

轨廓测量系统钢轨纵向标定方法研究

王乐^{1,2}, 周谦¹, 方玥¹, 王胜春^{1*}, 王昊¹, 黎国清¹, 任盛伟¹, 戴鹏¹, 韩强^{1,3}, 王凡¹¹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;³北京交通大学理学院, 北京 100044

摘要 为了获取钢轨轮廓测量系统中钢轨纵向的方向参数,提出了一种基于平面靶标的钢轨纵向标定方法。利用平面靶标与钢轨表面紧贴时靶标坐标系的 Z 轴始终与钢轨纵向垂直的特点,将平面靶标在钢轨表面平移或者旋转,并使平面靶标与钢轨表面保持贴紧状态;通过相机采集一组不同姿态下的平面靶标图像,将这组靶标坐标系 Z 轴单位向量变换到世界坐标系下,利用变换后单位向量的坐标进行平面拟合,通过计算拟合平面的法线得到钢轨纵向的方向向量,从而完成钢轨纵向参数的标定。在实验室环境下验证了所提方法的有效性,钢轨纵向标定误差在 0.1° 以下。当靶标图像数量在 10 张以上时,所提方法能达到最优的标定效果。所提方法为钢轨轮廓测量系统的精度提升和可靠性评估提供了理论依据。

关键词 测量; 钢轨轮廓; 钢轨纵向; 标定; 平面靶标

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1012004

Rail Longitudinal Calibration Method for Profile Measurement System

Wang Le^{1,2}, Zhou Qian¹, Fang Yue¹, Wang Shengchun^{1*}, Wang Hao¹,Li Guoqing¹, Ren Shengwei¹, Dai Peng¹, Han Qiang^{1,3}, Wang Fan¹

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

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

³School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract In order to obtain rail longitudinal direction parameters of a rail profile measurement system, a rail longitudinal calibration method based on the planar target is proposed. The Z-axis of the target coordinate system is always vertical to the rail longitudinal direction when the plane target is close to the rail surface. The plane target is translated or rotated on the rail surface and is closely attached to the rail surface. A group of plane target images with different postures are collected by the camera, and the Z-axis unit vector of the target coordinate system is transformed into the world coordinate system. After the transformation, the coordinates of the unit vector are fitted to the plane, and the longitudinal direction vector of the rail is obtained by calculating the normal of the fitting plane, so as to complete the calibration of the longitudinal parameters of the rail. The effectiveness of the proposed method is verified in the laboratory environment, and the rail longitudinal calibration error is less than 0.1° . When the number of target images is more than 10, the optimal calibration effect can be achieved. This method provides a theoretical basis for the accuracy improvement and reliability evaluation of the rail profile measurement system.

Key words measurement; rail profile; rail longitudinal; calibration; plane target

OCIS codes 120.4630; 110.2970; 100.2000; 290.5855

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2020-12-15; 录用日期: 2020-12-30

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)

* E-mail: wangshengchun@rails.cn

1 引言

为了掌握钢轨的服役状态、延长钢轨使用寿命,需要定期检测钢轨廓形、评估服役钢轨的垂直磨损量和侧面磨损量等状态参数^[1-2]。基于三角测量原理的线结构光钢轨廓形检测技术可以实时获取钢轨的轮廓信息,具有高速、高精度和非接触的特点,是国内外钢轨廓形动态检测的主流方式^[3-7]。为了保证钢轨轮廓测量结果的准确性,应当获取垂直钢轨纵向的横断面轮廓数据。在现场测量时,车体的振动会导致激光平面与钢轨纵向(延伸方向)不垂直,这时测量结果并非垂直钢轨纵向的横断面轮廓数据,而是钢轨的斜断面轮廓数据,与真实横断面轮廓相比,钢轨的斜断面轮廓数据表现为沿横向和垂向的拉伸,即测量轮廓产生了一定的畸变,从而导致测量误差的产生^[8]。同样地,在安装钢轨轮廓测量装置时,也应当保证钢轨两侧的激光平面与钢轨纵向垂直,然后以此为基准开展相应的标定和修正工作,两者不垂直将会影响后续的标定和修正工作,进而产生一定的系统误差。以上两种激光平面与钢轨纵向不垂直的问题分别发生在现场测量时和测量装置安装时,很多学者对现场测量时车体的振动导致的激光平面与钢轨纵向不垂直问题开展了大量的研究工作,从不同的角度提出了相应的修正方法,并取得了有效的研究成果^[9-10];然而,关于如何评估钢轨轮廓测量装置安装时钢轨两侧的激光平面与钢轨纵向的垂直问题却鲜有报道。现有的钢轨轮廓测量系统的标定方法仅获取了相机内外参数和激光平面参数^[11-14],并没有获取钢轨纵向在世界坐标系下的方向参数,也就无法评估组件安装后两侧激光平面是否垂直于钢轨纵向,这造成钢轨轮廓测量系统存在一定的系统误差。

针对以上问题,提出了一种基于平面靶标的钢轨纵向标定方法。首先阐述了标定原理,当平面靶标贴紧钢轨表面时,靶标坐标系的 z 轴与钢轨纵向始终满足垂直的条件,利用这种特点,将平面靶标在钢轨表面平移或者旋转,并保持平面靶标与钢轨表面贴紧,通过任意一侧相机拍摄每个姿态下的平面靶标,得到一组不同姿态下的平面靶标图像,这组不同姿态下的靶标坐标系的 z 轴仍满足与钢轨纵向垂直的条件。然后,将每个靶标坐标系的原点和 z 轴单位向量的坐标变换到世界坐标系下,构建一组新的向量,则新向量均位于与钢轨纵向垂直的同一平面内,对新向量的坐标进行平面拟合,计算拟合平

面的法线,从而得到钢轨纵向的方向向量。最后,详细阐述了钢轨纵向的标定步骤,开展了定性分析实验和定量分析实验,验证了所提方法的可行性和有效性,通过实验进一步分析了靶标图像数量与钢轨纵向标定均方根误差的关系,并指出了达到最优的标定效果时的靶标图像数量。

2 基本原理

2.1 线结构光钢轨轮廓测量原理

图 1 是线结构光钢轨轮廓测量技术的透视投影几何模型,线结构光入射到被测物表面,被调制成反映被测物轮廓信息的光条,由相机拍摄该光条,得到被测物的激光断面图像,图中 P 点为激光平面上的一点, Q 是其对应的像点。提取该图像的光条中心像素坐标,结合光条中心像素坐标和系统标定参数,便可计算出被测物实际轮廓^[15]。图 2 是线结构光钢轨轮廓测量原理图,在钢轨左右两侧各有一套由相机、镜头和线激光器组成的激光摄像组件,两套组件的激光平面共面安装,分别用于获取钢轨左右半断面轮廓数据,由标定参数将半断面轮廓进行拼接,从而得到钢轨全断面轮廓。两套组件通过扫描运动,即可实现对整个钢轨的轮廓测量^[16]。

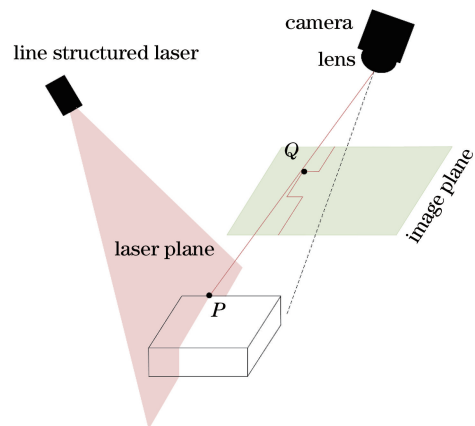


图 1 线结构光透视投影几何模型

Fig. 1 Geometric model of line structured light perspective projection

2.2 钢轨纵向标定原理

图 3(a)是本文采用的平面靶标,靶标平面内有 7×7 个等间距排列的圆点,以最中间圆点的圆心为坐标原点,靶标平面为 XOY 平面, Z 轴指向靶标的背面,建立靶标三维坐标系 tcs ,记相机坐标系为 ccs 。如图 3(b)所示,当平面靶标贴紧钢轨表面时,靶标平面与钢轨表面相切,靶标坐标系的 XOY 平面与钢轨的纵向平行, Z 轴与钢轨的纵向垂直,满足

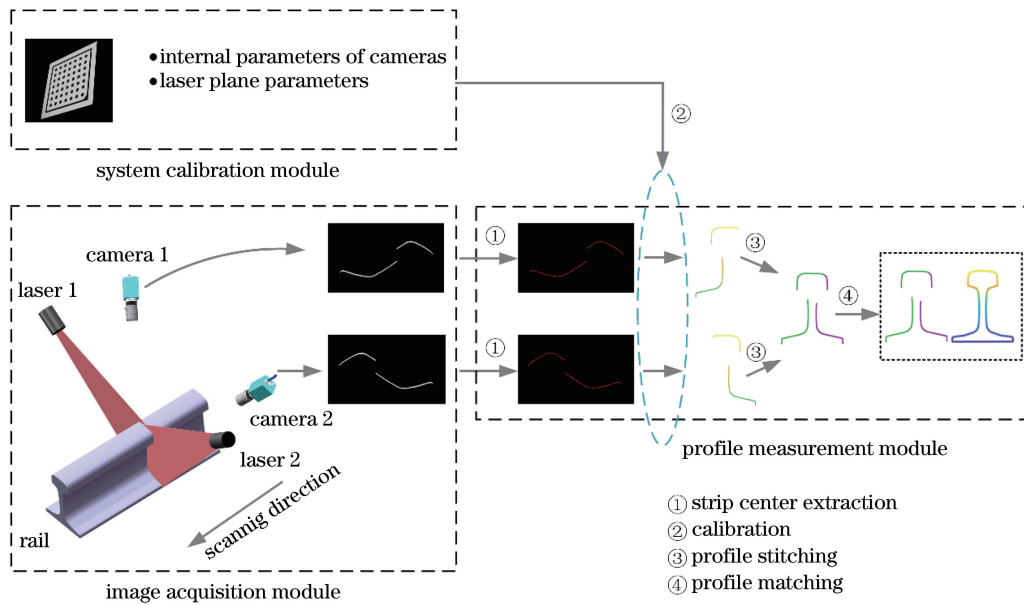


图 2 线结构光钢轨轮廓测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of rail profile measurement with line structured light

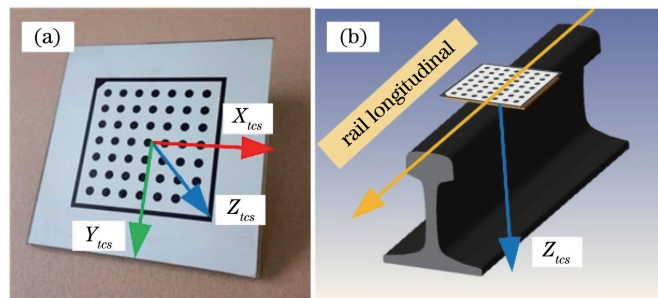


图 3 靶标坐标系与钢轨纵向。(a) 靶标坐标系; (b) 靶标坐标系 Z 轴 (Z_{tcs}) 与钢轨纵向垂直

Fig. 3 Target coordinate system and rail longitudinal direction. (a) Target coordinate system;

(b) Z-axis (Z_{tcs}) of target coordinate system is vertical to rail longitudinal direction

$$\mathbf{Z}_{tcs} \cdot \mathbf{V}_{rail} = 0, \quad (1)$$

式中: \mathbf{Z}_{tcs} 为靶标坐标系 Z 轴的单位向量; \mathbf{V}_{rail} 为钢轨纵向的方向向量。利用平面靶标贴紧钢轨表面时靶标坐标系 Z 轴与钢轨纵向垂直的特点, 将平面靶标按照图 4 所示的运动路径在钢轨表面平移或旋转, 并始终保持其与钢轨表面贴紧的状态。图 5 列

出了 9 种典型的平面靶标位姿示意图。通过任意一侧相机拍摄钢轨表面的平面靶标, 可以得到一组不同姿态下的平面靶标图像, 这组靶标图像可表示为

$$\{I_i \mid i = 1, 2, 3, \dots, n\}, \quad (2)$$

式中: I_i 为第 i 个靶标图像; n 为靶标图像的数量。靶标在移动过程中始终与钢轨表面贴紧, 因此, 这组

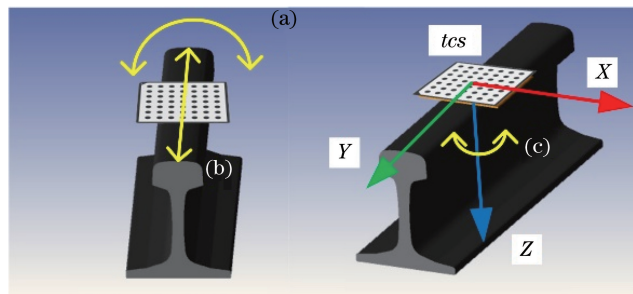


图 4 平面靶标在钢轨表面的运动路线示意图。(a) 绕钢轨纵向旋转; (b) 沿钢轨纵向平移; (c) 绕靶标坐标系 Z 轴旋转

Fig. 4 Schematic diagrams of plane target moving on rail surface. (a) Longitudinal rotation around rail;

(b) longitudinal translation along rail; (c) rotate around the Z-axis of target coordinate system tcs

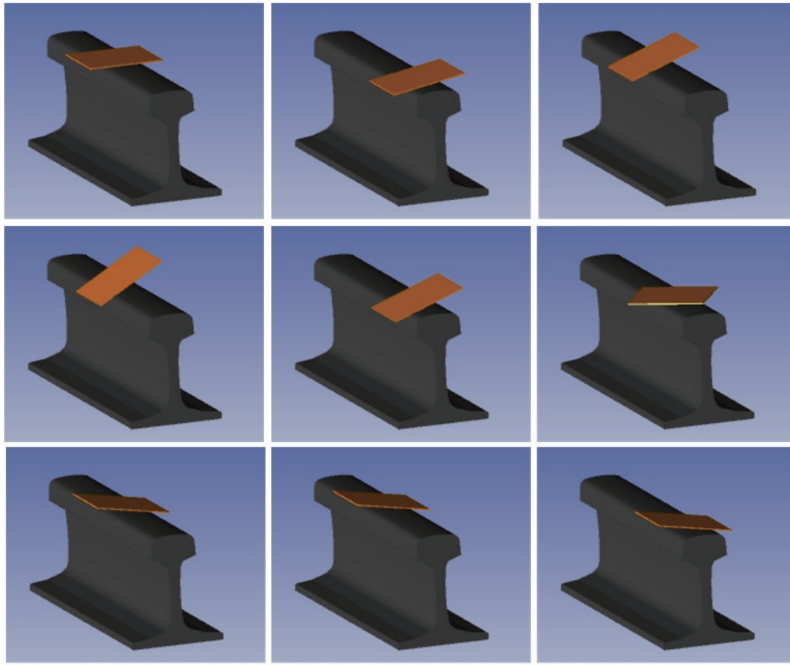


图 5 9 种典型的平面靶标位姿示意图

Fig. 5 Diagrams of nine typical plane target poses

平面靶标的靶标坐标系的 Z 轴也始终满足与钢轨纵向垂直的条件,即

$$\mathbf{Z}_{tes,i} \cdot \mathbf{V}_{rail} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{Z}_{tes,i}$ 为第 i 个平面靶标坐标系 Z 轴的单位向量。

记 $\mathbf{H}_{tes,i}^{ccs}$ 为相机坐标系到第 i 个靶标坐标系的齐次变换矩阵,则

$$\mathbf{H}_{tes,i}^{ccs} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{tes,i}^{ccs} & \mathbf{t}_{tes,i}^{ccs} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R}_{tes,i}^{ccs}$ 和 $\mathbf{t}_{tes,i}^{ccs}$ 分别为相机坐标系到第 i 个靶标坐标系的旋转矩阵和平移向量。根据张正友^[17]提出的基于平面靶标的相机标定方法,基于第 i 个靶标图像可以得到相机坐标系到第 i 个靶标坐标系的齐次变换矩阵 $\mathbf{H}_{tes,i}^{ccs}$,取第 1 个靶标坐标系为世界坐标系 wcs ,则

$$\mathbf{H}_{wcs}^{ccs} = \mathbf{H}_{tes,1}^{ccs}, \quad (5)$$

因此,可以通过

$$\mathbf{H}_{tes,1}^{wcs} = (\mathbf{H}_{wcs}^{ccs})^{-1} \cdot \mathbf{H}_{tes,i}^{ccs}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (6)$$

得到世界坐标系到第 i 个靶标坐标系的齐次变换矩阵 $\mathbf{H}_{tes,i}^{wcs}$ 。在此基础上,通过

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{wcs,i} = \mathbf{H}_{tes,i}^{wcs} \cdot \mathbf{P}_{tes,i} \\ \mathbf{Q}_{wcs,i} = \mathbf{H}_{tes,i}^{wcs} \cdot \mathbf{Q}_{tes,i} \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (7)$$

将第 i 个靶标坐标系的原点 $\mathbf{P}_{tes,i} = (0, 0, 0)^T$ 和 Z 轴单位向量的坐标向量 $\mathbf{Q}_{tes,i} = (0, 0, 1)^T$ 变换到世界坐标系下,得到 $\mathbf{P}_{wcs,i}$ 和 $\mathbf{Q}_{wcs,i}$,记向量 $\mathbf{V}_i =$

$\mathbf{P}_{wcs,i} \mathbf{Q}_{wcs,i} = (x_i, y_i, z_i)$,则向量 \mathbf{V}_i 仍与钢轨纵向垂直,即满足

$$\mathbf{V}_i \cdot \mathbf{V}_{rail} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (8)$$

且向量 \mathbf{V}_i 位于与钢轨纵向垂直的同一平面内,该平面过世界坐标系的原点。记 $\mathbf{V}_i = \mathbf{P}_{wcs,i} \mathbf{Q}_{wcs,i} = (x_i, y_i, z_i)$,对向量 \mathbf{V}_i 的坐标点进行平面拟合,则拟合平面的法线就是钢轨纵向在世界坐标系下的方向参数。

由向量 $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, z_i)$ 构造矩阵

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x} & y_1 - \bar{y} & z_1 - \bar{z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - \bar{x} & y_n - \bar{y} & z_n - \bar{z} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, $\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$,令 $\mathbf{S} = \mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M}$,显然 \mathbf{S} 有三个特征值,最小特征值对应的特征向量即为拟合平面的法线的方向向量 \mathbf{n} ,从而得到钢轨纵向在世界坐标系下的方向向量 $\mathbf{V}_{rail} = \mathbf{n}$ 。

需要指出的是,本文所提标定方法成立的条件是平面靶标与钢轨表面紧贴时,靶标平面与钢轨表面相切,靶标坐标系的 Z 轴与钢轨纵向始终垂直,为了满足这种条件,钢轨表面应当尽量保证平顺、不变形。因此,当钢轨表面存在凹凸不平或变形较大的情况时,靶标平面有可能会与钢轨表面存在点接触的情况,此时,靶标平面与钢轨表面不再相切,靶标坐标系的 Z 轴与钢轨纵向也不再垂直,所提方法

存在精度降低的风险。一般情况下,当在车库内安装钢轨轮廓测量装置时,由于车库内的钢轨维护较好,不存在变形或者表面凹凸不平的情况,因此所提标定方法存在成立的条件。此外,钢轨顶面由于长期和轮对接触,顶面较为光滑,可以优先考虑使用钢轨顶面与平面靶标相接触的方式。

3 实验与讨论

3.1 标定步骤

图 6 是钢轨纵向标定流程图,主要分为 5 步:

1) 基于传统钢轨轮廓测量系统标定方法标定钢轨左、右侧相机的内部参数,具体操作可参考文献[18]。

2) 关闭激光器,参考图 4 和图 5 调整平面靶标姿态,平面靶标可以沿钢轨纵向平移、绕钢轨纵向旋转以及绕自身靶标坐标系的 Z 轴旋转,但始终要保证平面靶标与钢轨表面贴紧。用任意一侧相机采集 n 幅不同姿态下的平面靶标图像, $n \geq 10$ 。

3) 利用不同姿态下的平面靶标图像计算世界坐标系到第 i 个靶标坐标系的齐次变换矩阵 $\mathbf{H}_{ics,i}^{wcs}$, $i=1,2,3,\dots,n$ 。

4) 通过(7)式将第 i 个靶标坐标系的原点 $\mathbf{P}_{ics,i}=(0,0,0)^T$ 和 Z 轴单位向量的坐标向量 $\mathbf{Q}_{ics,i}=(0,0,1)^T$ 变换到世界坐标系下,得到向量 $\mathbf{V}_i = \mathbf{P}_{wcs,i}, \mathbf{Q}_{wcs,i}=(x_i, y_i, z_i)$ 。

5) 对向量 $\mathbf{V}_i=(x_i, y_i, z_i)$ 进行平面拟合,并计算拟合平面的法线的方向向量 \mathbf{n} , 则 \mathbf{n} 就是钢轨纵向在世界坐标系下的方向向量。

3.2 标定结果及分析

为了验证钢轨纵向标定方法的有效性,搭建了线结构光钢轨轮廓测量装置,如图 7(a)所示,其中,线激光器采用加拿大 Nanoline 公司生产的波长为 650 nm 的半导体激光器,镜头采用日本 Kowa 公司生产的型号为 LM12HC-V 的 12 mm 定焦镜头,相机采用德国 SICK 公司生产的型号为 Ranger3 的工业相机,被测物选择 60 kg/m 型号的钢轨。如图 7(b)、(c)所示,将平面靶标与钢轨表面贴紧,利用 2 号相机采集 10 幅不同姿态下的标定板图像。图 8 是相机采集的部分标定板图像,图中还显示了相应的靶标坐标系。表 1 给出了向量 \mathbf{V}_i 在世界坐标系下的坐标,由向量 \mathbf{V}_i 的坐标拟合平面,平面拟合平均残差为 0.0634 mm,计算拟合平面的法线,得到法线的方向向量为 $(-0.248, -0.969, -0.003)$ 。根据计算结果,图 9 给出了向量 \mathbf{V}_i 和拟合平面法线分布图,可以明显看出,向量 \mathbf{V}_i 均在与钢轨纵向垂直的同一平面内,且拟合平面的法线与钢轨纵向一致,这证明了本方法的有效性。此外,如果操作失误导致某个靶标姿态没有调整到位,即靶标坐标系的 Z 轴与钢轨纵向不垂直,则该靶标姿态对应的平面拟合残差会变大。为了降低这种偶然因素导致的钢轨纵向标定误差、保证钢轨纵向标定精度,可以多采集一些不同姿态下的平面靶标图像,采用上述方法拟合平面,将平面拟合残差较大的靶标图像剔除掉,然后重新拟合平面,并计算钢轨纵向参数。

为了进一步定量分析钢轨纵向标定结果的准确度,将被测钢轨放置在电控旋转台上,将钢轨与激光平面垂直的位置定义为旋转基准位置,如图 10 所示,记此时的旋转角度 $\alpha=0^\circ$,以逆时针旋转为正,步长为 5° ,控制电控旋转台从 $\alpha=-25^\circ$ 旋转到 $\alpha=25^\circ$ 。在每个位置采用上述方法标定钢轨纵向,图 11 给出了其中 9 个位置的钢轨纵向标定结果,其中, \mathbf{V}_{rail}^j 表示第 j 个旋转位置钢轨纵向的方向向量, $j=1,2,\dots,10$ 。相邻两个旋转位置的钢轨纵向的夹角 β^j 为

$$\beta^j = \arccos\left(\frac{\mathbf{V}_{rail}^{j+1} \cdot \mathbf{V}_{rail}^j}{\|\mathbf{V}_{rail}^{j+1}\| \|\mathbf{V}_{rail}^j\|}\right), j=1,2,\dots,10. \quad (10)$$

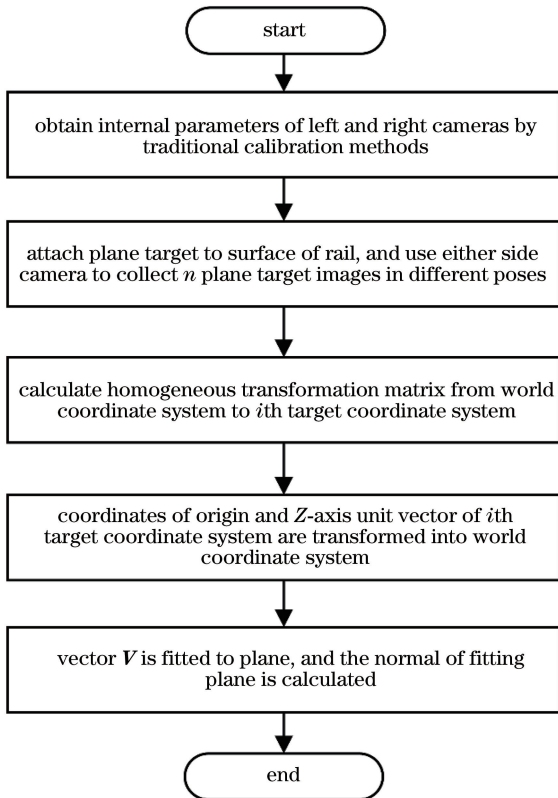


图 6 钢轨纵向标定流程图

Fig. 6 Flow chart of rail longitudinal calibration

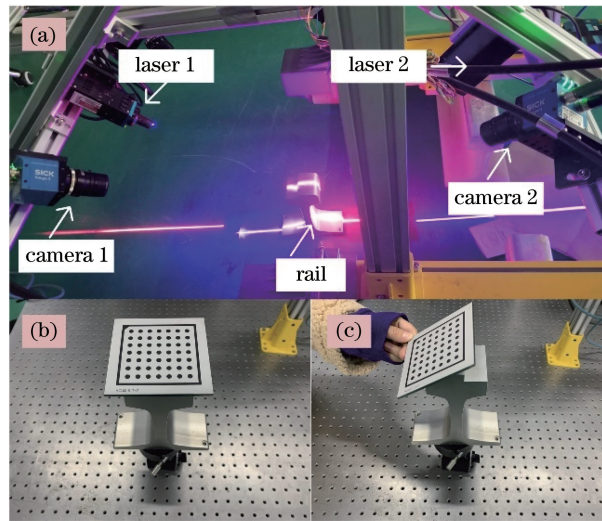


图 7 线结构光钢轨轮廓测量装置。(a)钢轨轮廓测量装置;(b)平面靶标与钢轨顶面紧贴;(c)平面靶标与钢轨侧面紧贴
 Fig. 7 Rail profile measurement device with structured light. (a) Rail profile measurement device;
 (b) flat target is closely attached to top surface of rail; (c) flat target is closely attached to side of rail

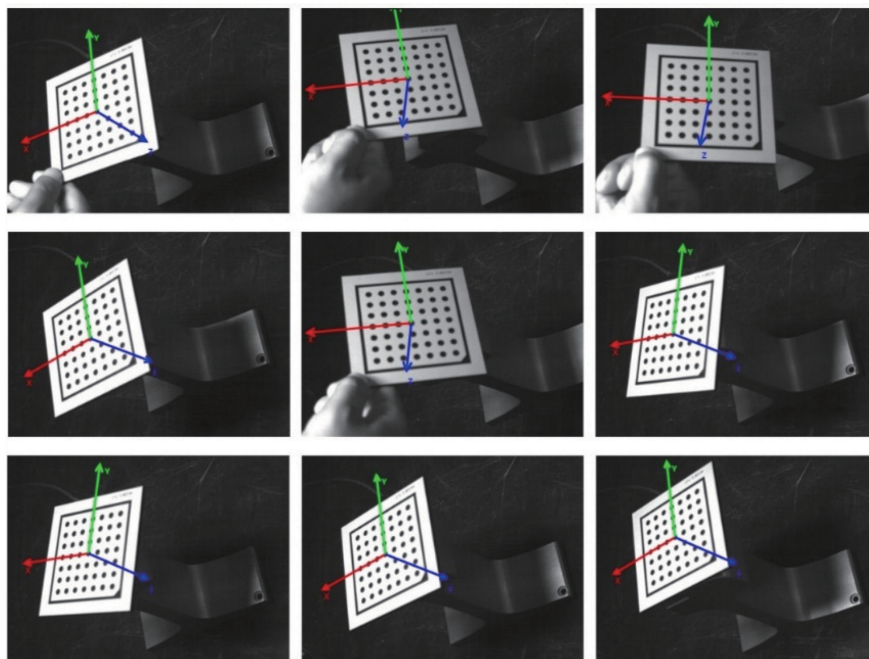


图 8 不同姿态下的平面靶标图像
 Fig. 8 Plane target images under different postures

表 1 向量 V_i 在世界坐标系下的坐标

Table 1 Coordinates of vector V_i in world coordinate system

x_i	0.002	0.150	-0.009	-0.009	0.014	-0.011	0.716	0.833	0.747	0.729
y_i	0.003	0.040	0.001	0.001	0.007	0	0.214	0.204	0.184	0.182
z_i	-0.999	-0.988	-0.999	-0.999	-0.999	-1.000	-0.664	-0.515	-0.638	-0.660

钢轨纵向标定误差可以表示为

$$E^j = \beta^j - 5, j = 1, 2, \dots, 10. \quad (11)$$

表 2 给出了钢轨纵向标定误差,可以看出钢轨

纵向标定误差均在 0.1° 以内,这说明本方法具有较
 高的准确度。

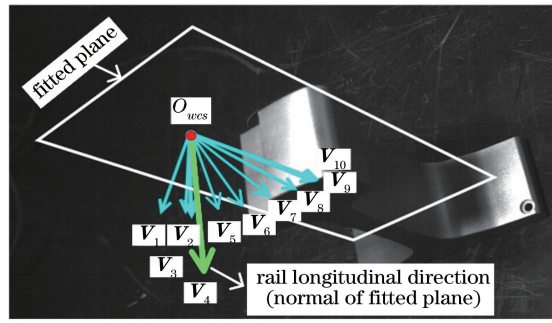


图 9 向量 V_i 和拟合平面法线分布图

Fig. 9 Distribution of vectors V_i and the normal of fitting plane

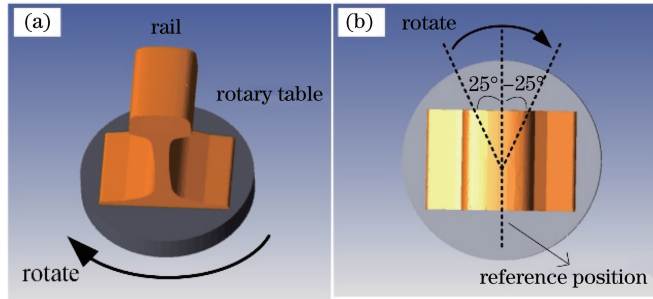


图 10 钢轨旋转位置示意图。(a)轴测图;(b)俯视图

Fig. 10 Schematic diagrams of rail rotation position. (a) Axonometric view; (b) top view

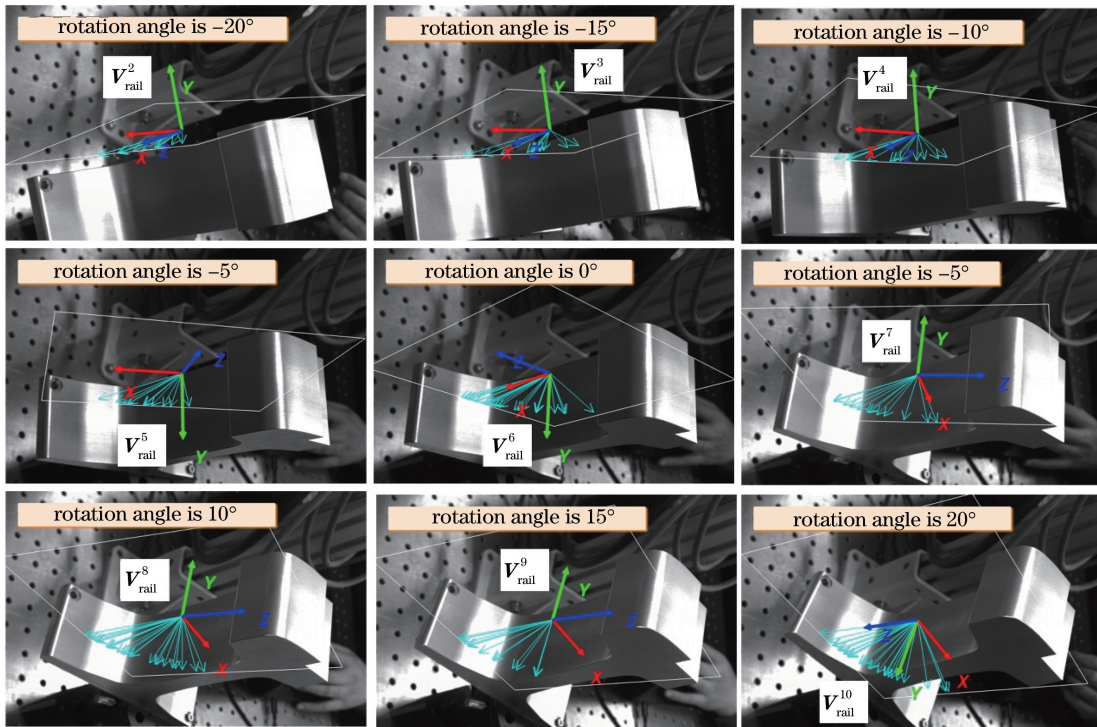


图 11 9 个旋转位置的钢轨纵向标定结果

Fig. 11 Rail longitudinal calibration results for 9 rotating positions

表 2 钢轨纵向标定误差

Table 2 Rail longitudinal calibration error

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Error / (°)	0.05	0.03	0.06	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05

为了评估靶标图像数量对钢轨纵向标定误差的影响,在旋转角度等于 0° 和 10° 的两个位置分别采集 20 张靶标图像。对于 0° 旋转位置,选取全部的靶标图像标定钢轨纵向,并将该位置的钢轨纵向标定结果作为参考值。对于 10° 旋转位置采集的 20 张靶标图像,分别随机选取其中的 3, 4, ..., 20 张靶标图像标定钢轨纵向,即对 10° 旋转位置标定钢轨纵向 18 次。将该位置每一次的钢轨纵向标定结果与 0° 旋转位置得到的参考值进行比较,得到每一次标定的钢轨纵向标定误差。图 12 给出了钢轨纵向标定误差随靶标图像数量的变化情况,可以看出,钢轨纵向标定误差随着靶标图像数量的增大而降低,当靶标图像数量较少(小于 8 张)时,受随机误差和操作方式等因素的影响,钢轨纵向标定结果具有较大的误差,但当靶标图像数量达到 10 张以上时,钢轨纵向标定误差可以保证在 0.1° 以下,且随着靶标图像数量的持续增加,钢轨纵向标定误差基本维持在 0.05° 左右,因此,为了保证钢轨纵向标定结果的准确性,现场标定时,应当至少采集 10 张靶标图像。

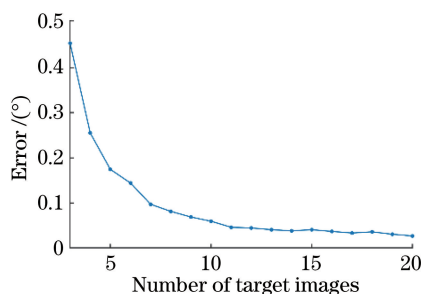


图 12 钢轨纵向标定误差与靶标图像数量的关系

Fig. 12 Relationship between rail longitudinal calibration error and number of target images

4 结 论

针对线结构光钢轨轮廓测量系统中钢轨纵向参数未知的问题,提出了基于平面靶标的钢轨纵向标定方法。通过对不同姿态下的靶标坐标系 Z 轴单位向量的坐标进行平面拟合,计算拟合平面的法线,从而得到钢轨纵向在世界坐标系下的方向向量。该方法不需要额外调整设备,标定过程简单高效,能够准确地获取钢轨纵向参数。钢轨纵向参数和已经标定的激光平面参数,可以用于评估两侧激光平面与钢轨纵向是否满足垂直的关系,这样可降低由于两者不垂直造成的系统误差,为后续的测量系统标定和误差修正工作提供了基础。

参 考 文 献

- [1] Wang S C, Han Q, Wang H, et al. Laser stripe center extraction method of rail profile in train-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.
- [2] Wang H. Research and application of dynamic measuring method of rail profile based on structured light projection [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2018.
王昊. 基于结构光投影的钢轨廓形动态测量方法研究及应用[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
- [3] 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(8): 1791.
- [4] Li Y F, Zhong X Y, Ma Z J, et al. The outlier and integrity detection of rail profile based on profile registration [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(3): 1074-1085.
- [5] Wang H, Wang S C, Wang W D, et al. Automatic registration method of rail profile in train-running environment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(11): 2273-2282.
王昊, 王胜春, 王卫东, 等. 行车环境下钢轨轮廓自动配准方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(11): 2273-2282.
- [6] Ma Z J, Dong Y R, Liu H L, et al. Rail corrugation dynamic measurement method based on multi-line structured-light vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 189-197.
马子骥, 董艳茹, 刘宏立, 等. 基于多线结构光视觉的钢轨波磨动态测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 189-197.
- [7] Wang S C, Wang H, Zhou Y L, et al. Automatic laser profile recognition and fast tracking for structured light measurement using deep learning and template matching [J]. Measurement, 2020, 169: 108362.
- [8] Sun J H, Liu Z, Zhao Y T, 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.
- [9] Wang C, Li Y F, Ma Z J, 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.
- [10] Li Y F, Liu H L, Ma Z J, et al. A distortion

- calibration method of rail profile based on dynamic reference[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(10): 119-126.
- 李艳福, 刘宏立, 马子骥, 等. 基于动态参考的钢轨轮廓失真校准方法[J]. 铁道学报, 2018, 40(10): 119-126.
- [11] Zhang X, Zhang J. Summary on calibration method of line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020001.
- 张曦, 张健. 线结构光标定方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020001.
- [12] Wang H, Hui B W, Wang S C, et al. Study on calibration method of planar target for rail profile measurement system [J]. Railway Engineering, 2018, 58(9): 114-117.
- 王昊, 回丙伟, 王胜春, 等. 钢轨廓形测量系统平面靶标标定方法研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(9): 114-117.
- [13] Xie Z X, Zhang A Q. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of ultra-large-scale line structured-light sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0315001.
- 解则晓, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器内外参数同时标定[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0315001.
- [14] Li Y F. Research on dynamic measurement method of rail wear based on laser displacement sensors[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- 李艳福. 基于激光位移的钢轨磨损动态检测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [15] 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.
- [16] Li A J, Xin R, Wu S H, et al. 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.
- [17] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] Li W T, Wang P J, Chen Y D, et al. Calibration of binocular vision measurement system by line structured light for rail full profile [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 203-211.
- 李文涛, 王培俊, 陈亚东, 等. 钢轨全轮廓线结构光双目视觉测量系统标定[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 203-211.