DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905532

基于双目视觉的无缝线路钢轨纵向位移测量方法研究*

崇爱新[1,2],尹 辉[1,2],刘艳婷[1,3],刘秀波[4],许宏丽[1,2]

(1. 北京交通大学计算机与信息技术学院 北京 100044; 2. 北京交通大学 交通数据分析与挖掘北京市重点实验室 北京 100044; 3. 北京交通大学 轨道工程北京市重点实验室 北京 100044; 4. 中国铁道科学研究院集团有限公司 北京 100081)

摘 要:无缝线路钢轨纵向位移是由钢轨内部纵向应力引起的钢轨沿轨排或道床顶面的纵向移动,对其进行及时的高精度测量对于高铁安全运营具有重要意义。本文提出了一种基于双目视觉技术的无缝线路钢轨纵向位移测量方法。由轨旁固定设施上部署的参考标靶、轨腰上部署的待测编码标志和双目相机构成便捷、高效的非接触式测量方案;提出了基于双直线约束的编码特征点检测算法,重点解决了复杂现场采集环境中编码特征点的精确检测与匹配问题。提出了链式双目相机三维测距算法,通过精确三维重建实现了高精度的无缝线路钢轨纵向位移测量。通过室内模拟实验和室外现场实验验证了本文提出方法的有效性,在室外现场实验中钢轨纵向位移的测量精度达到 0.2 mm。

关键词: 双目视觉;无缝线路钢轨纵向位移;编码特征点;高精度测量

中图分类号: TH711 TP391 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.40

Research on longitudinal displacement measurement method of seamless rail based on binocular vision

Chong Aixin[1,2], Yin Hui[1,2], Liu Yanting[1,3], Liu Xiubo[4], Xu Hongli[1,2]

(*1. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;*
2. Beijing Key Laboratory of Traffic Data Analysis and Mining, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. Beijing Key Laboratory of Track Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
4. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: The longitudinal displacement of the seamless rail is the longitudinal movement of the rail along the top surface of the track panel or road bed caused by the internal longitudinal stress of the rail. The timely and high-precision measurement of the longitudinal displacement is of great significance for the safe operation of the high-speed railway. In this paper, a method for measuring the longitudinal displacement of seamless rail based on binocular vision technology is proposed. This convenient and efficient non-contact measurement solution consists of a reference target deployed on the trackside fixed facility, a coded mark to be measured deployed on the rail waist and a binocular camera. A coding feature point detection algorithm based on double-line constraint is proposed, which focuses on solving the problem of accurate detection and matching of coded feature points in complex field acquisition environment. The three-dimensional distance measurement algorithm of chain binocular camera is proposed. The high-precision measurement of the longitudinal displacement of seamless rail is achieved with accurate three-dimensional reconstruction. The indoor simulation experiment and outdoor field experiment verify the effectiveness of the proposed method. The measurement accuracy of the rail longitudinal displacement in outdoor field experiment reaches 0.2 mm.

Keywords: binocular vision; longitudinal displacement of seamless rail; coded feature point; high accuracy measurement

收稿日期:2019-08-29 Received Date:2019-08-29

*基金项目:科技部国家重点研发计划(2017YFB1201104)、国家自然科学基金(51827813,61472029)项目资助

0　引　　言

在高速列车辗压、启制动、外界温度变化等因素作用下,无缝线路钢轨内部会产生很大的纵向应力,使钢轨沿着轨枕或轨道框架沿着道床顶面纵向移动,这种现象称为钢轨爬行或钢轨纵向位移[1]。钢轨纵向位移使得无缝线路钢轨应力重分布,甚至诱发胀轨跑道,从而影响高速列车的行车安全,因此对无缝线路钢轨纵向位移进行及时精确的测量对保证高速铁路安全运营具有重要意义。

空间距离测量在铁路基础建设[2-10]、航空航天[11]、机械制造[12-15]与智能机器[16-17]等领域应用广泛。在无缝线路钢轨纵向位移测量研究中,按照测量方式大致可分为接触式和非接触式两类方法。接触式测量方法[2-4]通常需要在钢轨等设施上安装测量仪器测算出位移距离。此类方法操作便捷,计算速度快,但是测量精度受设备制作精密度和人为操作安装等外部环境因素影响较大,加之长期受到轨道振动、恶劣天气等影响导致传感器的使用寿命缩短、测量精度及可靠性下降,并且此类方法需要在现场设施上安装测量设备,造成行车安全隐患。

非接触式测量方法可分为激光法[5]和视觉测量法[6-7]。前者操作便捷,但需人工读取测量值,因而存在一定的人工误差,并且激光位移检测设备固定位置易受到外部环境影响,从而影响到测量精度。基于视觉测量类方法由于其操作便捷,安全性高等特点,在多个领域已经得到广泛应用。但是该类方法易受到复杂环境影响,文献[6]在基于视觉测量的铁路基础设施检测方面进行初步探索,但现场采集图像受遮挡、低光照等各种降质因素影响,造成特征点检测困难,严重影响测量精度。

由此,本文提出一种基于双目视觉的高精度非接触式钢轨纵向位移测量方法。与现有的接触式测量方法相比,本文方法降低了因设备安装因素带来的测量误差,消除了因轨道振动对设备造成损坏和因在轨道上安装电子设备带来安全隐患的问题。对非接触式视觉测量而言,关键在于如何获取复杂现场采集环境中的有效监测图像,如何精确检测与匹配编码特征点,以及如何保证三维重建的高精度问题。针对上面 3 个问题,本文分别提出一种监测图像采集的现场部署方案,基于双直线约束的编码特征点检测算法和链式双目相机三维测距算法。本文提出的方法具有测量现场部署简单,操作便捷的特点,并通过室内与室外实验验证了本文方法的有效性和精确性。

1　基于双目视觉技术的钢轨纵向位移测量方案

综合分析无缝线路的现场条件以及钢轨纵向位移监测图像的复杂现场采集环境,本文提出了监测图像采集现场部署方案和测量流程。

1.1　监测图像采集现场部署方案

本文首先提出一种监测图像采集的现场部署方案,如图 1 所示。该方案主要是由现场的参考标靶,待测编码标志以及双目相机组成。

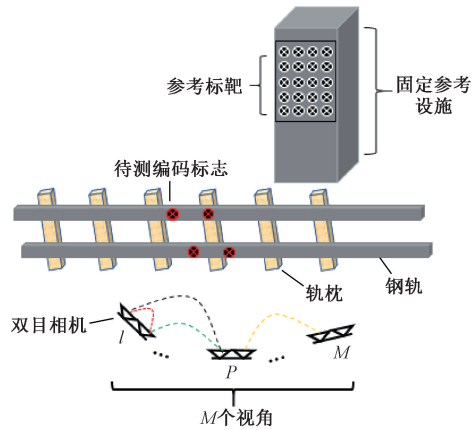

图 1　监测图像采集现场部署

Fig.1　Monitoring image acquisition field layout

在轨旁固定参考设施上喷漆印制由五行四列的编码标志构成的参考标靶作为参考基准,如图 1 中灰色立柱所示。在轨腰上喷漆印制带有编码信息的待测编码标志,每一条钢轨上喷印的标志间距离相同,如图 1 钢轨上的红色标志。双目相机在道旁距离参考标靶 3~5 m 处从不同视角进行图像采集。图像采集过程中保证各视角的图像中均包含有参考标靶和钢轨上的待测编码标志,设视角个数为 M,$M \geqslant 10$,从而得到 M 个视角的图像序列 $\mathfrak{T}^t = \{ I^t_{m.dir} \mid m \in [1,\cdots,M], dir \in [l,r] \}$,$\mathfrak{T}^t$ 表示在 t 时刻 M 个视角的图像序列,$I^t_{m.dir}$ 表示在第 m 个视角的 dir 方向相机获得的图像。

1.2　测量流程

利用上述图像采集现场部署方案进行多次现场监测得到多组不同时刻不同视角的图像序列 $\mathfrak{T}^t$,经过特征点检测、三维重建、纵向位移计算等步骤计算出不同监测时刻之间无缝线路钢轨发生的纵向位移,测量流程如图 2 所示。

本方法的测量流程中包含两个关键技术:编码特征点检测和基于三维重建的高精度位移计算,下文将详细介绍。

2　基于双目视觉技术的钢轨纵向位移测量方法

在实际的高速铁路环境下,部署在道旁的参考标靶和轨腰上的待测编码标志易沾染污渍,图像采集也易受

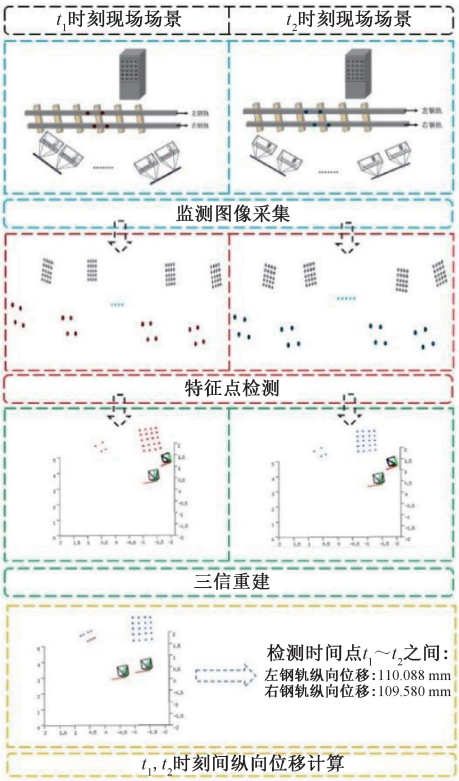

图 2 测量流程

Fig.2 Measurement process

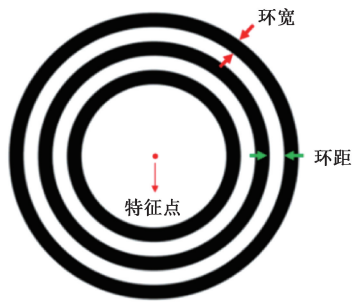

图 3 编码标志

Fig.3 Coded mark

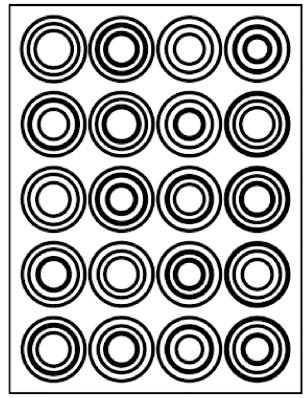

图 4 参考标靶

Fig.4 Reference target

到光照干扰等,这都将会影响最后测量精度。对此本文提出基于双直线约束方法增强特征点检测的鲁棒性和基于链式双目相机三维测距算法提高测量精度。

2.1 基于双直线约束的编码特征点检测算法

无缝线路钢轨表面光滑,无明显纹理、颜色、几何特征,给视觉测量造成困难。基于此,本文提出在钢轨的轨腰上喷印用于测距的待测编码标志和在线路旁路肩处的固定参考设施喷涂参考标靶以实现钢轨纵向位移的精确测量。

本文采用由 Calvet 等[18]提出的编码标志作为待测编码标志与参考标靶的基础标志元素,编码标志如图 3 所示,由 N 个位于白色支撑物上的同心黑色圆形环组成。编码标志的环宽与环距构成编码信息;圆心坐标为编码标志的位置信息,称为编码特征点。

本文提出了由黑色圆环数 $N=3$ 的编码标志组成 5 行4 列的参考标靶设计方案,如图 4 所示。为了应对现场复杂环境的挑战,设计的参考标靶中任意相邻的两个编码标志的编码信息至少存在 40% 的不同信息,该种设计方案的鲁棒性将在实验部分进行验证。

为了解决采集图像中参考标靶和待测编码标志的被遮挡问题,本文提出了基于双直线性约束检测算法。该算法应用编码标志检测算法[18]获得初始特征点集 $P^{t}_{m.dir}$,并由位于同一行(列)的特征点拟合出直线方程,再使用原始特征点的像素横(纵)轴坐标值去优化特征点的像素纵(横)轴坐标值,具体方法如式(1)所示。

$$\begin{cases}\hat{y}_{i,*} = a_i x_{i,*} + b_i \\ \hat{x}_{*,j} = (y_{*,j} - b_j)/a_j\end{cases} \tag{1}$$

式中:$\hat{x}_{*,j}$、$\hat{y}_{i,*}$ 为优化后的特征点在像素坐标值;a_*、b_* 为同一行(列)的特征点拟合出的直线方程参数。由此获得经过双直线约束优化后的特征点集 $\hat{P}^{t}_{m.dir}$。

2.2 基于链式双目相机三维测距算法

在复杂现场采集环境中,图像采集过程中会受到外界物体遮挡或光照等其他自然因素的影响而获得降质图像。若采用单视角双目相机进行图像采集难以实现对降质图像进行高精度三维重建,为此本文提出基于链式双目相机的三维测距算法。链式双目相机即是利用双目相机在多个视角位置对同一场景进行图像采集,形成一个双目采集链。

利用链式双目相机进行三维重建的优势是可以充分利用多视角光束平差约束和双目相机之间固定位置约束来提高三维重建精度。具体思路为:假设在同一时刻下将相机链中的第 m 视角的双目相机中左相机表示为 C^{m}_{L},

右相机表示为 C_R^m,并以左相机的坐标系作为世界坐标,计算相机 C_L^m 和其他相机(C_L^i 或 C_R^i)间的旋转平移矩阵即 $R_{ml,il}$,$T_{ml,il}$ 或 $R_{ml,ir}$,$T_{ml,ir}$,相机坐标系之间的转换关系如式(2)所示。

$$Z_{ml} = R_{ml,il} \cdot Z_{il} + T_{ml,il}$$
$$Z_{ml} = R_{ml,ir} \cdot Z_{ir} + T_{ml,ir} \quad (2)$$

式中:Z_{ml} 表示在第 m 视角中左相机坐标系下三维坐标;Z_{il} 表示在第 i 视角中左相机坐标系下三维坐标;Z_{ir} 表示在第 i 视角中右相机坐标系下三维坐标。

通过这些转换关系将各个视角所获得的特征点转换到同一个坐标系下,根据光束平差法[19]优化转换关系并使得同名特征点趋向重合,从而提高重建精度。利用相同的原理,求得不同时刻间 C_L^m 相机的转换关系,将待测编码标志的特征点转换到同一坐标系下,进而得到位移测量值,即对应不同时刻间的钢轨纵向位移值。

3　实　　验

本文实验由室内实验和室外实验两部分构成。室内实验针对本文提出的 3 个贡献点逐一进行实验验证;室外实验证明了本文提出的测量方法在复杂现场环境下的适用性。

本文实验的双目视觉系统采用工业摄像机的 CCD 像素尺寸为 3.2 μm×3.2 μm,其分辨率为 1 280×1 024 像素,镜头焦距为 10 mm(室外实验),30 mm(室内实验),如图 5 所示。标准圆形标靶为 Caliboptics CG-150H-5,圆心点间距为 15 mm,共 7×7 个圆心特征点。本文设计的参考标靶如图 4 所示。

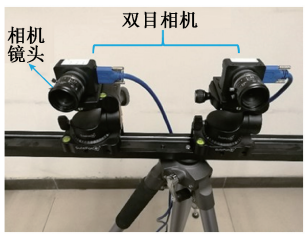

图 5　双目相机

Fig.5　Binocular camera

3.1　室内实验

1 监测图像采集现场部署方案可行性验证

图像采集方式采用 1.1 节提出的现场部署方案,实验中双目相机工作距离(工作距离:相机到待测物的距离)设置了 3、4、5 m 3 个级别。实验中将测量目标由钢轨上待测编码标志的位移值换成标准圆形标靶上特征点间距,具体如图 6 所示。

通过多组测距实验结果验证监测图像采集现场部署方案的可行性,测距结果如表 1 所示。从表 1 中可以发现虽然随着双目相机的工作距离加长,其测距效果有所下降,但是在 5 m 的工作距离下测距误差仍在 0.5 mm 级别,达到钢轨纵向位移测量要求。通过此实验也证明了本文提出的监测图像采集现场部署方案的可行性。

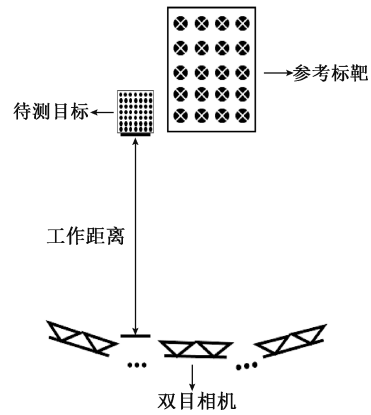

图 6　室内实验部署

Fig.6　Indoor experiment layout

表 1　室内测距实验

Table 1　Indoor distance measurement experiment

工作距离/m	真实距离/mm	测量平均距离/mm	平均误差率%
3	15.000	15.124	0.82
4	15.000	15.342	2.28
5	15.000	15.592	3.94

2 参考标靶的鲁棒性

将参考标靶中各个标志随机排列出同样的形状的对比标靶,对比标靶中任意相邻的两个编码标志的编码信息不满足存在 40% 不同信息的条件。利用对比标靶和参考标靶的标志识别实验验证本文设计的参考标靶的鲁棒性。对参考标靶和对比标靶图像进行加噪处理,噪声等级分为 5 个等级(σ=0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09),加噪后参考标靶如图 7 所示。图 7 中第 1 行为加噪后标靶图像,第 2 行为对应的局部放大图像。

在加噪标靶图像上进行标志识别的实验结果如图 8 所示。图中横轴为加入噪声的强度,纵轴为标志识别率即正确辨别出标志编码信息的百分比,计算公式如式(3)所示。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{N} \{ c_i = c'_i \} \times 1}{N} \quad (3)$$

式中:c_i 为第 i 个标志正确的编码信息;c'_i 为检测得到第 i 个标志的编码信息;{} 为指示函数满足条件时为 1,否则

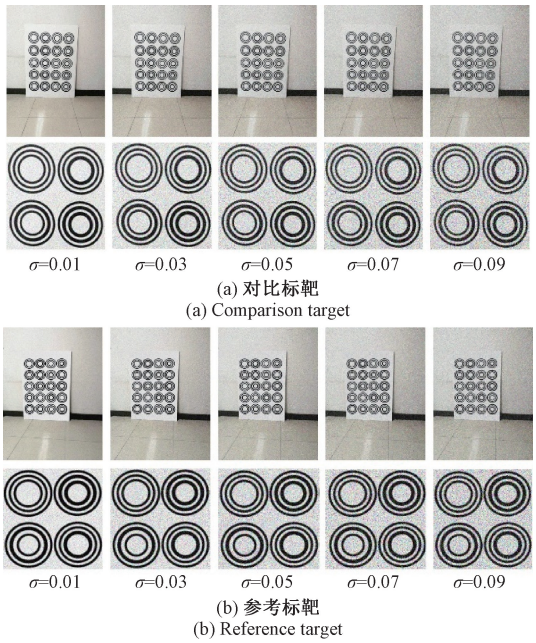

图 7 加噪标靶图像

Fig.7 The target images with noise added

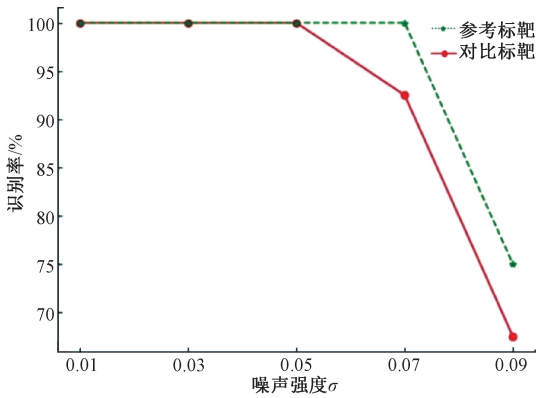

图 8 参考标志识别率

Fig.8 Reference mark recognition rate

为 0;N 表示图像中标志的个数。

从图 8 实验结果可以看出在噪声强度 σ = 0.07 时,本文设计的参考标靶识别率仍可以达到 100%,而对比标靶已经降到 93.5%。在噪声强度 σ = 0.09 时,本文设计的参考标靶识别率降为 75%,但仍优于对比标靶的 67.5%。综上分析,本文设计的参考标靶是具有较好的鲁棒性。

3)编码特征点检测算法与三维测距算法有效性验证

为了验证本文提出的基于双直线约束的编码特征点检测算法和基于链式双目相机三维测距算法在测距过程中起到的作用,设计了如下消融实验,具体实验结果如表 2 所示。

表 2 消融实验

Table 2 Ablation experiment

组数	未使用双直线约束	使用双直线约束	单视角双目三维重建	链式多视角双目三维重建	平均测距误差/mm
1	√	×	×	√	0.472
2	×	√	×	√	0.033
3	√	×	√	×	0.592
4	×	√	√	×	0.106

表 2 中的第 1 行是相关技术和平均测距误差,第 1 列是实验组号。对号“√”表示该组实验使用表中第一行对应的相关技术,叉号“×”则表示未使用相关技术。

从表 2 中的 1 组和 2 组实验,3 组和 4 组实验对比可以看出本文提出的基于双直线约束的编码特征点检测算法对实现高精度测量具有很大帮助,平均误差减少 0.462 mm,测量精度提高约 3%。从 1 组和 3 组实验,2 组和 4 组实验对比可以看出使用本文提出的基于链式双目相机三维测距算法对比单视角双目视角三维重建算法在平均误差上减少 0.096 mm,测量精度提高约 0.6%。综上分析,本文提出的方法在实现高精度测量上都有很大帮助,验证了基于链式双目相机三维测距算法有效性。

表 2 中 1 组和 2 组的实验结果如图 9 所示。图 9 中“+”表示未使用双直线约束的测距结果,“·”是使用双直线约束的测距结果。图 9 中横轴是测试图像号,纵轴是距离,红色虚线是真实距离(15 mm)等值线。从图 9 中“+”与“·”分布趋势看出本文提出的基于双直线约束的编码特征点检测算法可以使测量结果更加稳定。

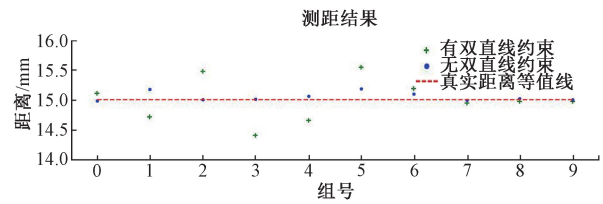

图 9 测距实验结果

Fig.9 Distance measurement experiment result

3.2 室外实验

为了验证本文提出的方法可以在复杂现场环境下实现高精度钢轨纵向位移测量,在室外实验场构建了钢轨纵向位移的双目视觉图像数据集。

数据集包含两组实验数据,每组实验数据中都包含了 $t1$,$t2$ 两时刻多视角的双目图像,如图 10 所示。图 10 中绿色实线框是参考标靶,红色虚线框是轨腰上待测编

码标志,“*L*”与“*R*”分别表示每个视角中左相机和右相机采集到的监测图像。同条钢轨轨腰上喷印的相邻两个待测编码特征点间距为 74 mm,在模拟钢轨不发生胀轨情况下,*t*1 与 *t*2 时刻下相邻编码特征点间距离不发生改变,可用于检验不同时刻下三维重建的精度。第 1 组图像数据中模拟两条钢轨在 *t*1 与 *t*2 时刻间的纵向位移真实距离值为 110 mm,第 2 组图像数据中模拟两条钢轨在 *t*1 与 *t*2 时刻间纵向位移的真实距离为 140 mm。

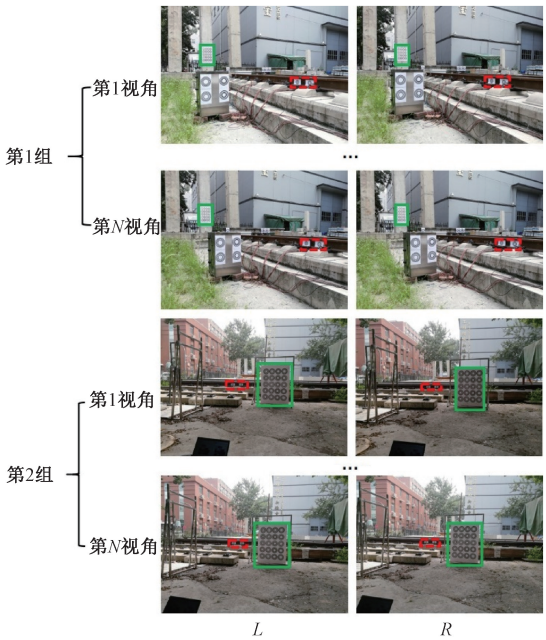

图 10　多视角钢轨位移监测图像

Fig.10　Multi-view rail displacement monitoring images

表 3 所示为两组实验分别在 *t*1,*t*2 时刻下,同一条钢轨上相邻待测编码特征点之间的距离测量实验的结果。表 3 中序号 1,2 分别表示第 1 组与第 2 组实验结果,从中可以看出,4 次实验的三维重建的误差都在 0.2 mm 以下,证明本文提出方法的精确性,这也为实现高精度钢轨纵向位移测量打下了良好基础。

表 3　编码特征点间距测量实验

Table 3　Spacing measurement experiment for the coded feature points

组数	时刻	真实距离 /mm	测量距离 /mm	误差 /mm	误差率 /%
1	*t*1	74.000	74.193	0.193	0.26
	*t*2	74.000	74.155	0.155	0.21
2	*t*1	74.000	73.836	0.164	0.22
	*t*2	74.000	74.182	0.182	0.24

室外钢轨纵向位移测量实验结果如表 4 所示,表中组数 1,2 分别表示第 1 组与第 2 组实验结果。每组都对近相机侧钢轨进行纵向位移测量,将一条钢轨上所有编码特征点在两时刻间的纵向位移的平均值作为该条钢轨纵的向位移距离。从表 4 中可以看出,两组实验测量误差都在 0.2 mm 以上,略高于室内实验测距结果,但测距的误差率依然维持在 0.2% ~ 0.3% 之间,验证了本文提出的方法在复杂现场环境下仍可以适用。

表 4　户外钢轨纵向位移测量实验

Table 4　The outdoor measurement experiment of the longitudinal displacement of the rail

组数	真实距离 /mm	测量距离 /mm	误差 /mm	误差率 /%
1	110.000	109.779	0.221	0.20
2	140.000	139.652	0.348	0.24

4　结　　论

本文提出了一种基于双目视觉技术的无缝线路钢轨纵向位移测量方法,该方法采用基于双直线约束的编码特征点检测算法,利用参考标靶中编码特征点的共线先验提高了特征点检测精确率,同时基于链式双目相机三维测距算法,通过融合多视角空间信息提高了三维重建精度。在室外真实环境下,测量误差可控制在±0.2 mm,误差率在 0.2% 左右,达到了钢轨纵向位移测量的要求。同时,本文提出的测量部署方案无需在钢轨上安装电子设备,具有部署快、数据采集简单和对行车影响小等特点。随着计算机视觉的快速发展,基于视觉测量的铁路基础设施监测方法必将得到越来越广泛的应用,在以后的工作中,将继续研究提高监测图像质量的方法以及多视角联合高精度标定等问题,以进一步提高位移监测的可靠性和精度。

参考文献

[1] 赵庆大,王晓锋.铁路轨道工程之线路防爬[J].民营科技,2015(6):124.
ZHAO Q D, WANG X F. Anti-crawling of railway tracks [J]. MinYing KeJi, 2015(6):124.

[2] 傅勤毅,彭亚凯,王超.基于 ZigBee 技术的无缝钢轨爬行监测系统设计[J].铁道科学与工程学报,2016,13(12):2478-2482.
FU Q Y, PENG Y K, WANG CH. Design of continuously welded rail crawling monitoring system

based on ZigBee [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016,13(12):2478-2482.

[3] 孙北林.钢轨纵向位移在线监测系统研究[D].北京:北京交通大学,2013.
SUN B L. A study on longitudinal rail displacement observation system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2013.

[4] 史红梅,余祖俊,朱力强,等.高速铁路无缝线路钢轨纵向位移在线监测方法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(4):811-817.
SHI H M, YU Z J, ZHU L Q, et al. Study on the monitoring method of longitudinal displacement for the high-speed continuous welded rail [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(4):811-817.

[5] 樊晓丽.基于高速铁路无缝线路钢轨纵向位移检测技术的研究[J].铁路采购与物流,2018,13(3):60-62.
FAN X L. Research on longitudinal displacement detection technology of seamless rail in high-speed railway [J]. Railway Purchase and Logistics Journal, 2018,13(3):60-62.

[6] 胡仁东.基于计算机视觉的高精度测量方法研究及应用[D].北京:北京交通大学,2017.
HU R D. Research and application of high precision measurement method based on computer vision [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2017.

[7] MURRAY C A, TAKE W A, HOULT N A. Measurement of vertical and longitudinal rail displacements using digital image correlation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(2):141-155.

[8] 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.
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.

[9] 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.
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.

[10] 朱力强,闻志强,邬成健,等.高寒地区高速铁路路基冻胀远程监测[J].铁道学报,2019,41(1):115-122.
ZHU L Q, WEN ZH Q, WU CH J, et al. Subgrade frost heaving monitoring for high-speed railway in alpine regions [J]. Journal of The China Railway Society, 2019,41(1):109-116.

[11] 赵振庆.大视距非合作目标视觉位姿测量系统关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
ZHAO ZH Q. Research on key technologies of visual pose measurement system with large vision range for non-cooperative target [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[12] 李秀智,梁兴楠,贾松敏,等.基于视觉测量的智能轮椅床自动对接[J].仪器仪表学报,2019,40(4):189-197.
LI X ZH, LIANG X N, JIA S M, et al. Visual measurement based automatic docking for intelligent wheelchair bed [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(4):189-197.

[13] 支珊,赵文珍,赵文辉,等.基于齿轮局部图像齿距机器视觉测量方法[J].仪器仪表学报, 2019, 40(2):205-212.
ZHI SH, ZHAO W ZH, ZHAO W H, et al. Visual measurement method of pitch machine based on gear local image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,39(2):205-212.

[14] 蔡友发,傅星,李飞.数字图像相关方法的桥梁挠度仪的温度补偿[J].电子测量与仪器学报,2019,33(7):88-92.
CAI Y F, FU X, LI F. Temperature compensations for bridge deflection meter by using of digital image correlation method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(7):88-92.

[15] 赵亚凤.基于双目视觉的原木材积检测方法研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.
ZHAO Y F. Log volume detection based on binocular stereo vision[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.

[16] 樊绍胜,杨迪,邹德华,等.输电线路螺栓紧固带电作业机器人的视觉搜索、识别与定位方法[J].电子测量与仪器学报,2017,31(9):1514-1523.
FAN SH SH, YANG D, ZOU D H, et al. Vision-based

tracing, recognition and positioning strategy for bolt tightening live working robot on power transmission line [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(9):1514-1523.

[17] 贾松敏,郑泽玲,张国梁,等.基于混合特征的机器人定位与地图创建[J].仪器仪表学报,2018,39(12):201-209.
JIA S M, ZHENG Z L, ZHANG G L, et al. Robot localization and map building based on hybrid features [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(12):201-209.

[18] CALVET L, GURDJOS P, GRIWODZ C, et al. Detection and accurate localization of circular fiducials under highly challenging conditions [C]. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE Computer Society, 2016.

[19] TRIGGS B, MCLAUCHLAN P F, HARTLEY R I, et al. Bundle adjustment—A modern synthesis [C]. International workshop on vision algorithms, Springer Berlin Heidelberg, 1999: 298-372.

作者简介

崇爱新,2017 年于山东农业大学获得学士学位,现为北京交通大学博士研究生,主要研究方向为计算机立体视觉。
E-mail:18112015@ bjtu.edu.cn

Chong Aixin received his B. Sc. degree from Shandong Agricultural University in 2017. Now, he is a Ph. D. candidate in Beijing Jiaotong University. His main research interests include computer stereo vision.

尹辉(通信作者),2010 年于北京交通大学计算机学院获得博士学位,现为北京交通大学计算机与信息技术学院教授,主要研究方向为机器视觉、智能信息处理及其在铁路工业中的应用。
E-mail:hyin@ bjtu.edu.cn

Yin Hui (Corresponding author) received her Ph. D. degree in computer application technology from Beijing Jiaotong University in 2010. Now she is currently a professor in School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University. Her main research interests include machine vision, intelligent information processing and their application in railway industry.