DOI: 10.13382/j.jemi.B2205220

基于轨型重建的平直度提取算法研究*

杨海马[1,2] 江 斌[1] 钱隆平[1] 张大伟[1] 焦 洋[3] 刘 瑾[4] 李 筠[1]

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093;2. 中国科学院空间主动光电技术重点实验室 上海 200083;
3. 上海瑞纽机械股份有限公司 上海 201314;4. 上海工程技术大学电子电气学院 上海 201620)

摘 要:钢轨焊前检测是保障铁路车辆安全行驶的重要环节,其中钢轨平直度是衡量钢轨质量优劣的重要指标。针对传统钢轨平直度检测步骤繁琐、单次测量长度有限和测量效率低等问题,依据三角法测量原理,利用激光轮廓仪交叠获取钢轨轮廓数据,使用改进的 ICP 算法快速配准点云数据,完成钢轨三维重建。然后利用自适应中值滤波对平直度参数曲线进行优化,采用模拟平尺法求解钢轨平直度。实验结果表明,基于轨型重建的平直度提取算法速度快,精度高,稳定性好,与人工检测的最大测量误差为 0.021 mm,与高精度电子平尺最大误差为 0.011 mm,最大标准差为 0.006 mm,符合钢轨焊前的平直度检测要求。

关键词: 焊前检测;激光轮廓仪;三维重建;ICP 算法改进;平直度;自适应中值滤波

中图分类号: TN206;U216.3 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 520.6040

Research on flatness extraction algorithm based on rail type reconstruction

Yang Haima[1,2] Jiang Bin[1] Qian Longping[1] Zhang Dawei[1] Jiao Yang[3] Liu Jin[4] Li Jun[1]

(1. College of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. Shanghai Railnu Machinery Corp, Shanghai 201314, China; 4. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Pre-welding rail inspection is a significant step to ensure the safe operation of railway vehicles. Rail straightness is an important index to measure rail quality. Aiming at the problems of cumbersome traditional rail flatness detection steps, limited single measurement length and low measurement efficiency, according to the triangulation measurement principle, the overlapping of laser profiler is used to obtain the rail contour data, and the improved ICP algorithm is used to quickly register the point cloud data to complete the three-dimensional reconstruction of rail. Then the adaptive median filter is used to optimize the flatness parameter curve, and the analog ruler method is used to solve the rail flatness. The experimental results show that the flatness extraction algorithm based on rail shape reconstruction has the advantages of high speed, high precision and good stability. The maximum measurement error with manual detection is 0.021 mm, the maximum error with high-precision electronic leveling ruler is 0.011 mm and the maximum standard deviation is 0.006 mm, which meet the requirements of flatness detection before rail welding.

Keywords: pre-welding; laser profiler; 3D reconstruction; ICP algorithm improvement; flatness; adaptive median filtering

0 引 言

国内外学者对高速铁路的研究表明,钢轨平直度对列车的行车速度和安全有着重要影响。钢轨平直度指标不合格会引起车体剧烈振动,可能导致车体脱轨倾覆,严重危害列车行驶安全。因此,为保障铁路行车安全,需要对钢轨平直度进行高精度检测。

传统的钢轨平直度检测主要依靠人工使用轨道检查仪、测量尺规、电子尺等工具完成。存在检测速度慢、测

收稿日期: 2022-03-02 Received Date: 2022-03-02

*基金项目:国家自然科学基金(U1831133)、中国科学院空间主动光电技术重点实验室基金(20212DKF4)项目资助

量精度低、人为干扰因素大等问题。随着检测工具和检测技术的发展,基于计算机视觉、三维测量技术等非接触式检测手段逐步应用在钢轨焊前检测中[1]。国内外的技术人员展开了深入广泛的研究,并有一部分的研究成果已经投入到实际使用当中。

Popov 等[2]重点研究了线结构光传感器的标定方法,并将成果成功运用在莫斯科轨道检测中。Sun 等[3]重点研究了轨型轮廓特征的提取,提出一种将卡尔曼滤波和 Hessian 矩阵相结合的方法来完成轨型特征的精确提取。Liu 等[4]提出了一种多结构光轨型轮廓动态检测技术,该方法能有效降低车体振动带来的误差。占栋等[5-6]在传感器传统标定的基础上,对非线性模型进行了深入研究并对视觉测量方法进行了优化和改进。

本文着重研究的是点云数据三维重建与 ICP 配准算法在平直度检测上的应用。在此方向上 Akca[7]首次提出了采用立体网格的方式来控制点云的搜索范围,通过限制采样点的选择来提高配准精度。He 等[8]提出了一种基于曲率自动配准的方法,该方法提高了配准精度。王志泽等[9]提出利用点云的法向量来对匹配点的选取进行约束,一定程度上提高了配准的精度。杨玲等[10]将 Procrustes 分析和 ICP 算法结合起来,提出了一种新型的配准算法。该算法均具有较好的鲁棒性,适用范围广。孙炜等[11]设计了一种融合轮廓特征的线激光点云配准算法,该方法减少了迭代的次数且对目标点云要求初始较低,一定程度上提高了配准的速度。罗哉等[12]用基于角度判断的细化算法和基于平面拟合的压缩算法,实现了边缘特征点的精细化提取。

本文在上述研究工作的基础上,将三维重建技术应用在钢轨焊前检测中,通过优化轨型三维结构,改进 ICP 算法,完成钢轨的平直度参数在线测量,最终检测结果表明该方法稳定可靠,有效提高了测量效率。

1 钢轨轮廓数据的完整获取

1.1 钢轨原始点云数据采集

本文采用激光轮廓仪获取钢轨的原始轮廓数据。工作时,轮廓仪内部发出激光束,激光束通过透镜后形成一条静态的激光线,该激光线照射到被测物体的表面后,轮廓仪内的光学系统接收被测物的漫反射光,并将其成像到相机芯片上,如图 1 所示[13-14]。

由图 1 可知,激光轮廓仪不仅可以获取传感器到被测物体的距离信息(z 轴),其内部的控制器还可以通过这组图像来计算沿激光线(x 轴)上的距离信息,计算公式如(1)所示:

$$x = \frac{ax'\sin\theta_2}{b\sin\theta_1 - x'\sin(\theta_1 + \theta_2)} \tag{1}$$

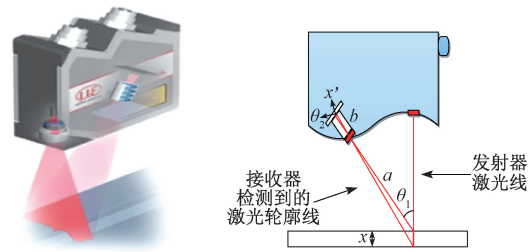


图 1 激光轮廓仪测量原理

Fig. 1 The measurement principle of laser profiler

将激光轮廓仪固定在机械滑台上,就可通过机械滑台的运动来获取钢轨表面的轮廓数据。机械滑台如图 2 所示。

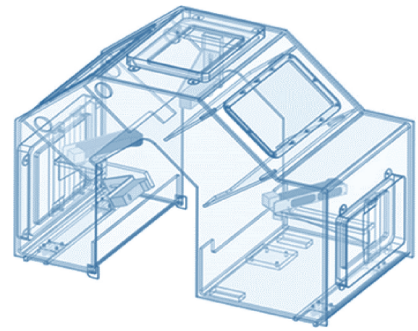


图 2 机械滑台

Fig. 2 Mechanical slide platform

但是激光轮廓仪测量也存在一定的局限性,即轮廓仪进行激光扫描时的数据可能因干扰而导致漏点。虽然可以通过插值法对轮廓线两端数据进行填充,但插值法会降低点云数据的测量精度[15],进而影响钢轨两端平直度的检测精度。

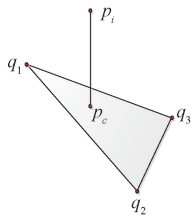
对此本文采取激光交叠式扫描方式来获取钢轨轨型轮廓数据[16],并将获取到的具有重叠部分的点云数据通过改进的 ICP 算法进行配准,完成完整的轮廓数据重建。

1.2 ICP 配准算法改进

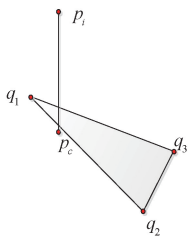
基础 ICP 算法迭代的对象是两块点云数据中的最近点。只有当其中一块点云数据是另一块点云数据的子集时,该算法才能发挥很好的效果[17]。本文需要配准的侧面轮廓点云数据集虽然有重合部分,但是也有各自的特征。因此,需要对基础 ICP 算法进行改进。改进主要是针对点云数据集中匹配点的选择、对应匹配点的选取、去除虚假匹配点和点之间的距离度量等几个方面进行。具体过程如下:

1)选择匹配点,在选取点云数据时先进行均匀采样,并将空间的点云重叠部分划分成若干个体素单元,这样可以让点云重叠的部分均匀分布。本文选择体素单元内距离重心最近的点近似代替其他点作为匹配点。

2)子集匹配,本文采取一种不需要求解向量的搜索方法找到对应的匹配点。假设要找到点云 P 中的点 p_i 在点云 Q 中的对应点,那么首先要找到 Q 中距离点云点 p_i 最近的 3 个点,组成一个三角形 $\Delta q_1q_2q_3$。过点 p_i 作这个三角形平面的垂线,垂足记为 p_c。如果 p_c 正好在三角形的里面或者边上,就把 p_c 当作 p_i 的最近点;如果 p_c 在三角形的外面,则把三角形的顶点中离 p_c 最近的点作为 p_i 的最近点,如图 3 所示。



(a) 垂足在三角形内部
(a) The vertical foot is inside the triangle



(b) 垂足在三角形内部
(b) The vertical foot is inside the triangle

图 3　垂足点和三角形的关系

Fig. 3　The relationship between perpendicular point and triangle

假设匹配点对是 $\{p_i,q_j\}$,对于点 $p_i(x_0,y_0,z_0)$,从 Q 点云中找出距离点 p_i 最近的 3 个点 q_1、q_2、q_3,3 个点的坐标为 (x_j,y_j,z_j),$j=1,2,3$。求解出点 p_i 到 $\Delta q_1q_2q_3$ 的垂足 p_c,如式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} x_2-x_1 & y_2-y_1 & y_2-y_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & y_3-y_1 \\ x_3-x_2 & y_3-y_2 & y_3-y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ c_0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中,a_0、b_0、c_0 的求解公式如式(3)所示:

$$\begin{cases} a_0 = (x_2-x_1)x_0 + (y_2-y_1)y_0 + (z_2-z_1)z_0 \\ b_0 = (x_3-x_1)x_0 + (y_3-y_1)y_0 + (z_3-z_1)z_0 \\ c_0 = (x_3-x_2)x_0 + (y_3-y_2)y_0 + (z_3-z_2)z_0 \end{cases} \tag{3}$$

计算垂足点 p_c 关于三角形 $\Delta q_1q_2q_3$ 的重心坐标 (u,v,w)。如果 u,v,w 均满足大于 0 的条件,则说明垂足点 p_c 是在三角形 $\Delta q_1q_2q_3$ 的内部,则 p_i 的匹配点 $q_j=p_c$;否则说明垂足点 p_c 是在三角形 $\Delta q_1q_2q_3$ 的外面,则 q_j 坐标为 $\Delta q_1q_2q_3$ 三个顶点中距离垂足点 p_c 最小的那个顶点坐标。

3)消除匹配异常点,子集匹配完成以后,可能会有一些虚假的对应点,因此需要将这些对应点的异常值进行消除。本步骤是为了检验并消除一些点云匹配中的虚假对应关系,如果点云匹配的虚假对应一直存在的话则很可能会对后续的步骤产生不利的影响。

对于 p_i,假设其邻域内所有的邻近点为 $KNB(p_i)\{p_{i1},p_{i2},\cdots,p_{ik}\}$。采样点 p_i 的微切平面 $S(p_i)$ 是由 $KNB(p_i)$ 所确定的。获取采样点 p_i 的邻域 $KNB(p_i)$ 后,需要通过邻域 $KNB(p_i)$ 的最小二乘逼近平面来作为采样点 P_i 的微切平面 $S(p_i)$,以此求出切平面 $S(p_i)$ 的法向量。将邻域 $KNB(p_i)$ 中的点和 $S(p_i)$ 微切平面的距离平方和通过目标函数 J 表达如式(4)所示:

$$J = \sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i) \cdot \boldsymbol{n}_i^2 \tag{4}$$

其中,Q_i 是微切平面 $S(p_i)$ 的中心点,$\boldsymbol{n}_i$ 则是该平面的法向量,Q_i 满足式(5):

$$O_i = \left(\sum_{j=1}^{k} p_{ij} \right) / k \tag{5}$$

构造协方差矩阵如式(6)所示:

$$\boldsymbol{CV} = \sum_{p_{ij} \in KNB(p_i)} (p_{ij} - O_i) \otimes (p_{ij} - O_i) \tag{6}$$

其中,⊗符号表示的是向量的张量积。矩阵的特征向量一定存在,因为 $\boldsymbol{CV}$ 是一个 3×3 的实对称矩阵。而 $S(P_i)$ 的法向量和该矩阵中最小特征值所对应的特征向量平行,通过雅克比法可以求解出 $\boldsymbol{CV}$ 最小特征值所对应的特征向量,获取微切平面 $S(P_i)$ 的法向量 $\boldsymbol{n}_i$。

假设 KNB(p_i)的重心是 $\overline{p_i}$,并且满足式(7):

$$\overline{p_i} = \frac{1}{k+1} \left(\sum_{p_{ij} \in KNB(p_i)} p_{ij} + p_i \right) \tag{7}$$

p_i 邻域内的第 j 个邻近点距离 $S(P_i)$ 的值为 d_j,到达 $\overline{p_i}$ 的距离是 λ_j,可以表示 p_i 邻域内第 j 个邻近点的曲率如式(8)所示:

$$h_{ij} = \frac{d_j}{\lambda_j} \tag{8}$$

本文基于点 p_i 邻域特征进行筛选,特征描述为 $(\boldsymbol{n}, h_{i_avg}, d)$,$\boldsymbol{n}$ 是点 p_i 的法向量,h_{i_avg} 代表 p_i 邻域内所有点加权曲率值的平均值,d 则是指 p_i 与其邻域重心间的距离。其中 h_{i_avg} 的表达式如式(9)所示:

$$h_{i_avg} = \frac{\sum_{j=1}^{k} \varphi(\| p_{ij} - p_i \| / r) \cdot h_{ij}}{\sum_{j=1}^{k} \varphi(\| p_{ij} - p_i \| / r)} \tag{9}$$

$\varphi(x) = \exp(-x^2)$ 是单调递减权重函数,r 是邻域的局部半径。

重心距离 d 的计算公式如式(10)所示:

$$d = \begin{cases} \| p_i - c \|, & (\overline{p_i} - p_i) \cdot \boldsymbol{n}_{p_i} < 0 \\ 0, & (\overline{p_i} - p_i) \cdot \boldsymbol{n}_{p_i} > 0 \end{cases} \tag{10}$$

其中,$\overline{p_i}$ 代表邻域的重心,$\boldsymbol{n}_{p_i}$ 是 p_i 的法向量,当$(\overline{p_i}$ -

p_i)·$\boldsymbol{n}_{p_i}$ < 0 时说明 p_i 是凸点,重心距离 d 是 p_i 到 c 的距离;($\overline{p_i}$ − p_i)·$\boldsymbol{n}_{p_i}$ > 0 时说明 p_i 是凹点,重心距离 d = 0。

基于上述本文消除异常匹配点的规则有:1)删除匹配点对 $\{p_i, q_j\}$ 中两点的法向量夹角超过 45°的点对;2)删除 $\{p_i, q_j\}$ 中两点邻域的曲率值之差超过设定阈值的点对;3)删除 $\{p_i, q_j\}$ 中点到其邻域重心的距离 d = 0 的点对。

4)点云间距最小化,一般常用于最小化两片点云间距的方法是将两片点云对应点之间距离的平方最小化来获取平移矩阵 $\boldsymbol{R}$ 以及旋转矩阵 $\boldsymbol{T}$。表示距离的类型有两类:

第 1 类是对应点间的欧几里得距离,传统的 ICP 使用的为这种距离类型,假设匹配点对是 $\{p_i, q_j\}$,对应点的误差度量为 s_i,那么目标函数最小化如式(11)所示:

$$E = \sum_i \Delta s_i^2 = \sum_i \| T(p_i) - q_i^2 \| \tag{11}$$

本文所采用的是另外一类:点和其匹配点所在切面的垂直距离,如果用 Δp 表示误差度量,目标函数可最小化为式(12):

$$E = \sum_i \Delta p_i^2 = \sum_i [(T(p_i) - q_i)^{\mathrm{T}} \cdot n_i]^2 \tag{12}$$

点到切平面的误差度量和点对点的误差度量并不相同,点对切平面误差不要求对应点和物空间是同一个点,只需要对应点和物空间在同一个平面上即可。点对点误差度量 Δs 以及点与切平面的误差度量 Δp 如图 4 所示。

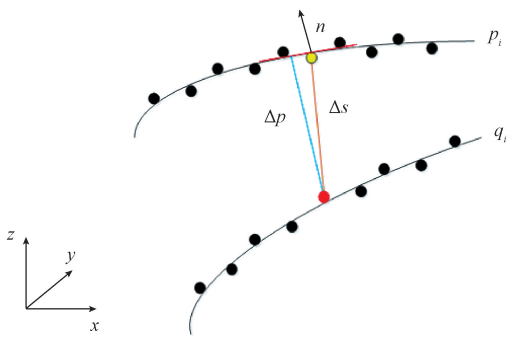


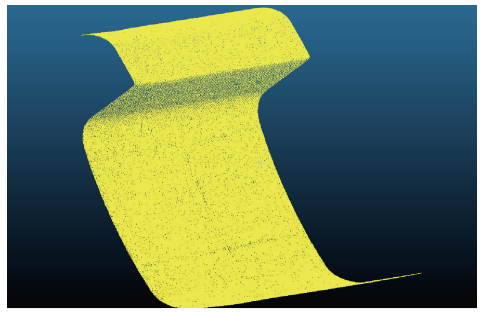
图 4 两种误差度量对比

Fig. 4 Comparison of the two error measures

从激光轮廓仪中获取到两块钢轨有重叠部分的侧面点云数据如图 5 所示。

在进行精配准前,需要粗配准调整好两块点云的初始位置。粗配准的目的是为了缩短各个平面之间的距离并将各个面安置在大致位置上,这样可以为后续精配准提供一个比较良好的前提条件[18]。具体做法是将原始点云数据的坐标转移到一个坐标系中并调整姿态。两块点云粗配准如图 6 所示。

之后分别对两片完成粗配准的点云数据进行传统的



(a) 钢轨侧面部分点云图1

(a) Point cloud diagram of rail side part 1

(b) 钢轨侧面部分点云图2

(b) Point cloud diagram of rail side part 2

图 5 待配准侧面点云图

Fig. 5 Side point cloud map to be registered

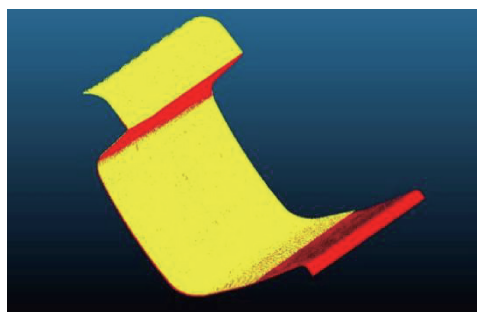


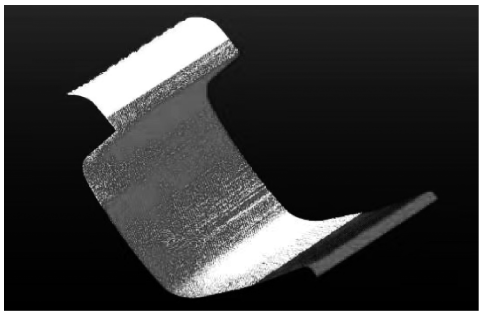
图 6 点云粗配准示意图

Fig. 6 Rough registration of point clouds

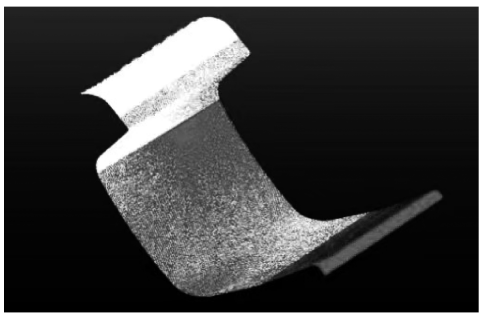
ICP 配准以及改进后的 ICP 配准。其中采样值决定体素的边长,而对应点则是点云体素结构中最接近其中心的点。通过设定采样值来确保选择的对应点均匀分布。经过反复验证对比发现,该值设置为 15 时效果最佳。分别将传统 ICP 配准和改进的 ICP 配准迭代次数设置为 15 和 10 次,配准效果如图 7 所示。

传统的 ICP 配准的结果如图 7(a)所示,可以看出两片点云的距离明显变小,但是配准后轨腰部分还是灰色点云偏多,这说明两片点云之间的重叠部分还存在一定的匹配误差,精度上不能很好地满足要求。在用本文提出改进的 ICP 配准算法得到的效果图 7(b)中,可以明显看出灰色和白色区域几乎是融合起来的,重叠的区域基

本完全重合。



(a) 传统ICP配准效果图
(a) Effect picture of traditional ICP registration



(b) 改进ICP配准效果图
(b) Effect picture of improving ICP registration

图 7　配准效果图对比

Fig. 7　Comparison of registration renderings

表 1 是两种对比点云配准算法的效果对比,主要对比标准是配准误差、消耗时间、迭代次数 3 个指标。

改进的 ICP 配准算法基于对应点的距离作为度量,相较于传统 ICP 算法中基于最近点的距离度量,该方法的精度更高,可以很好的配准钢轨的侧面数据,为重建一个良好的三维模型提供基础。并且传统 ICP 算法在点对点的选择上耗费了大量的时间,改进后的算法在效率上表现得更加出色。

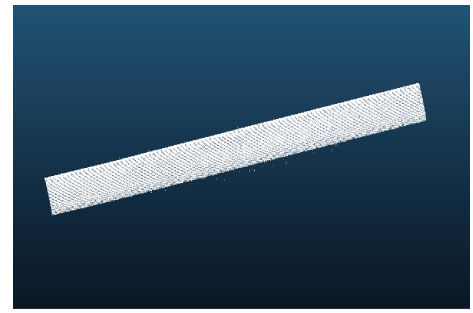
表 1　配准算法效果对比

Table 1　Comparison of registration algorithms

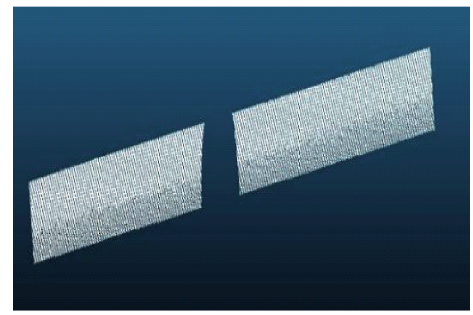
配准算法	迭代次数	耗时/s	误差/mm
改进 ICP 算法	10	36. 73	0. 005 3
ICP 算法	15	134. 23	0. 034 2

2　模拟平尺法求解平直度

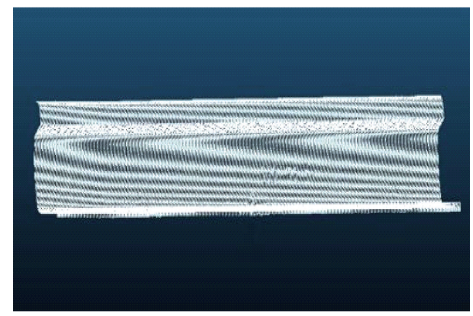
在进行平直度求解前,首先要对钢轨进行三维重建。从上一节的精配准可以得到完整的钢轨侧面点云数据。再结合上下激光轮廓仪采集的顶面和底面的廓形点云数据,可以得到钢轨完整的 4 个面的点云数据。按照轮廓仪的测量参数以及实验平台的运动参数指标对于获取到的数据进行坐标轴缩放,得到 4 个面的廓形点云数据(钢轨底部有一段被支撑的滚轮挡住,导致缺失了一段),如图 8 所示。



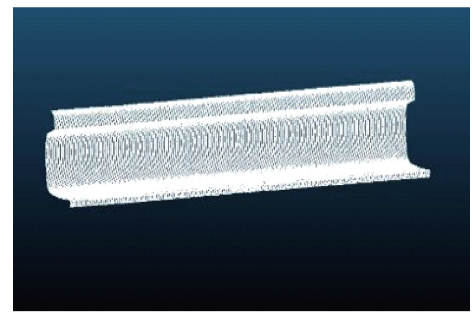
(a) 钢轨顶部曲面
(a) Rail top surface



(b) 钢轨底部曲面
(b) Rail bottom surface



(c) 钢轨左侧曲面
(c) Rail left surface



(d) 钢轨右侧曲面
(d) Rail right surface

图 8　钢轨各面廓形点云数据

Fig. 8　Point cloud data of rail profile

由于钢轨的各面上并没有太多的重叠区域,所以使用 ICP 算法实现整体配准的难度较大。鉴于钢轨轮廓点云的特殊性,本文采用断面配准的方式,每个面各截出一条轮廓线,通过断面配准的方法配准出一个完整的断面轮廓。而每条轮廓线在 x 轴和 y 轴的平移转换矩阵同样可以适用于对应该轮廓面的所有点云数据在 x 和 y 轴上的转换。这样就可以完成钢轨三维模型的建立,如图 9、10 所示。由此可以进行钢轨的平直度数据提取测量。

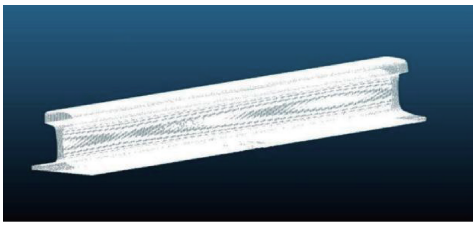


图 9 钢轨三维模型

Fig. 9 3D rail model

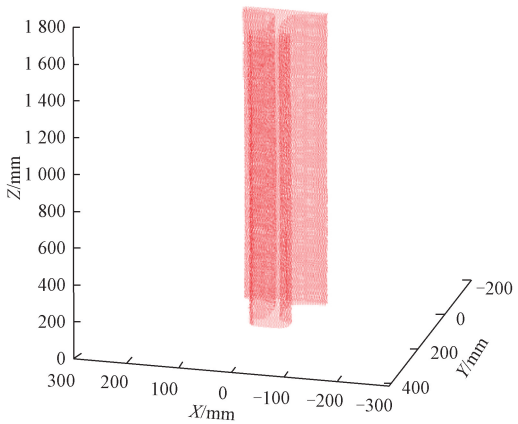


图 10 钢轨三维模型点云数据

Fig. 10 Rail 3D model point cloud data

平直度是钢轨焊前检测最为重要的特征参数,根据 TB/T 2344-2012 的要求,测量标准的示意图如图 11 所示。

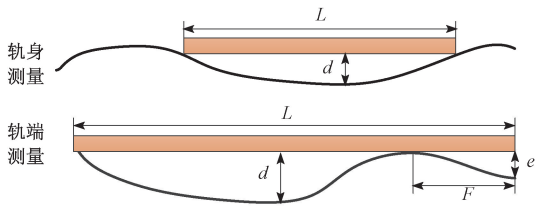


图 11 平直度参数检测

Fig. 11 Flatness parameter detection

其中,轨端是指钢轨断面开始 0~1.5 m 的位置,平直度公差 d 应该满足:$d \leqslant 0.6$ mm。同时轨端平直度还需满足一些其他的条件:当钢轨出现低头,即 $e < 0$ 时,出现低头部分的长度 F 应该满足 $F \geqslant 0.6$ mm。而轨身的平直度公差则相对简单,只需满足 $d \leqslant 0.6$ mm 即可。

为得到钢轨平直度变化曲线,首先要从钢轨模型中提取数据,将钢轨顶面纵向中心点处的数据单独提取出来作为钢轨顶部平直度的原始数据,左右两端则取钢轨模型轨冠拐点的位置作为左右两侧的平直度原始数据,如图 12 所示。对于顶面纵向中心点的确定,是由钢轨每一个横截面最高的 12 个点去掉其中最低和最高的点,将剩余 10 个点取平均值,而左右两侧的平直度取轨冠拐点处的 10 个点的平均值。

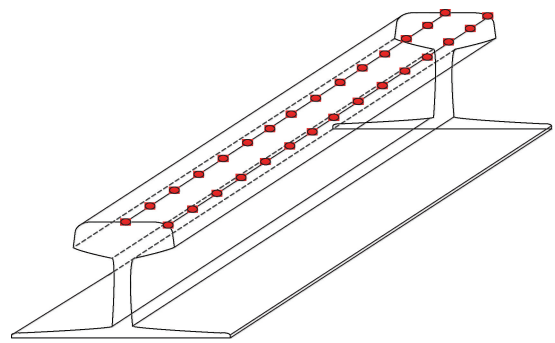


图 12 平直度取点示意图

Fig. 12 Schematic diagram of flatness point selection

通过上述步骤,得到了钢轨平直度变化曲线,以高速轨前 0~1.5 m 的平直度曲线处理为例,某根高速轨的平直度曲线如图 13 所示。

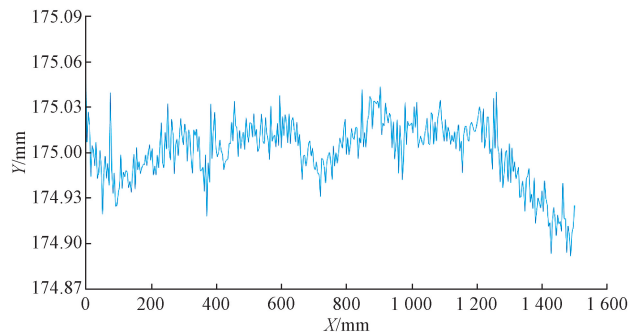


图 13 平直度曲线图

Fig. 13 Picture of flatness curve

得到了平直度曲线后,可以进行模拟平尺法。模拟平尺法的步骤主要如下:以测量焊前钢轨的 0~1.5 m 平直度为例,将轨头的第 1 个点记为 B 点,将 1.5 m 点记为 C 点。

1)将首尾两端的 B 和 C 点相连,依次求解各个点到这条直线的距离,规定在这条线之上的点到该直线的距离为正,在这条直线下方的点到该直线的距离为负;

2)从所有点中获取一个距离值最大的点记为 A,判

断 A 点所在的位置。如果 A 靠近 B,则将 A 点和 C 点连线,反之则和 B 点连线。

3)求出各个点到该直线的距离,距离的定义和 1)中相同。若所有点均在这条直线的下方,则该直线即为“平尺线”,执行步骤 5);如果仍然有点在该直线的上方,则进行步骤 4);

4)更新点的位置,把当前的直线左端点记为 B,右端点记为 C,之后执行步骤 2);

5)在这条“平尺线”上,求出与该线距离的绝对值最大点记为 N,最大的距离绝对值记为 d。示意图如图 14 所示。

到此平直度曲线比较复杂,计算平直度参数时所耗费的时间等资源也就比较多。因此需要在保持平直度曲线大体的趋势不变的情况下,尽可能地去优化曲线,减少计算量。

本文采用滤波的方法来优化曲线,滤波虽然不能获得一条平滑的曲线,但是可以在一定程度上将曲线简化,对于滤波期待实现的功能如下:

1)非细节的部分需要简化,使得滤波后的曲线可以更加地平滑;

2)细节部分不能被破坏而应该被很好地保留。中值滤波的原理是将数据集中的一个点的值用该点的某个规定的邻域内所有点的平均值来代替,这样让周围的值更加接近真实值。中值滤波滤波效果取决于移动窗口的尺寸大小,如果移动窗口尺寸比较大,则去噪能力强。但是在细节保留这方面可能表现不佳。如果移动窗口尺寸比较小,则可以很好地保留住轮廓细节但是去噪能力会大打折扣[19]。

因此如何选取一个合适的移动窗口尺寸是主要考虑的问题,一种自适应保细节中值滤波算法在图像处理上取得了很好的效果,无论是在边缘细节的保留上,还是在去除噪声上都有很好的表现。本文借鉴修改这种算法并使用在数据集的处理上。自适应中值滤波具体步骤如下:

1)以当前所在的点 O 为中心,向前后各取 $n+1$ 个点,计算总共 $2n+3$ 个点的平均值;

2)在 $2n+3$ 个点中找到里找到最接近平均值的点记为标准值;

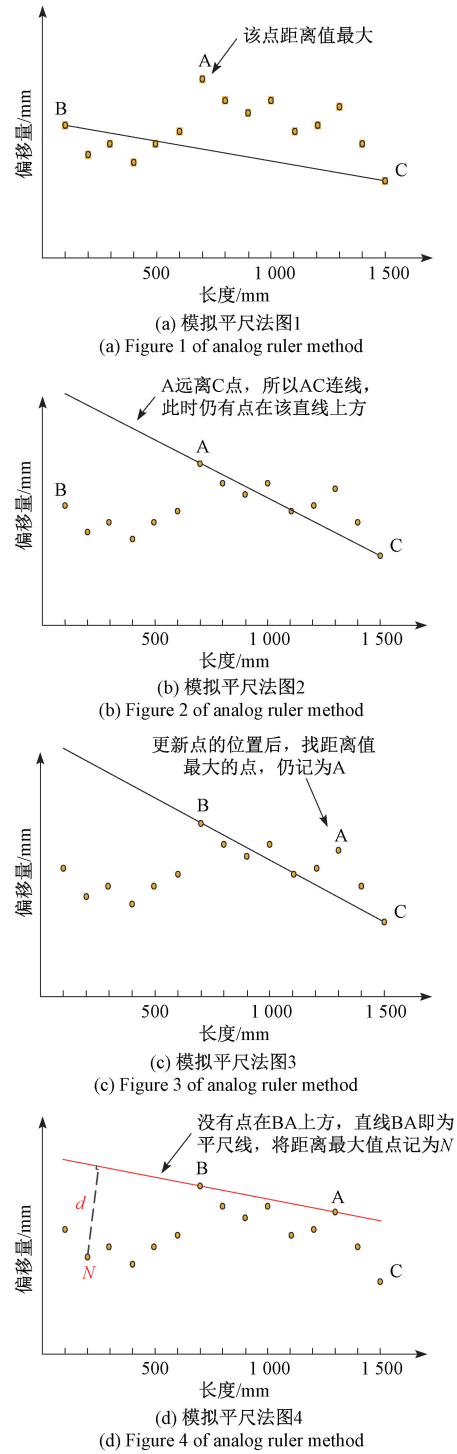
3)求出 O 点以及向前后各取 n 个点共 $2n+1$ 个点的平均值,如果该平均值与标准值的差值在指定的阈值内则取该平均值的点作为点 O 的值并跳过步骤 4),否则进行步骤 4);

4)将标准值作为点 O 的值;

5)对之后的点重复进行步骤 1)~4);

6)重复步骤直到滤波效果满意为止。

依照此方法,最终的效果图如图 15 所示。



(a) 模拟平尺法图1
(a) Figure 1 of analog ruler method

(b) 模拟平尺法图2
(b) Figure 2 of analog ruler method

(c) 模拟平尺法图3
(c) Figure 3 of analog ruler method

(d) 模拟平尺法图4
(d) Figure 4 of analog ruler method

图 14　模拟平尺法

Fig. 14　Analog ruler method

3　平直度测量对比实验

在进行本文平直度算法求解之前,先利用 0.01 mm 精度的塞尺进行人工测量,取其平均值作为测试结果比对基准。接着使用高精度电子平尺进行测量,作为本文

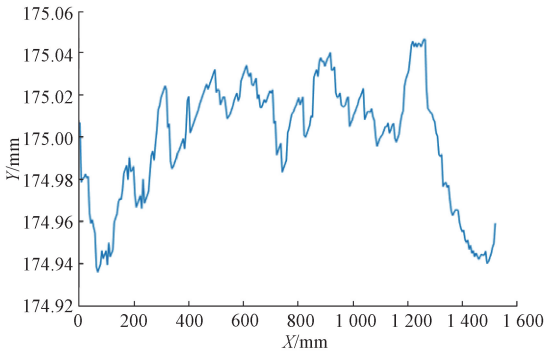


图 15 自适应中值滤波效果

Fig. 15 Effect of adaptive median filter

测试方法结果的对照组。

本文使用的电子平尺为德国施密特公司的 SEC-RC 型号。其主要性能指标有:测量长度 1 m,测量范围 −1.5/+2.5 mm,精确度±0.01 mm。本电子平尺虽使用步骤较为简单,但是其单次测量长度有限,故对较长的钢轨进行对此分段测量。实验室中 SEC-RC 测试环境如图 16 所示,操作及输出界面如图 17 所示。

图 16 电子平尺测试平台

Fig. 16 Electronic ruler test platform

图 17 SEC-RC 数据显示界面

Fig. 17 SEC-RC data display interface

最后使用本文的方案分别对待测钢轨进行 20 次重复的数据提取,将每次提取的数据都生成一个钢轨模型进行后续测试实验分析。建立钢轨三维模型后,从模型上获取数据并对顶部平直度、左侧平直度以及右侧平直度进行检测。最终人工测量的基准结果,电子平尺测量结果和本文重构法的测量结果如图 18 所示。

钢轨平直度的数据优劣以 0.6 mm 为评判点,因此实验测量的数值与人工多次测量标准值误差需要比 0.6 mm 低一个数量级,才能很好的保证检测结果的精确性。在图 18 中,通过三维重建模型获得的数据,对比人工用塞尺测量结果平直度测量误差均在 0.021 mm 以内,同时对比电子平尺的测量结果,最大偏差为 0.011 mm。验证了本文提出的平直度算法具有良好的重复性和较高的精度。为了使得测试结果可以更加直观地看出平直度检测稳定性的优劣,将测试数据转换成表格的形式,分别如表 2、3、4 所示。

表 2 对比实验结果

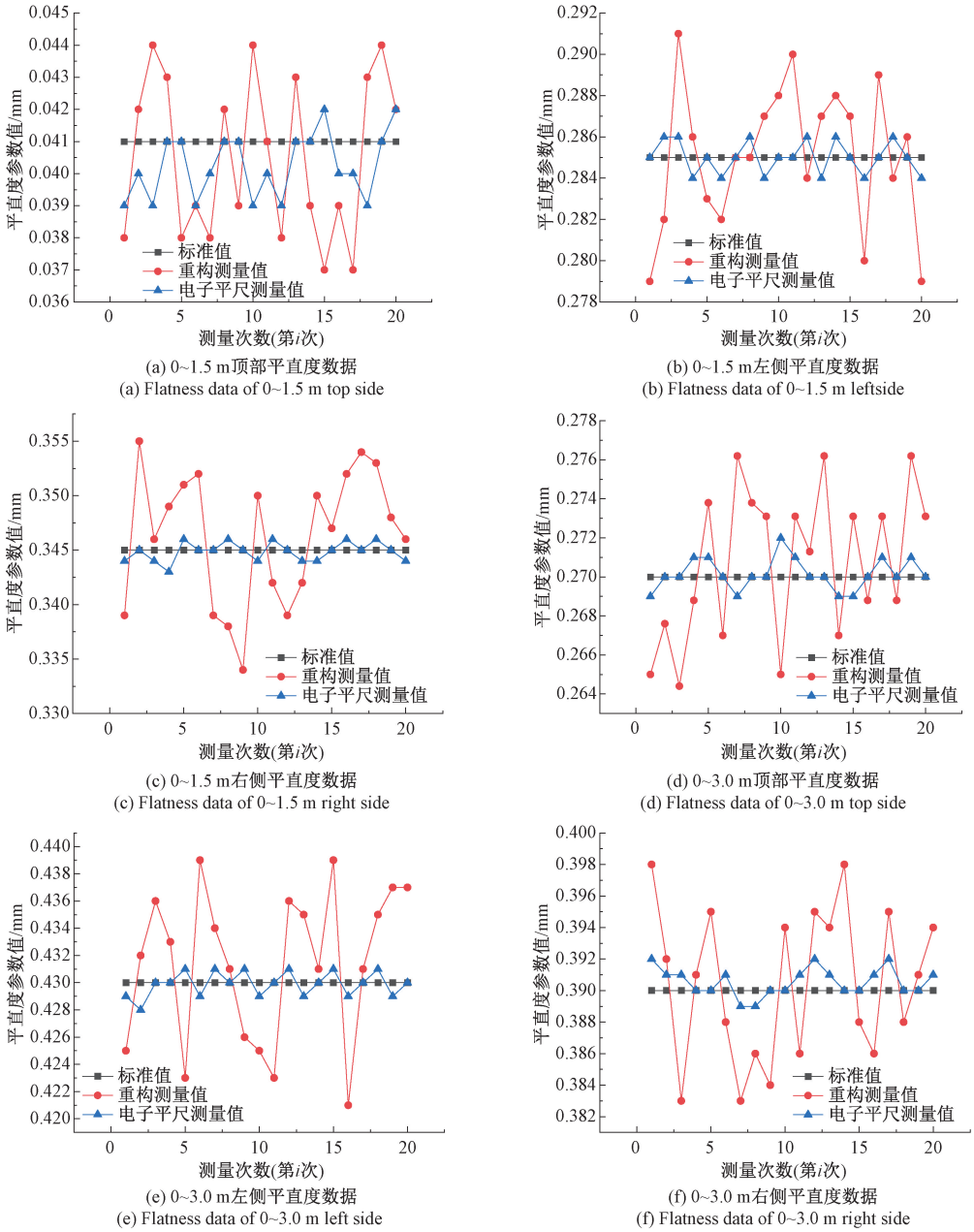
Table 2 Comparative experimental results

平直度参数/mm	重构-电子平尺(0~1.5 m)最大值	重构-塞尺(0~1.5 m)最大值	重构-电子平尺(0~3 m)最大值	重构-塞尺(0~3 m)最大值
顶面	0.004	0.004	0.007 2	0.020 6
左侧	0.006	0.007	0.001	0.009
右侧	0.011	0.011	0.008	0.008

表 3 重构平直度参数检测结果

Table 3 Reconstructed flatness parameter test results

平直度	0~1.5 m				0~3.0 m			
参数/mm	最大值	最小值	极限差	标准差	最大值	最小值	极限差	标准差
顶面	0.044	0.037	0.007	0.002 4	0.276	0.264	0.012	0.003 8
左侧	0.291	0.279	0.012	0.003 4	0.439	0.421	0.018	0.005 5
右侧	0.355	0.334	0.021	0.006 0	0.398	0.383	0.015	0.004 7



(a) 0~1.5 m顶部平直度数据
(a) Flatness data of 0~1.5 m top side

(b) 0~1.5 m左侧平直度数据
(b) Flatness data of 0~1.5 m leftside

(c) 0~1.5 m右侧平直度数据
(c) Flatness data of 0~1.5 m right side

(d) 0~3.0 m顶部平直度数据
(d) Flatness data of 0~3.0 m top side

(e) 0~3.0 m左侧平直度数据
(e) Flatness data of 0~3.0 m left side

(f) 0~3.0 m右侧平直度数据
(f) Flatness data of 0~3.0 m right side

图 18　平直度数据

Fig. 18　Flatness data

表 4　电子平尺参数检测结果

Table 4　Test results of electronic ruler parameters

平直度	0~1.5 m				0~3.0 m			
参数/mm	最大值	最小值	极限差	标准差	最大值	最小值	极限差	标准差
顶面	0.042	0.039	0.003	0.002 46	0.287	0.283	0.004	0.001 13
左侧	0.286	0.284	0.002	0.000 77	0.431	0.428	0.003	0.000 89
右侧	0.346	0.343	0.003	0.000 85	0.392	0.389	0.003	0.000 86

在表 3 中,重构法检测平直度最大的极限误差是 0.021 mm,标准差最大值为 0.006 mm,验证了本文提出的平直度算法具有很好的稳定性。

4 结 论

钢轨焊前平直度检测是一项重要的工作,本文采用交叠式激光扫描获取完整的钢轨数据,利用改进的 ICP 算法快速的配准点云数据,完成三维模型的建立,并利用自适应中值滤波进行曲线优化,优化后的曲线基本符合钢轨平直度的真实情况。再利用“模拟平尺法”进行钢轨平直度的计算求解,很好的解决了传统钢轨平直度检测的效率问题,经过实验对比测试表明,具有较高的精确度和很好的稳定性,与人工测量的误差控制在 0.021 mm 以内,与高精度电子平尺结果最大误差在 0.011 mm 内,可以满足实际测量的要求。

参考文献

[1] 程小红. 钢轨焊接接头平直度检测仪研制[D]. 成都:西南交通大学,2011.
CHENG X H. Development of straightness tester for rail welded joint [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.

[2] POPOV D V, RYABICHENKO R B, KRIVOSHEINA E A. Calibration of the CCD photonic measuring system for railway inspection[C]. Ultrafast X-Ray Detectors, High-Speed Imaging, and Applications. SPIE, 2005, 5920: 249-257.

[3] SUN J, LIU Z, ZHAO Y, et al. Motion deviation rectifying method of dynamically measuring rail wear based on multi-line structured-light vision[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 50: 25-32.

[4] LIU Z, SUN J, WANG H, et al. Simple and fast rail wear measurement method based on structured light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(11): 1343-1351.

[5] 占栋,于龙,邱存勇,等. 钢轨轮廓测量中的车体振动补偿问题研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(7):186-194.
ZHAN D, YU L, QIU C Y, et al. Study on vehicle vibration compensation in railway track profile inspection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34(7): 186-194.

[6] 占栋,景德炎,吴命利,等. 钢轨轮廓测量基准对齐和重采样方法研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(2):149-159.
ZHAN D, JING D Y, WU M L, et al. Study on datum alignment and resampling method of rail profile measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(2):149-159.

[7] AKCA D. Matching of 3D surfaces and their intensities[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(2): 112-121.

[8] HE B, LIN Z, LI Y F. An automatic registration algorithm for the scattered point clouds based on the curvature feature[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 46:53-60.

[9] 王志哲,余玲玲,杨安康. 基于曲面法向量的曲面 ICP 拼接算法研究[J]. 微计算机信息, 2010, 26(21): 145-147.
WANG ZH ZH, YU L L, YANG AN K. The research on the ICP algorithm based on the normal vector of the curved surface [J]. Control & Automation, 2010, 26(21): 145-147.

[10] 杨玲,谯舟三,陈玲玲,等. 结合 Procrustes 分析法和 ICP 算法的 PICP 配准算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(2): 337-343.
YANG L, QIAO ZH S, CHEN L L, et al. PICP registration method based on procrustes analysis and ICP algorithm [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(2): 337-343.

[11] 孙炜,苑河南,刘乃铭,等. 融合轮廓特征的线激光点云的快速配准算法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(7):156-162.
SUN W, YUAN H N, LIU N M, et al. Fast registration algorithm combining contour features for line laser point clouds [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 156-162.

[12] 罗哉,赵洪楠,江文松,等. 基于线激光扫描的基准孔检测与定位方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(12):184-190.
LUO Z, ZHAO H N, JIANG W S, et al. A detection and positioning method for the base hole based on line laser scanning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 42(12): 184-190.

[13] 卢凤凰. 激光三角测量光学系统设计及性能分析[D]. 成都:西南交通大学,2011.
LU F H. Design and performance analysis of laser triangulation optical system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.

[14] 张鹏贤,张国强,韦志成,等. 坡口及焊缝表面三维轮廓的激光视觉测量[J]. 焊接学报, 2017, 38(12):85-89,133.
ZHANG P X, ZHANG G Q, WEI ZH CH, et al. Laser vision measurement of three-dimensional profile of groove and weld surface [J]. Journal of Welding, 2017, 38(12):85-89,133.

[15] 秦绪佳,王建奇,郑红波,等. 三维不变矩特征估计的点云拼接[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 129-134.

QIN X J, WANG J Q, ZHENG H B, et al. Point clouds registration of 3D moment invariant feature estimation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 129-134.

[16] 史红梅,张继科. 基于激光三角测量原理的轨距检测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 1934-1940.
SHI H M, ZHANG J K. Study on track gauge measurement system based on laser triangulation principle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 1934-1940.

[17] 崔强. 基于图优化的多站激光点云拼接算法研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2018.
CUI Q. Research on multi-station point cloud data registration algorithm based on graph optimization[D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology, 2018.

[18] 吴霄. 三维点云数据的精简与拼接算法研究[D]. 苏州:苏州大学, 2017.
WU X. Studies on the reduction and registration of 3D point cloud data[D]. Suzhou:Soochow University,2017.

[19] 冯焕飞,何友全,刘冲. 基于邻域相关的自适应中值滤波算法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 547-550.
FENG H F, HE Y Q, LIU CH. Adaptive median filter based on neighborhood correlation [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences),2013, 32(3): 547-550.

作者简介

杨海马,2015 年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,现为上海理工大学副教授,主要研究方向为数字信号分析与处理、SPR 传感器机理与仿真、模式识别系统开发、符号滑块变结构控制。
E-mail: snowyhm@sina.com.cn

Yang Haima received a Ph. D. degree from Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science in 2015. He is now an associate professor at University of Shanghai for Science and Technology. His main research interests include digital signal analysis and processing, SPR sensor mechanism and simulation, pattern recognition system development, symbolic slider variable structure control.

江斌(通信作者),2020 年于南京理工大学紫金学院获得学士学位,现为上海理工大学硕士研究生,主要研究方向为光电检测与智能仪器开发。
E-mail: 1293602567@qq.com

Jiang Bin (Corresponding author) received a B. Sc. degree from Zijin College of Nanjing University of Technology in 2020. Now he is a M. Sc. candidate of Shanghai University of Technology. His main research interests include photoelectric detection and intelligent instrument development.