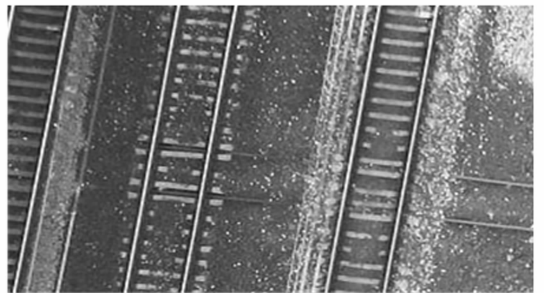


图 8 高速轨道激光雷达图像示意图

同理可以得出机载光电图像样本的生成结果。为保证激光雷达与机载光电图像融合技术的可操作性, 两种途径采集的图像样本大小均为 640×480 , 图像分辨率和曝光系数均相同。以图 8 表示的图像为处理对象, 通过预处理、特征匹配、坐标计算等步骤, 得出高速轨道形变的检测结果, 并通过显示器输出系统检测结果, 如图 9 所示。

重复上述操作可以得出高速轨道各个区段的形变检测结果。实验中设置的对比系统包括: 系统 1 (文献 [2] 系统) 和系统 2 (文献 [3] 系统), 在编程工具的支持下, 在 3.1 小节描述的相同测试环境下, 完成对比系统的开发, 并得出相应的检测输出结果。通过下述步骤确定实际测量距离:

- 1) 选择一个已知形变情况的轨道区域作为标定区域;
- 2) 在标定区域上放置一个或多个已知位置和形状的参数物体;



图 9 高速轨道形变检测系统输出界面

3) 运行检测系统, 使用激光雷达或机载光电成像等设备, 对标定区域进行数据采集, 获取轨道形变的检测结果;

4) 将采集到的数据进行处理和分析, 确定实际测量距离。

3.6 设置系统测试指标

为实现对系统检测功能的量化测试, 分别设置高速轨道形变状态误检率和轨道形变量检测误差作为系统测试实验的两个测试指标, 其中形变状态误检率主要是判断系统是否能够准确地将处于形变状态的轨道全部检测出来, 该指标的数值结果为:

$$\eta = \frac{N_c}{N_s} \times 100\% \quad (14)$$

式中, N_c 和 N_s 分别为系统检测错误的轨道区段数量和实验选择的轨道区段总数量, 通过系统输出状态检测结果与状态期望值的比对与统计, 即可得出 N_c 的具体取值。另外轨道形变量检测误差的数值结果如下:

$$\epsilon = |\gamma_c - \gamma_s| \quad (15)$$

其中: γ_c 和 γ_s 分别为系统输出的轨道形变量以及设置的形变量期望值。最终计算得出误检率越低、形变量检测误差越小, 证明对应系统的检测功能越优。

3.7 系统测试结果与分析

3.7.1 检测效果测试

统计 3 种系统输出的高速轨道形变状态检测结果数据, 通过公式 (14) 的计算得出高速轨道形变状态误检率指标的测试结果, 如图 10 所示。

从图 10 中可以直观地看出, 3 种系统的平均状态误检率分别为 17.4%、12.6% 和 2.3%, 与两种对比系统相比, 所设计系统的误检率更低, 检测效果最好。

3.7.2 检测可靠性测试

为了进一步验证所设计系统的检测可靠性, 对比 3 种系统的检测误差:

步骤 1: 使用三种系统对高速轨道进行形变检测, 并得

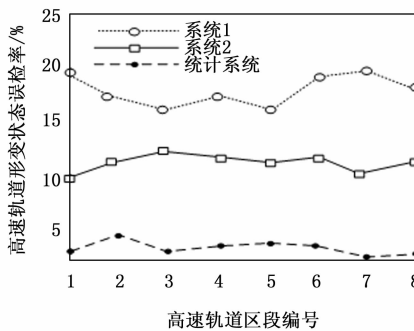


图 10 高速轨道形变状态误检率测试对比曲线

到水平形变分量和垂直形变分量的测量结果;

步骤 2: 记录每个系统在每个轨道编号下的水平形变分量和垂直形变分量的检测结果;

步骤 3: 根据测量结果通过公式 (15) 计算每个系统的高斯轨道形变量的检测误差, 具体结果如表 2 所示。

表 2 高斯轨道形变量检测误差测试数据表

轨道编号	系统 1		系统 2		所设计系统	
	垂直形变分量/mm	水平形变分量/mm	垂直形变分量/mm	水平形变分量/mm	垂直形变分量/mm	水平形变分量/mm
1	5.9	6.8	5.7	6.5	5.3	6.3
2	8.4	5.2	7.6	5.7	7.1	5.9
3	4.2	11.9	3.4	11.7	3.8	11.2
4	6.9	7.7	6.8	8.5	6.5	8.0
5	11.1	7.0	11.9	7.2	11.5	7.6
6	13.8	4.9	12.8	4.4	12.4	4.5
7	9.0	11.3	9.3	10.2	9.5	10.4
8	8.9	9.8	8.6	9.4	8.2	9.1

通过公式 (15) 计算两种对比系统的平均高斯轨道形变量检测误差分别为 1.41 mm 和 0.65 mm, 而所设计系统得出高斯轨道形变量检测误差的平均值为 0.15 mm, 误差检测结果最小, 证明该系统具有良好的形变检测可靠性。

4 结束语

为了保证高速轨道的使用安全, 在激光雷达与机载光电成像融合技术的支持下, 优化设计了高速轨道形变检测系统。从实验结果中可以看出, 与对比系统相比, 所设计系统具有更高的检测功能, 对于高速铁路列车的行驶安全起到积极作用。在系统测试实验结束后, 需要对损坏的高速轨道进行修复处理, 降低系统测试实验成本。

参考文献:

[1] 黄 希, 姚连璧, 杨璐璟. 基于移动激光扫描的轨道交通建筑限界一体化检测 [J]. 测绘通报, 2023 (3): 84-88.
 [2] 许 鹏, 耿 明, 方 舟, 等. 基于复合电磁的高速轨道缺陷检测方法研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (18): 57-65.

(下转第 39 页)