

# 用于便携式轨检小车的轨距及磨耗检测方法\*

郑树彬, 彭乐乐, 钟倩文, 李立明

(上海工程技术大学城市轨道交通学院 上海, 201620)

**摘要** 轨道线路的轨距及磨耗检测是保障列车运营安全的一项关键技术,传统的人工检测效率较低,大型轨检车检测及维护成本高,使得在轨道日检维护中缺少有效的设备及方法来满足轨道线路检测需求。为了解决此问题,提出了一种用于便携式轨检小车的轨距及磨耗检测方法。首先,基于光平面方程、机器视觉三维重构理论及相机标定技术构建了激光视觉检测模型及系统标定方法,获取了同一世界坐标系下的轨道左右轨轮廓线三维坐标值点集;其次,利用改进最近点迭代匹配算法,实现测量数据点集与标准钢轨点集匹配,计算得到轨距及磨耗值;最后,搭建测试系统进行实验验证。结果表明,该方法的测量最大偏差小于 0.1 mm,能够满足轨道线路日常检修及维护要求,为列车安全运行提供了技术保障。

**关键词** 机器视觉;最近点迭代匹配算法;轨距;磨耗;轨检小车

**中图分类号** TH71; TH741

## 引言

轨道线路作为列车可靠运行的基础,其轨距及磨损变形直接影响到列车的运行状态,严重的变形甚至会导致列车出轨等安全问题<sup>[1-2]</sup>。因此,如何实现轨道线路的轨距及磨耗检测已成为维护列车安全运行的必要手段之一<sup>[3-5]</sup>。

目前,针对轨距及磨耗的检测方法主要可以分为手持式人工检测<sup>[6]</sup>和车载式自动检测<sup>[7-8]</sup>2种。手持式人工检测方法是当前轨道线路日检中常用方法,采用的设备主要有轨距尺及钢轨廓形卡尺。该方法的主要缺点是依赖人工经验,造成测量数据存在一定不确定性,且检测设备功能相对单一,检测效率较低,难以满足轨道线路检测需求。车载式自动检测主要利用机器视觉<sup>[9-10]</sup>、图像特征提取<sup>[6]</sup>、惯性测量<sup>[7]</sup>、激光测距<sup>[11]</sup>及数据匹配技术<sup>[11-12]</sup>实现轨距及钢轨断面廓形检测。Xiong等<sup>[11]</sup>采用3D激光及最近点迭代匹配算法(iterative closest point,简称ICP)技术实现钢轨磨耗检测。史红梅等<sup>[12]</sup>利用最小二乘法拟合检测轨距参数。刘伶萍等<sup>[13]</sup>基于惯性原理开发了钢轨磨耗检测系统。李文涛等<sup>[14]</sup>采用视觉及图像特征提取方法,实现了磨耗的动态测量。占栋等<sup>[15]</sup>采用视觉标定方法检测钢轨廓形获取磨耗。车载式自动检测系统提高了检测效率,但存在

检测成本高、测量点间隔大、易局部点漏检、检测算法复杂以及检测周期较长等缺点,使其难以应用于轨道线路日常检修及维护中。

笔者提出了一种用于便携式轨检小车的轨距及磨耗检测系统及方法。采用光平面方程及机器视觉三维重构理论建立激光视觉检测模型,获取左右轨廓面坐标点集。采用改进最近点迭代匹配算法(improved iterative closest point,简称IICP),在实现坐标点集匹配的同时提高算法速度,从而快速实现轨距及磨耗的测量,并通过搭建测试系统进行实验验证。

## 1 检测系统结构及工作原理

图1为用于便携式轨检小车轨距和磨耗检测系统结构及原理图。该系统主要由左右2个对称的机器视觉检测系统组成。其中:左机器视觉检测系统由左激光光源 $L_1$ 和左相机组( $C_1, C_2$ )构成;右机器视觉检测系统由右激光光源 $L_2$ 和右相机组( $C_3, C_4$ )构成。轨距及磨耗检测原理可分为3步:①采用光平面方程及机器视觉三维重构理论构建激光视觉检测模型,分别获得左右机器视觉检测系统在各自世界坐标系下的轮廓线三维坐标点集;②通过相机标定技术建立左右机器视觉检测系统的世界坐标系映射

\* 国家自然科学基金资助项目(51907117,51975347);上海市科技计划资助项目(22010501600)

收稿日期:2020-08-04;修回日期:2020-09-10

关系,获取相同世界坐标系下的左右轨轮廓线三维坐标点集;③采用改进最近点迭代匹配ICP方法计算轨距及磨耗值。

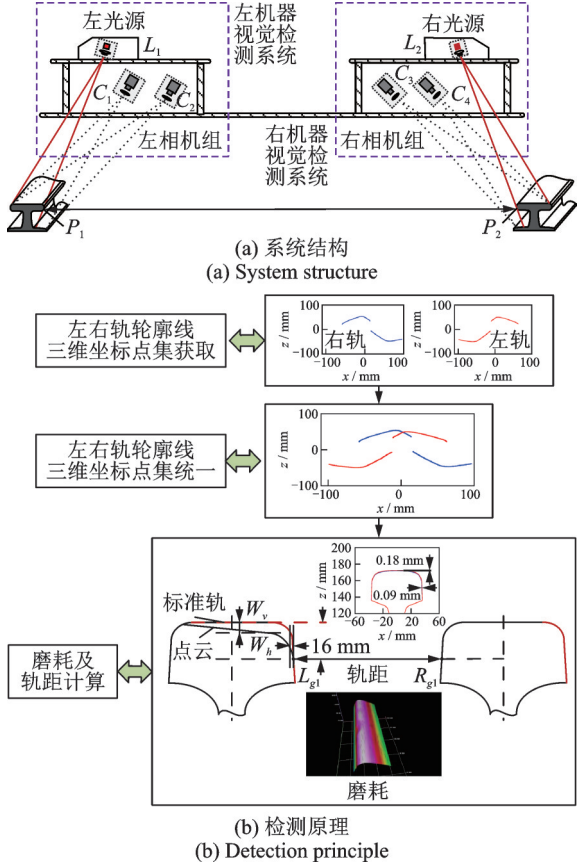


图1 用于便携式轨检小车的轨距和磨耗检测系统结构及原理图

Fig.1 Structure and principle diagram of rail gauge and wear for portable rail inspection trolley

## 2 激光视觉检测模型及系统标定

建立激光视觉检测模型及系统标定是为了获取同一世界坐标系下的左右轨轮廓线三维坐标点集,为计算轨距及磨耗提供数据源。图2为激光视觉检测模型及系统标定原理图。

设左机器视觉检测系统的世界坐标系为 $(x_{w1}, y_{w1}, z_{w1})$ 与左相机坐标系重合,右机器视觉检测系统的坐标系为 $(x_{w4}, y_{w4}, z_{w4})$ 与右相机坐标系重合,左右机器视觉坐标值可通过双目视觉三维重构技术获得,左右轨轮廓线的光平面方程为

$$A_{l,1}x_{l,w} + B_{l,1}y_{l,w} + C_{l,1}z_{l,w} + 1 = 0 \quad (1)$$

$$A_{r,1}x_{r,w} + B_{r,1}y_{r,w} + C_{r,1}z_{r,w} + 1 = 0 \quad (2)$$

其中: $A_{l,1}, B_{l,1}, C_{l,1}$ 为左相机组光平面方程系数; $A_{r,1}, B_{r,1}, C_{r,1}$ 为右相机组光平面方程系数; $x_{l,w}, y_{l,w}, z_{l,w}, x_{r,w}, y_{r,w}, z_{r,w}$ 为左右相机组在各自世界坐标系下

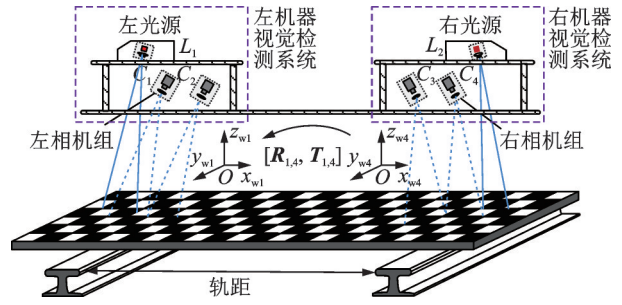


图2 激光视觉检测模型及系统标定原理图

Fig.2 The schematic diagram of laser vision inspection model and system calibration

坐标值。

基于摄像机成像模型,得到图像坐标系与世界坐标系之间的关系为

$$\begin{bmatrix} u_{l,1} \\ v_{l,1} \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_{l,w} \\ y_{l,w} \\ z_{l,w} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M = H_{l,1} [R_{l,1} \ T_{l,1}] \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} u_{r,1} \\ v_{r,1} \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_{r,w} \\ y_{r,w} \\ z_{r,w} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M = H_{r,1} [R_{r,1} \ T_{r,1}] \quad (6)$$

其中: $H_{l,1}, H_{r,1}$ 为左右相机组内部参数; $R_{l,1}, T_{l,1}, R_{r,1}, T_{r,1}$ 为左右相机组旋转及平移矩阵,可由相机标定获得; $u_{l,1}, v_{l,1}, u_{r,1}, v_{r,1}$ 为左右相机组的图像坐标值。

由式(1)~(4)可得

$$\begin{bmatrix} f_{l,x} & 0 & u_{l,0} - u_{l,1} \\ 0 & f_{l,y} & v_{l,0} - v_{l,1} \\ A_{l,1} & B_{l,1} & C_{l,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{l,w} \\ y_{l,w} \\ z_{l,w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} f_{r,x} & 0 & u_{r,0} - u_{r,1} \\ 0 & f_{r,y} & v_{r,0} - v_{r,1} \\ A_{r,1} & B_{r,1} & C_{r,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{r,w} \\ y_{r,w} \\ z_{r,w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: $f_{l,x}, f_{l,y}, f_{r,x}, f_{r,y}$ 为左右相机组焦距坐标值; $u_{l,0}, v_{l,0}, u_{r,0}, v_{r,0}$ 为左右相机组图像中心坐标值。

式(7)~(8)表明,获取同一坐标系下左右轨轮廓线三维坐标值的关键在于求解左右相机组的光平面方程系数( $A_{l,1}, B_{l,1}, C_{l,1}, A_{r,1}, B_{r,1}, C_{r,1}$ )和左右相机组旋转及平移矩阵( $R_{l,1}, T_{l,1}$ )。利用已知多组轮廓线三维世界坐标值建立关于光平面方程系数的方程组如式(9)~(10)所示。通过最小二乘法求解获取左右相机组的光平面方程系数。

$$\begin{bmatrix} x_{l,w1} & y_{l,w1} & z_{l,w1} \\ x_{l,w2} & y_{l,w2} & z_{l,w2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{l,wm} & y_{l,wm} & z_{l,wm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{l,1} \\ B_{l,1} \\ C_{l,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ \vdots \\ -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_{r,w1} & y_{r,w1} & z_{r,w1} \\ x_{r,w2} & y_{r,w2} & z_{r,w2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{r,wm} & y_{r,wm} & z_{r,wm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{r,1} \\ B_{r,1} \\ C_{r,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ \vdots \\ -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

点  $X_{c,1}, X_{c,r}$  在左右相机组的位置关系为

$$\begin{cases} X_{c,1} = R_{l,1} X_{l,w} + T_{l,1} \\ X_{c,r} = R_{r,1} X_{r,w} + T_{r,1} \\ X_{l,w} = R_{l,4} X_{r,w} + T_{l,4} \\ X_{c,1} = X_{c,r} + t \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $t$  为给定点的转换矩阵。

由式(11)可求得  $(R_{l,4}, T_{l,4})$  为

$$\begin{cases} R_{l,4} = R_{l,1} R_{r,1} \\ T_{l,4} = T_{r,1} - R_{l,1} R_{r,1}^{-1} T_{r,1} + t \end{cases} \quad (12)$$

### 3 基于 ICP 算法的轨距及磨耗计算

图3为轨距及磨耗计算原理图。根据文献[16]规定:在钢轨顶面宽1/3处测量钢轨的垂直磨耗  $W_v$ ,在距轨顶下方16 mm处测量钢轨的侧面磨耗  $W_h$ ,轨距  $L_g$ 是在轨顶下方16 mm范围内左右钢轨之间的最小距离,如图3所示。钢轨的轨距  $L_g$  和总磨耗  $W$  的计算公式为

$$L_g = \sqrt{(x_{r,w16} - x_{l,w16})^2 + (y_{r,w16} - y_{l,w16})^2 + (z_{r,w16} - z_{l,w16})^2} \quad (13)$$

$$W = W_v + W_h/2 \quad (14)$$

通过建立激光视觉检测模型及系统标定,获取同一世界坐标系下的左右轨轮廓线三维坐标值,得到由测量点集构成的目标点集  $P$ 。设标准钢轨在测量系统中的坐标点为参考点集  $Q$ ;  $T_{ICP}$  和  $R_{ICP}$  分别为  $P$  与  $Q$  之间的转换与旋转矩阵。通过求解  $T_{ICP}$  和  $R_{ICP}$ ,使  $P$  与  $Q$  之间的距离  $d$  最小,实现测量点集与标准轨位置匹配。利用式(13)~(14)获取轨距及磨耗值。根据 ICP 算法,  $T_{ICP}$  和  $R_{ICP}$  的计算公式为

$$\|Q_i^k - P_i^k\| = \min \quad (15)$$

$$C = \begin{bmatrix} (B/A)^2 + 1 & BC/A^2 & B/A^2 + (B/A)x_{wi} - y_{wi} \\ BC/A^2 & (C/A)^2 + 1 & C/A^2 + (C/A)x_{wi} - z_{wi} \\ (B/A)^2 + (B/A)x_{wi} - y_{wi} & C/A^2 + (C/A)x_{wi} - z_{wi} & 1/A^2 + (2/A)x_{wi} + l^2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

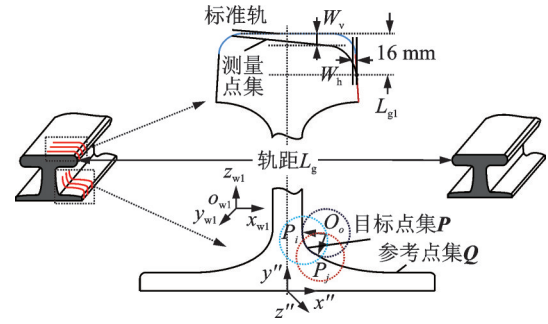


图3 轨距及磨耗计算原理图

Fig.3 The schematic diagram of rail gauge and wear calculation

$$P_i^{k+1} = R_{ICP}^k P_i^k + T_{ICP}^k \quad (16)$$

$$d^{k+1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|P_i^{k+1} - Q_i^k\|^2 < \epsilon \quad (17)$$

式(15)~(17)表明,决定匹配算法的关键在于  $P$  与  $Q$  之间的相似性。当相似度高时,匹配速度更快。因此,选取在实际使用中磨损较少的轨底圆弧处为目标点集  $P$ 。设任取该处一点  $(x_{wq}, y_{wq}, z_{wq})$  为以  $p_i(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$  为球心的球面一点,则球面方程为

$$X_q^T Q X_q = 0 \quad (18)$$

$$X_q = (x_{wq}, y_{wq}, z_{wq}, 1)^T \quad (19)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{wi} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{wi} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{wi} \\ -x_{wi} & -y_{wi} & -z_{wi} & l^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$l^2 = x_{wi}^2 + y_{wi}^2 + z_{wi}^2 - R^2 \quad (21)$$

其中:  $R$  为球半径。

设激光光源投射在光平面上的点为  $t = [x_t, y_t, 1]^T$ , 则有

$$X = E t \quad (22)$$

联合式(1)和式(2)可得

$$E = \begin{bmatrix} -B/A & -C/A & -1/A \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

根据式(18)和式(21),得到球面与光平面相交圆方程为

$$t^T E^T Q E t = t^T C t = 0 \quad (24)$$

将测量点集  $p_i$  和  $p_j$  代入式(24),可得

$$\begin{cases} t^T C_i t = 0 \\ t^T C_j t = 0 \end{cases} \quad (26)$$

轨底圆弧处目标点集  $P$  的球心可以通过式(26)求出。为了提高算法精度,设最优球心为  $O_0(x_{w,0}, y_{w,0}, z_{w,0})$ ,实测球心为  $O_k(x_{w,k}, y_{w,k}, z_{w,k})$ ,实测球心与最优球心的距离可表示为

$$d_k = (x_{w,0} - x_{w,k})^2 + (y_{w,0} - y_{w,k})^2 + (z_{w,0} - z_{w,k})^2 \quad (27)$$

最优球心的求解为

$$\frac{\partial L}{\partial x_{w,0}} = \frac{\partial L}{\partial y_{w,0}} = \frac{\partial L}{\partial z_{w,0}} = 0 \quad (28)$$

$$\min L = \sum_{k=1}^m d_k \quad (29)$$

由于轨底圆弧半径为 20 cm,因此选取左右轨目标点集分别为

$$\sqrt{(x_{l,w} - x_{w,0})^2 + (y_{l,w} - y_{w,0})^2 + (z_{l,w} - z_{w,0})^2} \leq 0.2 \quad (30)$$

$$\sqrt{(x_{r,w} - x_{w,0})^2 + (y_{r,w} - y_{w,0})^2 + (z_{r,w} - z_{w,0})^2} \leq 0.2 \quad (31)$$

综上所述,  $T_{ICP}$  和  $R_{ICP}$  的求解可通过 ICP 算法获得,图 4 为 ICP 算法流程图。

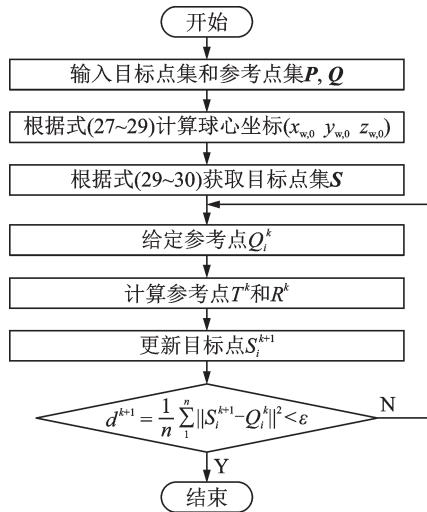


图 4 ICP 算法流程

Fig.4 The flow chart of ICP algorithm

## 4 实验验证

为了验证笔者所提方法的正确性及测量精度,搭建实验验证测试系统如图 5 所示。实验线路选择上海轨道交通实验线路龙阳路基地,该线路总长为 1.6 km,具有“三站三区间”线路形态,可进行多种形

式的轨道线路测试。测试系统采用间隔为 1 mm 的等距触发式数据采集方式,测量参数如表 1 所示。利用绝对偏差(absolute error,简称 AE)和最大绝对偏差(maximum absolute error,简称 MAE)来衡量检测精度<sup>[17]</sup>

$$AE_i = |V_{ri} - V_{ci}| \quad (32)$$

其中:  $i$  为采样点数;  $V_{ri}$  为检测数据;  $V_{ci}$  为设定值。

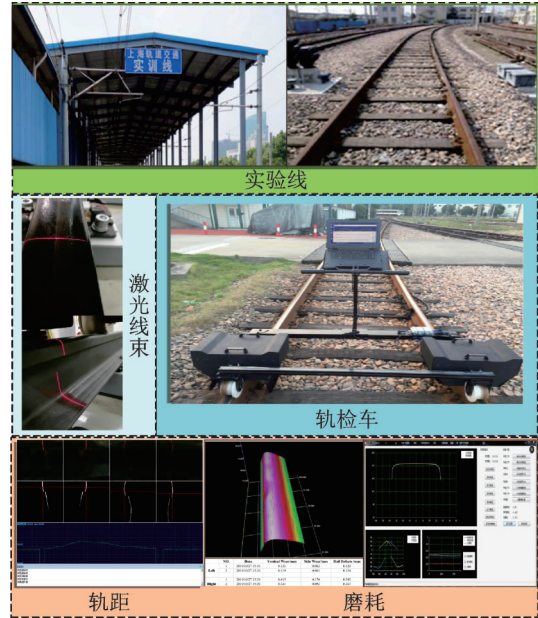


图 5 实验验证测试系统

Fig.5 Experimental verification test system

表 1 测量参数

Tab.1 Measurement parameters

序号	参数	数值
1	$(A_{1,1}, B_{1,1}, C_{1,1})$	$(-0.008\ 71, 0.000\ 94, 0.001\ 97)$
2	$(A_{r,1}, B_{r,1}, C_{r,1})$	$(-0.008\ 61, 0.000\ 92, 0.001\ 96)$
3	$R_{1,4}$	$\begin{bmatrix} 1.568\ 5 & 0.001\ 2 & -0.507\ 8 \\ 0.001\ 4 & 1.647\ 2 & 0.007\ 9 \\ 0.314\ 9 & 0.002\ 0 & 0.949\ 1 \end{bmatrix}$
4	$T_{1,4}$	$[335.37\ 0.404\ 6\ 39.771]$
5	$R_{ICP}$	$[0.47\ 0.47\ 0.47]$
6	$T_{ICP}$	$[10.34\ 5.16\ 0.11]$

图 6 为实验线路轨距实测数据曲线。可见,采用笔者所提方法与实际数据基本一致,能够准确获得轨距大小,实验线路的轨距范围为 1 434.7~1 535.8 mm,轨距的整体数值多处于标准轨距 1 435 mm 以上。

图 7 为实验线路测试轨距与实际数据的绝对偏差值。可以看出,与真实数据相比,最大绝对偏差小于 0.1 mm。实验线路的轨距最大偏差位于距离测



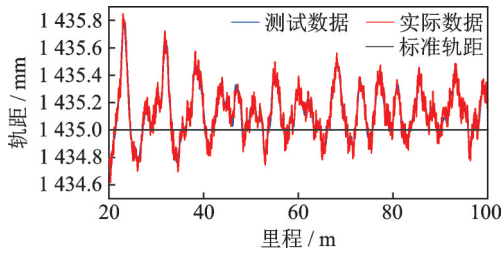


图6 实验线路轨距实测数据曲线

Fig.6 The measured data curve of test line gauge

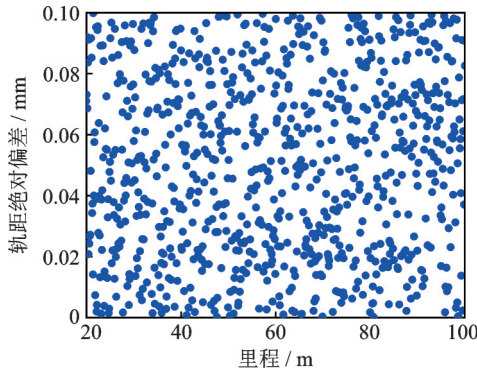


图7 实验线路测试轨距与实际数据的绝对偏差值

Fig.7 Absolute deviation of test line gauge between measured data and actual data

试原点 21.5 m 处,轨距偏差为 0.090 mm。

实验线路测试轨距与标准轨距的绝对偏差值如图 8 所示。可见,实验线路的整体轨距与标准钢轨的偏差范围为  $-0.429 \sim 0.847$  mm,全线绝对偏差小于 1 mm,在距原点 22.9 m 处,偏差达到了最大值。

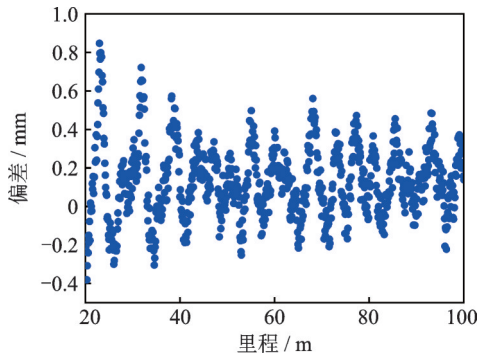


图8 实验线路测试轨距与标准轨距的绝对偏差值

Fig.8 Absolute deviation of test line gauge between measured data and standard data

图9为实验线路的磨耗测量数据曲线。从图9(a)可以看出,左轨道的整体垂直磨耗比侧面磨耗大,垂直磨耗的范围为  $0.001 \sim 0.290$  mm,侧面磨耗范围为  $0.001 \sim 0.173$  mm,总磨耗范围为  $0.001 \sim 0.297$  mm。最大磨耗位于距测量原点 35.9 m 处,对应的垂直磨耗为 0.264 mm,侧面磨耗为 0.066 mm。从图9(b)

可以看出,右轨道的整体垂直磨耗比侧面磨耗大,垂直磨耗的范围为  $0.001 \sim 0.269$  mm,侧面磨耗范围为  $0.001 \sim 0.293$  mm,总磨耗范围为  $0.001 \sim 0.279$  mm。最大磨耗位于距测量原点 97.9 m 处,对应的垂直磨耗为 0.189 mm,侧面磨耗为 0.180 mm。

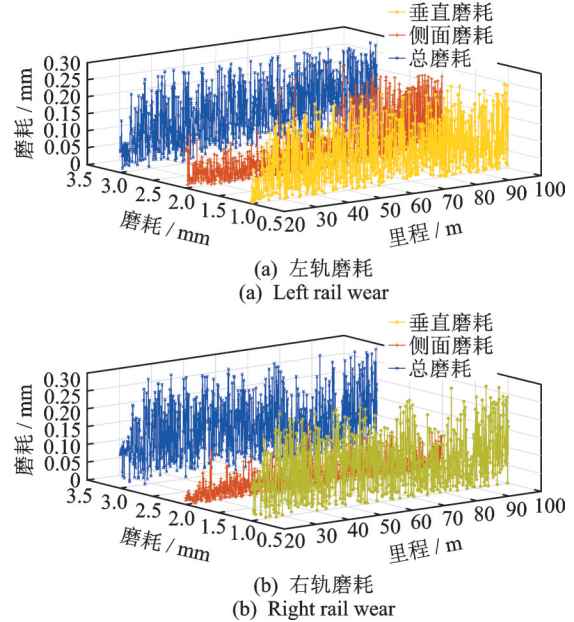


图9 实验线路的磨耗测量数据曲线

Fig.9 The measurement data curve of test line wear

表2为测试线路轨距及磨耗状况。该表可以反映出线路的安全状况,可为轨道的日常维护及维修提供指导。

表2 测试线路轨距及磨耗状况		
Tab.2 The status of test line gauge and wear		
名称	数值/m	最大偏差/mm
左轨距位置	22.9	0.847
右轨距位置	19.8	-0.429
左轨磨耗	35.9	(0.264, 0.066, 0.297)
右轨磨耗	97.9	(0.189, 0.180, 0.279)

## 5 结束语

为了提高轨道线路的日检效率,提出了一种基于机器视觉及 ICP 算法的用于便携式轨检小车轨距及磨耗检测方法,通过搭建测试系统进行了实验验证。结果表明,该方法可以准确获取轨距及左右轨磨耗数值,最大测量偏差小于 0.1 mm。该方法能反映出轨道线路的健康状况,为线路的日常维修及保养提供数据基础,有效保障列车的运营安全。

## 参 考 文 献

- [1] 郑树彬,彭乐乐,李立明,等. 机器视觉与惯性信息融合的轨道线形检测[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 394-426.  
ZHENG Shubin, PENG Lele, LI Liming, et al. Multi-sensors fusion of machine vision and inertial measurement[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(2):394-426. (in Chinese)
- [2] 孙宇,翟婉明. 钢轨磨耗演变预测模型研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(8):1-9.  
SUN Yu, ZHAI Wanming. A prediction model for rail wear evolution[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8):1-9. (in Chinese)
- [3] ZHOU L, WANG W J, HU Y, et al. Study on the wear and damage behaviors of hypereutectoid rail steel in low temperature environment[J]. Wear, 2020, 456: 203365-203378.
- [4] 侯茂锐,刘丰收,胡晓依,等. 我国典型高速铁路轮轨型面变化规律及匹配特性[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(7): 99-107.  
HOU Maorui, LIU Fengshou, HU Xiaoyi, et al. Typical wheel-rail profile change and matching characteristics of high-speed railway in China[J]. China Railway Science, 2020, 41(7):99-107. (in Chinese)
- [5] URDA P, MUÑOZ S, ACEITUNO J F, et al. Wheel-rail contact force measurement using strain gauges and distance lasers on a scaled railway vehicle [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 10655-10658.
- [6] 郑树彬,柴晓冬,安小雪,等. 基于动态模板的钢轨磨耗测量方法研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(2): 7-12.  
ZHENG Shubin, CHAI Xiaodong, AN Xiaoxue, et al. Rail wear measuring method based on dynamic template [J]. China Railway Science, 2013, 34(2): 7-12. (in Chinese)
- [7] 柴东明,魏世斌,刘玲平,等. 深圳地铁轨检车检测系统的研制[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(5):140-143.  
CHAI Dongming, WEI Shibin, LIU Lingping, et al. Development of the inspection system for Shenzhen metro track inspection car[J]. China Railway Science, 2005, 26(5): 140-143. (in Chinese)
- [8] 鞠标,朱洪涛,徐鞠萍,等. 基于轨检车振动问题的钢轨轮廓匹配方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 65-69.  
JU Biao, ZHU Hongtao, XU Juping, et al. Rail contour matching method based on random vibrations of a rail inspection vehicle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(3): 65-69. (in Chinese)
- [9] ZHANG Y, LIU M Y, CHEN Y N, et al. Real-time vision-based system of fault[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7): 5274-5284.
- [10] 唐晓敏,王培俊,吕东旭,等. 基于机器视觉的钢轨磨耗检测系统研究[J]. 仪表技术与传感器, 2017(9): 59-87.  
TANG Xiaomin, WANG Peijun, LV Dongxu, et al. Research on rail wear measurement system based on machine vision[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(9): 59-87. (in Chinese)
- [11] XIONG Z M, LI Q Q, MAO Q Z, et al. A 3D laser profiling system for rail surface defect detection [J]. Sensors, 2017, 17:1791-1804.
- [12] 史红梅,许明,徐祖俊. 基于最小二乘法曲线拟合的轨距参数测量方法[J]. 铁道学报, 2019, 41(12):82-88.  
SHI Hongmei, XU Ming, XU Zujun. Rail track gauge measurement method based on least-square curve fitting theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(12):82-88. (in Chinese)
- [13] 刘伶萍,杜鹤亭,杨爱红. 钢轨波浪磨耗检测系统的研究开发[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(6):65-69.  
LIU Lingping, DU Heting, YANG Aihong. Development of rail corrugation inspection system [J]. China Railway Science, 2002, 23(6):65-69. (in Chinese)
- [14] 李文涛,王培俊,王猛,等. 钢轨断面全轮廓磨耗激光视觉动态测量[J]. 西南交通大学学报, 2018, 16:1-8.  
LI Wentao, WANG Peijun, WANG Meng, et al. Laser visual dynamic measurement of rail wear on complete profile[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 16:1-8. (in Chinese)
- [15] 占栋,于龙,肖建,等. 钢轨轮廓测量中多视觉传感器全局标定方法研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(8):87-95.  
ZHAN Dong, YU Long, XIAO Jian, et al. Study on global calibration approach of multiple vision sensors for railway track profile measurement [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(8):87-95. (in Chinese)
- [16] TG/GW 102—2019 铁运铁路线路修理规则[S].
- [17] PENG L L, ZHENG S B, CHAI X D, et al. A novel tangent error maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system under fast multi-changing solar irradiances[J]. Applied Energy, 2018, 210:303-316.



**第一作者简介:**郑树彬,男,1979年8月生,博士、教授。主要研究方向为轨道车辆智能感知及数据分析。曾发表《机器视觉与惯性信息融合的轨道线形检测》(《振动、测试与诊断》2018年第38卷第2期)等论文。

E-mail: shubin.zheng@sues.edu.cn