

基于双目视觉的接触网几何参数测量系统

石 轶¹, 刘常杰¹, 郭 寅², 叶声华¹, 石 松³

- (1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084; 3. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘 要: 接触网是在电气化铁路中沿钢轨上空“之”字形架设的, 供受电弓取流的高压输电线, 其担负着把从牵引变电所获得的电能直接输送给电力机车使用的重要任务。针对传统的接触网几何参数测量方法中测量效率低下、精度不高的问题, 设计了一种快速、高精度测量系统。系统基于双目视觉测量原理, 由指示激光器进行特征指引, 通过两台高分辨率摄像机采集测量特征并进行图像处理和三维解算, 实现接触网几何参数的实时测量。实验结果表明: 系统测量的重复性精度可以达到 1 mm, 实现了接触网几何参数的实时、可靠测量, 为接触网的日常维护与检修提供了理论依据。

关键词: 接触网; 双目视觉; 非接触式测量; 立体控制场; 校准

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1936-07

Measurement system of geometric parameters for overhead line system based on binocular vision

Shi Yi¹, Liu Changjie¹, Guo Yin², Ye Shenghua¹, Shi Song³

- (1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: Overhead line system is the high voltage transmission line for pantograph obtaining electric current which is built above the rails in electrified railways. Its key task is to transport the electric energy from traction substation to electric locomotive. Aiming at the problem of low precision and low efficiency in traditional measuring method of geometric parameters, a measuring system is designed which is fast and of high precision. The system is based on principle of binocular vision. It produces the feature using a laser, acquires images using two high-resolution cameras and makes three-dimensional calculation, which makes it possible to measure the geometric parameters of the overhead line system in real time. Experimental result indicates that the repeatability precision of the system can reach up to 1 mm, and that the reliable real-time measurement of geometric parameters of the overhead line system has been accomplished, which provides useful theoretical basis for operating repairs.

Key words: overhead line system; binocular vision; non-contact measurement; controlling field; calibration

收稿日期: 2013-10-22; 修订日期: 2013-11-25

作者简介: 石轶(1988-), 男, 硕士生, 主要从事视觉测量技术的研究。Email: shi.yee@foxmail.com

导师简介: 刘常杰(1973-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事视觉测量技术的研究。Email: liuchangjie@tju.edu.cn

0 引言

接触网是在电气化铁道中,沿钢轨上空“之”字形架设的,供受电弓取流的高压输电线,担负着把从牵引变电所获得的电能直接输送给电力机车使用的任务。接触线与受电弓的可靠接触与取流关系到电气化铁道的正常、安全运营,因此其在铁路空间位置的准确测量十分关键,是接触网日常维护、检修的主要理论依据和列车安全运行的重要保障。接触网几何参数包括接触网导高(接触网距轨道上平面的垂直距离)和拉出值(接触网偏离轨道中心线的水平距离),目前接触网几何参数的检测主要分为接触式检测和非接触式检测两种^[1-6],但大都存在测量效率和测量精度较低的问题。由于视觉测量具有非接触、精度高、速度快等优点,可以满足测量要求。文中设计了一种基于双目视觉测量原理的接触网几何参数测量系统。根据接触网导线设计规范,要求系统测量的高度范围为 5 000~7 000 mm, 偏离轨道中心的水平范围为 -800~800 mm。考虑到系统的便携性及可靠性,将系统集成在一个安装重复性高的支架上,实现系统快速拆装。由指示激光器进行特征指引,通过两台高分辨率摄像机采集测量特征并进行图像处理和三维解算,实现接触网几何参数的实时测量,重复性精度可达 1 mm。

1 测量系统设计

接触网导线可视为空间中一宽度已知的直线,而直线是由一系列空间点构成,因此接触网导线的测量问题可转化为空间点三维坐标的测量问题。视觉测量具有非接触、精度高、速度快等优点,可以满足系统的测量要求。

1.1 测量原理

系统基于双目视觉测量原理^[7-11],利用空间点在两个相机的成像平面上的像面坐标求取空间点的三维坐标。

系统中两台高分辨率相机构成双目立体视觉测量单元,利用空间点在两台相机像平面上成像点的二维坐标求取空间点的三维坐标。如图 1 所示,两台相机与被测物体在空间形成三角关系,设相机 1 坐标系为 $O_{c1}X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$,其像平面坐标系为 $O_1x_1y_1$,有效

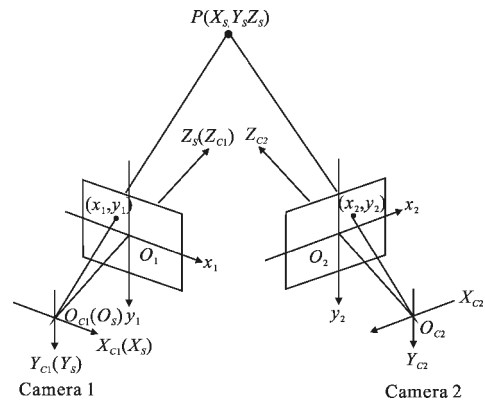


图 1 双目视觉测量模型

Fig.1 Measurement model of binocular vision

焦距为 c_1 ;相机 2 坐标系为 $O_{c2}X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$,其像平面坐标系为 $O_2x_2y_2$,有效焦距为 c_2 ,以相机 1 坐标系作为双目视觉传感器坐标系 $O_sX_sY_sZ_s$ 。两台相机之间的空间位置关系为:

$$\begin{cases} X_{c2} \\ Y_{c2} \\ Z_{c2} \\ 1 \end{cases} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ Z_{c1} \\ 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$,表示相机 2 坐标系到相机 1

坐标系的旋转矩阵; $T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}$,表示相机 2 坐标系到相

机 1 坐标系的平移矩阵。空间被测点 P 的三维坐标为:

$$\begin{cases} X_s = \frac{Z_s x_1}{c_1} \\ Y_s = \frac{Z_s y_1}{c_1} \\ Z_s = \frac{c_1(c_2 t_1 - x_2 t_3)}{x_2(r_{31}x_1 + r_{32}y_1 + r_{33}c_1) - c_2(r_{11}x_1 + r_{12}y_1 + r_{13}c_1)} = \frac{c_1(c_2 t_2 - y_2 t_3)}{y_2(r_{31}x_1 + r_{32}y_1 + r_{33}c_1) - c_2(r_{21}x_1 + r_{22}y_1 + r_{23}c_1)} \end{cases} \quad (2)$$

因此,当获得了有效焦距 c_1, c_2 和被测点在两个相机成像平面上的像面坐标 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 以及 R, T 矩阵后,即可求得点 P 在坐标系 $O_sX_sY_sZ_s$ 下的空间三维坐标。 R, T 矩阵可以通过现场两台相机位置关

系校准获得,其余参数通过相机内参数校准获得,将在后文中进行论述。

1.2 测量方案

接触网几何参数测量系统由两台高分辨率数字相机、大功率 LED 光源、指示激光器所组成。考虑到日间和夜间的照明条件不同,日间在自然光条件下即可通过图像处理进行三维解算;夜间则利用大功率 LED 光源对接触网导线进行照明以形成测量特征。对于线夹等特殊位置则采用指示激光器进行特征指引。如图 2(a)所示,两台相机安装在一个可折叠快速安装支架上,以一定夹角进行交会,由大功率 LED 光源进行照明;如图 2(b)所示,支架与一台推行车刚性连接,指示激光器投射到线夹处形成测量特征;如图 2(c)所示,支架为一可折叠结构,其设计基于以下考虑:

(1) 经过理论分析,当两台相机形成 30° 角进行交会测量时,以导线高度 6 m 为例,两台相机基线长度约为 3.2 m ,支架折叠角度设计成 180° ,折叠后支架长度缩短一半,兼顾了系统的测量精度和便携性。

(2) 考虑到系统只在出厂前进行一次校准的使用要求,对支架的重复折叠、安装精度提出了较高的要求,因此由机械加工的精度来保证。

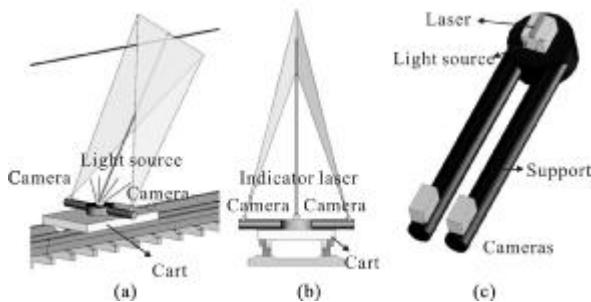


图 2 测量系统结构

Fig.2 Structure of measurement system

测量系统中,摄像机的内部参数、外部参数标定和测量系统的实时校准,以及系统机械安装的重复性是确保测量结果精确度的四个关键因素。前三个关键参数的校准可提前在室内完成,而测量系统的重复性精度则由机械安装的重复性予以保证。

1.3 工作过程

系统的具体工作过程如下:(1) 由上位机显示相机的实时图像,将推行车置于测量区域内,利用软件

进行触发,产生同步信号控制两台相机和 LED 光源同时开始工作;(2) LED 光源照亮接触网导线形成测量特征,两台相机同步进行图像采集;(3) 上位机软件对图像进行处理并实时解算,求得接触网导线的导高与拉出值;(4) 推行车沿轨道行进,求得所有感兴趣区域内的测量结果后,可绘制出整段线路的几何关系曲线。

2 测量系统出厂前的校准及特征提取

系统的校准包括相机的内参数校准、双相机外参数校准及双目视觉传感器坐标系与测量坐标系的转换三部分,由于系统的机械安装重复性足以满足测量重复性的要求,故只需在出厂前对系统进行一次校准即可,十分便捷。

2.1 基于立体控制场的相机内参数校准

基于立体控制场的相机内参数校准过程采用多基站方式,求解过程符合共线性约束条件,采用共线性约束优化校准算法。包含全部相机内参数的共线性约束方程数学描述为:

$$\begin{cases} x_p = x_0 + \Delta x - c \frac{m_{11}(X_p - X_0) + m_{12}(Y_p - Y_0) + m_{13}(Z_p - Z_0)}{m_{31}(X_p - X_0) + m_{32}(Y_p - Y_0) + m_{33}(Z_p - Z_0)} \\ y_p = y_0 + \Delta y - c \frac{m_{21}(X_p - X_0) + m_{22}(Y_p - Y_0) + m_{23}(Z_p - Z_0)}{m_{31}(X_p - X_0) + m_{32}(Y_p - Y_0) + m_{33}(Z_p - Z_0)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: (x_p, y_p) 为已知的图像像面坐标; (X_p, Y_p, Z_p) 为空间特征点的三维坐标,在立体控制场中为已知量; $(x_0, y_0, c, \Delta x, \Delta y)$ 引出了待校准的相机内参数 $(x_0, y_0, c, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, b_1, b_2)$; (X_0, Y_0, Z_0) 和 (m_{11}, \dots, m_{33}) 为每个基站相对于世界坐标系(控制场坐标系)的外部方位参数,为未知量。求解方程组即可确定相机的内参数。

基于立体控制场的相机内部参数标定技术,可以对实际成像系统中的畸变因素进行补偿修正,其实质就是根据空间被测点的真实三维坐标,由相机成像模型解算出的图像坐标与实际成像坐标之间的偏差,在二维成像平面上建立残差表 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 。

建立立体控制场,如图 3 所示,在每一个竖直的支撑框架上布置控制点,每个控制点均采用反光标记点制作。

利用 V-STARS 工业数字近景摄影三坐标测量系统测量立体控制场的每一个反光标记点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$,得到精确的空间三维坐标,由理想相机成像模型^[12-14],

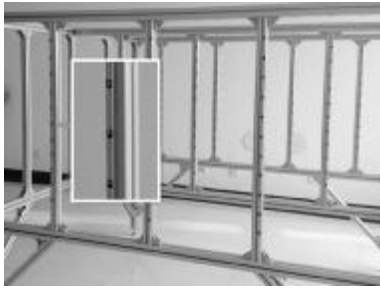


图 3 立体控制场

Fig.3 Stereoscopic controlling field

计算 P_i 的理论像面坐标 $p_i(x_i, y_i)$:

$$Z_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

公式(4)中,立体控制场的任一点 P_i 的空间三维坐标为 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$, f 为相机的焦距。计算所得相机像面坐标系下的坐标 $p_i(x_i, y_i)$ 作为真值。用相机拍摄空间同一被测点 P_i , 在相机成像平面上的实际成像坐标为 $p_{ri}(x_{ri}, y_{ri})$, 与理论成像点 $p_i(x_i, y_i)$ 相比较, 解算残差 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$, 当被测点遍布整个空间视场时即可建立立体控制场的残差表。

$$(\Delta x_i \ \Delta y_i) = (x_i - x_{ri} \ y_i - y_{ri}) \quad (5)$$

即由相机模型解算出的坐标值与 V-STARS 系统测量的坐标值之差。反复利用上述方法进行多次迭代计算后, 相机可以达到很高的精度。

2.2 基于光束平差法的双相机外参数校准

由上文可知, 确定两台高精度相机间的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T , 需要解算 $r_{11} \sim r_{33}$ 和 $t_1 \sim t_3$ 共 12 个未知数, 对公式(2)进行变换:

$$\begin{aligned} & (c_2 \cdot t_1 - X_2 \cdot t_3) \cdot (r_{21} \cdot X_1 + r_{22} \cdot Y_1 + c_1 \cdot r_{23}) - \\ & (c_2 \cdot t_2 - Y_2 \cdot t_3) \cdot (r_{11} \cdot X_1 + r_{12} \cdot Y_1 + c_1 \cdot r_{13}) = \\ & (Y_2 t_1 - X_2 t_2) \cdot (r_{31} \cdot X_1 + r_{32} \cdot Y_1 + c_1 \cdot r_{33}) \end{aligned} \quad (6)$$

设 $T' = \alpha T$, 根据坐标系的选择方法可知, $t_1 \neq 0$, 令 $\alpha = 1/t_1$, 有: $T' = (1 \ t_2' \ t_3')^T$, 公式(6)转化为含有 11 个未知数的方程, 用函数 $f(x) = 0$ 来表示。其中, $x = (t_2', t_3', r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33})$ 。此外, $r_{11} \sim r_{33}$ 构成的旋转矩阵 R 具有正交性, 满足 6 个正交约束方程, 利用公式(2)和正交约束方程构造含有 5 个独立变量的无约束最优目标函数, 当控制点的个数不少于 5 个时即可利用数学优化方法求解 x 。

校准时使用双相机对不同位置下已知精确长度的基准尺进行测量, 由于基准尺上两控制点间的精确距离已知, 由两个控制点间的距离能够求解比例因子 α 。如图 4 所示, 左、右相机对基准尺同时进行拍摄, 基准尺在空间内的站位设置尽量充满测量范围, 可分成前后两排在上、下均匀分布, 保证测量范围内的校准空间充足。设基准尺长度为 L , 在含有比例因子 α 的测量系统坐标系下长度为 L' , 则可得到 $L'^2 = \alpha L^2$, 由 α 和 x 能够得到最优的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T , 完成传感器结构参数的标定。

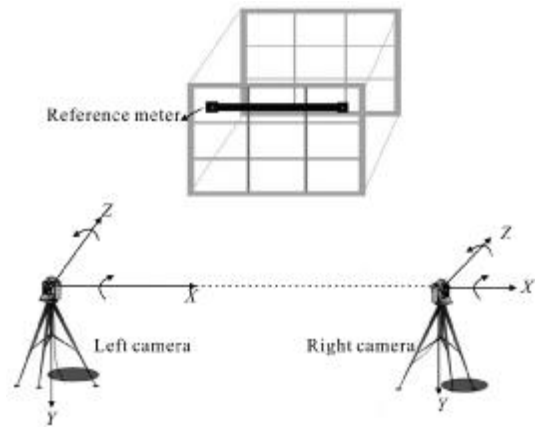


图 4 双相机标定示意图

Fig.4 Calibration of two cameras

2.3 双目视觉传感器坐标系与测量坐标系的转换

由于测量对象是接触网到轨道上平面的垂直距离以及接触网偏离轨道中心线的水平距离, 必须建立双目视觉传感器坐标系与测量坐标系的转换关系。由测量要求可知, 测量坐标系包含两个关键元素: 铁轨的上轨面和两条铁轨的中心线。如图 5 所示, 以两条铁轨

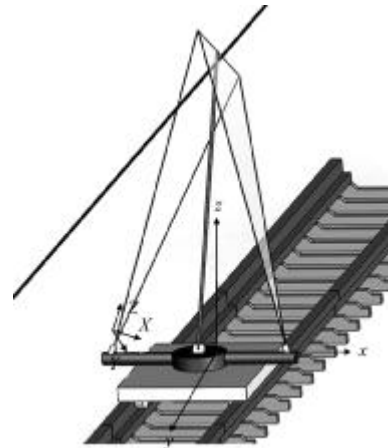


图 5 坐标系转换示意图

Fig.5 Transfer of coordinate systems

的上轨面作为测量坐标系的 xoy 平面, 其指向向上的法向量作为 z 轴正方向; 以垂直铁轨方向作为 x 轴, 原点选取在两条铁轨中心线上, 于是 y 轴方向亦可确定。

双目视觉传感器坐标系到测量坐标系的转换关系可由旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 表示:

$$P_i = RC_i + T \quad (7)$$

式中: P_i 为公共点在测量坐标系下的坐标; C_i 为公共点在双目视觉传感器坐标系下的坐标。 P_i 、 C_i 的质心坐标为:

$$\begin{cases} \bar{P} = \sum_{i=1}^n P_i/n \\ \bar{C} = \sum_{i=1}^n C_i/n \end{cases} \quad (8)$$

质心坐标之间同样存在如下关系:

$$\bar{P} = R\bar{C} + T \quad (9)$$

联立公式(7)与公式(9), 可得:

$$P_i - \bar{P} = R(C_i - \bar{C}) \quad (10)$$

令 $P_i' = P_i - \bar{P}$, $C_i' = C_i - \bar{C}$, P_i' 、 C_i' 为 P_i 、 C_i 质心化后的坐标, 建立最优目标函数:

$$F_{\min} = \sum_{i=1}^n \|P_i' - RC_i'\|^2 = \sum_{i=1}^n (P_i'^T P_i' + C_i'^T C_i' - 2P_i'^T RC_i') \quad (11)$$

公式(11)中, 要使 F_{\min} 取最小值, $P_i'^T RC_i'$ 应取最大值, 令 $H = \sum_{i=1}^n C_i' P_i'^T$, 则有:

$$\sum_{i=1}^n P_i'^T RC_i' = \text{Trace}(R \sum_{i=1}^n C_i' P_i'^T) = \text{Trace}(RH) \quad (12)$$

式中: Trace 为矩阵对角求和算子。对 H 进行奇异值分解可得: $H = U \times S \times V^T$; 通过求取 $\sum_{i=1}^n P_i'^T RC_i'$ 的最大值, 可以得到旋转矩阵的最优解: $R = VU^T$ 。将 R 代入公式(9)中求取平移矩阵 T , 从而建立起双目视觉传感器坐标系与测量坐标系的转换关系。

因此, 在推行车所在的模拟轨道上布置测量控制点, 如图 6 所示, 轨道上平面与内侧面均布满反光标记点, 通过 V-STARS 校准控制点建立轨道中心坐标系作为测量坐标系, 主相机坐标系作为双目视

觉传感器坐标系。利用立体控制场上的反光标记点作为公共点, 同时利用 V-STARS 系统与双相机进行拍摄, 分别求得公共点在轨道中心坐标系和主相机坐标系下的三维坐标, 即可高精度地建立起二者之间的转换关系。

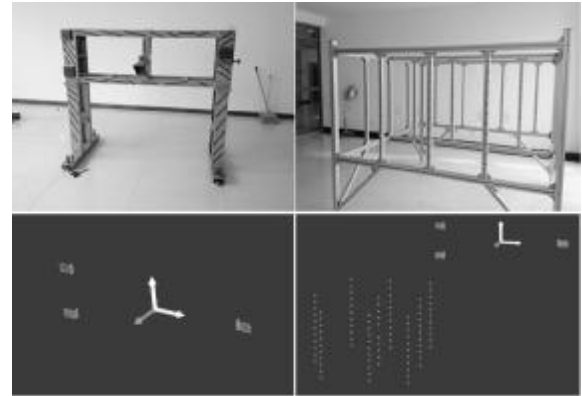


图 6 利用公共点转站示意图

(三部分点区对应于推行车所在的模拟轨道)

Fig.6 Transfer of coordinate systems using common points

(Three parts of points correspond to modeling railway)

2.4 线条中心的提取

文中基于 OpenCV 中的 $cvCanny$ 库函数, 通过增加自适应阈值设定的算法求得图像像素量级的线条边缘, 并在此基础上利用 Zernike 矩算子求取亚像素量级的线条中心。根据输入的灰度图像求出所有灰度值的平均值 avg 和标准差 sdv , 分别以 $avg + sdv$ 和 $avg - sdv$ 作为高、低阈值, 图像上灰度值大于 $avg + sdv$ 的点为被测物点, 小于 $avg - sdv$ 的点为背景。再计算图像的 Zernike 各阶矩 A_{00} 、 A_{11} 和 A_{20} , 精确地求得线条的左、右两个边缘后, 取二者中点作为线条中心, 即实现亚像素级线条中心的提取。

3 实验验证

文中使用 Point Grey 公司的两台 Blackfly PGE-13E4M-CS 型号相机进行实验, 实验过程如下。

3.1 坐标系转换精度验证

利用 V-STARS 建立轨道中心坐标系, 选取立体控制场中的 40 个点作为公共点, 求得轨道中心坐标系和主相机坐标系的转换关系。图 7 列出了各个公共点的转站误差。从图 7 中的数据可以看出, 系统的转站精度可以控制在 0.1 mm 以内。

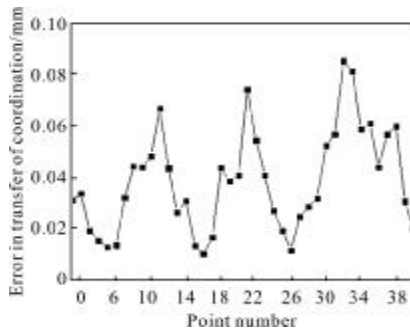


图 7 40 个公共点的转站误差

Fig.7 Errors of transfer of coordinate systems using 40 common points

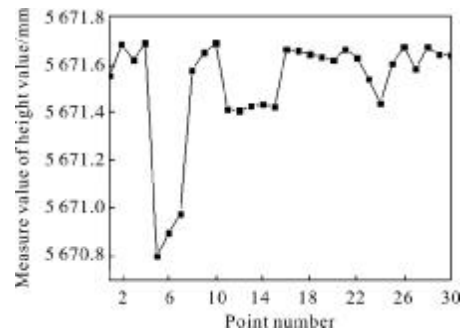


图 10 30 次导高测量值

Fig.10 Measured value of height value in frequency of 30

3.2 重复性精度验证

由于引起测量结果的误差包括系统误差和机械安装误差两部分,为了验证系统最终测量结果的重复性精度,进行如下实验:在一段模拟接触网导线的试验段,将推行车置于铁轨平面上,保持位置不变,对支架进行反复拆卸、安装,期间共拍摄 30 张图片。

以图 8 中左侧导线为例,求得 30 次拍摄得到的中心处导线的拉出值与导高值分别如图 9 和图 10 所示。

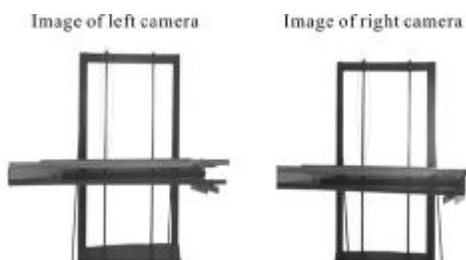


图 8 两相机所拍摄图像

Fig.8 Images of two cameras

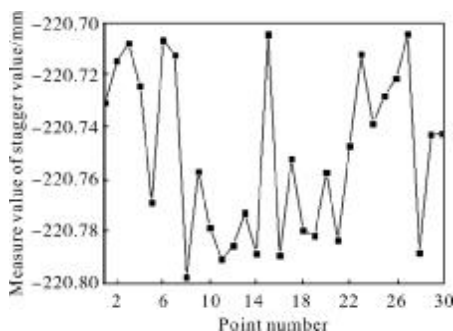


图 9 30 次拉出值测量值

Fig.9 Measured value of stagger value in frequency of 30

从图中 30 组数据对比可以看出,进行反复拆装时,系统在有测量需求的拉出值方向和导高方向的重复性精度均可以控制在 1mm 以内。

4 结 论

文中设计了一种接触网几何参数测量系统,能够实时得到接触网的几何参数,高效可靠。

(1) 系统基于双目视觉测量原理,利用两台相机获取图像,实现实时三维测量;

(2) 提出了一种适用于现场的高精度、快速转站方法,有效建立轨道中心坐标系,并将测量数据统一到该坐标系下;

(3) 实验结果表明,系统的重复性测量精度在 1 mm 以内。相比传统的测量方法,精度明显提高,为接触网几何参数的实时高精度测量提供了一种切实可行的解决方案。

参考文献:

[1] Zhang Tao. Study and Improvement on the OCS inspection system based on image processing[J]. Railway Locomotive & Car, 2009, 29(1): 68-71. (in Chinese)
张韬. 基于图像处理的接触网检测系统研究与改进[J]. 铁道机车车辆, 2009, 29(1): 68-71.

[2] Yu Zhigang, Wu Dongbo, Zhao Shaopeng, et al. The principle and application of catenary of geometrical parameters of the detector [J]. Shandong Science, 2009, 22 (3): 77-79. (in Chinese)
于志刚, 吴东波, 赵少鹏, 等. 接触网几何参数检测仪的原理及应用[J]. 山东科学, 2009, 22(3): 77-79.

[3] Liu Yinqiu, Han Tongxin, Liu Huiping. Study on OCS dynamic geometric parameters detection based on image processing[J]. Railway Locomotive & Car, 2012, 32(5): 86-91. (in Chinese)
刘寅秋, 韩通新, 刘会平. 基于图像处理的接触网动态几何参数测量研究[J]. 铁道机车车辆, 2012, 32(5): 86-91.

- [4] Yang Handong. Electrified railway catenary testing equipment development trend [J]. Science and Technology Communication, 2002 (2): 18-20. (in Chinese)
杨捍东. 电气化铁道接触网检测设备发展趋势[J]. 科学技术通讯, 2002 (2): 18-20.
- [5] Du Jianzhang. New methods of French bahn catenary inspection[J]. Electrified Railway, 1994(4): 39-42. (in Chinese)
杜建璋. 法国国铁接触网检测的新方法 [J]. 电气化铁道, 1994(4): 39-42.
- [6] Wu Guanggao, Zhao Qianzhao. Japan' s high -speed electrified railway design technology[J]. Electrified Railway, 1994(3): 1-4. (in Chinese)
吴光皋, 赵乾钊. 日本高速电气化铁路设计技术 [J]. 电气化铁道, 1994(3): 1-4.
- [7] Zhu Jigui, Yu Zhijing. The Principle of Vision Metrology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] Guo Yin, Liu Changjie, Zhu Jigui, et al. Research on measurement and calibration of the dynamic posture of High -speed trains. [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013(1): 021. (in Chinese)
郭寅, 刘常杰, 郝继贵, 等. 高速列车动态位姿测量方法及校准技术研究[J]. 光电子·激光, 2013(1): 021.
- [9] Zhu Jigui, Wang Dawei, Wang Xin, et al. Key techniques on optical coordinate measuring system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 296-299. (in Chinese)
郝继贵, 王大为, 王鑫, 等. 光学坐标测量系统中的关键技术[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 296-299.
- [10] Huang Yidan. The non -contact detection system of geometric parameters of catenary [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
黄艺丹. 接触网几何参数的非接触检测系统研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [11] Xu Kejia. Binocular stereo vision technology in the application of catenary geometric parameter measuring [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese)
徐可佳. 双目立体视觉技术在接触网几何参数测量中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [12] Li Muguo, Han Bing, Wang Jing, et al. Research on non -contact buoy 6-DOF detection system[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(1): 114-117. (in Chinese)
李木国, 韩冰, 王静, 等. 非接触式浮体六自由度检测系统研究[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(1): 114-117.
- [13] Chen Zhuo, Yang Xichen. Laser robot pose measurement based on machine vision [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(S1): 312-316. (in Chinese)
陈卓, 杨洗陈. 基于光电视觉的激光机器人姿态检测[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 312-316
- [14] Yuan Yun, Zhu Zhaokun, Zhang Xiaohu. Calibration method for large field of view camera based on infinite homography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0715002. (in Chinese)
苑云, 朱肇昆, 张小虎. 基于无穷单应的大视场摄像机标定方法[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0715002.