

文章编号:1671-1637(2018)02-0129-10

基于单目视觉的轨道固定桩基准点测量方法

傅勤毅¹, 胡杰华²

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 深圳市图敏智能视频股份有限公司, 广东 深圳 518109)

摘要:为了提高铁路线路固定桩基准点绝对坐标测量的效率,提出了一种新的测量方法;建立了无合作目标的单点测量模型,采用单目相机采集激光靶标图像,利用光饱和点重心法提取激光光斑中心;研究了平面直线成像规律,构造了基于正交直线的单应性矩阵求解方法,并对图像进行透视畸变校正;根据校正后的图像与靶标的几何相似关系,计算了激光光斑与靶标的横、纵向偏差;在室内环境下,进行了靶标图片拍摄的正交试验,计算与比较了横、纵向偏差。试验结果表明:在激光光斑和靶标固定的条件下,保持相机与靶标的距离不变,改变相机角度拍摄图片,经过透视变换校正后,横、纵向偏差与期望偏差分别为0.082、0.254 mm;相机拍摄角度固定,改变相机与靶标距离拍摄图片,经过透视变换校正后,横、纵向偏差与期望偏差分别为0.126、0.014 mm;在相机的角度、相机与靶标的距离都改变的情况下,拍摄的图片经过透视变换校正后,横、纵向偏差与期望偏差分别为0.329、0.064 mm;可见3组试验的横、纵向偏差与期望偏差的误差均小于0.5 mm;系统的水平距离测量误差范围为 ± 1.52 mm,高程测量误差范围为 ± 0.67 mm,根据轨道检查仪性能指标,线路水平距离误差范围为 ± 3.0 mm,高程误差范围为 ± 2.5 mm,因此,本文的测量方法精度满足轨道测量要求。水平距离测量误差完全由激光测距仪和倾角传感器决定,而高程测量误差是由激光测距仪、倾角传感器与激光点和靶心的偏移量共同决定的。

关键词:铁道工程;轨道测量;靶标识别;直线检测;Harris角点检测;Hough变换;透视变换

中图分类号:U216.3

文献标志码:A

Measurement method of reference points of railway fixed pile based on monocular vision

FU Qin-yi¹, HU Jie-hua²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;
2. Shenzhen TM Video Technology Co., Ltd., Shenzhen 518109, Guangdong, China)

Abstract: To improve the efficiency of absolute coordinates measurement of railway line fixed pile reference points, a new measurement method was proposed. The single-point measurement model of non-cooperative target was established. The laser target images were captured by monocular camera, the centroid method of saturation point was applied to exact laser spot center. The imaging rules of lines in plane were studied. A homography matrix solving method was constructed based on the orthogonal straight lines, and the image was corrected by perspective distortion. Then the horizontal and vertical offsets of laser spot and target were calculated based on the geometric similarity relationship between corrected image and target. In the indoor environment, orthogonal experiments of target image shooting were carried out. The horizontal and vertical offsets were calculated and compared.

收稿日期:2017-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51605495,61271356,51575541);中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2017G002-E)

作者简介:傅勤毅(1968-),男,湖南浏阳人,中南大学教授,工学博士,从事传感器与铁道测量方法研究。

通讯作者:胡杰华(1990-),女,湖北麻城人,深圳市图敏智能视频股份有限公司工程师。

Experimental result shows that under the condition that laser spot and target are fixed, the distance from camera to target is constant, and the camera's angle is only variable, after the images are shot and corrected by perspective transformation, the errors between the horizontal and vertical offsets and the expected values are 0.082 and 0.254 mm, respectively. Under keeping the camera's angle and changing the distance from camera to target, the errors of corrected images are 0.126 and 0.014 mm, respectively. When the camera's angle and the distance from camera to target both change, the errors of corrected images are 0.329 and 0.064 mm, respectively. The errors between the horizontal and vertical offsets and the expected values of 3 tests are less than 0.5 mm. The range of horizontal and height measure errors of the system are ± 1.52 and ± 0.67 mm, respectively. According to the index of railway inspection tester's performance, the horizontal measure errors of railway are within ± 3.0 mm and the height measure errors are within ± 2.5 mm. Obviously, the precision of the measurement method can meet the railway measurement requirements. The horizontal distance measure error is totally depended on the laser range finder and tilt sensor, while the height measure error is depended on the laser range finder, tilt sensor and the offsets of laser spot to the target. 8 figs, 26 refs.

Key words: railway engineering; track measurement; target recognition; line detection; Harris corner detection; Hough transformation; perspective transformation

Author resumes: FU Qin-yi(1968-), male, professor, PhD, qyfu@csu.edu.cn; HU Jie-hua(1990-), female, engineer, hujiehua@tmvideo.cn.

0 引 言

列车的平稳运行与轨道平顺性指标密切相关^[1],目前,在轨道参数测量中,效率最高的是“绝对+相对”测量方法,即采用全站仪进行绝对控制点测量,结合惯性基准的相对测量数据,采用数据融合方法实现轨道内、外部静态几何参数一体化测量。由于铁路运输的行车密度增大,使得可以用于养护维修作业的“天窗点”越来越短,另一方面,铁路线路里程越来越长,提高工务段作业效率更加迫切。采用“绝对+相对”测量方法时,在每个控制点都需要重新整平设站全站仪,影响了测量效率,很难满足工务段线路养护高效的需要^[2-3]。

针对激光光斑中心定位的问题,国内外学者进行了一系列研究,Ioannou 等针对数字图像中的圆形识别提出了一种两步提取圆心法,首先通过 2D 的 Hough 变换检测到圆心^[4],然后通过寻找半径直方图中的峰值确定圆的一个直径,从而可以求得圆心;闵永智等通过监测激光光斑对无砟轨道的表面沉降,针对传统光斑定位技术误差较大的问题,研究了光斑中心精确定位,提出了基于重心的灰度分布曲线拟合方法^[5];王会峰等针对激光靶标图像提出了一种基于重心法的不规则光斑中心检测法^[6];孔兵等针对传统的重心法、Hough 变换法等检测精度或速度上的不足,提出了一种基于圆拟合的激光

光斑中心检测算法,依据最小二乘原理采用圆来逼近激光光斑轮廓,可以同时检测光斑中心和半径^[7];章秀华等针对 CCD 相机采集到的光斑信号强度分布极不均匀问题,提出了一种利用目标图像梯度方向信息改进的二维 Hough 变换法^[8];王丽丽等提出了利用激光光斑不饱和点进行高斯分布拟合,以拟合函数最大值点作为中心的方法^[9]。

在实际工程应用中,靶标平面与相机光轴都有一定的倾斜角度,导致拍摄的图片存在透视投影失真,要实现高精度测量,必须对图像进行透视失真校正。Fan 等通过全站仪对准,并且使用姿态倾角传感器和角度编码器辅助,经过坐标变换得到相机的旋转矩阵和平移矩阵,再进行逆变换恢复出未失真的图像^[10],此方法精度较高,但是由于使用了全站仪导致测量效率低;Arulmozhi 等针对车牌自动识别系统中车牌的检测与倾斜校正,提出了一种通过检测边界直线计算倾斜角度,根据倾斜角度进行图像歪斜校正的方法^[11];Gong 等使用一种基于数学形态学的方法和 radon 变换法实现了车牌图像的倾斜校正^[12];刘慧娟通过正方形 4 个顶点,利用双线性的控制点变换和插值算法实现了对图像仿射变换失真的校正^[13];Seedahmed 提出了一种直接的 2D 投影变换方法,以实现平面透视失真校正^[14];Shan 等比较了直接线性变换法、共线性和共面性等变换法,给出了几种变换方法适用的条件^[15-16];Longuet-Higgins 提

出了一种通过2个视图进行平面重建的“八点算法”^[17]。进行透视失真校正,需要依赖成像物体与所成图像上对应的特征点、线的关系,所以需要提取图像特征点。图像特征点提取的算法可以分为2类:一类是Harris等提出的经典Harris角点检测法^[18]和Smith等提出的Susan角点检测法^[19];另一类是Lowe等提出的采用特征描述法进行特征匹配的SIFT(Scale Invariant Feature Transform)法、SURF(Speeded up Robust Features)法和DAISY法^[20-22]。

针对轨道测量效率低的问题,本文提出一种可替代全站仪的铁路固定桩基准点测量方法。将无合作目标测量原理和单目视觉技术引入到铁路固定桩基准点的绝对测量中,结合激光测距仪和倾角传感器,测量轨道到基准点的水平距离和垂直距离。为了避免人眼判别激光对准基准点靶心的误差导致测量精度降低,采用单目相机实时拍摄激光光斑与靶心的图片,通过图像处理技术建立激光光斑中心与靶心的关系,据此修正轨道到基准点的水平距离和高程,提高测量的精度。在本文的应用中,图像处理有激光光斑中心的提取,特征点、线的提取,透视变换校正和偏差计算4个步骤。针对前述激光中心提取的方法在检测精度或速度上的不足,本文提出了一种利用光饱和点的重心法进行激光光斑中心提取的方法;基于仿射变换的图像畸变校正不能有效校正透视畸变,线性变换的方法相对较复杂,“八点算法”简单但鲁棒性不强,本文在“八点算法”的基础上,结合正交直线的成像规律,提出了一种基于正交直线的透视畸变校正方法;特征描述法需要进行大量特征匹配,实时性较差,考虑到Sobel算子对垂直和方向边缘敏感^[23],使用Sobel算子作为方向导数,高斯函数作为窗函数的Harris角点检测方

法^[24],使用Hough变换提取直线,筛选特征点。在此基础上求解单应性矩阵,实现图像的畸变校正,提高算法的鲁棒性。

1 系统测量原理

1.1 测量原理

图1为基于单目视觉的轨道基准点测量原理:点 P 为轨道固定桩基准点(即靶标中心); P' 为激光光斑中心; e_x 为激光光斑与基准点在横向(x 向)的偏差; e_y 为激光光斑与基准点在纵向(y 向)的偏差; L 为轨道内侧面到靶标平面的水平距离; S 为采用基准点测量装置测量的标靶到激光测距仪的斜向距离; θ 为采用倾角传感器测量的激光测距仪与水平方向的角度; H 为靶标到轨道顶面的高度; l 为激光测距仪光心到轨道内侧面的水平距离; h 为激光测距仪光心到钢轨轨面的垂向距离。基准点测量装置安装在轨道检查仪(简称“轨检仪”)上。测量时,轨检仪静止在基准点与轨道的垂足点处,调整基准点测量装置的激光角度,使激光光斑落在靶标面上。相机拍摄靶标平面的图像,通过图像处理算法计算激光光斑中心偏移靶心的距离,推算基准点的水平距离和高程,最后根据轨检仪的测量参数及线路参数解计算当前点轨道中心的水平距离平面坐标和高程。

根据图1,可以推导出水平距离 L 和高程 H 分别为

$$\begin{cases} L = S \cos(\theta) + l \\ H = S \sin(\theta) + h + e_y \end{cases} \quad (1)$$

1.2 平面透视变换

在不考虑镜头畸变时,相机成像遵循透视投影的几何原理。图2为靶标平面透视成像的过程,其

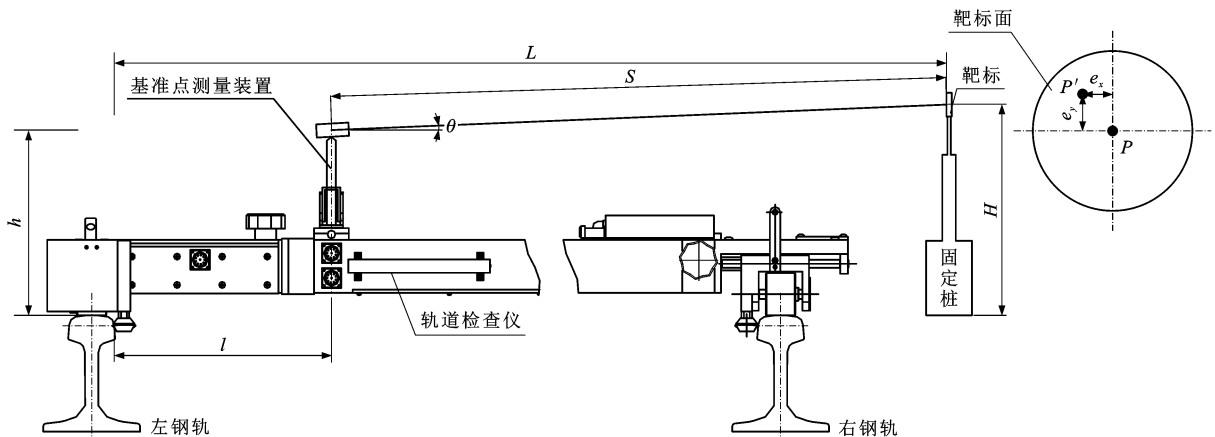


图1 轨道基准点的绝对测量原理

Fig. 1 Absolute measuring principle of railway reference points

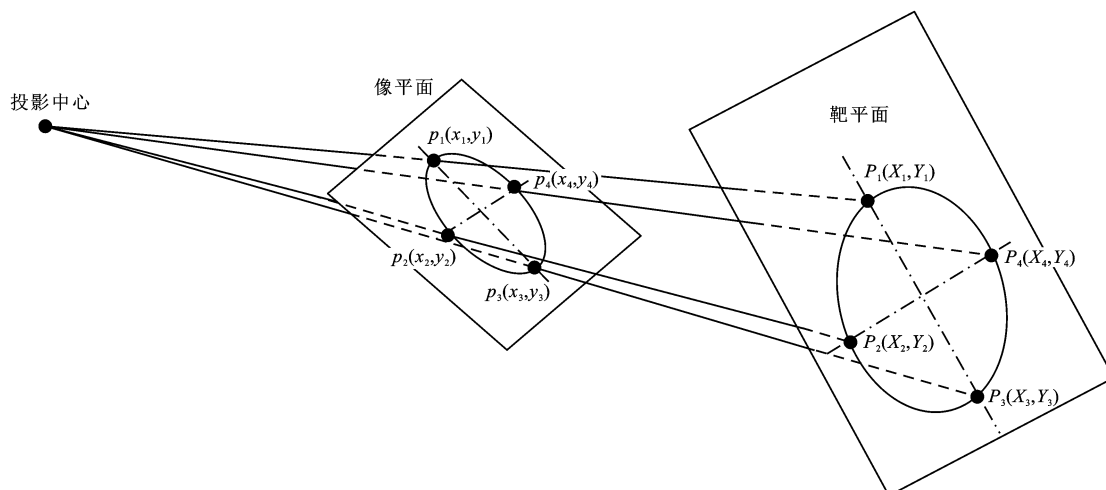


图2 靶标平面成像过程

Fig. 2 Imaging process of target plane

中: $P_1(X_1, Y_1)$ 、 $P_2(X_2, Y_2)$ 、 $P_3(X_3, Y_3)$ 、 $P_4(X_4, Y_4)$ 分别为靶标平面上圆形与“十”字的 4 个交点, $X_1 \sim X_4$ 分别为点 $P_1 \sim P_4$ 的横坐标, $Y_1 \sim Y_4$ 分别为点 $P_1 \sim P_4$ 的纵坐标; $p_1(x_1, y_1)$ 、 $p_2(x_2, y_2)$ 、 $p_3(x_3, y_3)$ 、 $p_4(x_4, y_4)$ 分别为对应的成像平面上的 4 个点, $x_1 \sim x_4$ 分别为点 $p_1 \sim p_4$ 的横坐标, $y_1 \sim y_4$ 分别为点 $p_1 \sim p_4$ 的纵坐标。

设 (X_i, Y_i) 为靶标平面上任意一点, (x_i, y_i) 是其在图像上对应的点, 根据几何学原理, 这种映射关系可以表示为^[14]

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{M} 为 3×3 的单应性矩阵; m_{ij} 为 \mathbf{M} 的第 i 行第 j 列元素。

\mathbf{M} 反映了从靶标平面到相机成像平面的投影映射关系, 求解相机成像平面与靶标平面的关系即是求解矩阵 \mathbf{M} 。求得透视变换矩阵后, 由式(2)可推出逆透视变换公式为

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} x_i & y_i & 1 \end{bmatrix}^T}{m_{31}x_i + m_{32}y_i + m_{33}} \quad (4)$$

根据式(4)可以实现图像的透视失真校正, 从而根据相似变换求出激光光斑的偏差。

2 图像处理算法

在图像处理前, 需对相机进行标定来消除镜头

畸变^[25], 提高图像处理精度。依据已有平面标定的实现方法^[26], 采用黑白平面棋盘格标定相机, 使用 MATLAB2015b 得到相机的内参矩阵和畸变参数, 对图片进行镜头畸变校正。

2.1 激光光斑中心提取算法

激光光斑的光饱和点区域实际上构成一个椭圆, 光斑中心 (x_0, y_0) 为椭圆中心。由于椭圆的对称性, 其中心也是重心, 对饱和点使用重心法即可求出 (x_0, y_0) , 具体算法如下。

通过阈值法提取出光饱和点区域, 计算公式为

$$I = \begin{cases} 0 & I_{i,j} < 255 \\ 255 & I_{i,j} = 255 \end{cases} \quad (5)$$

式中: I 为图像新的灰度值; $I_{i,j}$ 为图像第 i 行第 j 列的灰度值。

使用重心法提取饱和区域重心, 计算公式为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in A} i I_{i,j}}{\sum_{(i,j) \in A} I_{i,j}} \\ y_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in A} j I_{i,j}}{\sum_{(i,j) \in A} I_{i,j}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: A 为图像行、列号组成的集合。

从提取算法可以看出: 基于光饱和区域的重心法不受阈值和背景的影响, 并且算法实现简单。

2.2 特征提取算法

需要根据靶标平面与图像上的特征直线、特征点的对应关系求解单应性矩阵 \mathbf{M} , 所以特征直线与特征点的精确提取尤为关键。本文采用鲁棒性强的 Hough 变换提取特征直线, 采用改进的 Harris 角点

检测方法提取特征点,具体步骤如下。

Step 1: 采用 Sobel 算子作为方向导数,高斯函数作为窗函数的改进 Harris 角点检测方法^[13]对彩色图像进行角点检测,检测结果见图 3(a)。

Step 2: 提取的特征点和直线均为黑色,在 RGB 颜色空间中,黑色坐标为(0,0,0),根据欧氏距离公式,计算彩色图像每一点与黑色的距离,根据色彩距离进行图像分割,求解方法为

$$\begin{cases} E_{(i,j)} = \sqrt{z_{R(i,j)}^2 + z_{G(i,j)}^2 + z_{B(i,j)}^2} \\ I_{b(i,j)} = 0 \quad E_{(i,j)} < T \\ I_{b(i,j)} = 1 \quad E_{(i,j)} \geq T \end{cases} \quad (7)$$

式中: $E_{(i,j)}$ 为图像上第*i*行第*j*列的像素点色彩与黑色的欧氏距离; $z_{R(i,j)}$ 、 $z_{G(i,j)}$ 、 $z_{B(i,j)}$ 分别为彩色图像在 RGB 颜色空间中 R、G、B 通道的分量; $I_{b(i,j)}$ 为二值图像第*i*行第*j*列的像素点的灰度值; T 为分割阈值。

二值化后,使用形态学操作的方法提取图像特征骨架,通过 Hough 变换提取图片中的 2 条直线,提取结果见图 3(b)。

Step 3: 根据特征点在直线上对 Step 1 提取的角点进行筛选,对于 2 个点之间欧氏距离小于 3 个像素的点,取其算数平均值进行合并,最后得到特征点见图 3(c)。

2.3 透视变换坐标映射

根据透视变换的平面成像原理,式(2)可以写成如下形式

$$\begin{cases} X_i = \frac{m_{11}x_i + m_{12}y_i + m_{13}}{m_{31}x_i + m_{32}y_i + m_{33}} \\ Y_i = \frac{m_{21}x_i + m_{22}y_i + m_{23}}{m_{31}x_i + m_{32}y_i + m_{33}} \end{cases} \quad (8)$$

由于透视矩阵 M 只有 8 个自由度,为了求解方便,通常取 $m_{33}=1$ 。下面分析靶标“十”字的水平和竖直直线与图像中 2 条直线之间的关系。

设靶心坐标为(X_c, Y_c),则靶标上的 2 条正交直线可以分别表示为

$$\begin{cases} X = X_c \\ Y = Y_c \end{cases} \quad (9)$$

式中: X 为靶标竖直直线上一点的横坐标; Y 为靶标水平直线上一点的纵坐标。

设靶标的竖直直线在图像上成像的直线的斜率的倒数为 n ,在横轴上截距为 q ,(X, Y)为直线上任意一点,则直线方程可以表示为

$$X = nY + q \quad (10)$$

设靶标的水平直线在图像上成像的直线的斜率为 k ,在纵轴上的截距为 b ,则直线方程可以表示为

$$Y = kX + b \quad (11)$$

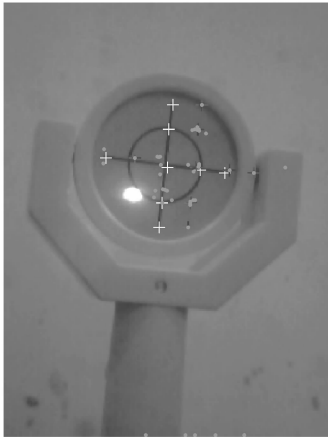
将式(8)、(9)代入式(10)、(11)中可得

$$X_c = \frac{(m_{11}n + m_{12})Y + m_{11}q + m_{13}}{(m_{31}n + m_{32})Y + m_{31}q + 1} \quad (12)$$

$$Y_c = \frac{(m_{21} + m_{22}k)X + m_{22}b + m_{23}}{(m_{31} + m_{32}k)X + m_{32}b + 1} \quad (13)$$

式(12)、(13)对直线上任意点都成立,可得

$$\begin{cases} nm_{11} + m_{12} - nX_cm_{31} - X_cm_{32} = 0 \\ qm_{11} + m_{13} - qX_cm_{31} = X_c \\ -(ny_s + q)m_{21} - ym_{22} - m_{23} + \\ Y_s(ny_s + q)m_{31} + Y_sy_m_{32} = Y_s \\ m_{21} + km_{22} - Ym_{31} - kY_cm_{32} = 0 \\ bm_{22} + m_{23} - bY_cm_{32} = Y_c \\ -x_rp_{12} - (kx_r + b)p_{12} - p_{13} + \\ X_rx_rp_{31} + X_r(kx_r + b)p_{32} = X_r \end{cases} \quad (14)$$



(a) 角点检测



(b) 直线提取



(c) 特征点筛选

图 3 特征点提取

Fig. 3 Extraction of feature points

式中: x_r 为与靶标水平直线上某点 r 对应的图像上点的横坐标; y_s 为与靶标水平直线上某点 s 对应的图像上点的纵坐标; X_r 为与靶标竖直直线上某点 r

对应的图像上点的横坐标; Y_s 为与靶标竖直直线上某点 s 对应的图像上点的纵坐标。

式(14)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & k & 0 & -X_c & -kX_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & 1 & 0 & -bX_c \\ n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -nY_c & -Y_c \\ q & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -qY_c & 0 \\ x_r & kx_r + b & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_rX_r & -(kx_r + b)X_r \\ 0 & 0 & 0 & ny_s + q & y_s & 1 & -(ny_s + q)Y_s & -Y_sy_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{31} \\ m_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ X_c \\ 0 \\ Y_c \\ X_r \\ Y_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

由式(15)可以看出:求解透视变换矩阵 \mathbf{M} , 除了两直线的斜率、截距, 还需要水平直线上 2 个点的坐标。求解出单应性矩阵 \mathbf{M} 后, 再根据式(4)对原

图像进行坐标映射, 得到校正后的图像, 见图 4。很明显, 经过校正后, 靶标图像靶平面的“十”字由倾斜变为正立。



(a) 校正前



(b) 校正后

图 4 透视校正前后的靶标图像

Fig. 4 Target image before and after perspective correction

2.4 偏移量计算

求出平面单应性矩阵 \mathbf{M} 后, 由式(4)进行逆透视变换。逆透视变换完成后, 以靶标中心为原点, “十”字为坐标系, 以像素为单位, 靶标圆的直径为 d , (x_0, y_0) 为光斑中心; 设靶标圆的实际直径为 D , 根据图像几何相似关系可得横、纵向偏差 X_0 、 Y_0 。分别为

$$\begin{cases} X_0 = x_0 D / d \\ Y_0 = y_0 D / d \end{cases} \quad (16)$$

3 试验结果误差分析

3.1 试验

图 5(a) 为无合作目标基准点测量系统试验装置, 图 5(b) 为试验激光靶标。其中靶标圆直径为

24 mm, “十”字的直线长度为 40 mm, 图像采集速度最高可达 $30 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$, 有效像素为 640×320 。在室内环境下搭建了测量系统, 使用图 5 的试验装置, 在 3 种情况下分别拍摄了 3 组激光靶标图片, 条件分别为相机与靶标的距离改变、相机拍摄的角度改变以及拍摄的距离和角度同时改变。利用 MATLAB2015b 编写程序对图像进行处理, 提取激光光斑中心, 计算出逆透视变换后激光光斑与靶标中心的偏差。

试验 1: 靶标固定, 使激光光斑中心偏差为横向 -10.0 mm , 纵向 9.0 mm 。保持相机到靶标的距离不变, 改变相机拍摄角度拍摄一组 12 幅图片。

按照本文的图像处理算法所得计算结果见图 6, 其中 μ 为期望值, σ 为标准差, 可以看出: 对同

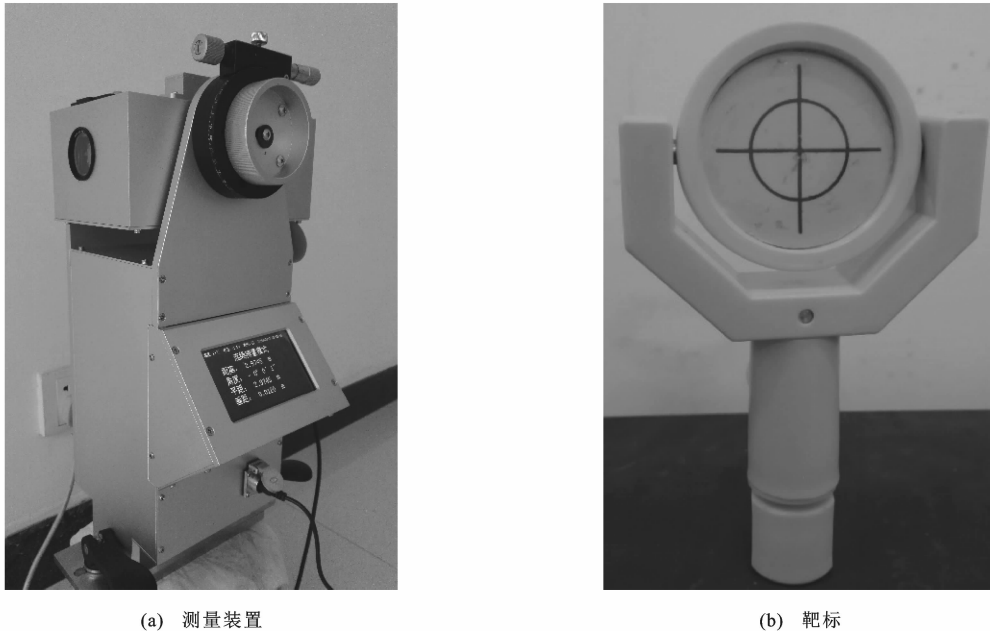


图5 无合作目标基准点测量系统

Fig. 5 Measurement system without cooperative target datum points

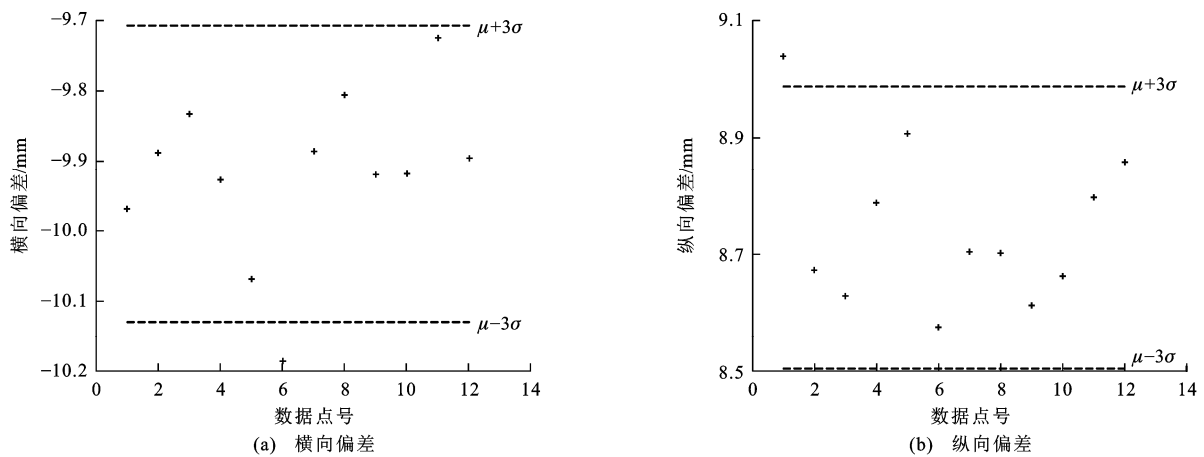


图6 试验1图像处理结果

Fig. 6 Image processing result of experiment 1

一个点同距离不同角度拍摄的图片,横向偏差均值为 -9.918 mm ,与期望偏差 -10.0 mm 的误差为 0.082 mm ,点落在 $\mu \pm 3\sigma$ 范围的概率为 91.6% ;纵向偏差均值为 8.746 mm ,与期望偏差 9.0 mm 的误差为 0.254 mm ,点落在 $\mu \pm 3\sigma$ 范围的概率为 91.6% 。

试验2:靶标和激光点位置固定,使激光光斑中心偏差为横向 -7.5 mm ,纵向 -15.5 mm 。相机拍摄角度固定,改变相机与靶标的距离,每次改变距离约为 5 cm ,以免靶标不在相机的拍摄范围内,拍摄一组12幅图片。

图像处理结果见图7,可以看出:激光光斑在靶标上的位置不变,改变拍摄距离时,横向偏差均值为 -7.324 mm ,与期望偏差 -7.5 mm 的误差为

0.176 mm ,点落在 $\mu \pm 3\sigma$ 范围的概率为 100% ;纵向偏差均值为 -15.514 mm ,与期望偏差 15.5 mm 的误差为 0.014 mm ,点落在 $\mu \pm 3\sigma$ 范围的概率为 91.6% 。

试验3:靶标和激光点位置固定,使激光斑点对准靶心,相机拍摄角度和相机与靶标的距离都改变,拍摄一组12幅图片。

图像处理结果见图8,可以看出:对于不同的拍摄距离和角度,横向偏差均值为 0.329 mm ,与期望偏差 0 的误差为 0.329 mm ,点落在 $\mu \pm 3\sigma$ 范围的概率为 83.3% ;纵向偏差均值为 -0.064 mm ,与期望偏差 0 的误差为 0.064 mm ,点落在 $\mu \pm 3\sigma$ 范围的概率为 91.6% 。

从3组试验结果可知:无合作目标基准点测量

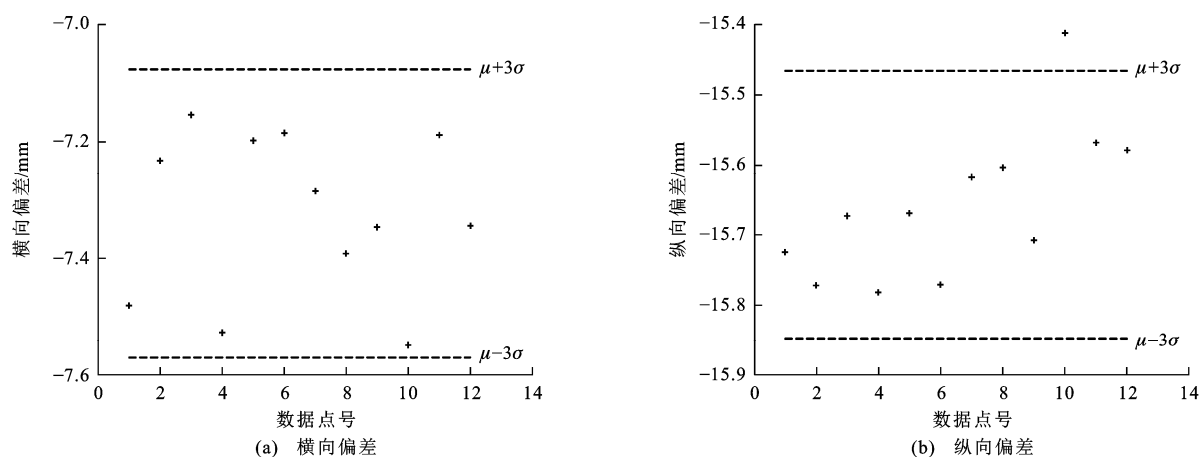


图 7 试验 2 图像处理结果

Fig. 7 Image processing result of experiment 2

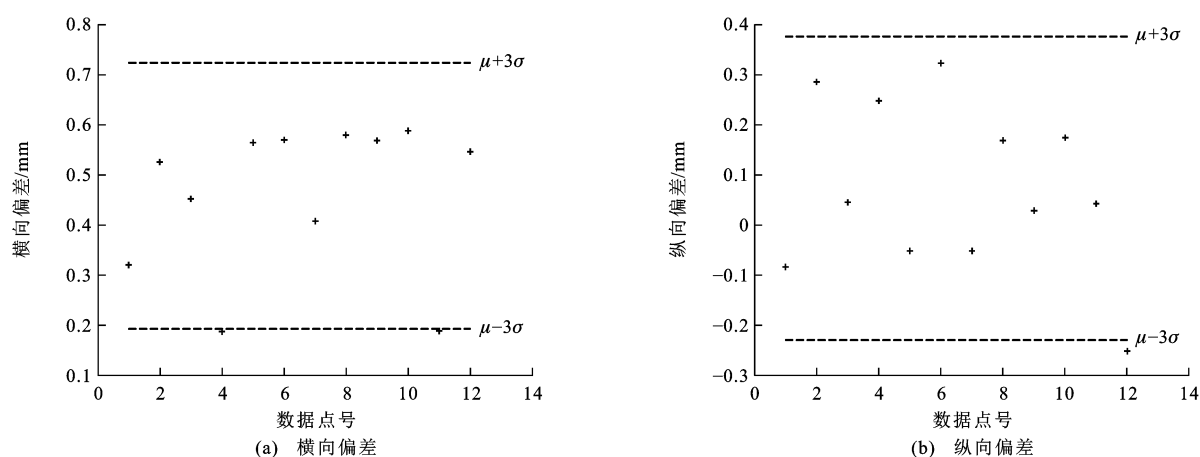


图 8 试验 3 图像处理结果

Fig. 8 Image processing result of experiment 3

系统的图像处理算法不受相机安放角度和距离的影响,图像处理计算的激光点横、纵向偏差与期望偏差的误差小于 0.5 mm。调整基准点测量装置使激光打在靶面,并且拍摄一幅稳定的图片,时间小于 3 s,采集到图像后,图像处理可以在测量结束后再进行,不占用“天窗点”(铁路工务段维修时间)。

3.2 误差分析

整个测量系统的精度由激光测距仪、倾角传感器、激光点与靶心的偏差决定。根据式(1)可以得到水平距离和高程的误差计算公式为

$$\begin{cases} \Delta L = \Delta[S \cos(\theta)] + \Delta l \\ \Delta H = \Delta[S \sin(\theta)] + \Delta h + \Delta e_y \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\Delta[S \cos(\theta)]$ 为 $S \cos(\theta)$ 的测量误差; $\Delta[S \sin(\theta)]$ 为 $S \sin(\theta)$ 的测量误差; ΔL 为 L 的测量误差; ΔH 为 H 的测量误差; Δl 为 l 的测量误差; Δh 为 h 的测量误差; Δe_y 为 e_y 的测量误差。

l 和 h 由机械结构保证,相对于整个测量系统,

误差可以忽略,式(17)简化后为

$$\begin{cases} \Delta L = -S \sin(\theta) \Delta \theta + \cos(\theta) \Delta S \\ \Delta H = S \cos(\theta) \Delta \theta + \sin(\theta) \Delta S + \Delta e_y \end{cases} \quad (18)$$

式中: ΔS 为 S 的测量误差; $\Delta \theta$ 为 θ 的测量误差。

可以看出:水平距离误差完全由激光测距仪和倾角传感器决定,而高程误差由激光测距仪、倾角传感器与激光点偏移靶心的距离共同决定。激光测距仪的误差为 1.5 mm,倾角传感器的误差为 0.002° ,由 3.1 节中的试验可知靶标竖直方向误差 Δe_y 为 0.5 mm。根据《有砟轨道固定桩设置及测量暂行技术条件》(TJ/GW 106—2013),固定桩高于轨面 0.5~0.8 m,高度差为 0.3 m,按照固定桩与外轨距离 1.5~6.0 m 来计算,可以得到 θ 的范围为 $-5.71^\circ \sim 5.71^\circ$ 。将数据代入式(18)可得

$$\begin{cases} -1.52 < \Delta L < 1.52 \\ -0.67 < \Delta H < 0.67 \end{cases} \quad (19)$$

由式(19)可以看出:高程误差主要受到激光点

与靶心的偏差影响。根据铁道轨道检查仪性能指标要求,线路水平距离误差范围为 $\pm 3.0\text{ mm}$,线路高程误差范围为 $\pm 2.5\text{ mm}$,显然,本文测量方法的精度满足轨道测量要求。

4 结 语

(1)提出了一种基于单目视觉的无合作目标的轨道固定桩基准点的测量方法,采用激光测距和单目相机拍摄靶标图像代替全站仪,结合图像处理算法计算固定桩基准点的水平距离、高程。通过3组试验表明:图像处理后的激光光斑横、纵向偏差均在 0.5 mm 以内。

(2)在试验的基础上,对系统误差进行了分析,结果表明:系统的水平距离测量误差范围为 $\pm 1.52\text{ mm}$,高程测量误差范围为 $\pm 0.67\text{ mm}$,根据铁道轨道检查仪性能指标要求,水平距离误差范围为 $\pm 3.0\text{ mm}$,线路高程误差范围为 $\pm 2.5\text{ mm}$,本文的测量方法精度满足轨道测量要求。

(3)为了进一步提高测量精度,在实际应用过程中,对于每一个基准点,可以考虑每个基准点连续拍摄3幅图片,求取平均值以进一步提高测量精度。

(4)图像识别算法受靶标影响比较大,未来进一步工作将研究靶标线更细,圆形靶标更改为正方形,提高特征点提取精度,以达到更高的测量精度。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 任铁南. 基于现代检测技术的高速铁路曲线状态评价与整正方法[D]. 成都:西南交通大学,2014.
REN Yi-nan. Based on evaluation of the state of modern high-speed rail curve detection technology and correction methods[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [2] 姚连璧,孙海丽,王 璇,等. 基于激光跟踪仪的轨道静态平顺性检测系统[J]. 同济大学学报:自然科学版,2016,44(8):1260-1265.
YAO Lian-bi, SUN Hai-li, WANG Xuan, et al. Detecting system of track static regularities based on the laser tracker[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(8): 1260-1265. (in Chinese)
- [3] 朱洪涛,徐宜敏,吴维军. 全站仪免置平自由设站及其测量方法[J]. 铁道标准设计,2013(6):25-28.
ZHU Hong-tao, XU Yi-min, WU Wei-jun. Free stationing and its surveying method for electronic total station without manual leveling[J]. Railway Standard Design, 2013(6): 25-28. (in Chinese)
- [4] IOANNOU D, HUDA W, LAINE A F. Circle recognition through a 2D Hough Transform and radius histogramming[J]. Image and Vision Computing, 1999, 17(1): 15-26.
- [5] 闵永智,康 飞,党建武,等. 无砟轨道沉降监测系统光斑中心定位技术研究[J]. 铁道学报,2014,36(2):81-85.
MIN Yong-zhi, KANG Fei, DANG Jian-wu, et al. Technology of light spot center positioning of ballastless track settlement monitoring system[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(2): 81-85. (in Chinese)
- [6] 王会峰,汪大宝,刘上乾. 激光靶标图像识别和测量方法研究[J]. 激光与红外,2007,37(6):564-566,574.
WANG Hui-feng, WANG Da-bao, LIU Shang-qian. Research on auto identify and measurement approach of laser target image[J]. Laser and Infrared, 2007, 37(6): 564-566, 574. (in Chinese)
- [7] 孔 兵,王 昭,谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. 红外与激光工程,2002,31(3):275-279.
KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yu-shan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 275-279. (in Chinese)
- [8] 章秀华,杨坤涛. 一种改进的二维 Hough 变换提取激光光斑参数方法[J]. 激光与红外,2006,36(10):995-997.
ZHANG Xiu-hua, YANG Kun-tao. An improved 2D Hough transform method for extracting laser spot parameter[J]. Laser and Infrared, 2006, 36(10): 995-997. (in Chinese)
- [9] 王丽丽,胡中文,季杭馨. 基于高斯拟合的激光光斑中心定位算法[J]. 应用光学,2012,33(5):985-990.
WANG Li-li, HU Zhong-wen, JI Hang-xin. Laser spot center location algorithm based on Gaussian fitting[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 985-990. (in Chinese)
- [10] FAN Yi-yan, ZHAO Bin. Combined non-contact coordinate measurement system and calibration method[J]. Optics and Laser Technology, 2015, 70: 100-105.
- [11] ARULMOZHI K, ARUMUGA PERUMAL S, THANOOJA PRIYADARSINI C S, et al. Image refinement using skew angle detection and correction for Indian license plates[C]//IEEE. 2012 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research. New York: IEEE, 2012: 1-4.
- [12] GONG Li-xia, HU Hong-ping, BAI Yan-ping. Vehicle license plate slant correction based on mathematical morphology and Radon transformation[C]//IEEE. 6th International Conference on Natural Computation. New York: IEEE, 2010: 3457-3461.
- [13] 刘慧娟. 快速响应码图像的全方位识别[J]. 仪器仪表学报, 2006,27(4):376-379,388.
LIU Hui-juan. Omnidirectional recognition of quick response code image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(4): 376-379, 388. (in Chinese)
- [14] SEEDAHMED G H. Direct retrieval of exterior orientation parameters using a 2D projective transformation[J]. Photogrammetric Record, 2006, 21(115): 211-231.
- [15] SHAN Jian, SHI Yuan-yuan, LIU Jia, et al. Comparative study of linear feature transformation techniques for mandarin digit string recognition[C]//ISCA Archive. The 2th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing.

- Hong Kong: SIG-CSLP, 2002: 1-4.
- [16] EL-ASHMAWY K L A. A comparison study between collinearity condition, coplanarity condition, and direct linear transformation(DLT) method for camera exterior orientation parameters determination[J]. *Geodesy and Cartography*, 2015, 41(2): 66-73.
- [17] LONGUET-HIGGINS H C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections[J]. *Nature*, 1981, 293: 133-135.
- [18] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//TAYLOR C J. *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*. Manchester: AVC, 1988: 147-151.
- [19] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN-a new approach to low level image processing[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [20] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [21] BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOL L. SURF: speeded up robust features[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 3951: 404-417.
- [22] TOLA E, LEPETIT V, FUA P. DAISY: an efficient dense descriptor applied to wide-baseline stereo[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(5): 815-830.
- [23] 袁春兰,熊宗龙,周雪花,等. 基于 Sobel 算子的图像边缘检测研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(1): 85-87.
YUAN Chun-lan, XIONG Zong-long, ZHOU Xue-hua, et al. Study of infrared image edge detection based on Sobel operator[J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(1): 85-87. (in Chinese)
- [24] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale and affine invariant interest point detectors[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1): 63-86.
- [25] 柳晨光,初秀民,谢 朔,等. 基于单目视觉的水面船舶多目标定位方法[J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15(5): 91-100.
LIU Chen-guang, CHU Xiu-min, XIE Shuo, et al. Multi-target locating method of surface ship based on monocular vision[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(5): 91-100. (in Chinese)
- [26] LU Ping-ping, LIU Qing, GUO Jian-ming. Camera calibration implementation based on Zhang Zhengyou plane method[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2016, 359: 29-40.