

## 轨廓测量系统激光不共面误差修正方法

王乐<sup>1</sup>, 王昊<sup>1</sup>, 王凡<sup>1</sup>, 王胜春<sup>1\*</sup>, 韩强<sup>1,2</sup>, 方玥<sup>1</sup>, 戴鹏<sup>1</sup>, 黎国清<sup>1</sup>, 任盛伟<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>北京交通大学理学院, 北京 100044

**摘要** 在线结构光钢轨轮廓全断面测量系统中, 钢轨两侧激光不共面引起轮廓测量误差。针对该问题, 提出了基于投影变换的激光不共面误差修正模型。沿钢轨纵向建立参考坐标系, 并将两侧半断面轮廓测量数据投影到与钢轨纵向垂直的辅助平面上, 以投影轮廓作为轮廓测量结果, 从而修正由激光不共面安装导致的钢轨轮廓测量误差。对比实验表明, 该方法可将激光不共面误差修正到 0.1 mm 以下。所提方法不需要钢轨两侧激光精确共面, 只需大致对齐即可, 既保证了轮廓测量精度, 又显著降低了现场安装要求。

**关键词** 测量; 钢轨轮廓; 激光平面; 钢轨纵向; 误差修正

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0604002

### 1 引言

钢轨作为铁路线路的重要组成部分, 是铁路养护维修的重点关注对象。通过定期检测服役钢轨的廓形, 评估其垂直磨损量和侧面磨损量等状态参数<sup>[1-3]</sup>, 不仅可以掌握钢轨服役状态, 也可以指导钢轨打磨作业, 是铁路运营维护的重要手段<sup>[4-6]</sup>。线结构光钢轨轮廓测量技术利用线结构光传感器实时获取钢轨轮廓信息, 并与钢轨标准廓形模板进行配准, 通过定位相关特征点并计算其位移变化量, 得到钢轨的垂直磨损量和侧面磨损量等参数。该技术具有高速、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<sup>[7]</sup>。为了准确评估钢轨廓形状态, 需要获取钢轨的全断面轮廓数据。通常, 在钢轨左右两侧各放置一个线结构光传感器, 分别用于获取钢轨左、右半断面轮廓数据<sup>[8-9]</sup>, 然后经过轮廓拼接得到钢轨的全断面轮廓。在上述过程中, 钢轨两侧的激光是否共面直接影响了钢轨左右半断面轮廓数据的准确性。当钢轨两侧线结构光传感器的出射激光不共面时, 测量轮廓存在一定的畸变, 引起钢轨轮廓测量误差。为了表述方便, 将这种由激光不共面安装导致的轮廓测量误差称为激光不共面误差。可见, 为了保证钢轨轮廓测量

结果的准确度, 钢轨两侧激光应当共面安装。然而, 在实际应用中, 由于组件加工精度和现场安装环境等方面的限制, 很难保证钢轨两侧激光平面精确共面。若通过精密的装调装置片面追求钢轨两侧激光平面的精确共面, 不仅会导致成本急剧增加, 也会使装调过程复杂化, 不利于铁路现场安装操作。

目前, 针对钢轨轮廓测量时两侧激光不共面问题的研究并不多, 相关研究主要集中在如何调整激光使其满足共面条件, 如占栋等<sup>[10]</sup>通过专门设计的机械调整机构实现线激光器的平移和旋转, 以实现激光器调整; 陈思豪等<sup>[11]</sup>通过高精密手动平移台实现了大型工件的轮廓扫描。也有一些学者通过研究标定方法实现两侧激光平面对齐, 如吴帮明等<sup>[12]</sup>通过特制的旋转支臂等机械件实现轮廓测量组件的全局标定; 张大龙等<sup>[13]</sup>通过拍摄标志物建立激光轮廓仪与标志物之间的位置关系, 把共面调整转化为对激光轮廓仪的位置调整; 鞠标等<sup>[14]</sup>采用等高线标定方法标定激光平面。目前, 鲜有关于钢轨轮廓全断面测量中钢轨两侧激光不共面误差修正方法的报道。

针对上述问题, 本文提出了基于投影变换的钢轨轮廓测量系统激光不共面误差修正模型, 首先通过传统的标定方法得到左右侧相机的内外参数和两

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2021-08-17; 录用日期: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(U1934215)

通信作者: \*wangshengchun@rails.cn; \*\*rsw@rails.cn

侧激光平面参数,然后利用平面标定板标定钢轨纵向参数,在此基础上,通过钢轨纵向参数建立与钢轨纵向垂直的辅助平面,并将钢轨两侧轮廓半断面数据投影到该辅助平面上,得到投影轮廓。将投影轮廓作为最终的钢轨轮廓测量结果,从而实现激光不共面误差修正。所提方法利用垂直于钢轨纵向的辅助平面修正左右侧激光平面,将钢轨两侧半断面轮廓测量数据转换到该辅助平面内,因此,不需要钢轨两侧激光平面精确共面,只需大致对齐即可,这就大大降低了现场安装要求。同时,由于辅助平面就是测量平面,从而保证了测量平面与钢轨纵向垂直,因此,在线结构光传感器安装后,即使出现激光平面与钢轨纵向不垂直的情况,也能保证轮廓测量结果是钢轨的横断面轮廓数据,而不是钢轨的斜断面轮廓数据。此外,对于其他需要多个线结构光扫描组件共面安装的场合,如大型工件三维扫描测量,可采用类似的方法修正激光不共面误差,提高轮廓测量精度。

## 2 轮廓测量方法

图 1 所示为线结构光轮廓测量技术的透视投影几何模型,由线激光器、镜头和相机组成一套线结构光轮廓测量组件,线激光入射到被测物表面形成光条,利用相机拍摄该光条得到被测物的激光断面图像<sup>[15-17]</sup>。其中, $o_w-x_wy_wz_w$  是世界坐标系, $o_c-x_cy_cz_c$  是相机坐标系, $o_l-x_ly_lz_l$  是激光平面坐标系(激光平面在 $o_l-x_ly_l$  平面内), $o_u-x_u y_u$  是像素坐标系。对于激光平面内的任意一点  $P_l = (x_l, y_l, z_l, 1)^T$ , 其 在 世 界 坐 标 系 下 的 坐 标 为  $P_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ , 该 点 对 应 的 理 想 像 点 为  $Q_u = (x_u, y_u, 1)^T$ 。

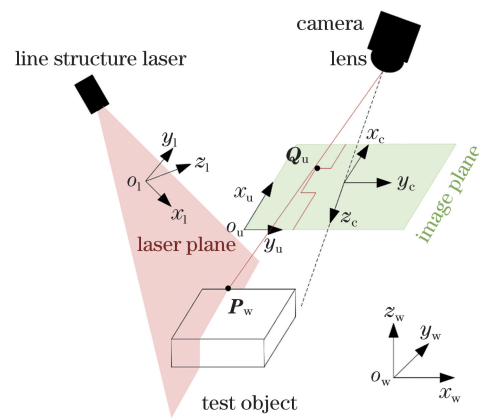


图 1 线结构光透视投影几何模型

Fig. 1 Geometric model of line structured light perspective projection

根据针孔成像模型<sup>[18]</sup>,有

$$sQ_u = A[R, t]P_w, \quad (1)$$

式中: $s$  为尺度因子;矩阵  $A$  是相机内参矩阵; $[R, t]$  是相机外参矩阵,分别是世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移向量。此外, $P_w$  在激光平面内,满足激光平面方程

$$ax_w + by_w + cz_w + d = 0, \quad (2)$$

式中: $a, b, c, d$  均为激光平面参数。联立(1)式和(2)式即可得到线结构光轮廓测量的数学模型:

$$\begin{cases} sQ_u = A[R, t]P_w \\ ax_w + by_w + cz_w + d = 0 \end{cases} \quad (3)$$

利用文献[19]的方法计算相机内参矩阵、外参矩阵和激光平面参数,即可由(3)式计算出  $P_w$ ,从而得到被测物的实际轮廓信息。

图 2 为线结构光钢轨轮廓全断面测量原理图,在钢轨左右两侧各有一台线结构光传感器,将两台

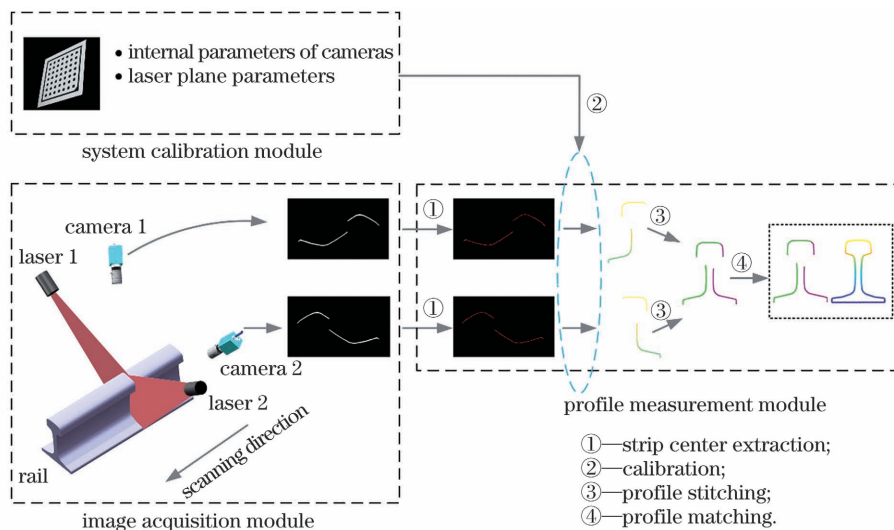


图 2 线结构光钢轨轮廓全断面测量原理图

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

传感器共面安装,分别用于获取钢轨左右半断面轮廓数据,由标定参数将两侧半断面轮廓进行拼接,从而得到钢轨轮廓全断面<sup>[20]</sup>。通过扫描运动,即可实现对整个钢轨的轮廓全断面测量。

如图 3 所示,以钢轨顶面中心为原点,激光平面为  $XOZ$  平面,水平方向为  $X$  轴,建立世界坐标系  $O-XYZ$ ,则钢轨两侧激光不共面安装的情况可以分为激光平面绕  $X$  轴的旋转和绕  $Z$  轴的旋转。图 4 所示为两侧激光不共面的一种情况,其中,左侧激光平面与钢轨纵向垂直,但右侧激光平面绕  $Z$  轴旋转一定的角度,此时,右侧激光平面与左侧激光平面不共面,且右侧激光平面也不再垂直于钢轨纵向。

此时,左侧相机得到的依然是与钢轨纵向垂直的横断面轮廓数据,而右侧相机得到的是与钢轨纵向不垂直的轮廓数据,即斜断面轮廓数据。很明显,钢轨的斜断面轮廓与横断面轮廓相比,表现为在某一个方向上进行了拉伸,拉伸的方向与激光平面和钢轨纵向的夹角有关,这种拉伸导致钢轨测量廓形产生了畸变,畸变的廓形会引起钢轨轮廓特征点的定位出现偏差,最终导致钢轨磨损测量误差增大。更一般的情况,当两侧激光平面既不共面,也不与钢轨纵向垂直时,钢轨两侧的测量廓形均不是钢轨的横断面轮廓,测量结果均发生了畸变,此时会引起更大的轨廓测量误差。

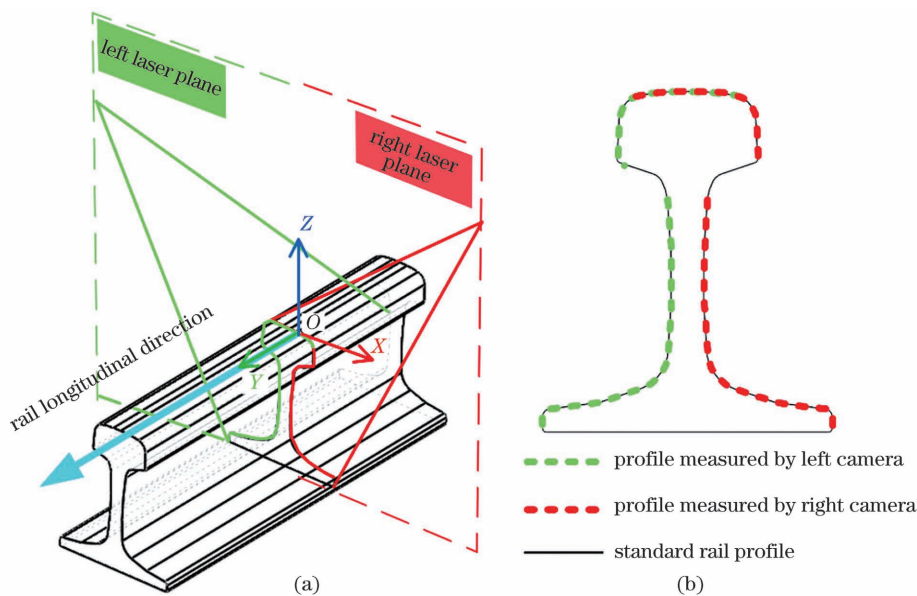


图 3 两侧激光共面安装示意图。(a)激光共面安装;(b)轮廓测量结果

Fig. 3 Schematic of laser coplanar installation. (a) Laser coplanar installation; (b) profile measurement result

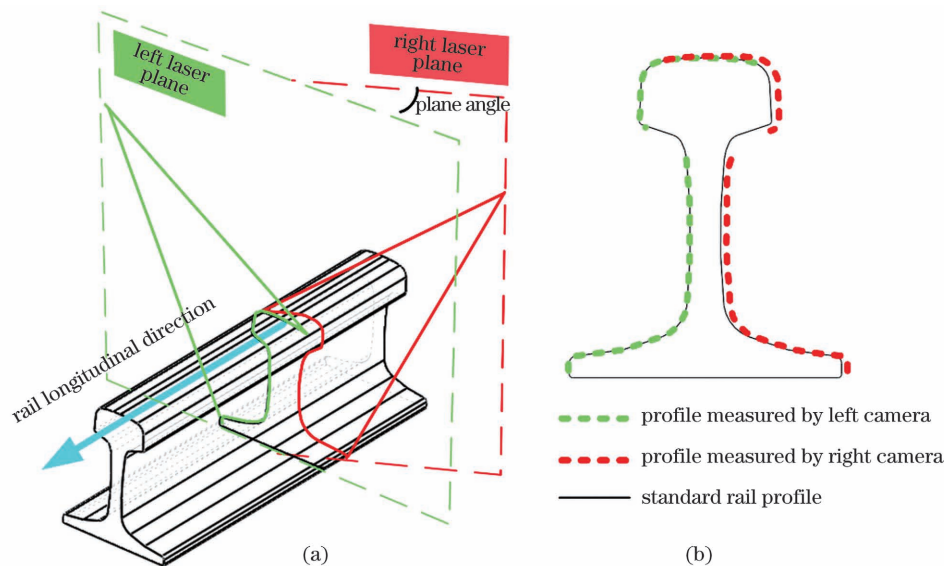


图 4 两侧激光不共面安装示意图。(a)激光不共面安装;(b)轮廓测量结果

Fig. 4 Schematic of two sides of laser noncoplanar installation. (a) Laser noncoplanar installation; (b) profile measurement result

### 3 激光不共面误差及修正

#### 3.1 激光不共面误差修正模型

从上述分析可以看出,当钢轨两侧的激光不共面时,会出现某一侧激光平面与钢轨纵向不垂直的现象,甚至出现两侧激光平面均与钢轨纵向不垂直的现象,从而引起轨廓测量误差。因此,若在测量装置安装后,通过标定获取钢轨纵向参数,即世界坐标系下钢轨纵向的方向向量,就可以将任意一侧的钢轨半断面轮廓测量数据投影到与该方向向量垂直的平面内,得到与钢轨纵向垂直的钢轨横断面轮廓数据,不仅可以修正由激光不共面安装造成的钢轨轮廓测量误差,也可以修正由激光平面与钢轨纵向不垂直安装导致的轮廓测量误差,从而降低系统误差,提高钢轨轮廓测量精度。

如图 5 所示,记  $P^i$  为左侧相机获取的钢轨半断面轮廓上的任意一点,其在水坐标系下的坐标为  $\mathbf{P}_{wcs}^i = (x_{wcs}^i, y_{wcs}^i, z_{wcs}^i, 1)^T$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ , 其中  $m$  为左侧轮廓上点的个数,相应地,记  $P^j$  为右侧相机获取的钢轨半断面轮廓上的任意一点,其在水坐标系下的坐标为  $\mathbf{P}_{wcs}^j = (x_{wcs}^j, y_{wcs}^j, z_{wcs}^j, 1)^T$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ , 其中  $n$  为右侧轮廓上点的个数。首先,参考文献[21]标定的钢轨纵向参数,记标定得到的钢轨纵向在水坐标系下的方向向量为  $\mathbf{V}_{wcs}^{rail} = (x_{wcs}, y_{wcs}, z_{wcs})^T$ , 然后,以世界坐标系的原点为原点,以该方向向量为 Y 轴建立参考坐标系,计算世界坐标系到参考坐标系的齐次变换矩阵  $\mathbf{H}_{wcs}^{rcs}$ 。需

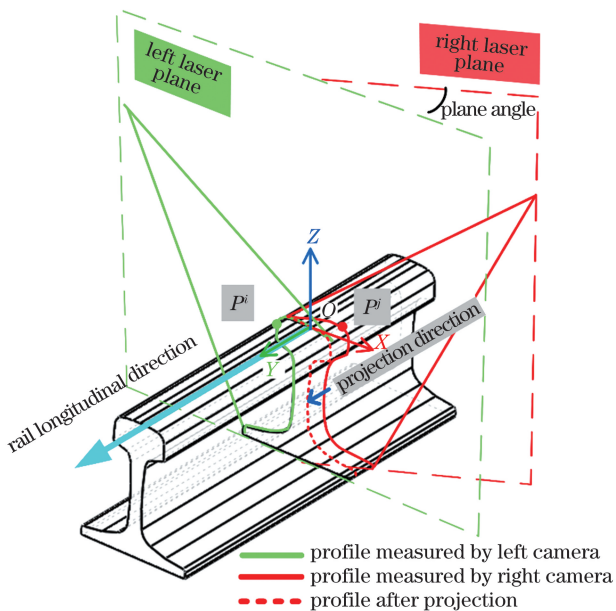


图 5 激光平面修正示意图

Fig. 5 Schematic of laser plane correction

要指出的是,参考坐标系绕其 Y 轴的旋转可以是任意的,这并不影响钢轨廓形,为了简化,这里将其旋转角度设置为 0。

如图 6 所示,首先将世界坐标系绕  $x_{wcs}$  轴旋转角度  $\alpha$ , 得到临时坐标系,然后将临时坐标系绕  $z_{mcs}$  轴旋转  $-\gamma$ , 从而得到参考坐标系,  $\alpha$  和  $\gamma$  的计算公式为

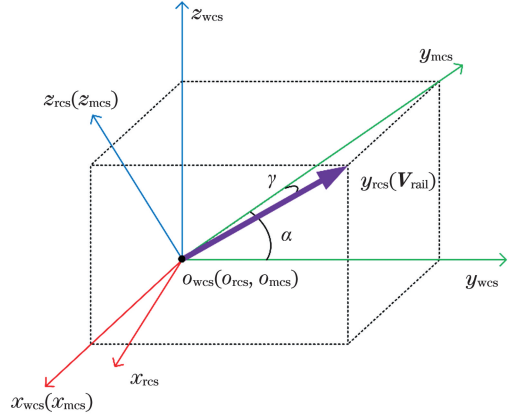


图 6 由钢轨纵向建立参考坐标系示意图

Fig. 6 Schematic of establishing reference coordinate system from rail longitudinal direction

$$\alpha = \arctan\left(\frac{z_{wcs}}{y_{wcs}}\right), \quad (4)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{x_{mcs}}{y_{mcs}}\right), \quad (5)$$

式中:  $y_{wcs}$ 、 $z_{wcs}$  均为钢轨纵向的方向向量在水坐标系下的坐标;  $x_{mcs}$  和  $y_{mcs}$  由(6)式确定

$$\begin{bmatrix} x_{mcs} \\ y_{mcs} \\ z_{mcs} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{wcs}^{mcs} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{rail} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{wcs} \\ y_{wcs} \\ z_{wcs} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由此得到参考坐标系与世界坐标系的齐次变换矩阵:

$$\mathbf{H}_{wcs}^{rcs} = \mathbf{H}_{mcs}^{rcs} \mathbf{H}_{wcs}^{mcs} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

在此基础上,通过

$$\mathbf{P}_{\text{res}} = (x_{\text{res}}, y_{\text{res}}, z_{\text{res}})^{\text{T}} = \mathbf{H}_{\text{wcs}}^{\text{res}} \mathbf{P}_{\text{wcs}}, \quad (8)$$

将两侧轮廓上的每一点  $P^i$  和  $P^j$  都变换到参考坐标系下,得到参考坐标系下的钢轨轮廓全断面  $\mathbf{P}_{\text{res}}^k = (x_{\text{res}}, y_{\text{res}}, z_{\text{res}})^{\text{T}}, k = m + n, k$  为轮廓全断面上点的个数。由于参考坐标系的  $Y$  轴与钢轨纵向平行,因此,将轮廓上每一点  $P^k$  的  $Y$  轴分量  $y_{\text{res}}$  置零,即可得到与钢轨纵向垂直的钢轨轮廓全断面数据:

$$\tilde{\mathbf{P}}_{\text{res}}^k = (x_{\text{res}}, 0, z_{\text{res}})^{\text{T}}, k = m + n. \quad (9)$$

联立(8)式和(9)式即可得到激光不共面误差的修正模型:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{\text{res}} = (x_{\text{res}}, y_{\text{res}}, z_{\text{res}})^{\text{T}} = \mathbf{H}_{\text{wcs}}^{\text{res}} \mathbf{P}_{\text{wcs}} \\ \tilde{\mathbf{P}}_{\text{res}}^k = (x_{\text{res}}, 0, z_{\text{res}})^{\text{T}}, k = m + n \end{cases}. \quad (10)$$

通过(10)式,不仅可以修正由激光不共面造成的钢轨轮廓测量误差,也可以修正组件安装后由激光平面与钢轨纵向不垂直造成的钢轨轮廓测量误差。

### 3.2 激光不共面误差修正步骤

图 7 为激光不共面误差修正流程图,下面结合图 7 阐述具体修正步骤。

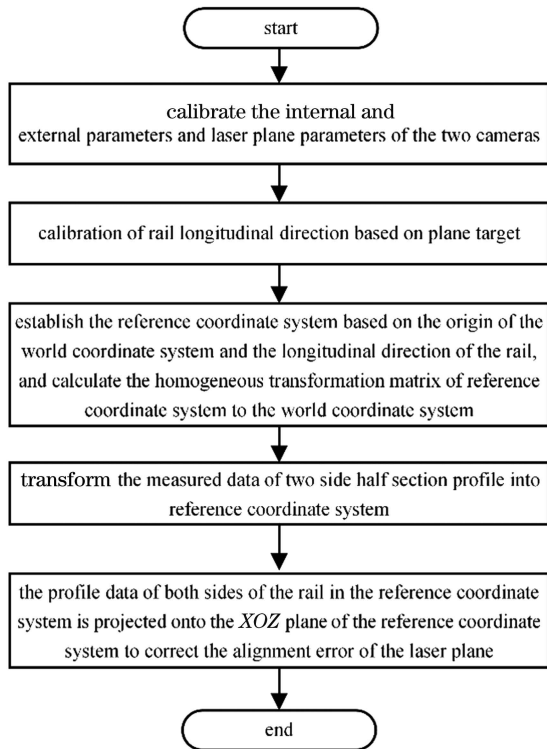


图 7 钢轨轮廓测量系统激光不共面误差修正流程图

Fig. 7 Flow chart of laser noncoplanar error correction for rail profile measurement system

第 1 步,利用传统相机标定方法标定钢轨两侧相机的内外参数和激光平面参数,记  $\mathbf{A}_1$  和  $\mathbf{A}_2$  分别为左、右侧相机的内参矩阵,  $[\mathbf{R}_1, \mathbf{t}_1]$  和  $[\mathbf{R}_2, \mathbf{t}_2]$  分别为左、右侧相机的外参矩阵,  $(a_1, b_1, c_1, d_1)$  和

$(a_2, b_2, c_2, d_2)$  分别为左、右侧激光平面参数。

第 2 步,基于第 1 步得到的两侧相机的内外参数和激光平面参数,参考文献[21]提出的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,通过任意一侧相机采集一组不同姿态下的平面靶标图像,对不同姿态下的靶标坐标系  $Z$  轴单位向量的坐标拟合平面进行法线求解,从而得到钢轨纵向在世界坐标系下的方向向量  $\mathbf{V}_{\text{wcs}}^{\text{rail}} = (x_{\text{wcs}}, y_{\text{wcs}}, z_{\text{wcs}})^{\text{T}}$ 。

第 3 步,以世界坐标系的原点和钢轨纵向为  $Y$  轴,建立参考坐标系,并计算参考坐标系与世界坐标系的齐次变换矩阵  $\mathbf{H}_{\text{wcs}}^{\text{res}}$ 。

第 4 步,通过(8)式将相机得到的钢轨两侧半断面轮廓数据转换到参考坐标系下。通常,钢轨两侧的半断面轮廓数据是在世界坐标系下表示的,如果是在相机坐标系下或者激光平面坐标系下表示,可以利用第 1 步的标定结果,通过坐标变换将其变换到世界坐标系下。

第 5 步,将参考坐标系下钢轨两侧轮廓数据投影到参考坐标系的  $XOZ$  平面(辅助平面)上。将参考坐标系下钢轨两侧的半断面轮廓数据的  $y_{\text{res}}$  坐标值置零,便可将参考坐标系下的钢轨两侧轮廓数据投影到上述辅助平面内,由于参考坐标系的  $Y$  轴与钢轨纵向平行,则  $XOZ$  平面内的数据  $(x_{\text{res}}, 0, z_{\text{res}})$  就是待测钢轨修正后的横断面轮廓数据,从而实现激光不共面误差修正。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验设计

为了验证激光不共面误差修正方法的有效性,搭建了图 8 所示的实验装置,其中相机选用德国 SICK 公司生产的 Ranger 3 工业相机。为了避免钢轨两侧线激光器互相干扰,分别选用加拿大 Osela 公司生产的波长为 660 nm 的线激光器和 Nanoline 公司生产的波长为 450 nm 的线激光器,通过在镜头前安装相应滤光片过滤掉干扰光。选择一段长度为 100 mm 的标准钢轨(无磨损)作为被测物,并将钢轨放置在两个相机的公共视场中。

如图 9 所示,设计 3 组对比实验:实验 1,通过机械调整装置将钢轨两侧的激光平面调整到共面的状态,并使激光平面与钢轨纵向垂直,如图 9(a)所示,标定相机内外参数和激光平面参数,采用文献

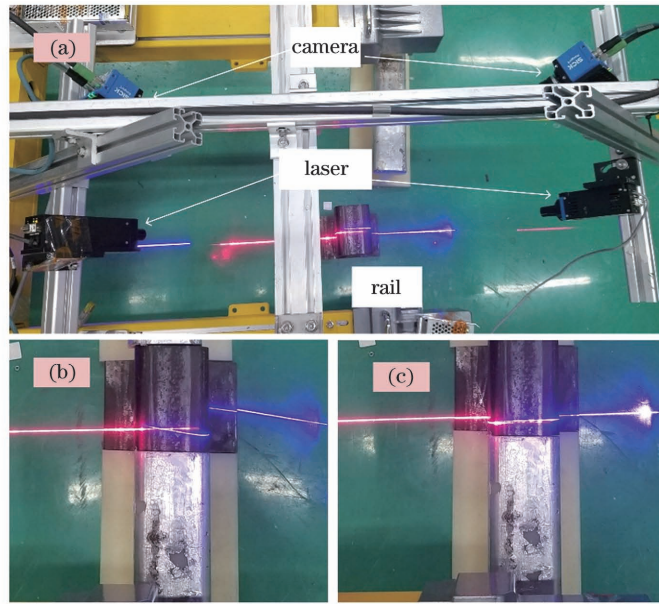


图 8 实验装置示意图。(a)实验装置;(b)两侧激光不共面;(c)两侧激光共面

Fig. 8 Schematic of experimental setup. (a) Experimental setup; (b) lasers on both sides are not coplanar; (c) lasers on both sides are coplanar

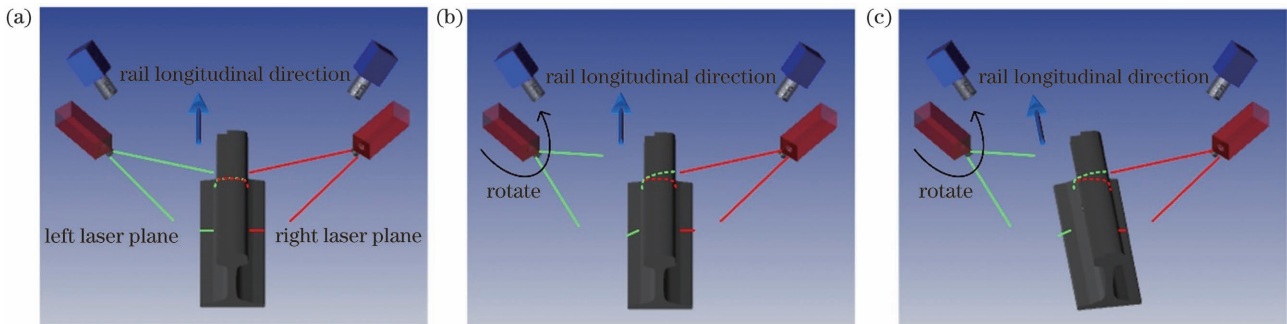


图 9 三组对比实验示意图。(a)两侧激光共面且与钢轨纵向垂直;(b)两侧激光不共面且左侧激光平面与钢轨纵向不垂直;(c)两侧激光不共面且均与钢轨纵向不垂直

Fig. 9 Schematic of three groups of comparative experiments. (a) Lasers on both sides are coplanar and both laser planes are perpendicular to the rail longitudinal direction; (b) lasers on both sides are not coplanar and the left laser plane is not perpendicular to the rail longitudinal direction; (c) lasers on both sides are not coplanar and both laser planes are not perpendicular to the rail longitudinal direction

[21]的方法标定钢轨纵向参数,利用两侧相机采集钢轨的激光断面图像,并通过(3)式计算钢轨的轮廓全断面;实验 2,在实验 1 的基础上,调整左侧激光平面,使钢轨两侧的激光平面不再共面,如图 9(b)所示,并再次标定左侧激光平面参数,利用所提方法修正钢轨轮廓全断面;实验 3,在实验 2 的基础上,将钢轨原地旋转一定的角度,使两侧激光平面均与钢轨纵向不再垂直,如图 9(c)所示,并再次标定钢轨纵向参数,利用所提方法修正钢轨轮廓全断面。3 组实验分别重复测量 20 次钢轨轮廓全断面,并计算相应的钢轨磨耗量。

#### 4.2 实验结果

表 1 和表 2 分别给出了两侧相机内部参数和激

光平面参数的标定结果,表 3 给出了钢轨纵向参数的标定结果。 $R_l, t_l$  和  $R_r, t_r$  分别表示世界坐标系到左、右侧相机坐标系的旋转矩阵和平移向量,其标定结果如下:

$$[R_l, t_l] = \begin{bmatrix} 0.771 & 0.304 & 0.559 & -292.703 \\ 0.637 & -0.362 & -0.681 & 257.768 \\ -0.005 & 0.881 & -0.473 & 198.647 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$[R_r, t_r] = \begin{bmatrix} 0.761 & -0.298 & -0.576 & 335.355 \\ -0.649 & -0.357 & -0.672 & 255.718 \\ -0.005 & 0.885 & -0.465 & 196.788 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

图 10 为钢轨纵向  $V_{wcs}^{rail}$  及参考坐标系示意图,

表 1 相机内部参数标定结果

Table 1 Calibration results of camera internal parameters

Parameter	Left camera	Right camera
$f / \text{mm}$	12.70	12.89
$k_1 / \text{m}^{-2}$	1210.17	1240.89
$k_2 / \text{m}^{-4}$	$-6.22 \times 10^5$	$-2.41 \times 10^6$
$k_3 / \text{m}^{-6}$	$-5.82 \times 10^{10}$	$-1.31 \times 10^{10}$
$p_1 / \text{m}^{-1}$	-0.12	-0.05
$p_2 / \text{m}^{-1}$	0.25	-0.01
$s_x / \text{m}$	$6.00 \times 10^{-6}$	$6.01 \times 10^{-6}$
$s_y / \text{m}$	$6.00 \times 10^{-6}$	$6.00 \times 10^{-6}$
$c_x$	1271.29	1260.64
$c_y$	510.94	486.01
Width / pixel	2560	2560
Height / pixel	832	832

表 2 激光平面参数标定结果

Table 2 Calibration results of laser plane parameters

Laser plane parameter	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$d_2$
Experiment 1	-0.005	0.002	1.000	-0.032	0	0	1	0
Experiment 2	0.064	0.001	0.997	0.170	0	0	1	0
Experiment 3	0.064	0.001	0.997	0.170	0	0	1	0

表 3 钢轨纵向参数标定结果

Table 3 Calibration results of rail longitudinal parameters

Rail longitudinal parameter	$x_{wcs}$	$y_{wcs}$	$z_{wcs}$
Experiment 1	0.002	-0.003	1
Experiment 2	0.002	-0.003	1
Experiment 3	0.052	-0.017	0.998

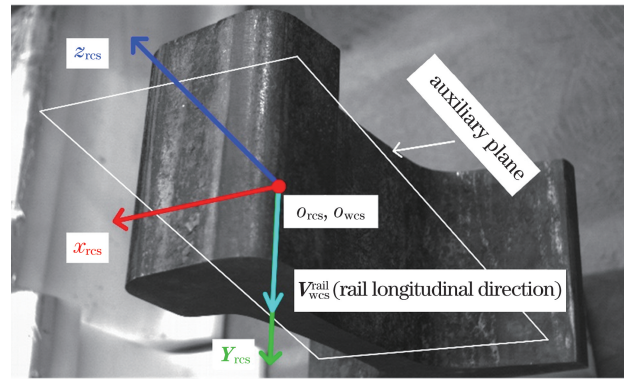


图 10 钢轨纵向  $V_{wcs}^{rail}$  及参考坐标系示意图

Fig. 10 Schematic of rail longitudinal  $V_{wcs}^{rail}$  and reference coordinate system

其中,参考坐标系原点与世界坐标系原点重合,辅助平面位于参考坐标系的  $XOZ$  平面内。可以看出,标定得到的钢轨纵向  $V_{wcs}^{rail}$  与实际钢轨纵向基本一致,由此建立的辅助平面也与钢轨纵向垂直。

图 11 所示为钢轨两侧激光共面(实验 1)时钢轨轮廓全断面的测量结果。可以看出,由于钢轨两侧激光共面,且均与钢轨纵向垂直,钢轨测量轮廓与钢轨标准轮廓具有较高的重合度。

图 12 所示为实验 2 的钢轨轮廓误差修正前、后的对比。可以看出,由于调整左侧激光使其与右侧激光不再共面,因此,左侧半断面轮廓存在一定程度的畸变,与标准钢轨并没有很好地匹配在一起。采用所提的误差修正方法后,左侧测量轮廓得到修正,其与标准轮廓的匹配程度明显提高。

图 13 所示为实验 3 的钢轨轮廓误差修正前、后对比。由于左、右侧激光不共面,且均不与钢轨纵向垂直,测量得到的左、右半断面轮廓均存在一定程度的畸变,因此,两侧测量轮廓与标准钢轨的重合度也

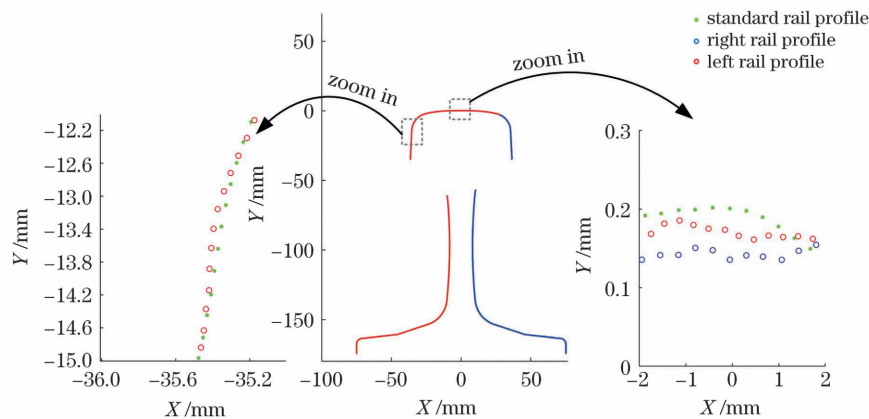


图 11 实验 1 的钢轨轮廓全断面测量结果

Fig. 11 Measurement results of rail profile in experiment 1

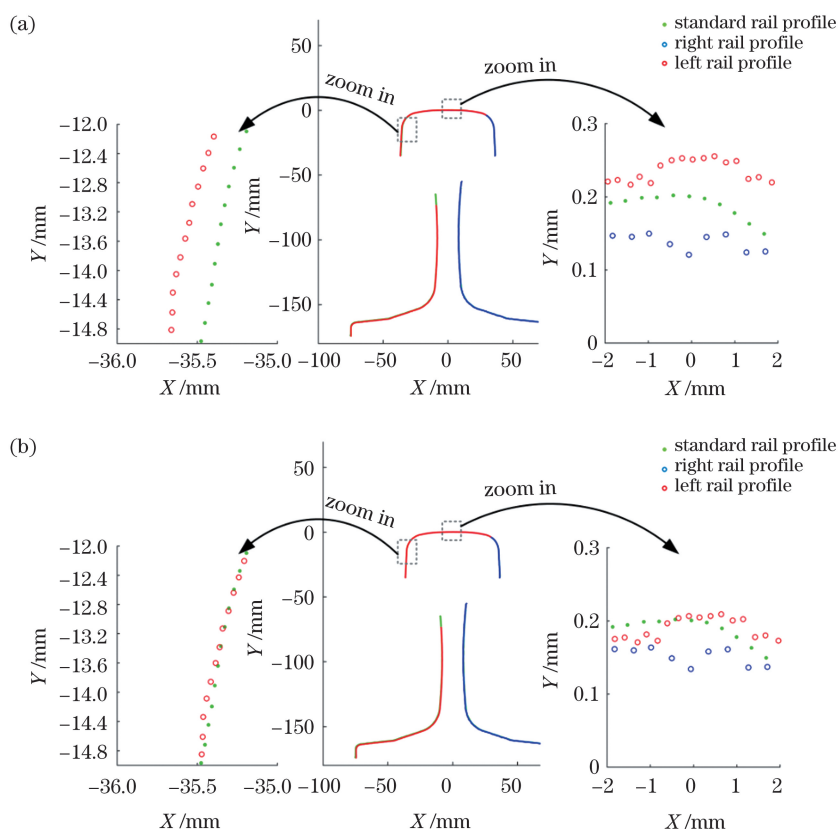


图 12 实验 2 的钢轨轮廓全断面测量结果。(a) 误差修正前;(b) 误差修正后

Fig. 12 Measurement results of rail profile in experiment 2. (a) Before error correction; (b) after error correction

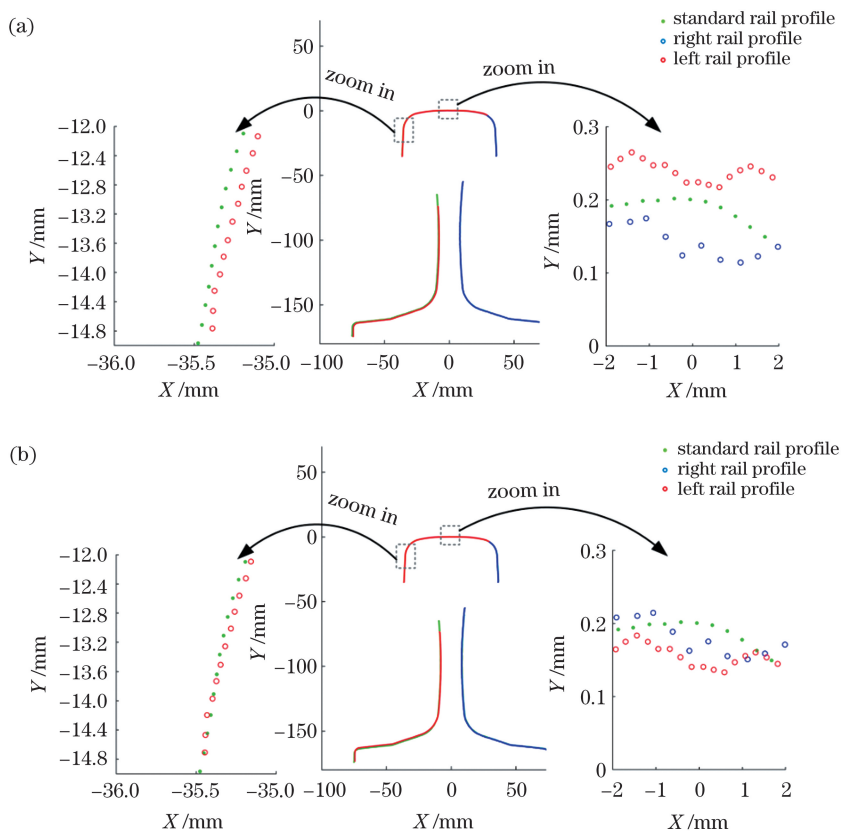


图 13 实验 3 的钢轨轮廓全断面测量结果。(a) 误差修正前;(b) 误差修正后

Fig. 13 Measurement results of rail profile in experiment 3. (a) Before error correction; (b) after error correction



较低。采用所提的误差修正方法后,钢轨两侧测量轮廓得到修正,与标准轮廓的匹配程度也明显提高。

### 4.3 讨论

钢轨磨耗包括垂直磨耗和侧面磨耗,由于被测钢轨为标准无磨耗钢轨,相应的磨耗测量值应当为零。然而,激光不共面安装引起测量轮廓畸变,畸变的钢轨测量轮廓造成钢轨磨耗特征点定位误差,进

表 4 钢轨磨耗平均测量误差

Table 4 Average measurement error of rail wear

unit: mm

State	Experiment 1		Experiment 2		Experiment 3	
	$E_h$	$E_v$	$E_h$	$E_v$	$E_h$	$E_v$
Before error correction	0.052	0.047	0.197	0.102	0.119	0.067
After error correction	-	-	0.059	0.047	0.062	0.038

由实验 1 可知,当钢轨两侧激光共面且均与钢轨纵向垂直时,钢轨测量轮廓与钢轨标准轮廓具有较高的一致性,钢轨侧面磨耗测量误差的平均值为 0.052 mm,垂直磨耗测量误差的平均值为 0.047 mm,测量精度符合实际情况。由实验 2 和实验 3 可知,激光不共面误差以及激光平面与钢轨纵向不垂直均会造成不同程度的钢轨磨耗测量误差。

对比实验 1 和实验 2 可知,即使钢轨两侧激光没有共面安装,采用所提激光不共面误差修正方法进行修正后,所得轮廓具有较高的精度,钢轨侧面磨耗测量误差的平均值由 0.197 mm 降到 0.059 mm,垂直磨耗测量误差的平均值由 0.102 mm 降到 0.047 mm,轮廓修正后的钢轨磨耗测量误差与实验 1 激光共面时的测量误差几乎接近,证明了所提误差修正方法的准确性和有效性。

在实验 3 中,钢轨两侧激光既不共面也不垂直于钢轨纵向,这也是现场安装测量系统时更容易出现的一种情况。对比实验 1 和实验 3 可知,对于这样的一般情况,所提误差修正方法也能将侧面磨耗测量误差的平均值修正到 0.062 mm,垂直磨耗测量误差的平均值修正到 0.038 mm,满足了 0.10 mm 的钢轨轮廓测量误差要求。这说明即使测量系统安装后,激光平面与钢轨纵向不垂直,采用所提误差修正方法也能保证测量结果是钢轨的横断面轮廓数据,而非斜断面轮廓数据,从而保证钢轨轮廓测量精度。因此,所提误差修正方法不需要钢轨两侧激光平面精确共面,可以大大降低现场安装要求。

## 5 结 论

针对钢轨轮廓全断面测量时遇到的激光不共面

而造成钢轨磨耗测量误差。为了进一步验证所提方法的有效性,对上述 3 组实验分别采集 20 个不同位置的钢轨轮廓,并计算误差修正前、后钢轨垂直磨耗量和侧面磨耗量。表 4 给出了上述 3 组实验得到的钢轨磨耗测量误差,其中  $E_v$  和  $E_h$  分别表示钢轨垂直磨耗测量误差的平均值和侧面磨耗测量误差的平均值。

误差问题,提出了基于投影变换的激光不共面误差修正模型,详细阐述了误差修正原理和步骤,并通过实验验证了所提方法的有效性和准确性。所提方法可将由激光不共面安装导致的钢轨轮廓测量误差修正到 0.10 mm 以内。所提方法不需要钢轨左、右两侧激光平面精确共面,只需大致对齐即可,既保证了钢轨轮廓测量精度,又显著降低了组件加工精度要求和现场安装环境要求,避免了现场繁琐、费时的激光平面精调过程。

## 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] Zhao X X, Wang S C, Wang H, et al. Fast tracking algorithm of rail profile under vehicle dynamic conditions[J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 145-155.  
赵鑫欣, 王胜春, 王昊, 等. 车载动态条件下钢轨廓形快速追踪算法[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 145-155.
- [3] 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.
- [4] 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, 2021, 169:

- 108362.
- [5] 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.
- [6] Vasin N N, Diyazitdinov R R. Processing of triangulation scanner data for measurements of rail profiles[J]. Computer Optics, 2018, 42(6): 1054-1061.
- [7] 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.
- [8] Wang H, Wang S C, Wang W D. 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. 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.
- [9] Feng K, Yu L, Zhan D, et al. Research on fast and robust matching algorithm in inspection of full cross-section rail profile[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(5): 162-167.  
冯凯, 于龙, 占栋, 等. 钢轨轮廓全断面检测中的快速高鲁棒性匹配方法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(5): 162-167.
- [10] Zhan D, Wu X S, Xiang W J, et al. Laser adjusting mechanism and method for 2D laser measuring instrument: CN213041207U[P]. 2021-04-23.  
占栋, 伍雪松, 向文剑, 等. 一种适用于 2D 激光测量仪的激光器调整机构: CN213041207U[P]. 2021-04-23.
- [11] Chen S H, Wang Z R, Xiao G R, et al. A three-dimensional scanning method for large workpiece by monocular structure light [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(11): 1358-1362.  
陈思豪, 王中任, 肖光润, 等. 大型工件单目结构光三维扫描方法 [J]. 激光与红外, 2018, 48(11): 1358-1362.
- [12] Wu B M, Feng Y B, Yao P. A calibration device for two dimensional laser displacement sensor: CN110793459A[P]. 2020-02-14.  
吴帮明, 冯艳波, 姚培. 一种二维激光位移传感器标定装置: CN110793459A[P]. 2020-02-14.
- [13] Zhang D L, Li Q L, Chen D J, et al. Coplanar adjustment system and method of laser profilometer array: CN110057314A[P]. 2019-07-26.  
张大龙, 李千里, 陈德君, 等. 激光轮廓仪阵列的共面调整系统及方法: CN110057314A[P]. 2019-07-26.
- [14] Ju B, Zhu H T. Study on line structure light-plane calibration in rail matching [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(8): 957-962.  
鞠标, 朱洪涛. 钢轨匹配中的线结构光平面标定方法研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(8): 957-962.
- [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. 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] Han J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402010.  
韩家杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估 [J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402010.
- [18] Chen H, Zhang S J, Gao J, et al. Online three-dimensional measurement technology for steel wheel based on rotating scanning of multiple line-laser sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704006.  
陈瀚, 张思瑾, 高见, 等. 基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术 [J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704006.
- [19] Wang H. Research and application of dynamic measuring method of rail profile based on structured light projection [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 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集团有限公司, 2018.
- [20] 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.
- [21] Wang L, Zhou Q, Fang Y, et al. Rail longitudinal

calibration method for profile measurement system  
[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1012004.

王乐, 周谦, 方玥, 等. 轨廓测量系统钢轨纵向标定  
方法研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1012004.

## Correction Method for Laser Noncoplanar Error for Rail Profile Measurement System

Wang Le<sup>1</sup>, Wang Hao<sup>1</sup>, Wang Fan<sup>1</sup>, Wang Shengchun<sup>1\*</sup>, Han Qiang<sup>1,2</sup>, Fang Yue<sup>1</sup>,  
Dai Peng<sup>1</sup>, Li Guoqing<sup>1</sup>, Ren Shengwei<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China;*

<sup>2</sup> *School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

### Abstract

**Objective** In the rail profile full section measurement system, the laser on both sides of the rail is not coplanar, resulting in the measurement profile distortion and profile measurement error. Presently, few studies are available on the noncoplanar problem of laser on both sides in rail profile measurement. The research focus is primarily on how to adjust the laser to meet the coplanar condition. When the laser from the structured light sensor on both sides of the rail is not coplanar, some distortion occurs in the measurement profile, resulting in rail profile measurement error. This contour measurement error caused by laser noncoplanar installation is referred to as laser noncoplanar error for ease of expression. To ensure the accuracy of rail profile measurement results, the lasers on both sides of the rail should be coplanar. However, in practical application, owing to the limitations of component processing accuracy and field installation environment, ensuring that the laser on both sides of the rail are accurately coplanar is difficult. If the precise coplanarity of the laser planes on both sides of the rail is pursued unilaterally through the precise assembly and adjustment device, it will not only result in a substantial increase in cost but will also complicate the assembly and adjustment, which is not conducive to on-site installation and operation of the railway. Presently, few reports are available on the method of correcting laser noncoplanar error on both sides of rail in full section rail profile measurement. To address the aforementioned issues, this paper proposes a laser noncoplanar error correction model of rail profile measurement system based on projection transformation. This method does not need the laser planes on both sides of the rail to be accurately coplanar but only needs to be roughly aligned, which greatly reduces the requirements of on-site installation.

**Methods** First, the internal and external parameters of the left and right cameras and the laser plane parameters on both sides are obtained through the traditional calibration method, and then the longitudinal parameters of the rail are calibrated using the plane calibration plate (Fig. 7). On this basis, the reference coordinate system is established using the world coordinate system's origin and the longitudinal parameters of the rail (Fig. 6), and the auxiliary plane perpendicular to the longitudinal direction of the rail is established using the longitudinal parameters of the rail (Fig. 10). The half section data of the profile on both sides of the rail are projected onto the auxiliary plane to obtain the projected profile (Fig. 5). The projected profile is used as the final measurement result of the rail profile to correct the laser noncoplanar error.

**Results and Discussions** To verify the effectiveness of the proposed method, three groups of comparative experiments of rail profile measurement are designed (Fig. 9). Experiment 1: the lasers on both sides are coplanar and perpendicular to the longitudinal direction of the rail on both sides. Experiment 2: the lasers on both sides are not coplanar, and the laser plane on the left is not perpendicular to the rail's longitudinal direction. Experiment 3: the lasers on both sides are neither coplanar and both planes are not perpendicular to the rail's longitudinal direction. The results show that the proposed method can reduce the error in rail profile measurement caused by laser noncoplanar installation to less than 0.10 mm (Figs. 11–13). Furthermore, if the proposed error correction method is used, even if the laser plane is not perpendicular to the longitudinal direction of the rail after the measurement system is installed, it can ensure that the measurement result is the cross-section profile data of the rail rather than the oblique section profile data, ensuring the measurement accuracy of the rail profile.

**Conclusions** Aiming at the problem of laser noncoplanar error encountered in the full section measurement of rail profile, a laser noncoplanar error correction model based on projection transformation is proposed, the principle and steps of error correction are described in detail, and the effectiveness and accuracy of the proposed method are verified by experiments. The proposed method reduces the rail profile measurement error caused by noncoplanar laser installation to less than 0.10 mm. This method does not require the laser planes on the left and right sides of the rail to be perfectly coplanar, but only that they be roughly aligned. It not only ensures rail profile measurement accuracy, but also greatly reduces the requirements for component processing accuracy and on-site installation environment, and avoids the time-consuming and labor-intensive laser plane fine adjustment process on site.

**Key words** measurement; rail profile; laser plane; rail longitudinal direction; error correction