DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.017

基于线结构光的钢轨断面磨耗改进检测算法

刘震锋，陈建政，李　伟
（西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031）

摘　要：经典的最近点迭代（Iterative Closest Point, ICP）配准算法常被应用于钢轨断面磨耗检测系统。当轨道检修车工作运行时，基于线结构光的钢轨断面磨耗检测系统采集的钢轨廓形数据通常会受到各种离群点噪声的干扰，导致计算得到的钢轨廓形几何形态变化较大。在实际应用中，轨道检修车钢轨断面磨耗动态检测精度要求侧磨为±0.5 mm，垂磨为±1.0 mm，故磨耗检测算法的设计不能因为廓形含离群点噪声而降低检测精度。因此，文章提出了一种改进的两阶段钢轨断面廓形磨耗检测算法。该算法在第一阶段首先利用钢轨廓形的特征点对进行快速初始配准，使得2个点云集具有较好的初始位姿，第二阶段采用改进的鲁棒ICP算法完成精确配准，最后计算得到钢轨断面磨耗几何参数。通过在实验室搭建钢轨断面磨耗检测系统试验平台，以试验模拟实测数据常见的轨腰段和轨底段离群点干扰，并以手工接触式磨耗仪的测量数据作为参考基准，对比经典ICP算法和文章所提出的改进算法，分析磨耗检测的精度误差和有效性，并在此基础上，对算法的检测速度进行对比分析，对改进算法的重复性测量精度进行验证，最后在地铁线路上开展轨道检修车实测验证。结果表明，文章所提的改进算法有效提高了在离群点干扰场景下钢轨断面磨耗检测的精度和速度，具有工程实用价值。

关键词：钢轨断面；廓形配准；钢轨磨耗；特征点；鲁棒ICP算法

中图分类号：U213.4^{+}2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)03-0138-08

0　引言

铁路在我国国民经济中具有重要关键性作用，铁路不仅是重要的基础设施，而且也是综合交通运输体系的主要支柱之一。在铁路基础设施中，钢轨磨耗数据是轨道几何质量参数的关键组成部分，对后期线路养护和检修的制定具有至关重要的作用。剧烈的钢轨磨耗改变了钢轨型面，从而影响轮轨接触关系，加剧轮轨相互作用，不仅增大了车辆脱轨的风险，还降低了钢轨的使用寿命[1]。随着我国铁路运输系统的高速发展，钢轨磨耗检测工作日益增加，磨耗检测精度也需要更加准确。传统的手工接触式磨耗检测方法工作量大、工作环境恶劣和效率低下，使用的接触式检测仪器不仅容易损坏，而且其检测精度受不可控因素影响也较大[2]。

目前，基于激光位移的非接触式钢轨磨耗检测技术是一种新兴的技术，该技术将激光传感器安装在轨道检修车（以下简称“轨检车”）上，可以实现对钢轨断面磨耗的实时检测[3-4]。该技术主要利用激光位移传感器对钢轨表面进行激光扫描，从而得到实测钢轨廓形，然后通过相关配准算法与标准钢轨廓形进行位姿对齐，从而得到钢轨磨耗量，配准算法的好坏直接关系钢轨磨耗检测的精度和速度。

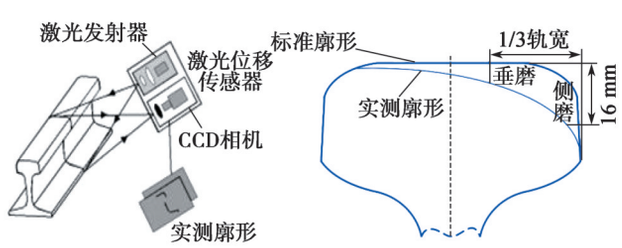
基金项目：四川省自然科学基金项目（24NSFSC0307）
通信作者：陈建政，男，研究员，硕士研究生导师，主要从事机车车辆动态检测技术及数据处理，机车车辆故障诊断及安全检测等研究；E-mail: chenjzh@home.swjtu.edu.cn
引用格式：刘震锋, 陈建政, 李伟. 基于线结构光的钢轨断面磨耗改进检测算法[J]. 机车电传动, 2024(3): 138-145.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.017.
Citation：LIU Zhengfeng, CHEN Jianzheng, LI Wei. Improved detection algorithm for rail profile wear based on line structured light[J]. Electric drive for locomotives,2024(3): 138-145.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.017.

文献[5]提出了基于最小二乘法的钢轨廓形配准算法，该方法具有较高的实时性，但当廓形被零部件或异物遮挡，并出现大量离群干扰点时，会出现廓形无法配准的情况；文献[6]提出采用遗传算法对钢轨廓形中的特征点进行配准，但遗传算法不太适合实时性要求较高的场景，且廓形配准精度容易受离群干扰点噪声的影响；文献[7]提出采用最近点迭代（Iterative Closest Point, ICP）算法进行钢轨断面廓形的配准，该方法具有较高的配准精度，但当实测廓形点云与目标廓形点云初始位置偏差较大，并且实测廓形中有大量离群干扰点时，算法会受到较大影响，容易陷入迭代的局部最优解，从而出现磨耗检测精度较低或没有意义的情况。

针对钢轨断面磨耗检测中经典ICP算法的局限性，本文提出了一种改进的两阶段噪声鲁棒钢轨廓形快速磨耗检测算法。该算法在第一阶段利用钢轨廓形的特征点对完成钢轨廓形的快速初始配准，第二阶段则利用改进的噪声鲁棒ICP算法完成精确配准，最后计算得到钢轨断面磨耗几何参数。本文提出的改进算法解决了经典ICP算法在初始位姿状态偏差较大时容易陷入迭代的局部最优解，以及受线路多样离群点干扰导致的配准精度较低的问题，提高了钢轨断面廓形在离群点干扰场景下磨耗检测精度和检测速度。

1　磨耗检测原理与系统组成

钢轨断面磨耗检测原理如图1(a)所示。检测系统采用日本基恩士公司的二维激光位移传感器，其中传感器模块包括二维激光发射器、高速DSP数字信号处理模块和CCD相机。CCD相机通过标定建立图像坐标系和世界坐标系之间的关系[8]，数字信号处理模块可以高速地处理计算并输出被测量钢轨廓形的二维坐标数据点。



(a) 检测系统　　(b) 磨耗测点

图1　钢轨磨耗检测原理

Fig. 1　Principle of rail wear detection

钢轨断面磨耗几何参数主要分为垂直磨耗（以下简称“垂磨”）和侧面磨耗（以下简称“侧磨”）。其中，垂磨检测点位于钢轨轨头部分的轨顶面1/3处，侧磨检测点位于钢轨踏面下方16 mm处[9]，如图1(b)所示。磨耗检测系统上位机首先会通过2D激光位移传感器采集的实测廓形坐标点与标准廓形坐标点完成廓形的配准[10]，然后根据图1(b)中的磨耗测点直接计算出钢轨断面磨耗几何参数。在实际应用场景中，在轨检梁上安装布置2D激光位移传感器，而轨检梁吊装在列车车体底部，随着轨检车的行驶，实时采集计算整条线路的钢轨磨耗几何参数并将数据进行存储。

2　磨耗检测算法及其改进

钢轨廓形配准是钢轨断面磨耗几何参数检测的重要环节，其目的是将实测的钢轨廓形与标准钢轨廓形点云进行位姿对齐，使得配准后公共区域点云满足设定的误差指标阈值。由于钢轨廓形轨头段有磨损，一般采用未磨损的轨腰作为2个点云集的公共区域。经典ICP算法的配准精度较高，是目前应用较多的钢轨廓形配准算法，但算法对钢轨廓形待配准点云的初始位姿要求较高，当待配准点云与目标点云位置偏差较大或受地铁线路多样离群点干扰时，可能会陷入算法迭代的局部最优解，导致钢轨断面磨耗检测精度和检测速度较低。本文针对经典ICP算法进行优化改进，改进的钢轨断面磨耗检测算法流程如图2所示。

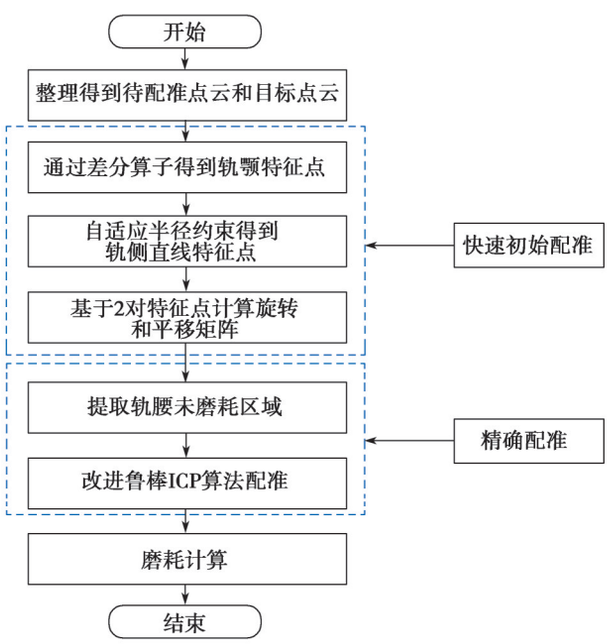


图2　改进算法流程图

Fig. 2　Flow chart of improved algorithm

2.1　经典ICP算法

经典ICP算法采用迭代优化的思想，以欧氏空间距离作为配准点对的选择依据。算法通过不断调整点云的位姿，最小化配准点对之间距离累计误差之和，最后通过计算最优的旋转矩阵$\boldsymbol{R}$和位移向量$\boldsymbol{T}$，实现待配准点云在配准参数变换之后与目标点云最精确的配准。由于ICP算法配准精度较高，因此该算法成为点云配准的主流算法，其中误差函数涉及的数学原理主要为最

小二乘法[11-12]。在数学上，经典ICP算法可以描述为假设给定2个不同的点云集合，其中一个为待配准点云P和另一个为目标点云A，2个点云中的点彼此对应，其中2个点云可以表示为：

$$A=(\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n)$$

$$P=(p_1,p_2,\cdots,p_n)$$

利用ICP算法求解配准参数中的旋转矩阵$\boldsymbol{R}$和位移向量$\boldsymbol{T}$，其误差函数为

$$E(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\alpha_i-\boldsymbol{R}p_i-\boldsymbol{T}\right\|^2 \tag{1}$$

2个不同点云集的质心为：

$$\mu_\alpha=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\alpha_i \tag{2}$$

$$\mu_p=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}p_i \tag{3}$$

去中心化后表示为：

$$A'=(\alpha_i-\mu_\alpha)=(\alpha_i'),\ i=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

$$P'=(p_i-\mu_p)=(p_i'),\ i=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

误差函数为

$$E(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\alpha_i-\boldsymbol{R}p_i-\boldsymbol{T}-\mu_\alpha+\boldsymbol{R}\mu_p+\mu_\alpha-\boldsymbol{R}\mu_p\right\|^2=$$

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\alpha_i-\mu_\alpha-\boldsymbol{R}(p_i-\mu_p)+(\mu_\alpha-\boldsymbol{R}\mu_p-\boldsymbol{T})\right\|^2=$$

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\alpha_i-\mu_\alpha-\boldsymbol{R}(p_i-\mu_p)\right\|^2+\left\|\mu_\alpha-\boldsymbol{R}\mu_p-\boldsymbol{T}\right\|^2 \tag{6}$$

由式(6)可知，位移向量$\boldsymbol{T}$仅与旋转矩阵$\boldsymbol{R}$有关，式(6)可转化为

$$E(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\alpha_i-\mu_\alpha-\boldsymbol{R}(p_i-\mu_p)\right\|^2 \tag{7}$$

式(7)可进一步转换为

$$E(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})=\sum_{i=1}^{n}(\alpha_i'^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}p_i')=\sum_{i=1}^{n}\mathrm{Trace}(\boldsymbol{R}\alpha_i'p_i'^{\mathrm{T}})=\mathrm{Trace}(\boldsymbol{RH}) \tag{8}$$

对式(8)中的$\boldsymbol{H}$进行SVD奇异值分解，可得：

$$\boldsymbol{H}=\sum_{i=1}^{n}(\alpha_i^{\mathrm{T}}p_i')=\boldsymbol{U\Sigma V}^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{VU}^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{\Sigma}$为奇异值组成的对角矩阵；$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$为正交矩阵。

得到旋转矩阵$\boldsymbol{R}$之后，可以计算位移向量$\boldsymbol{T}$，位移向量$\boldsymbol{T}$为

$$\boldsymbol{T}=\mu_\alpha-\boldsymbol{R}\mu_p \tag{11}$$

式中：α为当前时刻的点云；p为上一时刻的点云。

在实际应用中，ICP算法不能确定待配准点云与目标点云之间哪些点是相互对应的，很难通过一次迭代就计算出最终配准参数$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{T}$。经典ICP算法流程如图3所示，主要是寻找不同点云之间对应点对，进行点云的坐标变换，不断迭代更新参数$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{T}$，直至误差小于设置的阈值，达到收敛完成最终配准。

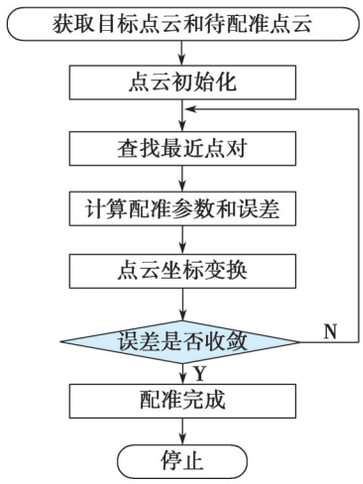


图3 ICP算法流程图

Fig. 3 Flow chart of ICP algorithm

在每一次迭代过程中，经典ICP算法都会对待配准点云中的每一个点进行处理，然后在目标点云中寻找与其对应的最近点，然后计算配准参数$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{T}$。若2个点云集的初始位姿相差较大，此过程会花费较多时间，甚至会陷入迭代的局部最优解，并且当待配准点云中有大量离群干扰点时也会影响其配准精度。因此，针对经典ICP算法改进的方向为先找到一个较好的位置作为迭代的初始位置，或者通过优化改进经典ICP算法的误差函数使其受离群干扰点的影响弱化，使得算法的鲁棒性能更好。

2.2 改进磨耗检测算法

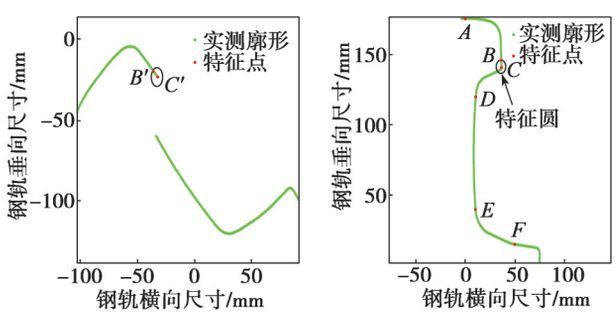
本文所提出的两阶段改进的钢轨断面磨耗检测算法结合了钢轨断面廓形自身的几何形态特征，旨在克服经典ICP算法在迭代过程中由于受到离群点干扰导致的鲁棒性较低和容易陷入局部最优解的问题，提高钢轨断面廓形在离群点场景下的磨耗检测精度与检测速度。该算法在第一阶段的快速初始配准过程中利用了钢轨廓形的特征点对，此时2个点云集位姿已大致对齐，可为迭代算法提供一个较好的初始位姿，提高了算法迭代收敛的速度；第二阶段的精确配准采用改进鲁棒ICP算法完成；最后，计算得到钢轨断面廓形磨耗几何参数。

2.2.1 特征点对快速初始配准

图4(a)是一帧实测钢轨廓形特征点图。根据实测钢轨廓形的形态特点，廓形轨颚处有明显的间断区域，由于传感器与钢轨平面成一个固定角度，因此轨颚处的间断区域长度会固定在一定的范围内。实测待配准廓形上的坐标点十分密集，通过差分法[13]逐个计算待配准廓形上相邻点之间的距离，能够快速寻找到廓形间断区域，并通过间断区域可定位稳定的轨颚特征点C'。由于在钢轨廓形轨头段轨颚处小范围区域内一般不会发生磨损，本文提出的特征点提取方法采用从轨

颚点C'出发，沿轨头方向特征圆半径5 mm轨迹自适应寻找轨侧直线的另一特征点B'，若固定距离5 mm轨迹处特征点不存在，则自适应寻找其最近点，以便能更好地反映钢轨廓形轨侧直线特征。

图4(b)为一幅标准钢轨廓形特征点图。分析标准廓形的几何形态特征可知，对于轨腰大圆弧段的D点，由于传感器振动，激光有时会照射不到；轨腰小圆弧段的E点和轨底处的F点容易被零件或异物遮挡；轨顶处的A点因为与列车车轮直接接触，容易被磨损消失；点C为标准廓形的轨颚点，点B为本文特征点提取方法所得。因此，点B和点C被选取为标准廓形的2个特征点。对于这2个标准廓形的特征点，由图4(a)可知，在实测的待配准廓形中可以提取出与其对应的2个特征点为点B'和点C'，通过2对稳定的特征点即可构建2个点云集的旋转平移关系，进行钢轨廓形的快速初始配准。



(a) 实测廓形特征点　　(b) 标准廓形特征点

图4　钢轨廓形特征点

Fig. 4　Rail profile feature points

目标标准廓形与待配准实测廓形参数满足以下旋转平移关系，具体为

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中：θ为目标廓形特征点连线与待配准廓形特征点连线之间的夹角；(p_x,p_y)为目标廓形点集上一点的坐标；(p'_x,p'_y)为待配准廓形点集上一点的坐标；t_x和t_y为位移向量参数。

夹角θ可通过目标廓形与待配准廓形的2对特征点坐标直接求得，将2对特征点的坐标代入式(12)，即可求得位移向量参数t_x和t_y。

计算得到的廓形初始配准参数可以为经典ICP算法的精确配准提供较好的初始位置，大幅缩短ICP算法迭代收敛的时间。

2.2.2　廓形精确配准算法

在钢轨廓形精确配准的过程中，通常使用经典ICP算法。然而，在应用经典ICP算法进行钢轨廓形精确配准时，由于实际的钢轨廓形包含大量的离群点噪声，故其配准精度较低，从而影响钢轨磨耗检测的准确性。这是因为钢轨廓形的轨腰段或者轨底段容易受运行线路上零部件或异物的遮挡，使得钢轨的实测廓形与标准廓形几何形态相差较大。

为了降低钢轨廓形中离群干扰点对经典ICP算法的影响，本文在经典ICP算法的误差函数中增加了权重项，目标是减小钢轨廓形中离群干扰点对配准精度的影响。改进的ICP算法可以增强其鲁棒性能，并且可以有效降低误差函数中因为离群点放大的误差。改进的鲁棒ICP算法涉及的函数包括误差函数和权重函数，其误差函数公式由式(1)优化为

$$E(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\omega_i \left\| \alpha_i - \boldsymbol{R}p_i - \boldsymbol{T} \right\|^2 \tag{13}$$

式中：ω_i为第i个点对应的权重项，其具体设计应该根据实际情况而定。

权重函数的具体设计应该根据实际情况而定，本文在Welsch损失函数[14]的基础上，改进了其权重函数，改进后ω_i权重函数的对应公式为

$$\omega_i = \exp\left(-\frac{\left\| \alpha_i - \boldsymbol{R}p_i - \boldsymbol{T} \right\|^2}{2v^2} \right) \tag{14}$$

式中：v为方差，其取值可以灵活进行调整，在本文取v=0.1时，试验表现较好。

分析式(14)，可知权重函数是一个关于方差为v的高斯函数，待配准点p_i与其对应的目标点α_i之间的欧氏距离越大，所施加的权重值越小，权重项可以有效地降低钢轨廓形受零部件或异物遮挡产生的离群干扰点的影响。

基于式(13)和式(14)对经典ICP算法进行相应的优化改进，即可完成对钢轨廓形的精确配准，从而更准确地计算钢轨断面廓形在离群点干扰场景下的磨耗几何参数。

3　试验误差分析

图5为在实验室通过铝型材支架搭建的钢轨断面磨耗检测试验平台，用以模拟采集廓形离群点场景的数据。根据国标GB/T 2585—2021中定义的60 kg/m钢轨断面廓形的标准尺寸，在MATLAB中按照0.1 mm间隔数值化仿真标准钢轨廓形点集，通过试验平台中的2D激光位移传感器采集待配准的钢轨廓形点集。在被测量的钢轨上画线标记，以接触式手工磨耗仪测量的磨耗几何参数作为基准参考。在标记处的轨腰段和轨底段放置异物模拟实际干扰，传感器采集到的就是带离群点干扰的廓形数据。根据仿真得到的标准钢轨廓形数据和带离群点干扰的实测钢轨廓形数据，对比经典ICP算法与本文所提的改进算法，分析改进算法是否提高了钢轨断面磨耗检测的精度，并以算法迭代时间和次数作为检测速度指标。

首先，在测量钢轨上做好标记，如图6所示，通过

接触式钢轨磨耗仪重复测量标记处钢轨磨耗5次。为了避免人为误差，剔除掉最大值和最小值，取剩下3次测量值的平均值作为基准值，测量得到的钢轨断面垂磨基准值为0.23 mm，侧磨基准值为–0.31 mm。由于钢轨在实验室放置太久，存在一定的锈蚀与肥边，故侧面磨耗为负值。

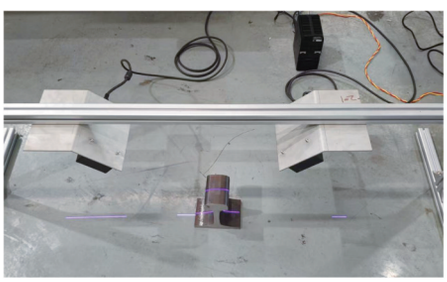


图5 钢轨磨耗检测试验平台

Fig. 5 Rail wear detection experimental platform

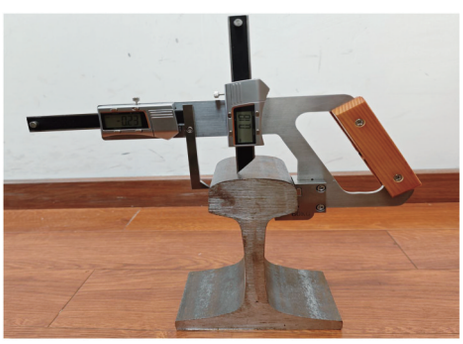


图6 数显式磨耗仪测量

Fig. 6 Measurements using digital-display wear tester

在标记处钢轨模型无干扰的情况下，利用试验平台采集1帧廓形的数据，然后对比经典ICP算法和本文所提改进算法配准效果。测量结果对比如表1所示。

表1 无干扰时算法对比

Table 1 Comparison of algorithms without disruptions

参数指标	经典ICP算法	本文所提算法
迭代次数/次	34	12
迭代时间/ms	313.279	62.495
垂磨/mm	0.178	0.202
侧磨/mm	–0.368	–0.341

由表1可知，在钢轨廓形数据无干扰情况下，本文所提的改进算法的磨耗检测参数与实测钢轨廓形基准值只有0.03 mm左右的误差，但本文所提算法大幅提高了磨耗检测的速度。

为了对比分析磨耗检测的精度，在测量钢轨同一断面标记处的轨腰段和轨底段分别放置异物，经典ICP算法和本文所提的改进算法测量的磨耗几何参数如表2所示。

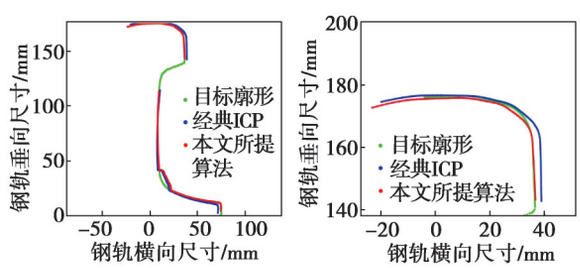
当离群点位置位于轨腰段时，由表2可知，采用经典ICP算法得到的钢轨垂磨值为–0.762 mm，侧磨值为–2.866 mm；而采用本文所提算法得到的钢轨垂磨值为0.022 mm，侧磨值为–0.092 mm。图7为在离群干扰点影响下2种算法计算得到的钢轨轨腰段廓形图。由图7可知，当轨头区域局部放大后，可明显发现经典ICP算法存在一定的计算误差。通过与手工磨耗仪测量的磨耗对比，经典ICP算法计算的垂磨误差为0.992 mm，侧磨误差为2.556 mm；而本文所提算法计算的垂磨误差为0.208 mm，侧磨误差为0.218 mm。

表2 磨耗检测算法精度对比

Table 2 Comparison in accuracy of wear detection algorithms

mm

算法	轨腰段		轨底段	
	垂磨	侧磨	垂磨	侧磨
经典ICP算法	–0.762	–2.866	1.994	0.672
本文所提算法	0.022	–0.092	0.098	–0.117

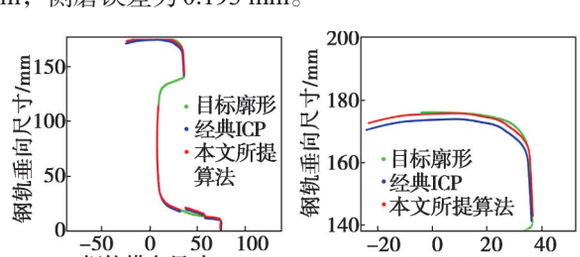


(a) 配准算法对比 (b) 局部放大

图7 轨腰段带离群点示意图

Fig. 7 Outliers in the rail web segment

当离群点位置为轨底段时，由表2可知，经典ICP算法计算的钢轨垂磨值为1.994 mm，侧磨值为0.672 mm；而本文算法计算的钢轨垂磨值为0.098 mm，侧磨值为–0.117 mm。图8为在离群干扰点影响下2种算法计算得到的钢轨轨底段廓形图。由图8可知，当轨头区域局部放大后，可明显发现经典ICP算法存在一定的计算误差，其垂磨误差为1.764 mm，侧磨误差为0.982 mm；而本文所提算法计算得到的垂磨误差为0.132 mm，侧磨误差为0.193 mm。



(a) 配准算法对比 (b) 局部放大

图8 轨底段带离群点示意图

Fig. 8 Outliers in the rail base segment

在实际应用中，GJ-6型轨检车动态磨耗检测精度要求侧磨为±0.5 mm，垂磨为±1.0 mm[15]。通过对比分析试验数据的误差，可知本文所提的改进算法的结果更加接近手工磨耗仪的测量值，具有更低的磨

耗检测误差，并且满足轨检车动态磨耗检测精度要求。实际上，造成经典ICP算法配准精度较低的原因是廓形数据中的离群干扰点改变了目标误差函数的最小值，而且其参数值对应的最优解也发生了变化，而本文所提的改进算法对廓形数据中的离群点施加了较小的权重，从而使整体点云的配准精度仍维持在较高水平，即在离群点干扰场景下仍能保证较高的钢轨断面磨耗检测精度。

为了验证本文所提的改进算法计算速度情况，在相同的误差收敛阈值情况下，以算法迭代时间和迭代次数作为指标进行对比分析。以上文提及的同一断面轨腰段和轨底段试验工况为例，对比经典ICP算法和本文所提的改进算法的廓形配准具体情况。算法迭代收敛后的结果如表3所示。

表3　算法迭代情况对比

Table 3　Comparison of algorithm iterations

参数指标	轨腰段		轨底段	
	经典ICP算法	本文所提算法	经典ICP算法	本文所提算法
迭代次数/次	35	14	33	12
迭代时间/ms	390.494	134.587	346.199	125.811

由表3可知，在离群点干扰场景下，本文所提的改进算法的迭代时间和迭代次数都少于经典ICP算法，这是由于本文所提的改进算法在第一阶段特征点对快速初始配准的过程中提供了较好的初始位置，为后续的精确配准提供较好的基础，提高了算法计算的速度。

由于轨检车在运行过程中会产生车体振动，采集的每一帧钢轨廓形点集的二维坐标都有所不同。为了验证本文所提的改进算法重复测量的有效性，通过试验平台垫高钢轨模拟车体振动，在轨腰或轨底受离群点干扰的同一断面处，进行不同传感器角度的数据采集，验证本文所提算法计算得到的磨耗值是否稳定。本文所提的改进算法5次重复测量的磨耗检测结果如表4所示。

表4　重复性测量数据

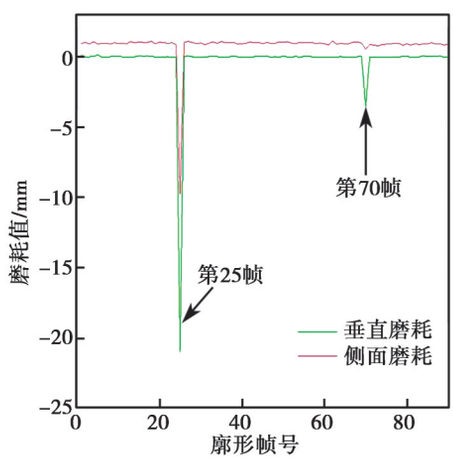
Table 4　Data of repeatability measurements　　mm

磨耗参数	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
垂磨	0.022	0.098	0.086	0.102	0.093
侧磨	–0.092	–0.117	–0.111	–0.121	–0.106

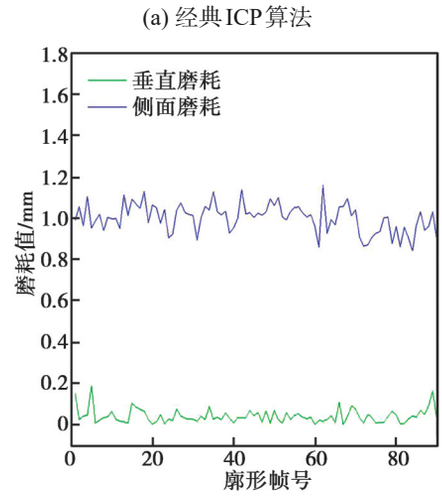
根据表4的测量结果，为了避免人为误差，剔除掉最大值和最小值之后，计算剩余3次测量的重复性精度，该值为3倍标准差的值，反映了测量值与平均值之间的差异，其值越小测量越稳定。本文所提的改进算法的垂直磨耗测量重复性精度为0.018 mm，侧面磨耗测量重复性精度为0.017 mm。因此，本文所提的改进算法具有良好的钢轨磨耗重复性测量稳定性。

4　实测数据验证

本文实测钢轨断面廓形数据来源于深圳地铁8号线，选取轨检车实测的90帧钢轨廓形的数据，进行连续钢轨廓形磨耗几何参数计算，对比经典ICP算法，验证本文所提的改进算法的磨耗检测精度和检测速度。不同算法磨耗检测的结果如图9所示。



(a) 经典ICP算法



(b) 本文所提的改进算法

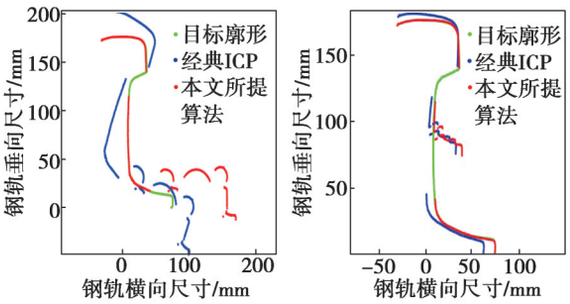
图9　实测廓形磨耗参数对比

Fig. 9　Comparison of measured profile wear parameters

经典ICP算法的单帧处理耗时为342.125 ms，本文算法的单帧处理耗时为80.901 ms，本文算法大幅提高了磨耗检测的速度。图9中，经典ICP算法的配准出现了明显较大的负值偏差，此时计算的钢轨断面磨耗已经没有参考意义。选取第25帧和第70帧磨耗值计算异常的检测数据进行分析（如图10所示），这2帧廓形分别为轨底段和轨腰段带离群点干扰的数据。然后，采用本文所提的改进算法和经典ICP算法进行可视化对比分析。

在图10(a)中，本文所提的改进算法计算的第25帧廓形垂磨值为0.021 mm，侧磨值为0.932 mm；在图10(b)中，计算的第70帧垂磨值为0.077 mm，侧磨值为

1.042 mm。由此可知，本文所提的改进算法降低了轨检车在线测量中磨耗值计算异常的情况，验证了本文所提的算法在离群点干扰场景下仍具有较好的磨耗检测精度和较快的检测速度。



(a) 轨底遮挡(第25帧)　　(b) 轨腰遮挡(第70帧)

图10　实测受遮挡廓形配准对比

Fig. 10　Comparison of measured profile containing occlusion with registration

5　结论

针对经典ICP算法计算钢轨断面廓形磨耗几何参数时，对待配准数据的初始位姿有一定要求、迭代过程中容易陷入局部最优解、容易受到线路多样离群点噪声干扰时磨耗检测精度和速度较低等问题，本文提出了一种改进的两阶段钢轨断面廓形磨耗检测算法，该算法在第一阶段快速初始配准的过程中利用了钢轨廓形的特征点对，第二阶段的精确配准则利用改进的噪声鲁棒ICP算法完成，解决了经典ICP算法易受廓形离群点噪声干扰而影响磨耗检测精度的问题。通过搭建的试验平台采集的试验数据进行算法对比分析，最后通过地铁线路实测数据进行算法对比验证。结果表明，本文所提的改进算法针对离群点干扰场景下的钢轨廓形具有较好的磨耗检测效果，提高了钢轨断面磨耗检测精度和检测速度，可以为轨检车钢轨断面磨耗实时在线检测提供更加准确的数据，具有工程实用价值。

参考文献：

[1] 陈经纬, 崔涛, 孙建锋, 等. 基于高速列车异常晃动的钢轨廓形打磨管理[J]. 机车电传动, 2020(5): 128-131.
CHEN Jingwei, CUI Tao, SUN Jianfeng, et al. Grinding management of rail profile based on abnormal hunting of high-speed train[J]. Electric drive for locomotives, 2020(5): 128-131.

[2] 孟佳, 高晓蓉. 钢轨磨耗检测技术的现状与发展[J]. 铁道技术监督, 2005(1): 34-36.
MENG Jia, GAO Xiaorong. Current status and development of rail wear detection technology[J]. Railway quality control, 2005(1): 34-36.

[3] WANG Chao, LI Yanfu, MA Ziji, et al. Distortion rectifying for dynamically measuring rail profile based on self-calibration of multiline structured light[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2018, 67(3): 678-689.

[4] FRANCA J G D M, GAZZIRO M A, IDE A N, et al. A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view[C]//IEEE. IEEE International Conference on Image Processing 2005. Genova: IEEE, 2005.

[5] LIU Zhen, SUN Junhua, WANG Heng, et al. Simple and fast rail wear measurement method based on structured light [J]. Optics and lasers in engineering, 2011, 49(11): 1343-1351.

[6] 杨强, 林建辉, 丁建明, 等. 基于二维激光位移传感器和遗传算法的钢轨磨耗动态检测系统[J]. 中国铁路, 2012(6): 85-88.
YANG Qiang, LIN Jianhui, DING Jianming, et al. Dynamic rail wear detection system based on two-dimensional laser displacement sensor and genetic algorithm[J]. Chinese railways, 2012(6): 85-88.

[7] 孙军华, 王伟华, 刘震, 等. 基于结构光视觉的钢轨磨耗测量方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(9): 1026-1029.
SUN Junhua, WANG Weihua, LIU Zhen, et al. Rail wear measurement method based on structured-light vision[J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 2010, 36(9): 1026-1029.

[8] 徐晋卿, 陈唐龙, 占栋, 等. 基于机器视觉的钢轨轮廓测量方法研究[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(4): 27-30.
XU Jinqing, CHEN Tanglong, ZHAN Dong, et al. Study of measurement method for rail profile based on machine vision[J]. Transducer and microsystem technologies, 2014, 33 (4): 27-30.

[9] 王德明, 王桂宝, 张广明, 等. 基于激光轮廓扫描仪的钢轨磨耗检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2014(10): 90-91.
WANG Deming, WANG Guibao, ZHANG Guangming, et al. Rail wear detection system based on laser profile scanner [J]. Instrument technique and sensor, 2014(10): 90-91.

[10] 周志杰, 陈建政. 基于二维激光位移传感器的钢轨磨耗改进检测算法[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(5): 133-135.
ZHOU Zhijie, CHEN Jianzheng. Improved rail wear detection algorithm based on two-dimensional laser displacement sensor[J]. Transducer and microsystem technology, 2019, 38 (5): 133-135.

[11] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

[12] 朱新荣, 郭振通, 周云霞, 等. 钢轨轮廓全断面检测中的匹配方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9): 2401-2406.
ZHU Xinrong, GUO Zhentong, ZHOU Yunxia, et al. Research on matching algorithm in rail profile inspection[J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(9):

2401-2406.

[13] 左伟, 李剑锋, 罗梓河 . 一种基于叠加权重ICP的快速钢轨廓形匹配算法[J]. 控制与信息技术, 2023(5): 91-97.
ZUO Wei, LI Jianfeng, LUO Zihe. A fast rail profile registration algorithm based on weighted ICP[J]. Control and information technology, 2023(5): 91-97.

[14] HOLLAND P W, WELSCH R E. Robust regression using iteratively reweighted least-squares[J]. Communications in statistics: theory and methods, 1977, 6(9): 813-827.

[15] 谢文军 . GJ-6型轨检车检测系统原理及应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
XIE Wenjun. Principle and application of GJ-6 rail inspection vehicle detection system[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

Improved detection algorithm for rail profile wear based on line structured light

LIU Zhengfeng, CHEN Jianzheng, LI Wei

(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The classical Iterative Closest Point (ICP) registration algorithm is commonly applied to rail profile wear detection systems. However, during the operation of track inspection vehicles, the profile data collected by the rail profile wear detection system based on linear structured light is often disrupted by noise from various outliers, leading to significant geometric variations in the rail profile calculation results. Given the dynamic detection accuracy requirements for rail profile wear using track inspection vehicles of ±0.5 mm for lateral wear and ±1.0 mm for vertical wear in practical applications, it is crucial that the design of wear detection algorithms do not compromise the detection accuracy due to outlier-induced noise in the profile data. To address this, this paper presented an improved two-stage rail profile wear detection algorithm. In the first stage, this algorithm enabled rapid initial registration based on feature point pairs extracted from the rail profile, providing an improved initial pose for the two point clouds. The second stage utilized an enhanced robust ICP algorithm for precise registration, followed by calculating geometric parameters related to rail profile wear. A laboratory experimental platform was set up to evaluate the developed rail profile wear detection system. This setup simulated typical disruptions from outliers in the measured data of rail web and rail base segments, in comparison with the measurements obtained using a manual contact-type wear tester for benchmarking. Moreover, the accuracy errors and effectiveness of wear detection were analyzed by comparing the classical ICP algorithm and articles with the proposed improved algorithm. Furthermore, a comparative evaluation was conducted to examine the detection speed of the algorithms, and the accuracy in repeatability measurements using the improved algorithm was verified. Finally, validation was conducted on a metro line using a track inspection vehicle, and the results highlighted the enhanced accuracy and speed of rail profile wear detection based on the improved algorithm in scenarios with disruptions from outliers, demonstrating the practical engineering value of the proposed algorithm.

Keywords: rail profile; profile registration; rail wear; feature points; robust ICP algorithm

收稿日期：2023-12-29；修回日期：2024-05-01