

近景摄影测量技术在钢轨检测中的应用研究

屈仁飞¹, 王培俊¹, 刘瑞¹, 刘强¹, 李保庆²

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031; 2. 成都西南交大研究院有限公司, 四川 成都 610031)

摘要:为解决手工检测工具效率低、检测结果不便于数字化管理和工作强度大等弊端,将非接触式近景摄影测量技术与三维结构光检测相结合,提出一种准确获取钢轨的三维点云数据,进而得到钢轨表面轮廓参数的有效手段。使用近景摄影测量技术获取标志点的空间位置,以此作为点云扫描的全局拼接点;利用三维结构光扫描仪获取钢轨的点云数据,从而获取钢轨表面轮廓参数;对比研究近景摄影测量技术对检测结果与测量精度的影响。铁路现场试验表明:该方法的测量精度可达0.08 mm,可实现对钢轨表面轮廓参数的精确测量。

关键词:近景摄影测量;三维结构光;钢轨;表面轮廓参数

中图分类号:U216.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)01-0175-04

Application of Close-range Photogrammetry Technology in Rail Inspection

QU Renfei¹, WANG Peijun¹, LIU Rui¹, LIU Qiang¹, LI Baoqing²

(1. College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Chengdu Southwest Jiaotong University Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to solve the disadvantages of low efficiency of manual testing tools, inconvenient digital management of testing results and high work intensity, etc. By combining non-contact close-range photogrammetry with three-dimensional structured light detection, an effective method is proposed to accurately obtain the three-dimensional point cloud data of the rail and then obtain the rail surface profile parameters. Close-range photogrammetry is used to obtain the spatial location of landmarks as the global splicing point of point cloud scanning. The point cloud data of the rail are obtained by using a three-dimensional structured light scanner, thus the rail surface profile parameters are obtained. The influence of close-range photogrammetry on the test results and measurement accuracy is compared and studied. The railway field test shows that the measurement accuracy of this method can reach 0.08mm and can realize the accurate measurement of rail surface profile parameters.

Keywords: close-range photogrammetry; three-dimensional structured light; rail; parameters of surface profile

0 引言

我国高铁的蓬勃发展使钢轨的实时精确检测在保障铁路的安全运营中尤为重要。目前国内铁路现场对钢轨的检测方式大多为接触式测量,存在效率低、测量工作强度高、检测过程对人员依赖性大、检测结果不便于数字化管理等问题。非接触式测量具有测量精度高、自动化程度高等优势。为准确、有效地获取钢轨的表面轮廓参数,有研究提出对钢轨进行三维光学检测。杨杰等利用三维结构光采集得到钢轨点云,采用平面遍历弦测法与密度聚类计算得到波磨的谷深与波长信息^[1]。荀慎龙等提出一种基于结构光技术的轨道检测平台,可测量多个轨道相关参数^[2]。高军强等提出一种多摄像机线结构光的钢轨三维检测系统,可对钢轨表面缺陷深度信息实现实时在线检测^[3]。以上研究均对短距离钢轨进行扫描,测量精度会随着钢轨测量长度的增加而降低,其中点云的拼接累积误差是对精度的主要影响因素之一。

高铁客运追求平稳性和平顺度,随着速度的增加,对钢轨的精度要求越来越高,因此钢轨需要精度更高的检测手段。近景摄影测量技术具有测量精度高、可实现非接触式测量和便于携带等优势。赵博雅^[4]介绍了近景摄影测量技术在航空制造过程中零部件几何特征测量、全机水平测量、逆向反求测量和钣金变形分析等各项应用。同时,近景摄影测量技术在自动分拣系统^[5]、监测基坑^[6]和山地矿区变形^[7]等应用场景有突出表现。

本文将近景摄影测量技术应用到钢轨的三维结构光检测中,解决了单独使用结构光扫描钢轨导致的多片点云拼接累积误差变大的问题,是一种获取钢轨表面轮廓数据的高精度手段。

1 近景摄影测量与三维结构光检测系统

钢轨具有在高度方向和横截面方向尺寸较小、列车行驶方向尺寸很大的几何特征。三维结构光检测系统具有

基金项目:四川省科技计划重点研发项目(2019YFG0045)

第一作者简介:屈仁飞(1996—),男,重庆梁平人,硕士研究生,研究方向为数字化设计与检测。

抗干扰能力强、精度高、效率高等特点,可扫描检测复杂三维曲面。但对于长钢轨而言,其不足之处在于扫描得到的单片点云的幅面有限,扫描幅面越大,精度越低。为适应长钢轨的特征,需要多次扫描并进行点云拼接处理。试验表明,点云拼接累积误差随点云幅数的增加而增加^[8]。为弥补结构光检测系统对于多片点云的拼接累积误差,本文首先使用近景摄影测量系统获取标志点三维坐标,再将标志点坐标信息导入三维结构光检测系统并获取多片连续的钢轨点云。

1.1 近景摄影测量系统

近景摄影测量系统通过中心透视原理投影成像,利用共线方程、共面方程、空间相似变换方程、空间前后方交会、相对定向、绝对定向、光束平差等数学模型求得编码标志点与非编码标志点的空间坐标信息。本文使用的近景摄影测量系统由相机、测量分析软件、笔记本电脑、编码标志点、非编码标志点、定比例尺等组成。该系统需要的摄站由编码标志点、非编码标志点与定比例尺在钢轨周围的空间摆放位置组成,图1所示为使用相机环绕摄站进行拍摄。

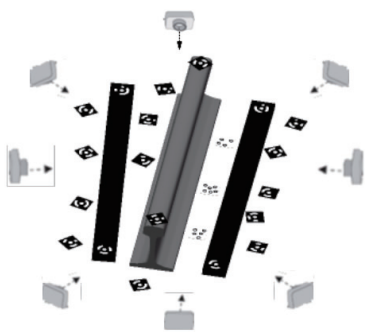


图1 环绕摄站拍摄

近景摄影测量系统具体操作步骤如下:1)在钢轨周围布置适量非编码标志点;2)在钢轨周围放置定比例尺和适度密度的编码标志点,完成摄站布置;3)从不同方位环绕摄站拍摄至少8幅具有足够多标志点的照片;4)将照片导入测量分析系统软件;5)运用软件计算得到所有标志点的三维坐标;6)导出标志点坐标信息。

1.2 三维结构光检测系统

三维结构光检测系统由测量头与测量软件组成,其中测量头正中装有光栅投射器,左、右两侧各有一个摄像头,组成一个双目结构光视觉测量系统。光栅投射器向钢轨投射光栅,光栅相位呈周期性变化;两个摄像头对钢轨进行拍摄,得到具有光栅的钢轨照片,如图2所示。

将使用近景摄影测量系统运算得到的标志点坐标信息导入三维结构光检测系统中,测量软件将结合标志点坐标信息对带有光栅的照片进行计算,即可得到精确的钢轨表面三维点云信息。

2 提取钢轨表面轮廓参数

根据国家铁道行业标准 TB/T3276—2011《高速铁路

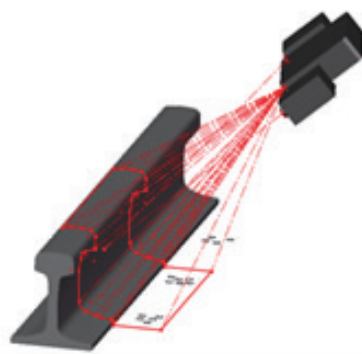


图2 三维结构光扫描钢轨

用钢轨》^[9],将近景摄影测量技术与三维结构光扫描系统结合,检测钢轨点云的多个横截面方向的钢轨高度、轨头宽度、轨底宽度以及列车行驶方向的平直度。

2.1 钢轨点云预处理

为了方便提取钢轨表面轮廓参数,点云需要经过除杂与摆正等预处理过程。

1) 钢轨点云除杂

铁路现场扫描得到的钢轨点云往往掺杂着部分道床、轨枕、联结零件等非钢轨点云,如图3(a)所示,应去除这些无用的点云数据,以免影响钢轨表面轮廓参数的提取。

非钢轨点云数据与钢轨点云数据之间存在一定空间距离,并且非钢轨点云数据的点数量较少。本文通过设置欧式聚类^[10]的搜索半径将非钢轨点云数据与钢轨点云数据分割成不同聚类;然后设置聚类最少需要的点数量,从而剔除非钢轨点云数据。

2) 钢轨点云摆正

点云数据最初的空间位置是随机的,难以计算钢轨表面轮廓参数,因此需要调整其空间位置,使横截面方向、高度方向和列车行驶方向分别与 x 轴、 y 轴和 z 轴平行。

首先,按照 TB/T3276—2011《高速铁路用钢轨》^[9]提供的 60 kg/m 钢轨断面图建立钢轨模型,从而获得标准钢轨点云;其次,使用主成分分析^[11](principal component analysis, PCA)+迭代最近点^[10](iterative closest point, ICP)配准算法,将扫描得到的钢轨点云与标准钢轨点云进行配准,从而达到将扫描得到的钢轨点云摆正的目的。

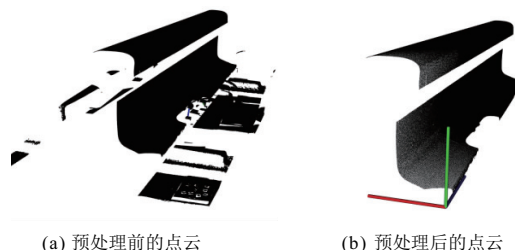


图3 预处理前后钢轨点云对比

2.2 钢轨表面轮廓参数

标准 60 kg/m 钢轨三维模型如图4所示,其断面对称

轴为 $x = 75 \text{ mm}$, 对称轴所在点云数据的 y 值为钢轨高度; 轨头踏面以下 14.2 mm 处点云数据至对称轴距离的 2 倍为轨头宽度; 轨底点云数据至对称轴距离最大值的 2 倍为轨底宽度。

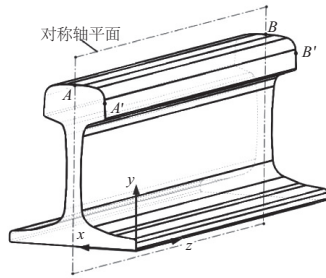


图4 标准60钢轨模型

提取对称轴所在点云数据, 令 z 值最小处的点为 A , z 值最大处的点为 B , 线段 AB 作为垂直平直度测量基线, 则其他横截面在对称轴处的点 C 至测量基线的距离为垂直平直度 h 。将点 A 、 B 、 C 视为 $\triangle ABC$ 的 3 个顶点, 则垂直平直度 h 为过点 C 作边 AB 的垂线, h 的具体计算如式(1)~式(6)所示。

$$|AB| = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \quad (1)$$

$$|AC| = \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2} \quad (2)$$

$$|BC| = \sqrt{(x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2 + (z_B - z_C)^2} \quad (3)$$

$$\cos\langle AB, AC \rangle = \frac{|AB|^2 + |AC|^2 - |BC|^2}{2|AB||AC|} \quad (4)$$

$$\sin\langle AB, AC \rangle = \sqrt{1 - \cos^2\langle AB, AC \rangle} \quad (5)$$

$$h = |AC| \cdot \sin\langle AB, AC \rangle \quad (6)$$

同理, 提取轨头侧面圆弧以下 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 处点云数据, 令 z 值最小处的点为 A' , z 值最大处的点为 B' , 线段 $A'B'$ 作为水平平直度测量基线, 则其他横截面在轨头侧面圆弧 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 处的点 C' 至测量基线的距离为水平平直度 h' 。

3 现场试验与结果分析

为了测试近景摄影测量技术结合三维结构光系统对钢轨的检测效果以及检验该方法的可行性和精度, 在汉十高铁线云梦东站对 60 kg/m 钢轨进行了现场测量试验。

选取一段长度为 1.2 m 的待测钢轨, 对其进行两种不同方式的非接触式测量: a. 综合使用近景摄影测量和三维结构光检测系统进行测量; b. 直接使用三维结构光检测系统测量。为考察上述测量方式的准确性, 对同一钢轨采取第 3 种测量方式; c. 使用分度值为 0.02 mm 的数显式游标卡尺测量, 将其与上述两种非接触式测量方式对比。游标卡尺操作简单, 精度较高, 目前铁路现场普遍使用, 但其属于接触式测量, 容易磨损, 每次使用后须重新校准才可准确测量, 且手工记录检测数据, 测量效率低; 而本文的非接触式光学测量则避免了此问题。

3.1 现场试验

1) 进行近景摄影测量。在待测钢轨周围布置定比例

尺、编码标志点和非编码标志点, 图 5 所示为测量现场布置的摄站。环绕摄站至少拍摄 8 幅照片, 为保证使用编码标志点成功对照片进行定位以便于计算相机位置, 每张照片中应至少包含 5 个编码标志点。将照片导入测量分析软件中, 计算出所有标志点。本文的近景摄影测量系统使用的标志点为 12 位, 测量精度为 $25 \mu\text{m/m}$ 。



图5 铁路现场摄站布置

2) 进行三维结构光扫描。将结构光检测系统中的测量头搭载在自行研制的轨道检测小车上, 对图 5 中的钢轨进行扫描, 如图 6 所示。本文使用的结构光扫描系统的单幅测量幅面为 $400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 单幅获取点云数据 120 万~160 万, 单幅测量精度为 0.03 mm 。

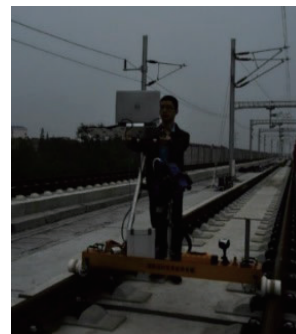
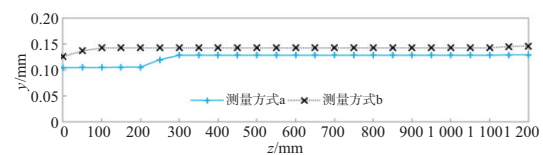


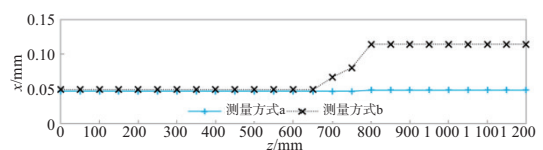
图6 结构光现场测量

3.2 试验结果与分析

通过测量方式 a、方式 b 得到的垂直平直度如图 7(a) 所示, 均 $< 0.6 \text{ mm}$; 通过方式 a、方式 b 得到的水平平直度如图 7(b) 所示, 均 $< 0.4 \text{ mm}$, 且均满足国家铁道标准要求, 但这两种方式的准确性需与测量方式 c 比对后确认。



(a) 垂直平直度



(b) 水平平直度

图7 测量方式 a、方式 b 测得的平直度

对试验钢轨每隔 30 cm 取 1 个截面进行对比。表 1 为通过测量方式 a、方式 b、方式 c 得到的钢轨各截面的轮廓参数对比。可见方式 a 得到的结果与方式 c 更接近,更稳定,且都满足标准要求。

表 1 方式 a、方式 b、方式 c 测得的钢轨轮廓参数
单位:mm

测量参数	测量方式	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	标准要求
钢轨高度	a	175.67	175.67	175.65	175.57	176±0.6
	b	175.75	175.75	175.75	175.57	
	c	175.62	175.64	175.62	175.60	
轨头宽度	a	70.56	70.57	70.56	70.56	70.8±0.5
	b	70.32	70.36	70.36	70.29	
	c	70.54	70.54	70.52	70.56	
轨底宽度	a	150.75	150.75	150.75	150.75	150±1.0
	b	150.28	150.76	150.76	150.28	
	c	150.62	150.62	150.64	150.60	

获取点云时,测量方式 a 和方式 b 均需点云拼接,对于本试验中的 1.2 m 钢轨,需扫描 4 幅点云,拼接 3 次。点云拼接会产生拼接误差,表 2 为通过这两种方式测得的点云拼接后的平均绝对误差。可见方式 a 的误差相对较小,不会随着点云拼接数量的增加而增加;方式 b 的误差会随着点云拼接数量的增加而增加。

表 2 现场点云拼接平均绝对误差 单位:mm

点云拼接片数	平均绝对误差	
	测量方式 a	测量方式 b
2	0.08	0.13
3	0.07	0.20
4	0.08	0.29

相对误差 δ 可以很好地反映测量值的精确程度:

$$\delta = \frac{l-L}{L} \times 100\% \quad (7)$$

计算方式 a、方式 b 两种测量方式获得的钢轨表面轮廓参数的相对误差,取其最大值,即最大相对误差进行比较,如表 3 所示。可见方式 a 的相对误差更小,精度更高。

表 3 最大相对误差对比 单位:%

轮廓参数	测量方式 a	测量方式 b
钢轨高度	0.14	0.36
轨头宽度	0.06	0.39
轨底宽度	0.09	0.72

4 结语

1) 将近景摄影测量技术与三维结构光检测相结合,对钢轨进行扫描,可准确地获取钢轨的点云数据,从而提取钢轨表面轮廓参数。

2) 现场试验表明,本文提出的方法对钢轨高度、轨头宽度、轨底宽度和平直度等钢轨表面轮廓参数的检测精度约为 0.08 mm,满足国家铁道行业对各参数的检测要求。相对于单独使用三维结构光对钢轨进行检测,该方法精度更高;有效解决了点云幅数越多、拼接累积误差越大的问题;且该方法为非接触式测量,避免了使用游标卡尺测量存在的工作效率低、易磨损、曲面测量困难等问题。

参考文献:

- [1] 杨杰,王培俊,肖俊,等. 基于弦测法与密度聚类的三维结构光波磨检测[J]. 铁道标准设计,2020,64(2):40-45.
- [2] 苟慎龙,王培俊,唐晓敏,等. 一种轨道三维检测平台的设计分析与仿真[J]. 机械制造与自动化,2018,47(1):152-155,180.
- [3] 高军强,刘桂华. 多摄像机线结构光的钢轨表面三维缺陷检测[J]. 机械设计与制造,2017(3):170-172,176.
- [4] 赵博雅,张承阳,景喜双,等. 近景测量技术研究及其在航空制造中的应用[J]. 图学学报,2018,39(3):509-514.
- [5] 靳璞磊,张丽艳. 一种基于摄影测量的自动分拣系统标定方法[J]. 机械制造与自动化,2017,46(4):219-224.
- [6] 孟丽媛,邹进贵,朱勇超,等. 近景摄影测量在基坑监测中的应用研究[J]. 测绘通报,2015(增刊1):167-170.
- [7] 刘昌华,王成龙,李峰,等. 数字近景摄影测量在山地矿区变形监测中的应用[J]. 测绘科学,2009,34(4):197-199.
- [8] 郑小江. 60 钢轨和 9 号道岔尖轨光学测量精度及廓形参数研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [9] 中华人民共和国铁道部. TB/T 3276—2011 高速铁路用钢轨[S]. 北京:中国铁道出版社,2011.
- [10] 郭浩. 点云库 PCL 从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2019.
- [11] 刘哲,周天,彭东东,等. 一种改进的基于 PCA 的 ICP 点云配准算法研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2019,36(4):473-478,505.

收稿日期:2020-06-19