

高速铁路接触网几何参数立体视觉测量系统

周威^{1*}, 杜馨瑜¹, 薛宪堂¹, 李丁², 傅强², 张翼¹, 王强², 王发灯¹, 任盛伟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北京铁科英迈技术有限公司, 北京 100081

摘要 接触网几何参数是我国高速铁路供电安全检测监测系统(6C系统)的基本检测内容,是保证电气化铁路安全运营的重要参数。基于多目立体视觉技术研究设计了一种接触网几何参数测量系统,并测量拉出值、接触线高度等几何参数。研究开发了一种高速同步频闪照明技术,该技术使测量系统的功耗显著降低,图像质量和抗阳光干扰能力显著提升。建立了用于接触网几何参数测量的线阵相机立体视觉测量模型,并提出了一种可靠的线阵相机立体视觉匹配方法。采用激光二维传感器进行车体振动补偿并建立了车辆振动补偿模型。研制了接触网几何参数测量系统样机并开展了现场测试。测试结果表明:拉出值和接触线高度的测量精度优于 10 mm,所提方法为 6C 系统提供了一种可靠的接触网几何参数测量手段。

关键词 测量; 接触网几何参数; 立体视觉; 频闪照明

中图分类号 U226.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221547

1 引言

为确保高速铁路动车组运营秩序,提高动车组的供电安全性、可靠性,我国构建了高速铁路供电安全检测监测系统(6C系统),其目的是对高速铁路的牵引供电系统进行全方位、全覆盖的综合检测监测^[1-2]。接触网几何参数是 6C 系统的基本检测内容,是描述接触网空间位置关系的基本状态参数,主要包括拉出值和接触线高度等。接触网几何参数静态值是接触网在无外部扰动条件下的静止状态相对于轨道参考坐标系的数值,主要用于施工验收和现场维修作业,其中,拉出值静态值是接触线相对轨道中心的水平距离,接触线高度静态值是接触线相对钢轨顶平面的垂直距离。接触网几何参数动态值是接触网在受电弓滑动接触作用下相对于受电弓参考坐标系的数值,主要用于评价接触网的动态服役性能。为保证电气化铁路的安全运营、保证弓网的良好接触和可靠取流,在接触网工程的设计、施工和运营等各阶段都需要确保接触网几何参数达到一定的规范要求^[3-4],因此必须定期对接触网几何参数进行检测,以便及时发现并消除隐患。

适应高速铁路应用要求的接触网几何参数测量系统需具备如下特点:1)测量精度高。在新建高速铁路接触网工程静态测试中应及时发现拉出值超限和接触线高度不平顺等施工偏差超限,以确保接触线静态几

何平顺性满足高速铁路的运行要求。2)测量速度高。尤其对于仅开行动车组的全封闭式高速铁路,需采用车载接触网几何参数测量系统测量接触线动态几何参数,按线路上列车的实际运营速度运行,检测列车真实运行状态下的受电弓运行轨迹和弓网动态响应,及时发现动态拉出值超限和接触线动态高度不平顺等危及行车安全、影响受流质量的接触网隐患。3)受环境影响较小。测量系统应能在白天、夜晚、通过桥隧等不同光照环境下进行可靠测量,满足我国高速铁路网的日常动态巡检要求。这些应用特点为研制、发展高速铁路接触网几何参数测量系统带来了诸多挑战。

国内外先后开展了激光雷达^[5]、结构光立体视觉^[6]和双目立体视觉^[7]等车载接触网几何参数测量技术研究。激光雷达的扫描频率和分辨率较低,主要应用于低速测量;结构光立体视觉的二维图像数据量较大,且易受环境光线影响,在高速全天候检测应用中受到了一定限制;双目立体视觉测量存在不易提取特征、同名点匹配较困难等不足。近年来,基于面阵相机的多目立体视觉测量技术和立体匹配方法逐渐发展起来。周舵等^[8]使用了一个投影仪和两个面阵相机组成三目立体视觉系统,利用像素的相位信息来完成同名点匹配;束安等^[9]利用三台呈等边三角形布置的面阵相机设计了一种三目立体视觉测量方法,并采用三目交叉极线约束的方法对特征点进行匹配。周爱国等^[10]提出了一

收稿日期: 2022-07-28; 修回日期: 2022-08-29; 录用日期: 2022-09-30; 网络首发日期: 2022-10-10

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司基金(2020YJ065)

通信作者: *zhouwei_semi@163.com

种基于加权 Levenberg-Marquardt 非线性优化的定位算法,提高系统对同名物点世界坐标的解算精度。

基于线阵相机的立体视觉测量技术在高速铁路接触网几何参数测量中具备如下优势:1)测量分辨率高;2)一维图像数据量少,测量频率高,满足高速铁路接触网动态等速检测要求;3)采用可见光,安全性较高。目前,运用这种测量技术的测量系统主要采用多个大功率气体放电灯作为主动照明光源,其功耗较高且平均使用寿命不长^[11-12];这类测量系统通常采用拉弦式位移传感器进行车辆振动补偿,具有数据采集和处理简单的优点,但存在传感器弦线易断、维护量较大的不足。

针对高速铁路接触网几何参数测量技术的现状和不足,本文研制了基于线阵相机多目立体视觉技术的接触网几何参数测量系统,设计了一种高速同步频闪照明技术以显著提升图像质量和抗阳光干扰能力,建立了由立体视觉测量模型和车辆振动补偿模型构成的接触网几何参数测量模型,提出了采用第三个线阵相机对各空间点的重投影点与实际提取目标进行对比以快速去除伪目标的线阵相机立体视觉匹配方法,该方法实现了接触网几何参数静态值的准确测量,满足了 6C 系统的应用需求。

2 基本原理

2.1 系统设计

基于多目立体视觉技术的接触网几何参数测量系统设计如图 1 所示,主要包括车顶由线阵相机组成的立体视觉测量设备和车底由激光二维传感器组成的振动补偿测量设备。

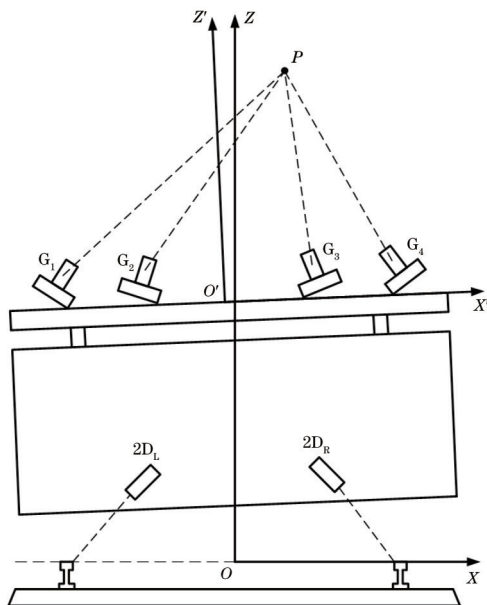


图 1 基于多目立体视觉的接触网几何参数测量原理

Fig. 1 Measurement principle of overhead wire geometry parameters based on multi-view stereo vision

车顶视觉测量设备由 4 个线阵相机组成。 $O'X'Z'$ 为车顶坐标系,原点 O' 为车顶光学梁中点,点 P 为接触线, G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 为 4 个线阵相机,4 个线阵相机分为两组且相对光学梁中点呈对称分布。同步采集 4 个线阵相机拍摄的点 P 平面图像,通过实时图像处理和分析获得点 P 在各线阵相机图像中的位置,基于视差原理即可计算点 P 在车顶坐标系 $O'X'Z'$ 的垂向位移和横向位移。设计 4 个不同仰角的线阵相机以最大限度地避免直射阳光干扰导致图像灰度饱和、无法提取接触线目标的问题,使检测系统可在白天和夜晚等不同环境光照条件下正常工作。

拉出值、接触线高度等接触线静态几何参数是以轨面坐标系 OXZ 作为测量基准,原点 O 为两轨顶面中点,拉出值静态值是接触线相对轨道中心的水平距离,即图 1 中点 P 到 OZ 轴的垂直距离,接触线高度静态值是接触线相对钢轨顶平面的垂直距离,即图 1 中点 P 到 OX 轴的垂直距离。新建接触网的设计、施工和验收以及运营接触网的日常检修维护都是基于接触网静态几何参数进行的。而车载测量系统是在运动中进行动态检测,其检测得到的拉出值和接触线高度等参数是以车顶坐标系 $O'X'Z'$ 作为测量基准。为检验新建接触网的施工质量是否符合设计要求,需要将车顶坐标系 $O'X'Z'$ 下的测量值换算为以轨面坐标系 OXZ 为基准的静态测试值,这就需要进行车辆振动位移补偿测量,即测量车辆在运行过程中相对于轨面坐标系 OXZ 的空间姿态。

运行中的列车车辆是具有弹簧悬挂装置的六自由度振动系统,这种复杂的振动是若干基本形式的振动组合的结果,包括沿三个相互垂直的坐标轴的旋转和平移^[13]。结合理论分析和运营实践,发现影响接触线高度测量的振动主要是车体垂向沉浮振动和侧滚振动,影响拉出值测量的振动主要是车体侧滚振动和横摆振动。因此,采用 2 个激光二维传感器 $2D_L$ 和 $2D_R$ 构成车底振动补偿测量设备,测量车体相对轨面坐标系 OXZ 的侧滚角度、横向相对位移和垂向相对位移这三种空间姿态参数,如图 2 所示,侧滚角度是轨平面 OX 轴和车底平面 $O''X''$ 轴的夹角,横向相对位移是车底坐标系 $O''X''Z''$ 的原点 O'' 相对轨面坐标系 OXZ 的原点 O 的横向位移,垂向相对位移是点 O'' 相对点 O 的垂向位移。

2 个激光二维传感器对称安装于作为测量基准的光学检测梁上,光学检测梁悬挂固定于车体底部,光学检测梁与车体可视为同一刚体。车顶立体视觉测量设备和车底振动补偿测量设备位于车辆垂直于行进方向的同一断面。车底振动补偿测量设备以 100 Hz 固定频率测量车体振动姿态参数,测量数据作为软件缓存并实时更新以供合成计算调用。将车顶立体视觉测量设备获得的车顶坐标系 $O'X'Z'$ 下的拉出值、接触线高度测量结果与车底振动补偿测量设备获得的车体空间

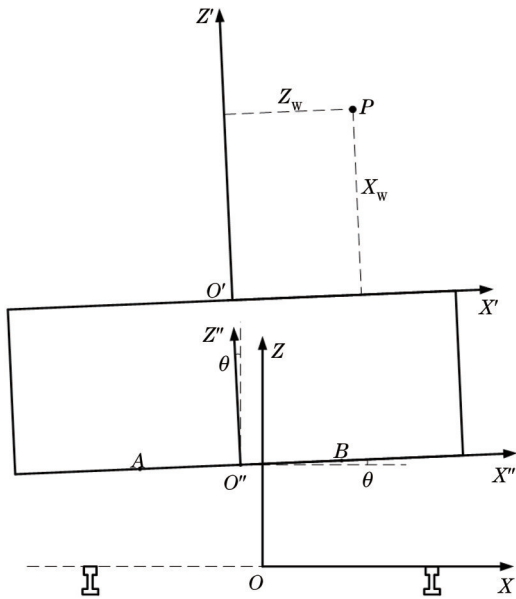


图2 车辆振动补偿模型

Fig. 2 Vehicle vibration compensation model

姿态参数测量结果进行合成计算,即可获得点 P 在轨面坐标系 OXZ 下的拉出值和接触线高度测量结果。

2.2 同步频闪照明技术

对于车载接触网视觉测量系统,以天空为主要背景、环境光照变化剧烈是面临的主要挑战。即使设计了不同仰角的线阵相机,在夏季晴朗天气和进出隧道等环境下,车载接触网视觉测量系统仍面临图像质量难以满足处理要求等困难。因此,主动视觉照明设计对于确保车载接触网几何参数测量的可靠性至关重要。合理的光学照明设计可提高接触网图像质量,降低图像处理和识别难度,提高被测目标与背景的分度。目前适合线阵相机的照明光源主要有大功率气体放电灯、大功率LED光源和线激光光源等。大功率气体放电灯存在消耗功率高、温度高、使用寿命较短等不足。大功率常亮LED光源的芯片长时间处于工作发热状态,热能堆积造成的芯片结温过高会严重影响芯片实际使用寿命,因此其散热性能制约了光通输出的进一步增大。线激光光源要求线激光平面与线阵相机的线扫平面重合,对安装精度要求高,而且功率较大的激光光源存在一定的安全风险。

针对接触网几何参数测量的视觉照明需求,本文设计了单色光LED同步频闪照明技术。通过控制LED芯片驱动电流通断的方式实现高速频闪照明,使其仅在相机芯片曝光的时间段进行照明,实现照明和成像的同步。图3为同步频闪照明技术原理,由安装在车轮的编码器产生的脉冲信号经信号同步模块产生三路同步脉冲信号,分别通过图像采集卡和电气驱动模块同步触发4个线阵相机曝光和多个LED光源频闪照明。LED这种照明占空比极小的工作方式将大幅降低光源功耗,其功耗仅相当于文献[12]所采用聚

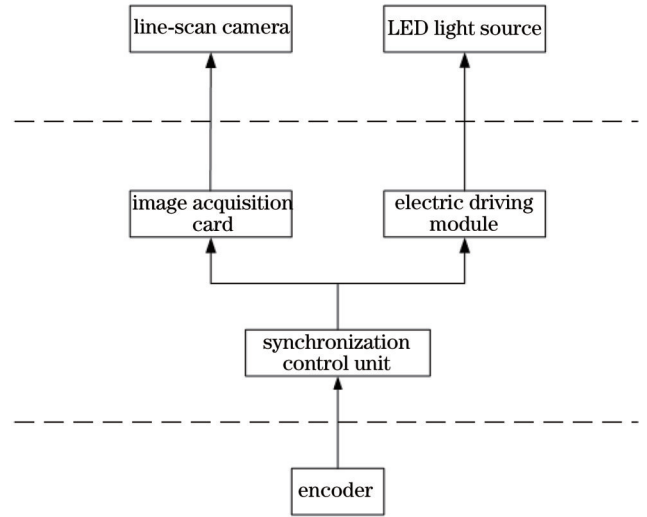


图3 同步频闪照明技术原理

Fig. 3 Principle of synchronized stroboscopic lighting technology

光灯光源总功耗的约5%。

为了在晴朗白天获得接触线与背景灰度差异显著的高质量接触线图像,采用光谱波段较窄的单色光LED光源替代连续光谱的白光LED。同时在相机接收端设置对应的单色光滤色片,从而提高了相机图像的信噪比。综合考虑线阵相机光谱响应、LED芯片辐射功率、太阳光光谱强度分布和被测目标的光谱反射率等因素,选择大功率蓝光LED光源。

在户外强阳光照射条件下对接触线进行成像对比测试。一个测试采用蓝光LED照明配合蓝光滤色片,另一个测试采用白光LED照明配合白光滤色片,两个测试中的光源功率相同。主动照明光源照射后的图像信号强度对比表明:蓝光LED照明方案的目标物灰度约为白光LED照明方案的65%。经作为背景噪声存在的太阳光照射后的图像噪声强度对比表明:在太阳光未导致图像灰度饱和的情况下,蓝光LED照明方案的(453±25) nm滤色片后的图像背景灰度降低至白光LED照明方案的400~750 nm滤色片后的图像背景灰度的约12%。定义图像信噪比 R_{SN} 为信号强度 S 与噪声强度 N 之比,则两种照明方案的图像信噪比比值约为5.4。

图4为采用蓝光LED同步频闪照明技术的接触网几何参数测量系统实物图,设计光学检测梁用于共面布置4个线阵相机和3组蓝光LED灯具。线阵相机和LED灯具沿光学检测梁长度方向布置,共同覆盖光学检测梁上方的接触线测量范围并使照明尽量均匀。

在夏季晴朗天气对采用传统大功率气体放电灯光源和蓝光LED频闪照明光源的两种设备进行了高铁线路接触网实际成像对比测试,如图5和图6所示。对于采用传统气体放电灯光源照明方案的测量设备,受强烈阳光干扰的接触网图像部分区域已饱和,严重时



图 4 采用蓝光 LED 频闪照明技术的接触网几何参数测量系统

Fig. 4 Measurement system of overhead wire geometry parameters using blue LED stroboscopic lighting technology

甚至会淹没图像中的接触线目标,使图像处理变得困难。对于采用蓝光 LED 频闪照明光源的测量设备,绝大部分太阳光线被蓝光滤色片吸收,背景灰度较低,且经 LED 光源照明后接触线目标清晰,与背景反差大,有利于图像处理和接触线定位,其抗阳光干扰能力显著提升。

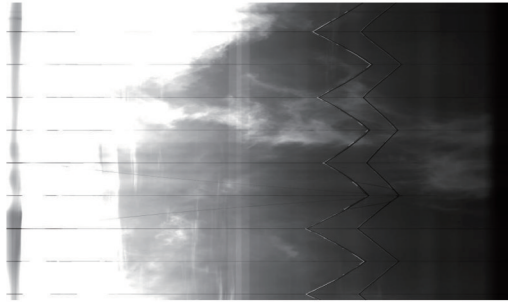


图 5 采用气体放电灯光源照明获得的接触网图像(夏季晴天)
Fig. 5 Catenary image illuminated by gas discharge lamp light source (a sunny day in summer)

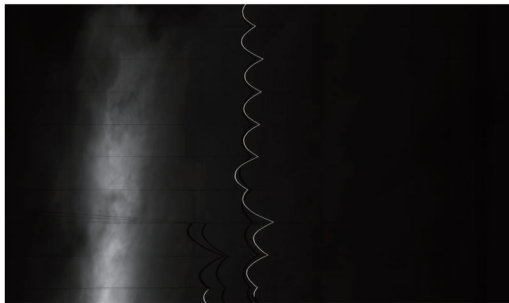


图 6 采用蓝光 LED 频闪光源照明获得的接触网图像(夏季晴天)
Fig. 6 Catenary image illuminated by blue LED stroboscopic lighting lamps (a sunny day in summer)

3 测量原理

3.1 立体视觉测量模型和匹配方法

线阵相机的感光单元为一维阵列,测量平面内点 P 的二维场景,通过成像透镜将其投影到相机一维像平面上。通过欧氏空间变换和透视投影变换^[12,14-15],可建立从全局坐标系到图像坐标系的成像变换关系,即

线阵相机模型,用齐次坐标可以表示为

$$s \begin{pmatrix} u \\ 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: s 为中间变量; u 为点 P 的像点在图像像素坐标系中的坐标; M 为隐参数矩阵; X_w 和 Z_w 分别为点 P 在全局坐标系下的横向位移和垂向位移,即该点处的拉出值和接触线高度。

消去式(1)中的中间变量 s ,可得

$$u = \frac{m_{11} X_w + m_{12} Z_w + m_{13}}{m_{21} X_w + m_{22} Z_w + m_{23}}. \quad (2)$$

式(2)为线阵相机的透视投影方程,其建立了点 P 在二维全局坐标系下的坐标与点 P 在一维图像像素坐标系下的坐标之间的关系。根据已知的多个标定点(与点 P 相似)在二维全局坐标系下的坐标及其像素坐标以及式(2)建立方程组,即可求解隐参数矩阵 M 。

运用任意 2 个线阵相机、基于三角测量原理即可测量点 P 在车顶坐标系 $O'X'Z'$ 下的测量坐标 X_w 和 Z_w ,用下标 a 、 b 、 c 和 d 对应表示 4 个线阵相机 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 ,以线阵相机 G_1 和 G_4 为例,联立关于 G_1 、 G_4 线阵相机的上述式(2)的透视投影方程,可得到 X_w 、 Z_w 的表达式分别为

$$\begin{cases} X_w = \frac{q_2 k_1 - q_1 k_2}{p_1 q_2 - p_2 q_1} \\ Z_w = \frac{p_1 k_2 - p_2 k_1}{p_1 q_2 - p_2 q_1} \end{cases}, \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} p_1 = m_{11a} - u_a m_{21a} \\ p_2 = m_{11d} - u_d m_{21d} \\ q_1 = m_{12a} - u_a m_{22a} \\ q_2 = m_{12d} - u_d m_{22d} \\ k_1 = u_a m_{23a} - m_{13a} \\ k_2 = u_d m_{23d} - m_{13d} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: m_{11a} 、 m_{21a} 、 m_{12a} 、 m_{22a} 、 m_{23a} 、 m_{13a} 为线阵相机 G_1 的隐参数矩阵 M_a 的元素; m_{11d} 、 m_{21d} 、 m_{12d} 、 m_{22d} 、 m_{23d} 、 m_{13d} 为线阵相机 G_4 的隐参数矩阵 M_d 的元素; u_a 和 u_d 分别为接触线在线阵相机 G_1 和 G_4 图像中的像素坐标。式(3)即

为接触网几何参数的立体视觉测量模型。在实际测量中,通过图像处理和分析确定接触线在两个线阵相机图像中的像素坐标 u_a 和 u_d ,根据已标定的隐参数矩阵 M_a 和 M_d 并运用式(3)即可计算出接触线的横向位置 X_w 和垂向位置 Z_w 。

锚段关节是高速铁路接触网的一种常用的接触线转换结构,可使机车受电弓平滑并安全地由一个锚段的接触线滑动过渡到另一个锚段去。在锚段关节转换区段,线阵相机会拍摄到转换的两支接触线,甚至可以拍摄到在接触线上方悬挂接触线的两支承力索。对于立体视觉测量,只需要两个线阵相机提供同一个目标的像素坐标信息即可计算获得接触线的空间坐标。但是,当拍摄目标数目大于一个时,需判断参与计算的两个线阵相机拍摄图像中目标的匹配情况,即解决匹配多义性问题,也就是在给定一幅图像上的已知点后,在另一幅图像上寻找与之相对应的目标匹配点。

适用于接触网几何参数高速测量的立体视觉测量系统,要求图像分析算法处理速度快、实时性强、匹配精度高并且对光照变化不敏感,并且线扫描相机采集的图像包含的目标信息有限。因此,本文提出了一种基于空间目标位置特征的匹配方法,采用第三个线阵相机的目标成像坐标信息,检查前两个线阵相机图像中的匹配情况,可快速消除许多仅用双目图像匹配所产生的不确定性。

如图 7 所示, A 、 B 为空间两个目标, O_1 、 O_2 和 O_3 分别为三个线阵相机的光心, a_1 、 b_1 分别为目标 A 和 B 在一号线阵相机的成像点, a_2 、 b_2 分别为目标 A 和 B 在二号线阵相机的成像点。其中,成像点 a_1 和 a_2 、 b_1 和 b_2 分别为真实匹配对,对应目标 A 和 B ,而 b_1 和 a_2 的匹配对会形成一个空间伪目标 C 。采用第三个线阵相机的匹配方法顺序为:

1) 前两个线阵相机图像中匹配点对应的空间点先被重建,运用式(3)分别计算空间点 A 、 B 、 C 的坐标 X_w 和 Z_w ;

2) 将重建的各空间点分别投影到第三个线阵相机的图像,已知各空间点的坐标 X_w 和 Z_w 和三号线阵相机的隐参数矩阵 M ,运用式(3)即可计算出各空间点在三号线阵相机的投影点 a_3 、 b_3 和 c_3 ;

3) 由于 C 为空间伪目标,三号线阵相机图像中仅在投影点 a_3 、 b_3 附近存在真实目标,而 c_3 附近没有找到有效目标,因此,判断由 b_1 和 a_2 形成的匹配为错误的匹配。

3.2 车辆振动补偿模型

接触网几何参数车辆振动补偿模型如图 2 所示。接触网几何参数合成计算是将接触线点 P 在车顶坐标系 $O'X'Z'$ 下的拉出值、接触线高度测量结果 $[X_w, Z_w]$ 转换至轨面坐标系 OXZ 下的测量结果 $[X_i, Z_i]$,该过程涉及三个坐标参考系,即车顶坐标系 $O'X'Z'$ 、轨面坐标系 OXZ 和车底坐标系 $O''X''Z''$ 。车顶视觉测量设备测量

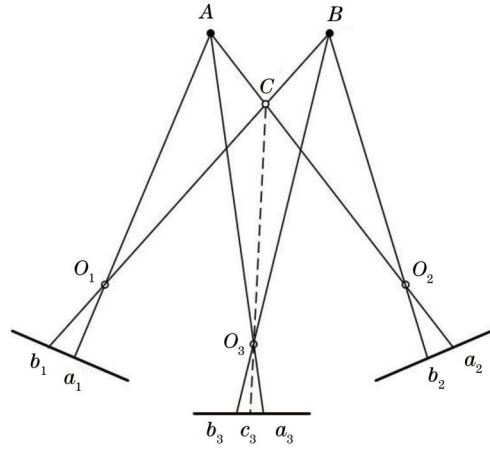


图 7 多目立体视觉匹配方法

Fig. 7 Matching method of multi-view stereo vision

获得接触线点 P 在车顶坐标系 $O'X'Z'$ 下的拉出值、接触线高度测量结果;车底振动补偿测量设备测量获得车底坐标系 $O''X''Z''$ 和轨面坐标系 OXZ 之间的相对位置关系,由侧滚角度 θ 、横向相对位移 Δx 和垂向相对位移 Δz 这三种空间姿态参数描述。

由于车体为同一刚体,因此车顶坐标系 $O'X'Z'$ 和车底坐标系 $O''X''Z''$ 相互平行,两坐标系原点 O' 和 O'' 的距离为车顶光学检测梁和车底振动补偿检测梁之间的高度,记为 H_1 。当车辆在平直道上静止且车体相对轨道平面未产生侧滚、横移和垂向沉浮时,记车底坐标系 $O''X''Z''$ 的原点 O'' 相对轨面坐标系 OXZ 的原点 O 的初始高度为 H_2 。记 2 个激光二维传感器的水平间距为 W ,记 x_l 、 x_r 、 z_l 、 z_r 分别为 2 个激光二维传感器输出的左激光二维传感器水平位移、右激光二维传感器水平位移、左激光二维传感器垂直位移和右激光二维传感器垂直位移。

车体相对轨面的侧滚角度 θ 、横向相对位移 Δx 和垂向相对位移 Δz 的计算式如下:

$$\sin \theta = \frac{z_r - z_l}{W}, \quad (5)$$

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta}, \quad (6)$$

$$\Delta x = \frac{x_l + x_r}{2}, \quad (7)$$

$$\Delta z = \frac{z_l + z_r}{2} + H_2. \quad (8)$$

车体作为刚体旋转产生侧滚角度 θ 后,车顶坐标系 $O'X'Z'$ 的原点 O' 在轨面坐标系 OXZ 中的坐标为

$$X_{O'} = \Delta x - H_1 \sin \theta = \frac{x_l + x_r}{2} - H_1 \sin \theta, \quad (9)$$

$$Z_{O'} = \Delta z + H_1 \cos \theta = \frac{z_l + z_r}{2} + H_2 + H_1 \cos \theta. \quad (10)$$

点 P 在车顶坐标系 $O'X'Z'$ 下拉出值、接触线高度的测量结果 $[X_w, Z_w]$ 到轨面坐标系 OXZ 下的测量结果 $[X_i, Z_i]$ 的转换为

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_w \\ Z_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{O'} \\ Z_{O'} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

点 P 在轨面坐标系 OXZ 下的拉出值和接触线高度测量结果分别为

$$X_f = X_w \cos \theta - Z_w \sin \theta + X_{O'} = X_w \cos \theta - Z_w \sin \theta + \frac{x_1 + x_r}{2} - H_1 \sin \theta, \quad (12)$$

$$Z_f = X_w \sin \theta + Z_w \cos \theta + Z_{O'} = X_w \sin \theta + Z_w \cos \theta + \frac{z_1 + z_r}{2} + H_2 + H_1 \cos \theta. \quad (13)$$

式(12)、(13)即为接触网几何参数车辆振动补偿计算模型。根据接触线在车顶坐标系下的拉出值、接触线高度测量结果,将2个激光二维传感器输出的单边垂向、横向位移以及相关车辆几何参数尺寸进行合成计算,得到接触线在轨面坐标系下的拉出值、接触线高度测量结果。

4 分析与讨论

设计了如图8所示的线阵相机标定架标定4个线阵相机的隐参数矩阵各参数。相机标定架设置一个水平布置的标定目标阵列,等间距布置11个标定目标,各标定目标的间距为100 mm。上下移动滑杆可将水平标定阵列固定于特定高度,在这一特定高度平面可同时进行11个空间标定点的标定图像采集,经图像分析后可确定每个线阵相机采集得到的11个标定点的图像像素坐标。上下移动滑杆至若干个等间距的垂直

位置,即可完成整个标定过程。



图8 线阵相机标定架

Fig. 8 Calibration tool for line-scan cameras

将所有空间标定点的空间位置坐标 $[X_w, Z_w]$ 和对应每个线阵相机的标定点图像像素坐标 u_a, u_b, u_c, u_d 分别代入式(2),即可求解隐参数矩阵 M_a, M_b, M_c, M_d ,标定结果如表1所示。4个线阵相机的所有标定点重投影平均偏差距离分别为0.79、0.95、0.97、0.84 pixel。

表1 线阵相机参数标定结果

Table 1 Calibration results of line-scan camera parameters

Camera No.	1	2	3	4
m_{11}	-4104.27	-3991.49	-2983.28	-2275.00
m_{12}	330.15	1149.90	2890.27	3445.18
m_{13}	2653017.50	1290261.95	-1189125.70	-1745124.50
m_{21}	-0.41	-0.22	0.25	0.44
m_{22}	0.91	0.98	0.97	0.90
m_{23}	253.33	70.62	67.22	250.02

将标定后的接触网几何参数立体视觉测量设备和车辆振动补偿设备分别安装在如图9所示的高速铁路专用的接触网检测车上。拍摄获得的线阵相机接触网图像如图6所示,接触线目标的灰度值显著大于附近的环境灰度,这是因为接触线底面经电弓的滑动作用后能较好地反射主动照明光线,接触线截面整体呈圆形,其两侧面的光线反射较弱,灰度迅速下降,图像中接触线附近的环境灰度值相对较小且变化较缓慢。对接触网一维灰度图像进行差分预处理,计算得到的图像灰度梯度分布如图10所示。可以看出,图像灰度梯度曲线可较好地接触线与背景进行区分。由于接触线底面灰度值显著大于接触线两侧面灰度值,在接触线局部灰度曲线中进一步定位接触线底面左、右两边

缘的像素坐标,通过计算底面两边缘像素坐标的平均值获得接触线底面中点的像素坐标。

根据图像灰度梯度曲线分别确定接触线目标底面中点在各线阵相机拍摄图像中的像素坐标位置,采用立体视觉匹配方法确定真实匹配,再运用立体视觉测量模型[式(3)]可计算获得接触线在车顶坐标系 $O'X'Z'$ 下的拉出值、接触线高度测量结果。根据车辆振动补偿设备输出的单边垂向、横向位移,计算获得车体相对轨面的侧滚角度 θ 、横向相对位移 Δx 和垂向相对位移 Δz 等三个振动补偿参数,再与立体视觉测量模型计算得到的车顶坐标系下的拉出值、接触线高度测量数值进行合成计算,获得接触线在轨面坐标系 OXZ 下的拉出值、接触线高度测量结果。



图 9 高速铁路专用的接触网检测车

Fig. 9 Catenary inspection vehicle for high-speed railway

在一段包含直线区段和曲线区段的高铁线路进行动态试验验证,接触网几何参数立体视觉测量设备和车辆振动补偿设备分别输出的测量结果如表 2 所示。运用接触网几何参数车辆振动补偿计算模型进行合成计算后,在轨面坐标系 Oxz 下的拉出值、接触线高度测量结果 $[X_l, Z_l]$ 与地面拉出值、接触线高度人工测量数据 $[X_G, Z_G]$ 的对比如表 3 所示。将 DJJ-8 型激光接触网检测仪放置于轨道平面,测量获得拉出值、接触线高

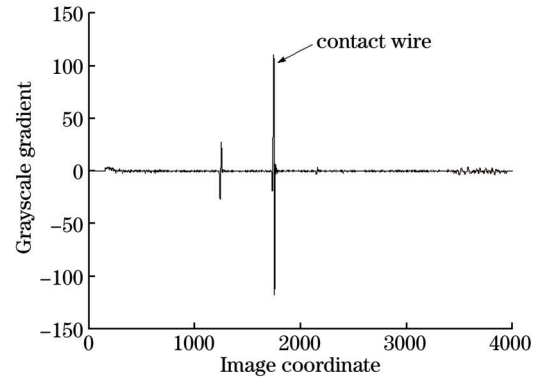


图 10 接触网图像灰度梯度曲线

Fig. 10 Grayscale gradient curve of catenary image

度的地面人工测量数据。高速铁路正线接触网通常每隔 1 km 左右布置一个机械分段,在机械分段处动车组受电弓由一根接触线平滑过渡到另一根接触线。因此,根据机械分段处包含两支接触线的特征,首先对比该位置处的测量系统输出的测量结果和地面人工测量数据,然后逐一比对相邻两个机械分段之间各支柱位置的数据,确保同一杆号处两种测量数据的位置一致性。

表 2 接触网几何参数立体视觉测量设备和车辆振动补偿设备分别输出的测量结果

Table 2 Measurement results of stereo vision measurement module of catenary geometry parameters and vehicle vibration compensation module

Pole No.	Stagger (car roof) X_w /mm	Height (car roof) Z_w /mm	Roll angle θ /($^\circ$)	Lateral relative displacement Δx /mm	Vertical relative displacement Δz /mm
1452	230	5308	0.086	10	1
1450	-180	5305	0.071	9	1
1448	211	5298	0.080	10	1
1446	-178	5276	0.055	8	0
1444	206	5292	0.093	10	0
1442	-201	5300	-0.002	3	1
1440	206	5290	-0.059	-3	0
1438	-193	5277	-0.094	-10	1
1436	168	5295	-0.152	-18	0
1434	-208	5283	-0.175	-24	0
1432	179	5299	-0.273	-33	1
1430	-222	5298	-0.350	-39	1
1428	145	5307	-0.351	-39	1
1426	-255	5313	-0.383	-43	0
1424	124	5310	-0.417	-46	0
1422	-261	5307	-0.413	-46	1

在该段测试高铁线路,杆号 1452~1444 的区段为直线区段,杆号 1442~1432 的区段为直线向曲线过渡的缓和曲线,杆号 1430~1422 的区段为曲线区段。表 2 的侧滚角度 θ 和横向相对位移 Δx 的数值变化可反映车辆从直线到曲线的振动姿态变化:直线区段车体相

对轨面的侧滚角度 θ 的数值接近 0,不超过 0.1° ,曲线区段侧滚角度 θ 的数值则达到或超过了 -0.4° ;横向相对位移 Δx 的数值则从直线区段 10 mm 左右逐渐变为曲线区段 -46 mm,这反映了曲线区段车体相对轨面的横向相对位移显著变大。从垂向相对位移 Δz 的数

表 3 动态试验测量结果与地面测量结果的对比

Table 3 Comparison between dynamic test results and ground measurement results

unit: mm

Pole No.	Stagger	Height	Stagger (ground	Height (ground
	(rail surface)	(rail surface)	measurement)	measurement)
	X_i	Z_i	X_g	Z_g
1452	218	5309	221	5306
1450	-191	5304	-195	5302
1448	199	5299	202	5296
1446	-187	5275	-191	5273
1444	194	5292	198	5292
1442	-204	5300	-202	5298
1440	210	5289	213	5290
1438	-181	5278	-180	5275
1436	189	5293	195	5292
1434	-180	5283	-178	5280
1432	217	5299	217	5297
1430	-176	5299	-186	5295
1428	191	5306	197	5304
1426	-204	5313	-201	5309
1424	178	5308	184	5306
1422	-207	5309	-206	5306

值分布来看,无论是直线区段还是曲线区段,车辆运行过程中车体相对轨面的沉浮量均很小。

表 2 和表 3 分别给出了车顶坐标系 $O'X'Z'$ 下的拉出值、接触线高度测量结果 $[X_w, Z_w]$ 和轨面坐标系 OXZ 下的拉出值、接触线高度测量结果 $[X_i, Z_i]$ 。为便于对比,表 2 中接触线高度测量结果 Z_w 是在车顶坐标系 $O'X'Z'$ 下的接触线高度测量结果加上车辆在静止状态下原点 O' 在轨面坐标系 OXZ 的垂直高度。通过对比可知,由于车体沉浮量较小且车体侧滚对车体高度的影响很小,无论是直线区段还是曲线区段,补偿前后的接触线高度测量结果差异均较小。从直线区段到曲线区段,车体相对轨面的侧滚角和横向相对位移均逐渐变大,导致补偿前后的拉出值测量结果差异也逐渐变大,最大达到 54 mm。

由表 3 可见:经合成计算得到的轨面坐标系下的拉出值和接触线高度测量结果与地面人工测量结果的偏差满足 ± 10 mm 的要求,实现了接触线在轨面坐标系下拉出值和接触线高度的准确测量;激光二维传感器的车体振动补偿方法避免了拉弦式位移传感器的车体振动补偿方法存在的机械弦线易断的不足,满足高速铁路接触网几何参数检测需要,可以用于指导供电部门对线路进行养护和维修。

5 结 论

为满足高速铁路的应用要求,研究设计了基于多目立体视觉技术的接触网几何参数测量系统,研究采用新的高速同步频闪视觉照明技术,该技术显著降低

系统功耗,满足不同环境的检测要求。研究建立了由立体视觉测量模型和车辆振动补偿模型构成的接触网几何参数测量模型。研究提出了采用第三个线阵相机对各空间点的重投影点与实际提取目标进行对比以快速去除伪目标的线阵相机立体视觉匹配方法。高速铁路动态试验结果表明:所设计系统的测量数据准确可靠,满足 6C 系统应用需求,为接触网动静几何参数测量评估提供一种可靠的技术手段。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路供电安全检测监测系统(6C 系统)总体技术规范[EB/OL]. (2012-07-01)[2022-03-06]. <https://max.book118.com/html/2018/1013/6010211224001222.shtml>. Ministry of Railways of the People's Republic of China. General technical specification for power supply safety detection and monitoring system (6C system) of high-speed railway[EB/OL]. (2012-07-01) [2022-03-06]. <https://max.book118.com/html/2018/1013/6010211224001222.shtml>.
- [2] 张润宝, 杨志鹏. 接触网运行状态检测监测系统研究与实践[J]. 中国铁路, 2019(9): 64-70. Zhang R B, Yang Z P. Research and practice of operation state inspection and monitoring system of overhead contact line system [J]. China Railway, 2019(9): 64-70.
- [3] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003: 323-344. Yu W J. High-speed railway catenary[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003: 323-344.
- [4] Kießling F, Puschmann R, Schmieder A. 电气化铁道接触网[M]. 中铁电气化局集团有限公司, 译. 1 版. 北京: 中国电力出版社, 2004: 369-384. Kießling F, Puschmann R, Schmieder A. Contact lines for electric railways[M]. China railway electrification engineering group Co. Ltd., Transl. 1st ed. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 369-384.

- [5] 牛大鹏. 非接触式接触网几何参数检测系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008: 9-12.
Niu D P. Study on the OCS geometric parameters' inspection system based on non-contact measurement[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008: 9-12.
- [6] Liu Z G, Liu W Q, Han Z W. A high-precision detection approach for catenary geometry parameters of electrical railway [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(7): 1798-1808.
- [7] 石轶, 刘常杰, 郭寅, 等. 基于双目视觉的接触网几何参数测量系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1936-1942.
Shi Y, Liu C J, Guo Y, et al. Measurement system of geometric parameters for overhead line system based on binocular vision[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1936-1942.
- [8] 周舵, 王鹏, 孙长库, 等. 投影仪和双相机组成的三目立体视觉系统标定方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115001.
Zhou D, Wang P, Sun C K, et al. Calibration method for trinocular stereovision system comprising projector and dual cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115001.
- [9] 束安, 裴浩东, 段慧仙. 空间非合作目标的三目立体视觉测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0615001.
Shu A, Pei H D, Duan H X. Trinocular stereo visual measurement method for spatial non-cooperative target[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0615001.
- [10] 周爱国, 于江洋, 蒲家坤, 等. 基于加权Levenberg-Marquardt的多目视觉同名物点定位算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2415006.
Zhou A G, Yu J Y, Pu J K, et al. Positioning algorithm of homonymous object points in multi-vision system based on weighted Levenberg-Marquardt[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2415006.
- [11] 王卫东. 高速铁路基础设施动态检测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 108-115.
Wang W D. Dynamic detection technology of high-speed railway infrastructure[M]. Beijing: Science Press, 2017: 108-115.
- [12] 周威, 孙忠国, 任盛伟, 等. 基于多目立体视觉的接触网几何参数测量方法[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(5): 104-109.
Zhou W, Sun Z G, Ren S W, et al. Measurement method for geometric parameters of overhead contact line based on multi-view stereovision[J]. China Railway Science, 2015, 36(5): 104-109.
- [13] 刘涛, 吴积钦, 曾明. 非接触式接触网检测车车体振动位移补偿系统[J]. 电气化铁道, 2007, 18(5): 21-24.
Liu T, Wu J Q, Zeng M. Non-contact vibration displacement compensation system for detection car of OCS[J]. Electric Railway, 2007, 18(5): 21-24.
- [14] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 23-41.
Zhang G J. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008: 23-41.
- [15] 苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0815002.
Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0815002.

Stereo Vision-Based Measurement System for Geometric Parameters of High-Speed Railway Catenary

Zhou Wei^{1*}, Du Xinyu¹, Xue Xiantang¹, Li Ding², Fu Qiang², Zhang Yi¹, Wang Qiang²,
Wang Fadeng¹, Ren Shengwei¹

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

²Beijing IMAP Technology Co. Ltd., Beijing 100081, China

Abstract

Objective A measurement system for geometric parameters of the catenary on rolling stocks is investigated with the multi-view stereo vision technology and then used to measure geometric parameters, such as stagger and contact wire height. The geometric parameters of the catenary are the basic detection content of China's power supply safety inspection and monitoring system for high-speed railways (the 6C system). They are also important parameters to ensure the safe operation of electrified railways. The current measurement methods include the laser scanning methods, such as the one based on structured-light stereo vision and the one based on binocular stereo vision. These methods are weakened by several limitations in the on-board measurement of the geometric parameters of the catenary, such as the low scanning frequency and measurement resolution, the influence of sunlight, and the difficulty in matching homonymous points. Therefore, this paper attempts to propose a multi-view stereo vision technology with line-scan cameras to perform the on-board measurement of the geometric parameters of the catenary. A new kind of high-speed synchronized stroboscopic lighting technology for stereo vision-based measurement is developed to improve the resistance to sunlight interference, enhance image quality, and reduce the power consumption of the measurement system. A measurement model and a matching method for stereo vision with line-scan cameras are proposed. A method of compensating vehicle vibration with two-dimensional laser sensors and the corresponding model for vehicle vibration compensation are constructed.

Methods The measurement system is composed of two parts, i. e., a stereo vision-based measurement module on the

train roof and a measurement module for vehicle vibration compensation at the bottom of the train. The stereo vision-based measurement module consists of four line-scan cameras. A line-scan camera model is developed by Euclidean space transformation and perspective projection transformation. A measurement model for geometric parameters, including stagger and contact wire height, relative to the train roof coordinate system is developed by applying the triangulation principle of stereo vision. A matching method based on the spatial location features of targets is proposed. Specifically, the targets' imaging coordinates in the third line-scan camera are used to check the matching between the image from the first line-scan camera and that from the second line-scan camera, thereby quickly eliminating the uncertainty caused by binocular image matching. The measurement module for vehicle vibration compensation includes two two-dimensional laser sensors and measures the three spatial attitude parameters of the train body relative to the rail surface coordinate system, including the roll angle, the lateral relative displacement, and the vertical relative displacement. The geometric parameters (stagger and contact wire height) of the contact wire relative to the rail surface coordinate system are calculated by synthesizing the measurement data of both the stereo vision-based measurement module and the measurement module for vehicle vibration compensation. A light-emitting diode (LED) lamp based on stroboscopic lighting technology is proposed as an alternative light source. The high-speed synchronization of lighting and camera exposure is achieved by sharing the same trigger pulse produced by an encoder mounted on the train wheel. A blue LED lamp with a narrow-bandpass optical filter is proposed to minimize the influence of sunlight on imaging. The image signal-to-noise ratio (SNR) in a complex environment is significantly improved, and the power consumption of the measurement system is greatly reduced.

Results and Discussions Specifically, a calibration tool with a horizontally arranged calibration target array is designed to achieve high positioning accuracy of calibration targets (Fig. 8). The horizontally arranged calibration target array includes 11 targets equally spaced at 100 mm apart. At a certain height, the images of the 11 calibration points with different horizontal coordinates in the global coordinate system are captured. The calibration target array can be moved up and down to obtain calibration points with different vertical coordinates in the global coordinate system. The values of the parameters in the implicit parameter matrix of the line-scan cameras are calculated by Eq. (2) (listed in Table 1). The average deviations of the calibration point' reprojection obtained with the four line-scan cameras are 0.79 pixel, 0.95 pixel, 0.97 pixel, and 0.84 pixel, respectively. The proposed measurement system is installed on a dedicated inspection vehicle. The field test is performed on a high-speed railway line. The contact wire and the background can be well distinguished by first-order difference processing of the image (Fig. 10). The pixel coordinate of the midpoint of the contact wire's bottom surface is determined by locating the edges on both sides of the contact wire's bottom surface. The position of the contact wire relative to the train-roof coordinate system is calculated with the proposed stereo vision-based measurement model. Then, the position of the contact wire relative to the rail surface coordinate system is calculated by the vehicle vibration compensation method. The values of roll angle and lateral relative displacement of the train body both increase from near zero when the inspection vehicle travels from the straight-line section to the curved-line section. In contrast, the deviation of the vertical relative displacement of the train body is small (listed in Table 2). The comparison between dynamic test results and ground measurement results indicates that the measurement errors in stagger and contact wire height are both smaller than 10 mm (listed in Table 3). The test demonstrates that the proposed measurement system can be used both in the low-speed static inspection of a newly built catenary system and in the cyclic dynamic inspection of an operating catenary system.

Conclusions This paper proposes a measurement system for the geometric parameters of the catenary on rolling stocks based on multi-view stereo vision technology. The proposed system can measure geometric parameters, including stagger and contact wire height. The blue LED lamp based on stroboscopic lighting technology is investigated. Compared with the traditional measurement device using the high-intensity discharge (HID) lamp, the proposed device significantly improves the image signal-to-noise ratio in a complex environment and greatly reduces the power consumption of the measurement system. A measurement model for the geometric parameters of the catenary is developed, and it is composed of a stereo vision-based measurement model and a model for vehicle vibration compensation. A matching method for stereo vision with line-scan cameras is proposed. It uses the third line-scan camera to compare the reprojected points of each space point with the actual extracted points from image processing to quickly remove the pseudo-objects. The dynamic test results indicate that the measurement errors in stagger and contact wire height are both smaller than 10 mm. The test demonstrates that the proposed measurement system satisfies the application requirement of the 6C system.

Key words measurement; geometric parameters of catenary; stereo vision; stroboscopic lighting