

基于线结构光的钢轨扣件紧固状态检测方法

王乐^{1,2}, 周谦¹, 方玥¹, 王胜春^{1*}, 黎国清¹, 王昊¹, 任盛伟¹, 戴鹏¹, 王凡¹

¹中国铁道科学研究院集团有限公司基础设施检测研究所, 北京 100081;

²中国铁道科学研究院研究生部, 北京 100081

摘要 铁路钢轨扣件系统易发生扣件缺失、弹条断裂、弹条歪斜和螺栓松动或过紧等现象, 传统基于二维强度图像的检测方法可以较好地识别出前三种缺陷, 却很难检测出螺栓松动或过紧缺陷。针对该问题, 提出了基于线结构光的扣件螺栓紧固状态检测方法。利用 3D 相机获取轨道结构的三维点云数据, 通过构建累积高度函数和先验知识, 分割钢轨区域和扣件区域, 并计算待测螺栓与钢轨轨头外侧非磨损区域的高度差。在此基础上, 提出了一种基于在线更新阈值库确定螺栓紧固状态阈值的方法, 将该高度差与阈值库进行比较, 实现螺栓的紧固状态检测。实验结果表明, 在检测速度为 $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的情况下, 扣件松动和过紧的检出率均在 80% 以上。该方法弥补了传统扣件检测方法的不足, 实现了扣件紧固状态的自动化检测。

关键词 测量; 线结构光; 扣件紧固状态; 松动检测; 三维测量

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1612002

Detection Method of Rail Fastener Fastening State Based on Line Structured Light

Wang Le^{1,2}, Zhou Qian¹, Fang Yue¹, Wang Shengchun^{1*}, Li Guoqing¹, Wang Hao¹, Ren Shengwei¹, Dai Peng¹, Wang Fan¹

¹Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

²Graduate Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China

Abstract Railway rail fastener system is prone to defects such as fastener missing, elastic strip fracture, elastic strip skew, and bolt loosening or over tightening. The traditional detection method based on two-dimensional intensity images can identify the first three diseases, but it is difficult to detect the bolt looseness or over tightening defect. In order to solve this problem, a detection method of fastener bolt fastening state based on line structured light is proposed. The 3D point cloud data of track structure are obtained by 3D camera. The rail area and fastener area are segmented by building a height integral function and prior knowledge, and the height difference between the bolt to be measured and the non-wear area outside the rail head is calculated. Based on this, a method to determine the threshold of bolt fastening state based on online updating threshold library is proposed. The height difference is compared with the threshold database to realize the detection of bolt fastening state. The experimental results show that the detection rate of fastener looseness or over tightening is more than 80% under the condition of detection speed of $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. This method makes up for the shortcomings of the traditional fastener detection methods and realizes the automatic detection of fastener fastening state.

Key words measurement; line structured light; fastener fastening state; looseness detection; three dimensional measurement

OCIS codes 120.1880; 110.2970; 100.2000; 150.6910

收稿日期: 2020-10-13; 修回日期: 2020-11-12; 录用日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61702551)、中国铁道科学研究院集团有限公司基金重点项目(2018YJ147)

通信作者: *wangshengchun@rails.cn

1 引言

扣件是轨道结构的重要组成部分,它起到保持和调整轨距、轨向,提供纵向阻力,防止钢轨爬行的作用,同时也提供弹性,减小列车运行时产生的振动冲击,因此,扣件系统对于铁路运行安全至关重要^[1]。然而,随着列车运行速度和密度的提升,扣件螺栓松动和过紧的问题越来越多,尤其是重载铁路,由于列车的振动冲击较大,螺栓松动问题频发。螺栓松动和过紧的问题如果不能得到及时解决,相邻区域的扣件会失效,轨道几何参数改变,平顺性降低,行车安全受到影响^[2-4]。人工作业主要以塞尺作为检测工具,通过抽样的方式进行扣件螺栓松动检测,具有效率低、成本高的缺点,不符合铁路高速化和智能化发展的趋势。目前,国内铁路养护单位主要利用轨道巡检车,通过线阵相机采集轨道结构的二维灰度图像,然后分割轨道结构并提取扣件缺陷特征,从而识别出扣件缺失、弹条断裂等缺陷^[5-7],但无法检测螺栓松紧问题。这是由于相机垂直于轨道拍摄,仅仅获取了轨道结构的二维灰度图像,而螺栓松动或过紧前后的二维灰度图像差别很小,无法实现缺陷特征的提取有效,因此传统基于二维灰度图像的方法不能进行螺栓松紧状态的检测。文献[8]利用二维激光轮廓传感器扫描待测铁路扣件,获取扣件的坐标数据,并将其与标准扣件的坐标数据进行对比分析,根据误差判断待测铁路扣件的松紧状态。该方法比对待测扣件数据与标准扣件数据的过程涉及到点云匹配问题,点云匹配过程耗时,且由于受噪声干扰、待匹配点云分割不确定性等因素的影响,点云匹配结果往往出现较大误差。文献[9]提出了一种基于高度比对的钢轨扣件螺栓浮起检测方法。该方法首先获取扣件的三维深度数据,将其转换为二维深度图像,再在二维深度图像中确定螺栓感兴趣区域,计算当前螺栓高度值,并与当前螺栓未浮起时的参考高度值进行比较,通过固定阈值判断当前螺栓是否浮起。该方法通过计算螺栓紧固头到钢轨底部平面的距离来获取螺栓的高度,但由于传感器扫描角度的限制,无法直接扫描获取钢轨底部平面数据,需要通过轨腰及轨底三角区域的数据间接计算得到,计算方法较为耗时。

选取螺栓高度的参考基准是准确识别扣件螺栓松紧状态的关键。由于铁路线路受到路基沉降和施工因素的影响,正常螺栓的高度并不是保持不变的,因此选取正常螺栓的高度作为螺栓松动判断的参考

基准容易造成较大误差,而选择固定阈值作为整条线路螺栓松动的判断依据也不合理。

针对以上问题,提出了基于线结构光的扣件螺栓紧固状态检测方法。该方法基于线结构光三维测量原理,利用 3D 相机获取轨道结构的三维点云数据。在一个轮廓中,根据钢轨的宽度构建累积高度函数,利用累积高度函数的最大值点分割出钢轨区域,由钢轨区域和先验知识定位扣件区域,在扣件区域利用阈值分割法得到螺栓区域,选取钢轨轨头外侧非磨耗区域的高度值作为参考基准,计算该区域与待测螺栓的高度差。为了避免路基沉降和施工因素的影响,提出了在线更新阈值库的方法以确定螺栓紧固状态的判断阈值。该方法步骤简单,不需要点云匹配过程,计算复杂度低,并且充分考虑了轨底坡因素,对于同一股钢轨内外侧螺栓,分别设置不同的紧固状态判断阈值,螺栓紧固状态的判断依据合理。

2 研究方法

2.1 线结构光的三维测量原理

图 1 是线结构光轮廓测量技术所采用的透视投影几何模型,其中 P 点为激光平面上的一点, Q 是其对应的像点。线激光器、镜头和相机组成一套线结构光轮廓测量组件,线结构光入射到被测物表面,被调制能反映被测物轮廓信息的光条,相机拍摄该光条,得到被测物的激光断面图像。对该图像进行光条中心提取,得到光条中心像素坐标,结合光条中心的像素坐标和系统标定参数,便可计算出被测物的实际轮廓。配合扫描运动,可以等间距获取被测物的轮

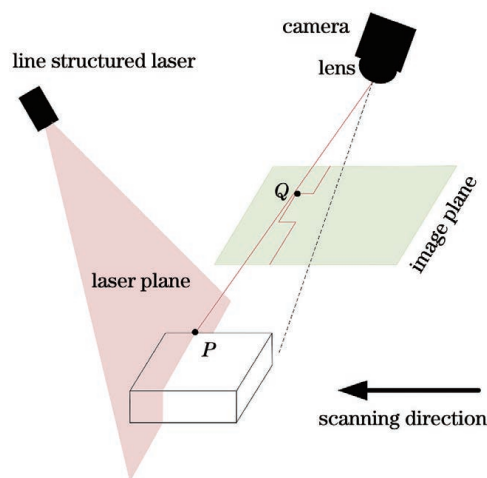


图 1 线结构光的三维测量原理图

Fig. 1 Principle diagram of 3D measurement based on line structured light

廓数据,从而实现整个被测物的三维测量^[10-12]。

2.2 系统组成

基于线结构光的三维测量原理,3D 相机、机器视觉镜头和线激光器组成的线结构光 3D 测量组件如图 2 所示,线结构光的光刀平面垂直入射到钢轨表面,由 3D 相机获取钢轨等部件的激光断面图像。

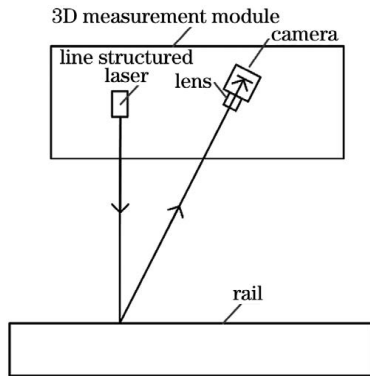


图 2 3D 测量系统

Fig. 2 3D measurement system

图 3 是三维点云数据采集系统,由两个线结构光 3D 测量组件、检测梁、轴端编码器和存储设备等主要部件组成。两个线结构光 3D 测量组件刚性连接在检测梁的两端,且两个线结构光 3D 测量组件分别位于两股钢轨的正上方,用于同时获取两股钢轨及其扣件的三维点云数据。图 4 是轨道三维点云数据采集原理图,定义 X 轴为扫描方向,即 X 轴与钢轨走向平行,Y 轴垂直于钢轨走向且指向轨道中心线,Z 轴垂直于轨道平面,向上为正。将检测梁安装在轨道巡检车或手推小车上,随着车辆的前进,轴端光电编码器提供等间距采样信号,控制两个线结构光 3D 测量组件同时对轨道结构进行等间距扫描,得到一系列轨道结构的轮廓数据,将轨道结构轮廓数据按照实际的采样间隔等间距排列,即可得到轨道结构的三维点云数据,实现轨道结构的三维重建。该轨道结构点云数据同时包含钢轨、扣件和轨道板等轨道关键部件数据,可用于轨道相关缺陷的检测。

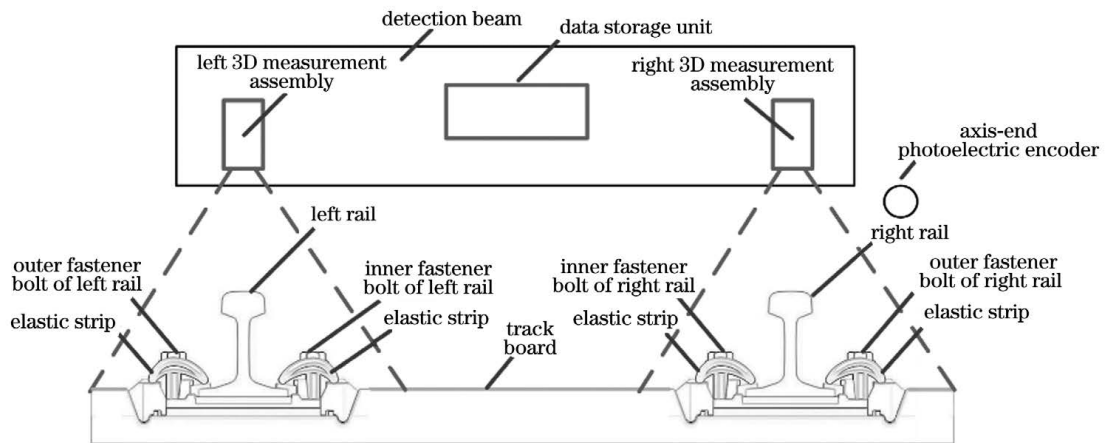


图 3 三维点云数据采集系统

Fig. 3 3D point cloud data acquisition system

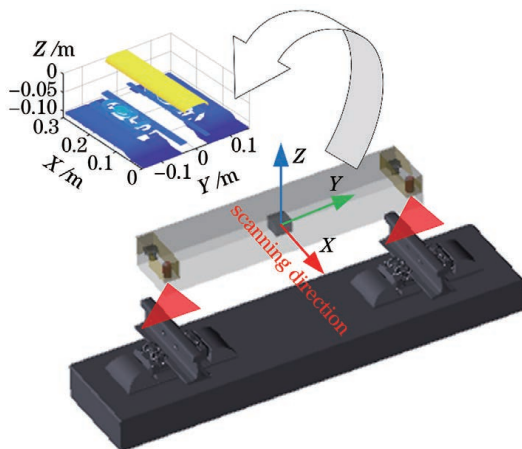


图 4 轨道三维点云数据采集原理图

Fig. 4 Principle diagram of track 3D point cloud data acquisition

2.3 扣件紧固状态的判断方法

图 5 是扣件紧固状态的检测流程图,主要由轨道结构三维点云数据采集单元、图像处理单元和螺栓松动判断单元组成。首先通过 3D 测量组件获取轨道结构的三维点云数据,然后通过图像处理单元定位钢轨轨头外侧矩形区域和扣件螺栓区域,最后通过螺栓松动判断单元判断螺栓紧固状态。

图像处理单元的作用是定位钢轨轨头外侧矩形区域和扣件螺栓区域,主要包括三步。

第一步,分割点云数据,定位钢轨轨头区域和扣件区域。首先,将钢轨轨头区域从原始三维点云中分割出来。以左侧钢轨为例,阐述点云分割过程。将轨道三维点云图像 Y 和 X 方向的长度分别记为

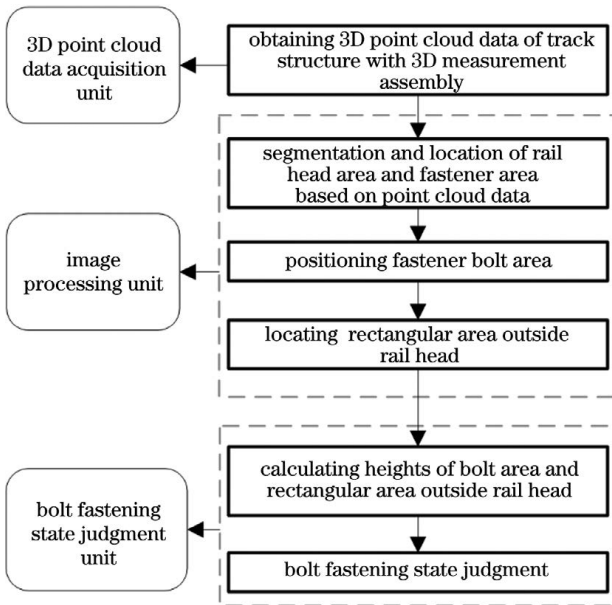


图 5 扣件紧固状态检测流程图

Fig. 5 Flow chart of fastener fastening state detection

W_{wid} 和 H_{Hei} , 用 $z(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的高度值 (深度值), 其中 $x = 0, 1, 2, \dots, H_{Hei} - 1, y = 0, 1, 2, \dots, W_{wid} - 1$ 。轨道三维点云图的每一行代表一个轮廓, 第 i 个轮廓的高度可以表示为

$$h(i) = z(i, y), y = 0, 1, 2, \dots, W_{wid} - 1. \quad (1)$$

图 6 是第 i 个轮廓的高度分布图, 可以看出, 钢轨区域在轨道三维点云图中具有固定的宽度和高度, 在一个轮廓中, 钢轨区域明显高于其他区域。将钢轨区域左边界的 Y 坐标值记为 y_l^i , 右边界的 Y 坐标值记为 y_r^i , 钢轨轨头宽度记为 w_1 。对于 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 型号的钢轨, $w_1 = 73 \text{ mm}$, 对于 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 型号的钢轨, $w_1 = 70 \text{ mm}$ 。在第 i 个轮廓中, 有

$$G(k, i) = \sum_{y=k}^{y=k+w_1} Z(i, y), y \in (0, W_{wid} - 1), k \in (0, W_{wid} - 1 - w_1). \quad (2)$$

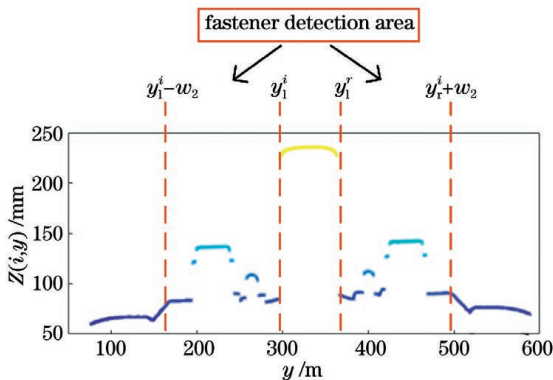


图 6 第 i 个轮廓的高度分布

Fig. 6 Height distribution of i -th contour

通过(2)式, 依次计算 $(k, k + w_1)$ 区间内的总高度 $G(k, i)$, 得到第 i 个轮廓的累积高度函数 $G(k, i)$, 其中 $k = 0, 1, 2, \dots, W_{wid} - 1 - w_1$, $G(k, i)$ 实际上是一个随 k 变化的离散函数。图 7 是第 i 个轮廓的累积高度函数 $G(k, i)$, 可以看出, 在钢轨轨头左边界的位置, 累积高度函数 $G(k, i)$ 达到最大值, 因此累积高度函数 $G(k, i)$ 达到最大值时的 k 就是钢轨轨头区域的左边界 y_l^i , $y_l^i + w_1$ 就是钢轨轨头区域的右边界。 y_l^i 和 y_r^i 的表达式分别为

$$y_l^i = \operatorname{argmax} [G(k, i)], \quad (3)$$

$$y_r^i = y_l^i + w_1. \quad (4)$$

对于由 H_{Hei} 个轮廓组成的轨道三维点云图, 利用(2)~(4)式计算每一个轮廓中轨头区域的左右边界, 即可得到整个轨道三维点云图中钢轨轨头区域的左右边界。

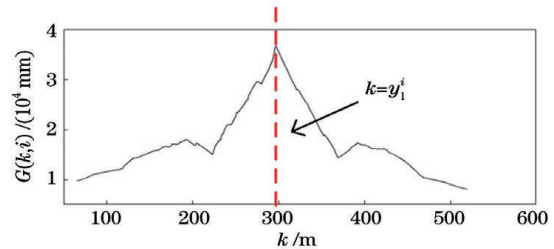


图 7 第 i 个轮廓的累积高度函数 $G(k, i)$

Fig. 7 Cumulative height function $G(k, i)$ of profile i

然后, 基于钢轨区域定位扣件区域。扣件对称分布于钢轨的左右两侧, 且扣件后肢边缘与钢轨边界的横向距离基本保持不变, 把该横向距离记为 w_2 , 则钢轨左侧扣件分布在区间 $(y_l^i - w_2, y_l^i)$ 内, 右侧扣件分布在区间 $(y_r^i, y_r^i + w_2)$ 内, 如图 6、8 所示, 其中图 8 中虚线矩形框表示钢轨区域, 实线矩形框表示扣件区域。利用该先验知识, 在第 i 个轮廓中, 选择区间 $(y_l^i - w_2, y_l^i)$ 和区间 $(y_r^i, y_r^i + w_2)$ 作为扣件检测区域, 当该区域内出现扣件时, 区域内的高度

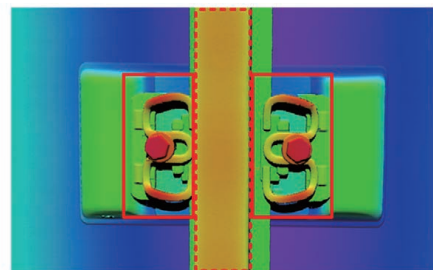


图 8 钢轨和扣件区域的分割结果(左股钢轨采样间隔为 1 mm)

Fig. 8 Segmentation results of rail and fastener area (sampling interval of left rail is 1 mm)

均值 H 和高度方差 D 较大,当该区域没有扣件,而是轨道板时,由于轨道板低于扣件,且较为平坦,此时区域内的高度均值和高度方差均较小。因此,利用扣件检测区域内的高度均值和高度方差两个特征量来判断该区域是否出现扣件。以左侧扣件检测区域为例,第 i 个轮廓的高度均值 H^i 和高度方差 D^i 分别为

$$H^i = \frac{1}{w_2} \sum_{y=y_1^i-w_2}^{y_1^i} Z(i, y), \quad (5)$$

$$D^i = \frac{1}{w_2} \sum_{y=y_1^i-w_2}^{y_1^i} [Z(i, y) - H^i]^2. \quad (6)$$

在此基础上,定位扣件区域为

$$\begin{cases} H^i > H_{t1} \text{ and } D^i > D_t, & \text{presence of fasteners} \\ H^i \leq H_{t1} \text{ and } D^i \leq D_t, & \text{no fasteners} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: H_{t1} 和 D_t 分别为高度均值阈值和高度方差阈值,其中前者与世界坐标系的选取相关,后者与世界坐标系的选取无关,本文中 $H_{t1} = 50 \text{ mm}$, $D_t = 33$ 。此外,在轨道三维点云图中,扣件区域沿扫描方向,即 X 轴方向具有一定的宽度,记为 w_3 。为了确保扣件区域定位的准确性并排除噪声干扰,连续被判断出现扣件的轮廓数量 n 满足

$$n \geq n_0 = \frac{w_3}{s}, \quad (8)$$

式中: s 为轮廓采样间隔,由编码器触发信号确定; n_0 为理论上完整的扣件区域的轮廓数量。当 n 不满足(8)式时,将已判定的轮廓出现扣件修正为轮廓没有出现扣件。

第二步,定位钢轨左右侧扣件螺栓区域。在扣件区域,螺栓的高度明显高于非螺栓区域,因此,利用该先验知识将螺栓区域从扣件区域分割出来。具体的做法如下。记扣件区域的最大高度为 Z_m ,在扣件区域,螺栓区域 R_{bolt} 内的点满足

$$Z(x, y) > Z_m - H_{t2}, \quad (9)$$

式中: H_{t2} 为调节阈值,对于不同的螺栓, H_{t2} 的取值略有不同; m 为螺栓区域点的个数。螺栓区域的中心记为 (x_0, y_0) :

$$x_0 = \frac{1}{m} \sum_{x \in R_{bolt}} x, \quad (10)$$

$$y_0 = \frac{1}{m} \sum_{y \in R_{bolt}} y. \quad (11)$$

x_0 被选为下一步定位钢轨轨头外侧矩形区域的位置基准。

第三步,定位钢轨轨头外侧矩形区域。图 9 是

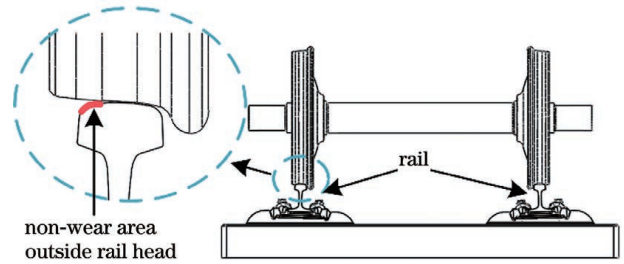


图 9 轮轨接触关系示意图

Fig. 9 Wheel rail contact diagram

轮轨关系示意图,在列车运行过程中,车轮与钢轨轨头内侧接触摩擦,随着运营时间的增加,左右股钢轨轨头内侧区域的磨损较为严重,而钢轨轨头外侧区域基本不存在磨损,因此该区域可以作为螺栓紧固状态判断的基准位置。同样以左股钢轨为例,过内侧螺栓区域的中心点 (x_0, y_0) 作平行于 Y 轴的直线,交钢轨轨头左边界于 (x_0, y_1) 点,如图 10 所示。其中, y_1 由第二步中确定的钢轨轨头左边界的一组 y_1^i 的平均值决定,可表示为

$$y_1 = \frac{1}{i_{max} - i_{min}} \sum_{i=i_{min}}^{i=i_{max}} y_1^i, \quad (12)$$

式中: $i \in (i_{min}, i_{max})$, i_{min} 和 i_{max} 分别为完整扣件区域的最小轮廓索引值和最大轮廓索引值。在点 (x_0, y_1) 右侧取一点 $(x_0, y_1 + w_y)$ 作为中心点,建立宽为 $2w_x$ 、高为 $2w_y$ 的平行于坐标轴的矩形区域 R_{rail} ,其四个顶点依次是 $(x_0 - w_x, y_1)$ 、 $(x_0 - w_x, y_1 + 2w_y)$ 、 $(x_0 + w_x, y_1)$ 和 $(x_0 + w_x, y_1 + 2w_y)$,其中 w_x 和 w_y 分别是矩形区域的半宽和半高, w_x 的取值范围为 $(2, 10)$, w_y 的取值范围为 $(6, 30)$ 。由

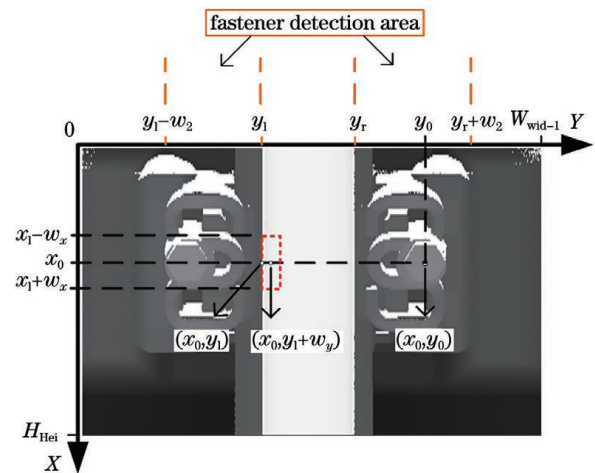


图 10 钢轨轨头外侧非磨损矩形区域示意图(左股钢轨轮廓采样间隔为 1 mm)

Fig. 10 Schematic of non-wear rectangular area outside rail head (sampling interval of left rail profile is 1 mm)

于该矩形区域位于钢轨轨头外侧非磨损区域,为了保证测量结果的准确性,以该矩形区域的平均高度作为螺栓松动判断的基准。

螺栓松动判断单元的作用是基于图像处理单元得到的数据,根据预设规则判断待测螺栓的紧固状态,主要分为两个环节。首先,分别计算扣件螺栓区域和钢轨轨头外侧矩形区域的高度。螺栓区域 R_{bolt} 和钢轨轨头外侧矩形区域 R_{rail} 的平均高度分别记为 H_{bolt} 和 H_{rail} ,计算公式分别为

$$H_{bolt} = \frac{1}{m} \sum_{(x,y) \in R_{bolt}} Z(x,y), \quad (13)$$

$$H_{rail} = \frac{1}{2\tau_{w_x} \times 2\tau_{w_y}} \sum_{(x,y) \in R_{rail}} Z(x,y). \quad (14)$$

然后,根据预设规则判断螺栓的紧固状态。假设在钢轨两侧扣件螺栓中,靠近轨道中心线的螺栓为内侧,远离轨道中心线的螺栓为外侧。受 1:40 钢轨轨底坡的影响,在正常情况下,钢轨内外侧扣件螺栓并非处于同一高度^[13],如图 6 所示,内侧螺栓的高度低于外侧螺栓,即内侧螺栓与钢轨顶面的垂直距离大于外侧螺栓与钢轨顶面的垂直距离,因此内外侧螺栓紧固状态的判断阈值并不相同。基于这种事实,在外侧螺栓的紧固状态判断中增加校正项 H_0 ,不同线路的校正项 H_0 不同,应根据实际情况选取。

因此,有

$$\Delta_H = \begin{cases} |H_{rail} - H_{bolt}|, & \text{inside} \\ |H_{rail} - H_{bolt}| + H_0, & \text{outside} \end{cases}. \quad (15)$$

利用(15)式计算内外侧螺栓与轨头顶面参考位置的高度差。记螺栓松动的判断阈值为 T_l ,螺栓过紧的判断阈值为 T_t ,螺栓紧固状态的判断公式为

$$\begin{cases} \text{loose}, & \Delta_H < T_l \\ \text{tight}, & \Delta_H > T_t \end{cases}. \quad (16)$$

如果螺栓高度与参考基准的高度差 Δ_H 小于固定阈值 T_l ,判断螺栓松动, Δ_H 大于固定阈值 T_t 时,判断螺栓过紧。但在现场应用中,受路基沉降、施工因素和线路种类差异的影响,螺栓紧固状态的判断阈值 T_l 和 T_t 不是固定的,而是随着线路状态改变,因此采用固定判断阈值判断螺栓紧固状态的准确度比较低,效果并不好。

实际上,在一定检测距离内,正常扣件的螺栓高度保持小范围的波动,而螺栓松动或过紧情况主要发生在极个别的扣件上,因此取一定检测范围内多个松动扣件和过紧扣件的 Δ_H 值组成螺栓紧固状态判断阈值库,并根据统计学 3σ 准则,确定合适的螺栓松动阈值 T_l 和螺栓过紧阈值 T_t 。通过上述分析,提出了一种基于在线更新阈值库确定螺栓紧固状态阈值的方法,图 11 是该方法的流程图,在测量

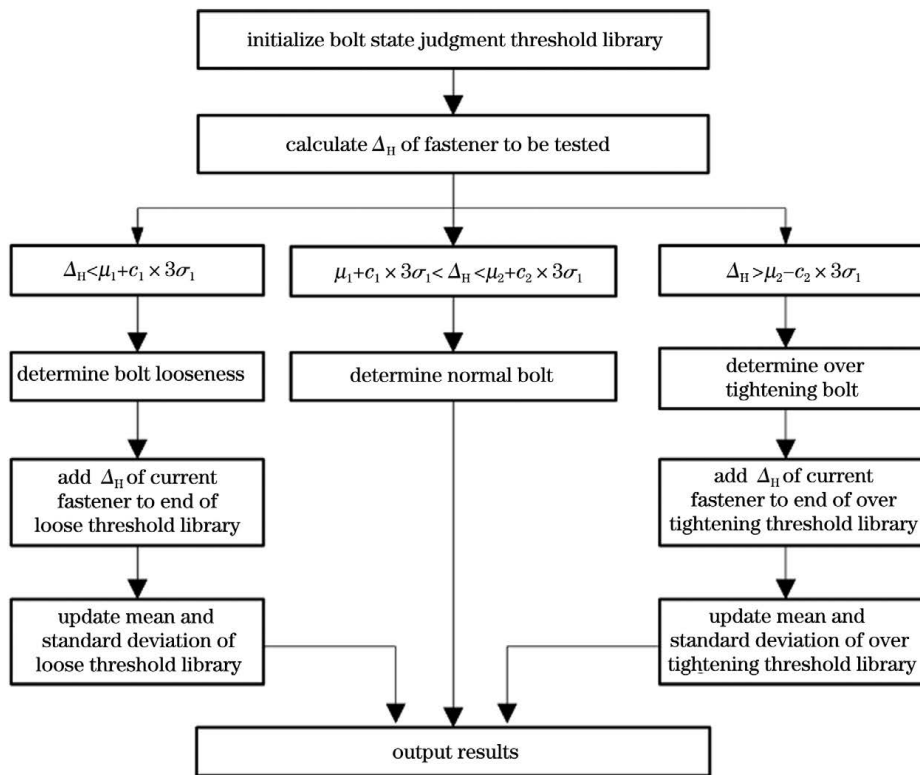


图 11 在线更新阈值库的流程图

Fig. 11 Flow chart of online updating threshold database

开始前,由 n_1 个螺栓松动的经验阈值 T_1 组成螺栓松动判断阈值库 $\{T_1^i, i=1, 2, 3, \dots, n_1\}$, n_2 个螺栓过紧的经验阈值 T_2 组成螺栓过紧判断阈值库 $\{T_2^i, i=1, 2, 3, \dots, n_2\}$, 记两个阈值库的均值分别为 μ_1 和 μ_2 , 标准差分别为 σ_1 和 σ_2 。对于当前待检测扣件, 计算螺栓高度与参考基准的高度差 Δ_H , 如果 $\Delta_H < \mu_1 + c_1 \times 3\sigma_1$, 则认为当前扣件螺栓松动, 并将当前扣件的 Δ_H 值添加到螺栓松动阈值库末尾, 更新螺栓松动阈值库的均值 μ_1 和标准差 σ_1 。如果 $\Delta_H > \mu_2 - c_2 \times 3\sigma_2$, 则认为当前扣件螺栓过紧, 并将当前扣件的 Δ_H 值添加到螺栓过紧阈值库末尾, 更新螺栓过紧阈值库的均值 μ_2 和标准差 σ_2 。如果 $\mu_1 + c_1 \times 3\sigma_1 < \Delta_H < \mu_2 - c_2 \times 3\sigma_2$, 则认为扣件螺栓正常。其中 c_1 和 c_2 是阈值范围调整系数, c_1 和 c_2 的取值范围由线路实际情况确定。如果阈值库的长度超过预设值 n_{\max} , 则删除阈值库的第一个阈值。以螺栓松动判断阈值库为例, 由阈值库的更新准则可以看出, 阈值库开头的阈值是距离当前待检测扣件较远的松动扣件的 Δ_H , 阈值库末尾的阈值是距离当前待检测扣件较近的松动扣件的 Δ_H , 因此动态更新的阈值库体现了当前待检测扣件局部范围内的扣件状态, 阈值库随着线路状态的变化而改变, 可以较好地适应路基沉降、施工因素和线路种类差异等情况, 从而提高扣件螺栓紧固状态检测结果的准确度。

3 实验与结果

3.1 实验室静态精度

3D 测量组件的视觉采集前端采用 SICK Ranger3 3D 相机和 Osela 5 mW 线激光器, 波长为 660 nm, 如图 12(a) 所示。3D 测量组件的深度测量范围为 200~500 mm。为了验证该组件在静态条件下的深度测量精度, 将一大一小两个公制标准量块叠放在基准台上, 标准块厚度均为 (9.00 ± 0.01) mm, 如图 12(b) 所示。3D 测量组件固定在标准块的正上方, 拍摄被标准块调制后的光条图像, 如图 12(c) 所示, 通过基准台下方一维平移台的运动(位置精度为 0.05 mm), 实现标准块的扫描和三维重建。计算最上方标准块的厚度, 并与实际厚度 9.00 mm 比较, 得到 3D 测量组件深度测量误差。厚度计算方法如下。任取两个标准块的一条轮廓线, 如图 12(b) 中虚线所示, 得到图 12(d) 所示两个标准块的实测轮廓, 其中右上方的点表示小标准块上表面的轮廓, 左下方的点表示大标准块上表面的轮廓。

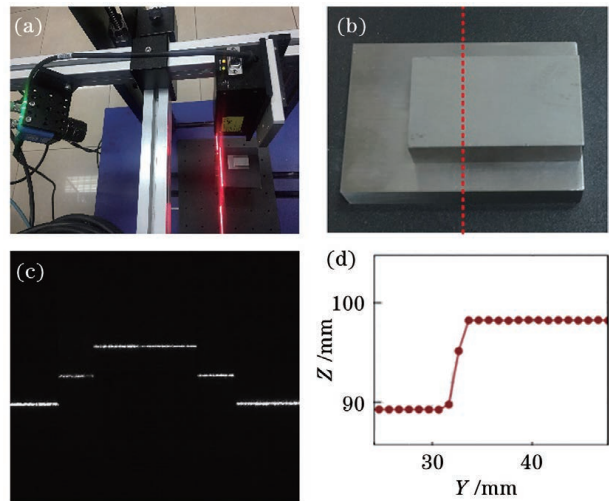


图 12 实验室静态精度验证。(a)测量装置;(b)两个标准块;(c)标准块的激光断面图像;(d)标准块的实测轮廓

Fig. 12 Static accuracy verification at laboratory. (a) Measuring device; (b) two standard blocks; (c) standard block laser section image; (d) measured profile of standard block

采用最小二乘法, 将小标准块上表面的轮廓拟合合成直线, 接着计算大标准块上表面该轮廓线上的点到该直线的距离, 记为 d_i , 则 d_i 的平均值就是标准块的厚度。

3D 测量组件在不同的深度位置具有不同的分辨率, 因此为了保证结果的可靠性, 上下移动标准块, 获取标准块在量程起点、中点和终点三个位置的轮廓数据, 分别计算标准块在上述三个位置的厚度与真实厚度的差值, 得到三组测量误差, 如表 1 所示。可以看出, 随着被测物远离 3D 测量组件, 测量误差逐渐增大, 总体上, 实验室静态精度在 0.1 mm 以内。

表 1 实验室静态精度

Table 1 Static precision at laboratory unit: mm

Block position	Measured value	Measurement error
Starting position	8.98	0.02
Midpoint position	8.94	0.06
Terminal position	8.91	0.09

3.2 现场动态精度

将 3D 测量组件安装在轨检车上, 进行现场动态实验, 如图 13 所示。这里以钢轨垂直磨耗的测量误差作为 3D 测量组件的动态精度。采用 3D 测量组件获取现场一段 100 m 长钢轨的三维点云数据, 每隔 1 m 计算钢轨垂直方向的磨耗; 在同样的位置

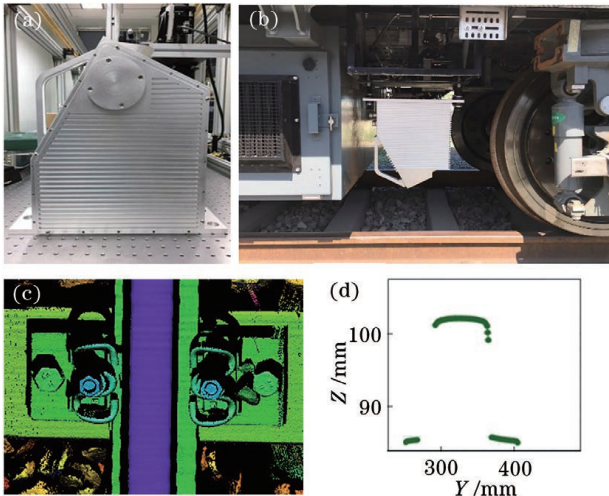


图 13 现场动态实验。(a) 3D 测量组件;(b) 现场安装;
(c) 钢轨三维重建;(d) 钢轨实测轮廓

Fig. 13 Dynamic test from scene. (a) 3D measurement module; (b) field installation; (c) 3D reconstruction of rail; (d) measured profile of rail

采用 Miniprof 轨廓仪(测量精度为 0.01 mm)每隔 1 m 进行钢轨垂直方向磨耗的现场复合,则 3D 测量组件的动态测量误差定义为钢轨垂直方向的磨耗计算值与现场复合值的差。图 14 为 100 个采样点的垂直磨耗测量误差,统计结果表明,钢轨垂直方向的磨耗最大误差为 0.78 mm,误差均值为 0.19 mm,标准差为 0.25 mm。

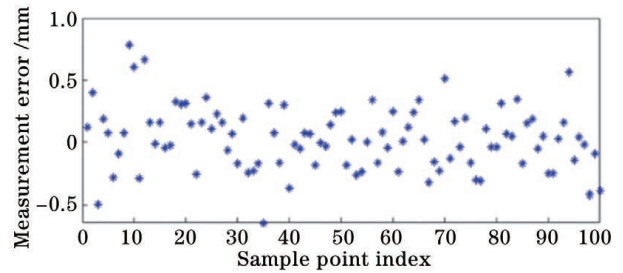
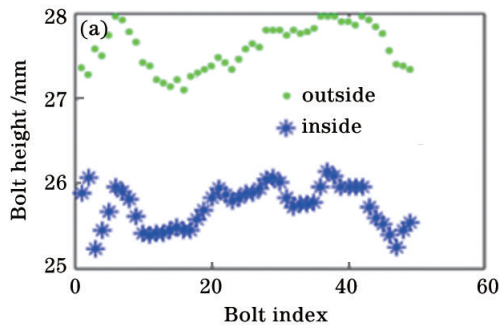


图 14 现场钢轨垂直方向的磨耗测量误差

Fig. 14 Wear measurement error perpendicular to rail from scene

3.3 扣件紧固状态的实测

由于轨底坡的存在,钢轨并不是水平放置的,而是朝向轨道中心线一侧倾斜一定的角度,因此正常情况下,钢轨内外侧的螺栓并不是处于同一高度。在实验线路上随机选取若干段螺栓正常的区域,统计钢轨两侧的螺栓高度分布情况,如图 15(a)所示。计算钢轨左右侧螺栓的高度差,结果如图 15(b)所示,可以看出,由于轨底坡的存在,钢轨外侧的螺栓高度普遍大于内侧,结合现场实际情况,确定轨底坡修正项 $H_0 = 1.9$ mm。在一段 5 km 长的实验线上(约 15000 个扣件),人工制造 140 个扣件松动缺陷和 60 个扣件过紧缺陷。扣件紧固状态判断精度 P 为

$$P = N_{TP} / (N_{TP} + N_{FP}), \quad (17)$$

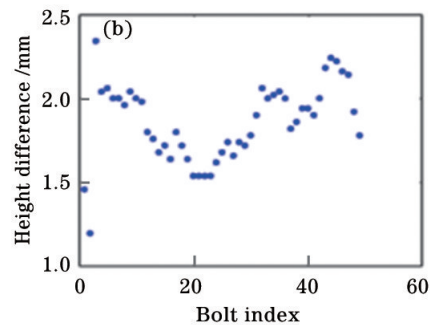


图 15 钢轨两侧的螺栓高度。(a) 两侧螺栓的高度分布;(b) 两侧螺栓的高度差

Fig. 15 Bolt heights on both sides of rail. (a) Bolt height distributions on both sides; (b) height difference of bolts on both sides

式中: N_{TP} 为真阳性结果的个数; N_{FP} 为假阳性结果的个数。在检测速度为 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的情况下,采集轨道结构的三维数据。在测量开始前,取经验阈值 $T_1 = 6$ 组成螺栓松动判断阈值库,经验阈值 $T_t = 8$ 组成螺栓过紧判断阈值库,两个阈值库的 n_{\max} 均取 10,表 2 给出了该条件下的扣件紧固状态判断结果。可以看出,扣件过松和过紧的判断精度均在 80% 以上,取得了较好的判断结果。由于阳光和异物等因

表 2 扣件紧固状态的判断结果

Table 2 Judgment results of fastener fastening state

Condition	N_{TP}	N_{FP}	$P / \%$
$T_1 = 6, n_{\max} = 10$	126	20	86.3
$T_t = 8, n_{\max} = 10$	45	10	81.8

素的干扰,检测结果出现了一定的假阳性,下一步可以通过对比不同检测时期的检测结果等措施,进一

步降低检测结果的假阳性。

4 结 论

提出了基于线结构光的扣件螺栓紧固状态检测方法,该方法不需要点云匹配过程,计算复杂度低,螺栓紧固状态的判断不受路基沉降和施工因素的影响。实验结果表明,实验室静态精度在 0.1 mm 以内,在检测速度为 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的情况下,该方法能有效地检测紧固件过松或过紧的异常状态,准确率达 80% 以上,实现了铁路钢轨扣件松紧程度的自动检测。排除阳光和异物等因素的干扰,进一步降低检测结果的假阳性是下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] Zhao R K. Rail fastening systems [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
赵汝康. 铁路钢轨扣件[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [2] Wang S C, Han Q, Wang H, et al. Laser stripe center extraction method of rail profile intrain-running environment[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0212004.
王胜春, 韩强, 王昊, 等. 行车环境下钢轨轮廓激光条纹中心的提取方法[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0212004.
- [3] Han Q, Dai P, Tan S, et al. Research and manufacture of vehicle-mounted track inspection system [J]. Railway Engineering, 2014, 54(11): 144-147.
韩强, 戴鹏, 谭松, 等. 车载轨道巡检系统研制[J]. 铁道建筑, 2014, 54(11): 144-147.
- [4] Liu J J, Xiong Y, Li B L, et al. Research on automatic inspection algorithm for railway fastener defects based on computer vision[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(8): 73-80.
刘甲甲, 熊鹰, 李柏林, 等. 基于计算机视觉的轨道扣件缺陷自动检测算法研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(8): 73-80.
- [5] Mao Q Z, Cui H, Hu Q W, et al. A rigorous fastener inspection approach for high-speed railway from structured light sensors [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 143: 249-267.
- [6] Dai X X, Ding S H, Yang E H, et al. Development and verification of automatic inspection system for high-speed railway fastener [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(10): 2478-2486.
代先星, 丁世海, 阳恩慧, 等. 铁路扣件弹条伤损自动检测系统研发与验证[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 2478-2486.
- [7] Wei J H, Liu C, Ren T Q, et al. Online condition monitoring of a rail fastening system on high-speed railways based on wavelet packet analysis [J]. Sensors, 2017, 17(2): E318.
- [8] Li C R, Cheng S M. Device and method for detecting tightness of railway fastener: CN107421445A [P]. 2017-12-01.
李存荣, 成思梦. 一种检测铁路扣件松紧状态的装置及方法: CN107421445A [P]. 2017-12-01.
- [9] Zuo L M. Method for detecting floating of track fastener bolts based on height comparison: CN109029283A [P]. 2018-12-18.
左丽玛. 一种基于高度比对的轨道扣件螺栓浮起检测方法: CN109029283A [P]. 2018-12-18.
- [10] Zhou J B, Li Y H, Qin Z Y, et al. Calibration of line structured light sensor based on reference target [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0412005.
周京博, 李玥华, 秦志英, 等. 基于参考靶标的线结构光传感器标定 [J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0412005.
- [11] Li A J, Xin R, Wu S H. Efficient calibration method for line-structured light vision measurement system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 221505.
李爱娟, 辛睿, 武栓虎. 高效线结构光视觉测量系统标定方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 221505.
- [12] Xie Z X, Li J P, Chi S K. Underwater binocular measurement method based on line-structured light [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0504004.
解则晓, 李俊朋, 迟书凯. 基于线结构光的水下双目测量方法 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0504004.
- [13] Xia Y, Lin J H, Wang F, et al. Study on dynamic detection system of rail cant based on 2D laser displacement sensor [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(4): 63-68.
夏银, 林建辉, 王锋, 等. 基于 2D 激光位移传感器的轨底坡动态检测系统研究 [J]. 铁道标准设计, 2019, 63(4): 63-68.