

DOI: 10.3901/JME.2013.16.039

轨道检测中激光摄像式传感器标定方法研究*

占栋 于龙 肖建 陈唐龙
(西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

摘要: 激光摄像式传感器标定是采用激光摄像技术进行轨道几何参数检测的难点。建立基于非线性最小二乘法及高斯-牛顿最优化计算方法的激光摄像式传感器标定模型。在专用调整平台上采用棋盘格进行标定试验,获取200组标定数据。分别运用非线性最小二乘法及高斯-牛顿最优化计算方法,求解激光摄像式传感器标定模型参数。在上述200组标定数据基础上,另取200组数据共同参与标定误差分析。结果表明,高斯-牛顿最优化计算方法较非线性最小二乘计算方法标定精度在水平方向和垂直方向分别提高0.155 mm、0.150 mm。针对激光摄像式传感器在轨道检测中的应用,提出采用高斯-牛顿最优化计算方法进行标定。给出轨道检测中基于高斯-牛顿最优化计算方法的轨距及转向架倾摆角求解方法。

关键词: 轨道检测 激光 摄像机 标定

中图分类号: U216

Calibration Approach Study for the Laser Camera Transducer of Track Inspection

ZHAN Dong YU Long XIAO Jian CHEN Tanglong
(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Utilizing laser and camera for track geometry inspection, calibration approach for laser photogrammetric transducers is a key issue. The calibration models constructed by the nonlinear least-square method and Gaussian-Newton optimization computational method are presented respectively. The transducer measurement models parameters are acquired by the above-mentioned approaches making use of 200 individual data in the checkerboard plane by the dedicated test platform. Moreover, the other 200 individual data are added for different algorithms calibration errors analysis. The experimental results show that Gaussian-Newton algorithm is more accurate than the nonlinear least-square algorithm in camera calibration. The horizontal and vertical accuracy can improve 1.55 mm and 1.50 mm by use of Gaussian-Newton algorithm. While using laser photogrammetric transducers in track inspection vehicle, Gaussian-Newton calibration algorithm is proposed. Track gauge and bogie tilting angle computational formulations are given by Gaussian-Newton algorithm in the track inspection system.

Key words: Track inspection Laser Camera Calibration

0 前言

轨道检测是铁路工务部门的基础任务。轨检车是用于轨道参数连续动态检测的专用车辆,其目的是定期对轨道进行检测,掌握轨道质量状态,指导铁路工务部门进行轨道维护,确保铁路运输安全。轨道几何参数是轨检车主要检测项目,是影响列车运行安全及平稳性的重要指标。随着列车运行速度的不断提高,从轨道铺设到后期检修都提出了更高

要求,精度均需要控制在毫米级。现代高精度测量手段是解决轨道测量问题的唯一途径。激光摄像式传感器具有量程大、精度高、稳定可靠等优点,最早被国外使用,于近些年被运用于国内轨道测量中,代表当前轨检最先进技术,能够较好解决铁路轨道测量问题。

采用激光摄像技术进行轨道几何参数检测,前提需要对其标定,然而,受车底安装空间限制及检测方式决定,摄像机参考系与轨道参考系存在多个自由度变换,此外,摄像机镜头存在非线性畸变,因此,轨道测量中,对激光摄像式传感器进行高精度标定,其难点是对激光图像进行多自由度坐标变

* 国家自然科学基金(51177137)和国家高技术研究发展计划(863 计划, 2011AA11A102)资助项目。20121025 收到初稿,20130320 收到修改稿

换及镜头畸变补偿。

激光摄像式传感器标定, 常见的标定方法有拉丝标定法^[1-3]、立体靶标标定法^[4-5]、基于标定板的共面标定法^[6-8]。拉丝法利用交比不变性定理进行标定, 该方法标定速度快, 但获取的标定点数量有限, 适用于精度要求不高的快速标定。立体靶标标定法采用空间形状已知的立体物体作为激光切面投射面, 获取靶标图像特征点进行标定, 但图像特征不够明显, 高精度提取难度大。采用标定板进行共面标定, 图像特征明显、易于提取, 除标定点数量可控制外, 还可以综合考虑镜头畸变, 被广泛用于视觉测量系统的高精度标定中。文献[9]针对轨检应用, 对激光摄像式传感器标定方法进行了研究, 其采用专用标定板, 水平方向和垂直方向每隔 10 mm 设有直径为 2 mm 标定孔, 忽略镜头畸变, 采用摄像机线性模型进行标定; 文献[10]侧重于激光摄像式传感器轨道图像特征点提取; 文献[11]考虑镜头畸变, 对激光摄像式传感器进行标定, 但未给出详细的推导过程及验证结果。国内文献[12-17]采用激光摄像技术及惯性技术先后研制出不同型号轨检车, 但对激光摄像式传感器标定采用线性模型, 摄像机镜头存在非线性畸变, 因此, 标定精度有待进一步提高。

针对上述现状, 本文综合考虑激光摄像式传感器镜头非线性畸变, 采用棋盘格标定板, 基于共面标定法, 建立用于轨道测量的激光摄像式传感器非线性标定模型。针对标定模型中待求参数难求解的问题, 提出采用非线性最小二乘法及高斯-牛顿法分别求解, 并比较上述两种不同方法标定误差。通过两种标定方法的标定误差比较, 探寻适合于轨检的激光摄像式传感器高精度标定方法。

1 激光摄像式传感器轨道检测原理、标定模型及求解方法

1.1 激光摄像式传感器轨道检测原理

激光摄像式传感器由线结构激光器及面阵式电荷耦合元件(Charge-coupled device, CCD)摄像机组成。采用激光摄像技术进行轨道测量需要用到两组激光摄像式传感器。激光摄像式传感器设计及安装有两个关键角度: 摄像机相对于激光切面安装角度 α_1 、 α_2 ; 激光摄像式传感器相对于轨检梁安装角度 β_1 、 β_2 , 其检测原理如图 1 所示。

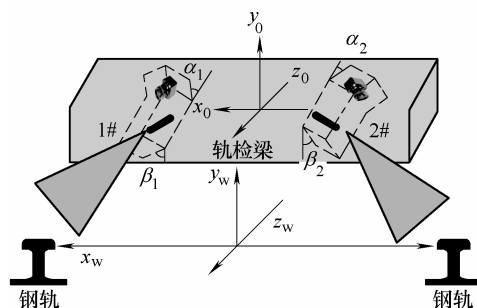


图1 轨检中激光摄像式传感器检测原理图

轨检梁是用于安装轨检传感器的专用检测梁, 与转向架构架焊接栓连。激光摄像式传感器安装于轨检梁下方箱体内, 能够达到较好的遮光及防护目的, 实物如图 2 所示。



图2 轨检设备实物图

激光器发射扇形激光切面, 沿钢轨断面方向由内向外垂直照射钢轨, 在钢轨顶面及钢轨内侧面形成一条高亮激光轮廓线, 旁侧摄像机实时获取钢轨激光轮廓图像, 采用图像处理方式和三角测距原理, 对钢轨轮廓特征进行识别、定位。由于摄像机坐标系与轨道参考坐标系存在多个自由度变换及平移, 因此, 要实现轨道几何参数高精度检测, 前提是要对激光摄像式传感器进行高精度标定, 建立摄像机参考坐标系相对于轨道参考坐标系的测量模型。

1.2 激光摄像式传感器标定模型

激光摄像式传感器标定模型如图 3 所示。

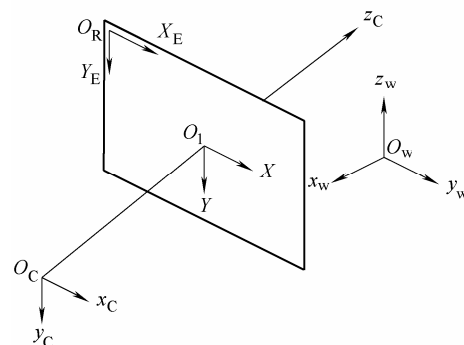


图3 摄像机成像及标定示意图

摄像机中存在图像像素坐标系 $O_R X_E Y_E$, X_E 为

水平像元阵列方向, Y_E 为垂直像元阵列方向, O_C 为摄像机焦点, 过 O_C 点作 $O_C z_C$ 轴垂直于像平面并交像面于点 O_1 , $O_C z_C$ 轴方向取 $O_C O_1$ 方向, 过 O_C 点作 $O_C x_C$ 平行于 $O_R X_E$, 过 O_C 点作 $O_C y_C$ 平行于 $O_R Y_E$, 建立摄像机坐标系 $O_C x_C y_C z_C$; 同理, 建立图像物理坐标系 $O_1 XY$, 建立世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ 。

设 R 、 T 分别为摄像机坐标系 $O_C x_C y_C z_C$ 到世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ 的旋转矩阵和平移矢量, 为摄像机外部参数。($\alpha, \beta, \gamma, u_0, v_0$) 为摄像机内部参数。其中 α 、 β 分别为摄像机像元在 X_E 轴、 Y_E 轴的比例因子, γ 为摄像机感光芯片横向像元与纵向像元未能垂直安装带来的比例因子, (u_0, v_0) 为摄像机主点 O_1 在图像像素坐标系 $O_R X_E Y_E$ 中像素坐标。摄像机视角范围中任何一点 (x_w, y_w, z_w) 对应图像像素坐标系中坐标为 (X_E, Y_E), 由摄影投影定理可知^[6-7]

$$z_c \begin{pmatrix} X_E \\ Y_E \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

$O_C x_C y_C z_C$ 坐标系与 $O_w x_w y_w z_w$ 坐标系关系可通过摄像机外部参数表示, 如式(2)所示

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = (R \quad T) \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

激光摄像式传感器世界参考坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ 中, 激光切面决定测量时世界参考坐标系只存在 2 个自由度, 设 $z_w=0$, 故式(2)可转换为式(3)

$$z_c \begin{pmatrix} X_E \\ Y_E \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & T_x \\ r_4 & r_5 & T_y \\ r_7 & r_8 & T_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

考虑摄像机镜头畸变, 设畸变后的图像像素坐标为 (X_D, Y_D), (u, v) 为图像中心像素坐标系坐标, u 、 v 、 r 定义如式(4)所示。式(4)中摄像机主点坐标 (u_0, v_0) 一般作为已知参数给出

$$\begin{cases} u = X_D - u_0 \\ v = Y_D - v_0 \\ r^2 = u^2 + v^2 \end{cases} \quad (4)$$

设 X_E 、 Y_E 方向畸变因子分别为 $\delta_u(u, v)$ 、 $\delta_v(u, v)$, 则 (X_D, Y_D) 与 (X_E, Y_E) 关系如式(5)所示

$$\begin{cases} X_E = X_D + \delta_u(u, v) \\ Y_E = Y_D + \delta_v(u, v) \end{cases} \quad (5)$$

借助式(4)中 u 、 v 、 r 定义及畸变因子计算公式, 则可得摄像机镜头畸变因子表达式, 如式(6)所示^[6-7]

$$\begin{cases} \delta_u(u, v) = k_1 u r^2 + k_2 u r^4 + p_1 (3u^2 + v^2) + p_2 (2uv) + s_1 r^2 \\ \delta_v(u, v) = k_1 v r^2 + k_2 v r^4 + p_2 (3v^2 + u^2) + p_1 (2uv) + s_2 r^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, k_1 、 k_2 为镜头径向畸变系数, p_1 、 p_2 为镜头薄棱畸变系数, s_1 、 s_2 为镜头偏心畸变系数。将式(6)先后代入式(5)、(3), 即可得到式(7)。

$$\begin{cases} f_u(x_w, y_w, u, v) = a_1 x_w + a_2 y_w + a_3 - (a_7 x_w + a_8 y_w + 1) \times (X_D + k_1 u r^2 + k_2 u r^4 + p_1 (3u^2 + v^2) + p_2 (2uv) + s_1 r^2) \\ f_v(x_w, y_w, u, v) = a_4 x_w + a_5 y_w + a_6 - (a_7 x_w + a_8 y_w + 1) \times (Y_D + k_1 v r^2 + k_2 v r^4 + p_2 (3v^2 + u^2) + p_1 (2uv) + s_2 r^2) \end{cases} \quad (7)$$

$$\phi(a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2) = \sum_{i=1}^{i=n} f_{ui}^2 + f_{vi}^2 \quad (8)$$

激光摄像式传感器标定, 即建立世界坐标系中距离坐标 (x_w, y_w) 与畸变后的图像像素坐标 (X_D, Y_D) 的对应关系。由式(3)、(5)、(6)可知, 建立 (x_w, y_w) 与 (X_D, Y_D) 关系, 需要求解摄像机线性模型系数 ($a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2$)。采用棋盘格进行标定, 标定数据对个数一般远大于待求参数 ($a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2$) 个数, 因此, 求取摄像机参数 ($a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2$), 即采用合适方法求取式(8)中 $\phi(a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2)$ 最小值。

1.3 非线性最小二乘数值求解方法

若要同时求取 ($a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2$), 则式(8)为非线性方程组, 采用线性最小二乘法无法直接求出。若将 (k_1, \dots, s_2) 作为已知参数, 则式(8)为关于 (a_1, a_2, \dots, a_8) 的线性方程组, 同理, 若将 (a_1, a_2, \dots, a_8) 作为已知参数, 则式(8)为关于 (k_1, \dots, s_2) 的线性方程组, 则分别可以采用线性最小二乘法进行求解^[18-20]。一般, 畸变参数 (k_1, \dots, s_2) 较小, 将 (k_1, \dots, s_2) 置零, 求取 (a_1, a_2, \dots, a_8), 再将 (a_1, a_2, \dots, a_8) 作为已知参数代回式(8), 即可求取 (k_1, \dots, s_2), 精度要求不是特别高的场合, 通过数次迭代便接近最优解。采用轮流迭代方法求解 ($a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2$), 为激光摄像式传感器标定模型非线性最小二乘数值求解方法。

1.4 高斯-牛顿最优数值求解方法

求解 $(a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2)$, 也可采用非线性最优优化计算方法, 求解过程如下。

(1) 采用第 1.3 节中介绍的方法, 将 $(a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2)$ 分成两组参数 (a_1, a_2, \dots, a_8) 和 (k_1, \dots, s_2) , 分别采用线性最小二乘法, 初求 (a_1, a_2, \dots, a_8) 和 (k_1, \dots, s_2) , 一般 4~5 步即可。

(2) 将第一步中初求得得到的 $(a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2)$ 作为初值, 根据式(8)建立高斯-牛顿最优优化计算模型, 采用高斯-牛顿法搜索最优值。

高斯-牛顿法求解模型如式(9)所示^[20]

$$G = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{u1}}{\partial a_1} & \frac{\partial f_{u1}}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_{u1}}{\partial s_1} & \frac{\partial f_{u1}}{\partial s_2} \\ \frac{\partial f_{v1}}{\partial a_1} & \frac{\partial f_{v1}}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_{v1}}{\partial s_1} & \frac{\partial f_{v1}}{\partial s_2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{un}}{\partial a_1} & \frac{\partial f_{un}}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_{un}}{\partial s_1} & \frac{\partial f_{un}}{\partial s_2} \\ \frac{\partial f_{vn}}{\partial a_1} & \frac{\partial f_{vn}}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_{vn}}{\partial s_1} & \frac{\partial f_{vn}}{\partial s_2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$X^{(n+1)} = X^n + P_k$$

式中, P_k 为迭代步长, $P_k = -(G^T G)^{-1} \nabla S(x_k)$, $\nabla S(x_k) = G^T (f_u, f_v)^T$ 。通过步骤(1)中的计算, $(a_1, a_2, \dots, a_8, k_1, \dots, s_2)$ 已经具有较好初值, 目标函数接近二次函数, 故高斯-牛顿迭代算法具有较好的收敛速度^[18-20]。

2 激光摄像式传感器标定试验

2.1 标定试验

标定试验摄像机采用北京微视公司 MVC1000SAM_GE30 摄像机, 分辨率为 1 280 像素 × 1 024 像素; 采用 Kowa 公司型号为 LM12NCL 镜头, 镜头焦距为 12 mm; 激光器采用德国 Z_Laser 激光器; 激光线宽小于 0.2 mm。

采用黑白棋盘格作为标定板, 标定原理如图 4 所示。标定装置如图 5 所示。

激光摄像式传感器标定方法如下所述。

(1) 将棋盘格标定板安装在固定支座上, 调整合适角度, 如图 5a 所示。

(2) 固定激光摄像式传感器, 使摄像机视角范围处于标定板范围内, 并将其锁死, 如图 5b 所示。

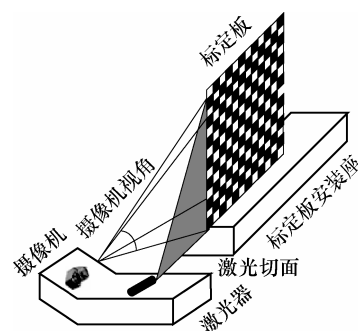


图 4 激光摄像式传感器标定原理图

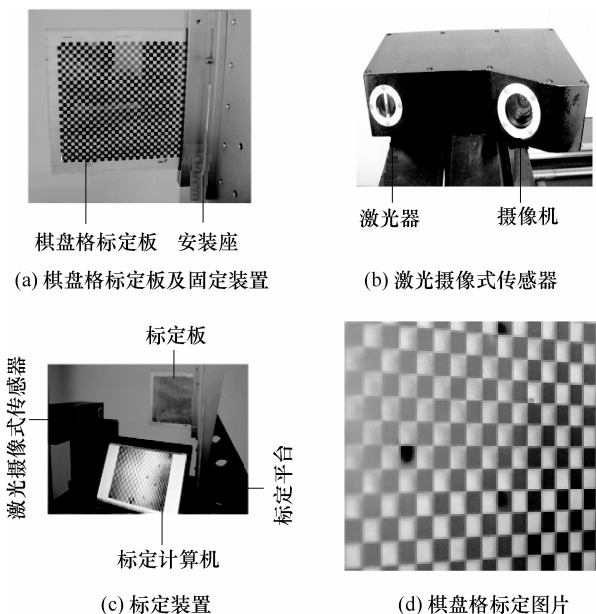


图 5 标定试验装置及标定图片

(3) 借助由 3 个旋转机构及 1 个平移机构组成的标定板安装底座调整装置, 将棋盘格标定板平面与激光扇形切面调为同一个平面, 如图 5c 所示。

(4) 拍摄当前标定板棋盘格图像, 选取棋盘格所在平面合适点作为世界坐标系原点, 如图 5d 所示。

(5) 采用亚像素提取算法, 自动提取棋盘格角点亚像素坐标^[21-22], 根据单位棋盘格的大小, 推算出角点亚像素坐标在世界坐标系中的对应坐标。

(6) 分别采用第 1.3、1.4 节介绍的标定方法求解激光摄像式传感器数学模型。

盘格垂直方向逐列选取 13 列数据, 因此图 5a~5d 为 13 段阶梯波曲线。

采用上述标定设备及标定方法, 取出 200 组标定数据, (X_D, Y_D) 坐标分别如图 6a、6b 所示, 对应世界坐标系坐标 (x_w, y_w) , 如图 6c、6d 所示。沿棋采用非线性最小二乘法迭代 4 次, 发现 (a_1, a_2, \dots, a_8) 和 (k_1, \dots, s_2) 值比较稳定, 将此时的 (a_1, a_2, \dots, a_8) 、

(k_1, \dots, s_2) 作为非线性最小二乘法的解, 求解结果如表 1、2 所示。

将表 1、2 中 (a_1, a_2, \dots, a_8) 和 (k_1, \dots, s_2) 值作为高斯-牛顿法初值, 借助第 1.4 节介绍的高斯-牛顿搜索算法, 搜索 (a_1, a_2, \dots, a_8) 和 (k_1, \dots, s_2) 最优值。图 7 为摄像机线性参数 (a_1, a_2, \dots, a_8) 的收敛曲线, 图 8 为镜头畸变因子系数 (k_1, \dots, s_2) 的收敛曲线。由图 7、8 可知, 采用高斯-牛顿最优化搜索方法, 在迭代 50 步之后, 参数基本收敛, 此时所求的 (a_1, a_2, \dots, a_8) 、 (k_1, \dots, s_2) 为通过 200 组样本得到的最优解。 (a_1, a_2, \dots, a_8) 、 (k_1, \dots, s_2) 的最优解如表 3、4 所示。

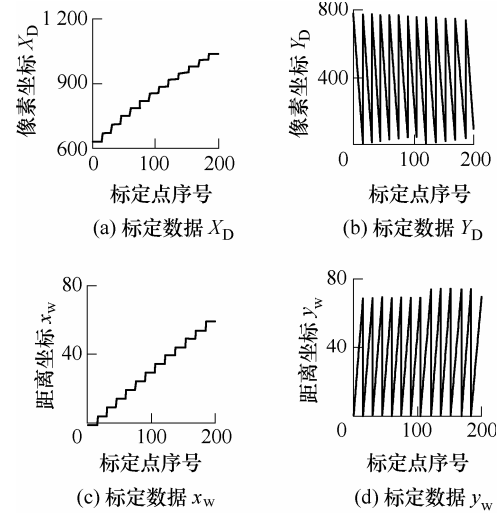


图 6 标定数据 (X_D, Y_D) 、 (x_w, y_w)

表 1 标定参数 (a_1, a_2, \dots, a_8)

参数	摄像机线性模型系数							
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
数值	1.01×10^1	4.1×10^{-2}	6.41×10^2	1.7	-1.12×10^1	7.74×10^2	3.3×10^{-3}	2.88×10^{-5}

表 2 标定参数 (k_1, \dots, s_2)

参数	镜头畸变因子系数					
	k_1	k_2	p_1	p_2	s_1	s_2
数值	-1.40×10^{-10}	3.12×10^{-15}	-8.15×10^{-14}	1.13×10^{-14}	-2.72×10^{-14}	3.77×10^{-15}

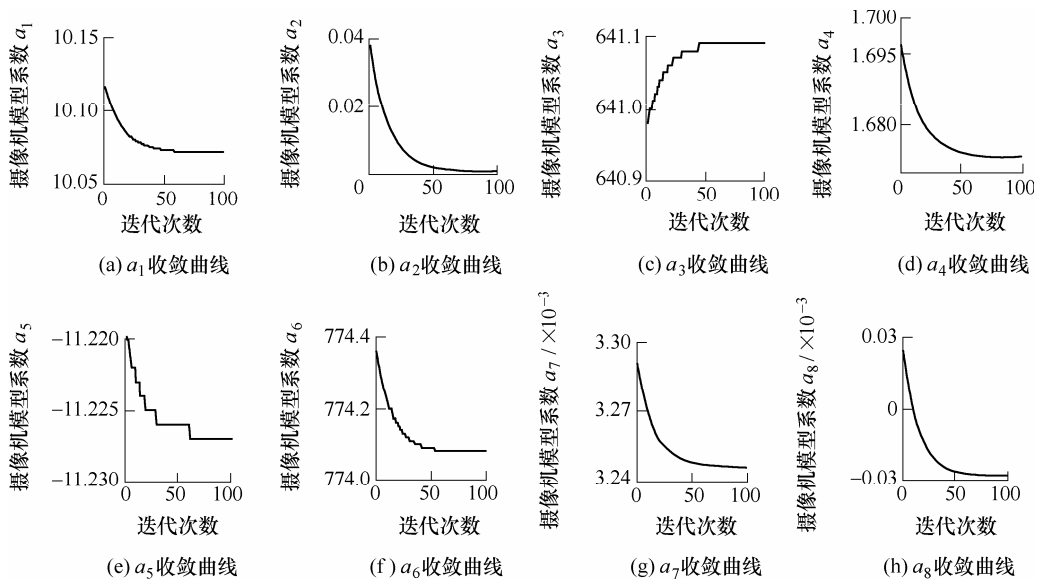
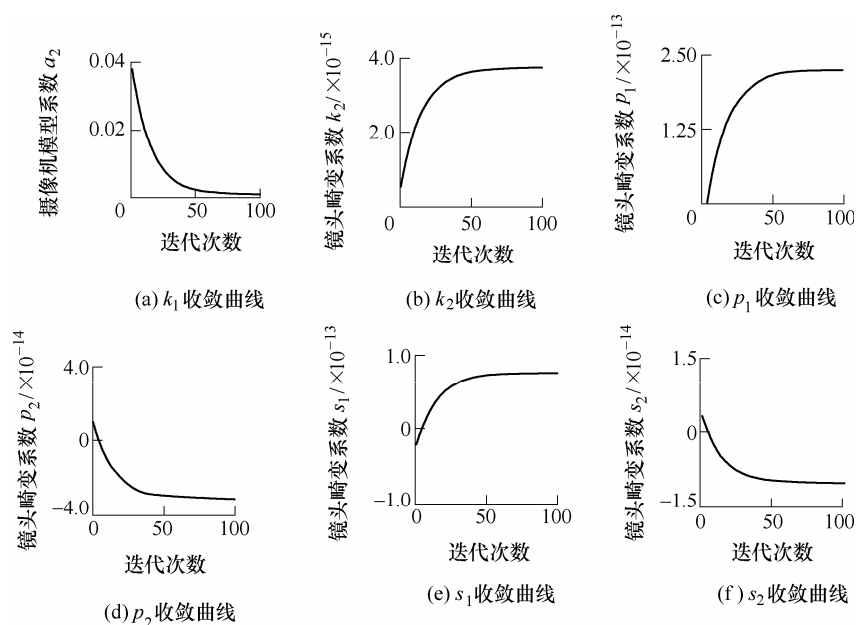


图 7 (a_1, a_2, \dots, a_8) 收敛曲线

2.2 标定试验数据误差分析

通过表 1~4 中 (a_1, a_2, \dots, a_8) 、 (k_1, \dots, s_2) 值, 即可分别得出激光摄像式传感器基于非线性最小二乘标定方法(方法 1)及高斯-牛顿最优化标定方法(方法 2)模型。为了验证方法 1 及方法 2 标定精度, 采用逆向过程, 将 200 组标定像素坐标 (X_D, Y_D) 分别

代入方法 1 及方法 2 中摄像机模型, 分别求得其在世界坐标系中坐标值 $(\hat{x}_{w1}, \hat{y}_{w1})$ 、 $(\hat{x}_{w2}, \hat{y}_{w2})$, 用标定原始数据 (x_w, y_w) 作为基准, 验证该模型的标定精度。设 (x_w, y_w) 分别为世界坐标系水平方向和垂直方向, $(\Delta x, \Delta y)$ 为水平方向和垂直方向标定误差。

图8 (k_1, \dots, s_2) 收敛曲线表3 标定参数 (a_1, a_2, \dots, a_8)

参数	摄像机线性模型系数							
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
数值	1.007×10^1	1.1×10^{-3}	6.41×10^2	1.67	-1.12×10^1	7.74×10^2	3.2×10^{-3}	-2.78×10^{-5}

表4 标定参数 (k_1, \dots, s_2)

参数	镜头畸变因子系数					
	k_1	k_2	p_1	p_2	s_1	s_2
数值	3.85×10^{-10}	3.72×10^{-14}	2.24×10^{-13}	-3.07×10^{-14}	7.48×10^{-14}	-1.02×10^{-14}

$(\Delta x_1, \Delta y_1) = (x_w - \hat{x}_{w1}, y_w - \hat{y}_{w1})$, 为该 200 组数据采用方法 1 得到的标定误差, $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ 分别如图 9a、9b 所示。 $(\Delta x_2, \Delta y_2) = (x_w - \hat{x}_{w2}, y_w - \hat{y}_{w2})$, 为该 200 组数据采用方法 2 得到的标定误差, $(\Delta x_2, \Delta y_2)$ 分别如图 9c、9d 所示。

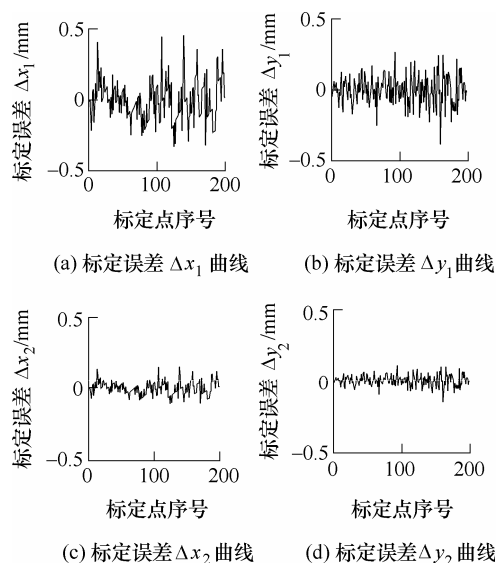


图9 参与标定模型计算的 200 组数据标定误差曲线

$D(\hat{x}_{w1})$ 、 $D(\hat{y}_{w1})$ 为该 200 组数据采用方法 1 得到的标定误差均方差; $D(\hat{x}_{w2})$ 、 $D(\hat{y}_{w2})$ 为该 200 组数据采用方法 2 得到的标定误差均方差。

为验证方法 1 与方法 2 标定精度的一般性, 对于未参与模型计算的数据也有效, 另外选取 200 组未参与标定模型计算的数据进行精度验证。该 200 组数据在世界坐标系中的坐标 (x_w, y_w) 标定前已知, 提取该 200 组数据在图像中的像素坐标, 借助方法 1 及方法 2 中的摄像机模型, 分别计算得出该 200 组数据的世界坐标系中坐标 $(\hat{x}_{w3}, \hat{y}_{w3})$ 、 $(\hat{x}_{w4}, \hat{y}_{w4})$ 。将 (x_w, y_w) 分别减去 $(\hat{x}_{w3}, \hat{y}_{w3})$ 、 $(\hat{x}_{w4}, \hat{y}_{w4})$, 得到该 200 组数据在方法 1 及方法 2 下的标定误差 $(\Delta x_3, \Delta y_3)$ 、 $(\Delta x_4, \Delta y_4)$ 。未参与标定模型计算的 200 组数据, 其标定误差曲线如图 10 所示。

$D(\hat{x}_{w3})$ 、 $D(\hat{y}_{w3})$ 为采用方法 1 得到的 200 组标定数据标定误差均方差; $D(\hat{x}_{w4})$ 、 $D(\hat{y}_{w4})$ 为采用方法 2 得到的 200 组标定数据标定误差均方差。

分别求取两组数据标定误差均方差的平均值, 作为最终标定精度。综合表 5、6 标定误差均方差统计数据可知, 方法 2 较方法 1 水平方向和垂直方向

标定精度分别提高 0.155 mm 和 0.150 mm。

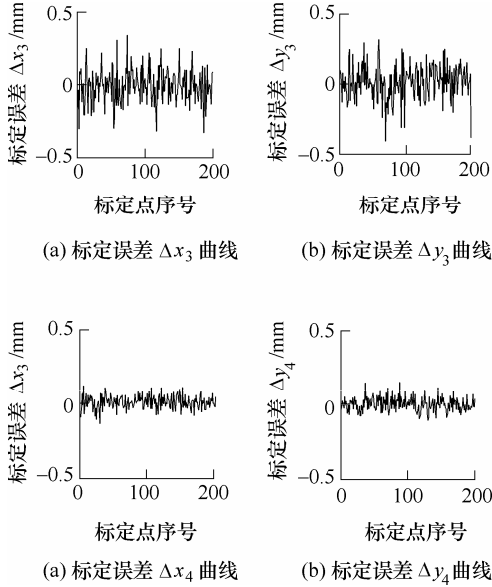


图 10 未参与标定模型计算的 200 组数据标定误差曲线

表 5 参与标定模型计算的 200 组数据标定误差统计

误差统计	标定误差均方差统计/mm			
	$D(\hat{x}_{w1})$	$D(\hat{y}_{w1})$	$D(\hat{x}_{w2})$	$D(\hat{y}_{w2})$
误差值	0.27	0.28	0.12	0.14

表 6 未参与标定模型计算的 200 组数据标定误差统计

误差统计	标定误差均方差统计/mm			
	$D(\hat{x}_{w3})$	$D(\hat{y}_{w3})$	$D(\hat{x}_{w4})$	$D(\hat{y}_{w4})$
误差值	0.29	0.29	0.13	0.13

3 轨检中激光摄像式传感器应用

激光摄像式传感器在轨道检测中, 主要用于轨距、转向架倾摆角及钢轨轮廓测量。如图 11 所示, 分别以左右激光摄像式传感器激光切面作为标定平面, 假设转向架构架中心坐标系 $O_0x_0y_0$ 与左右激光切面共面, 将棋盘格置于激光切面附近, 通过专用的标定调整机构, 将棋盘格标定板在摄像视视角范围内调为激光切面方向。

分别以左右激光切面作为 $O_{w1}x_{w1}y_{w1}$ 、 $O_{w2}x_{w2}y_{w2}$ 参考平面, 以棋盘格水平刻度方向和垂直刻度方向作为 $O_{w1}x_{w1}y_{w1}$ 、 $O_{w2}x_{w2}y_{w2}$ 的参考方向, 左右激光摄像式传感器分别选取棋盘格右上方、左上方起始点作为坐标系原点 O_{w1} 、 O_{w2} 。

采用第 1.2 节介绍的方法建立激光摄像式传感器模型, 采用第 1.4 节介绍的高斯-牛顿最优优化数值求解方法对激光摄像式传感器模型进行求解。对于

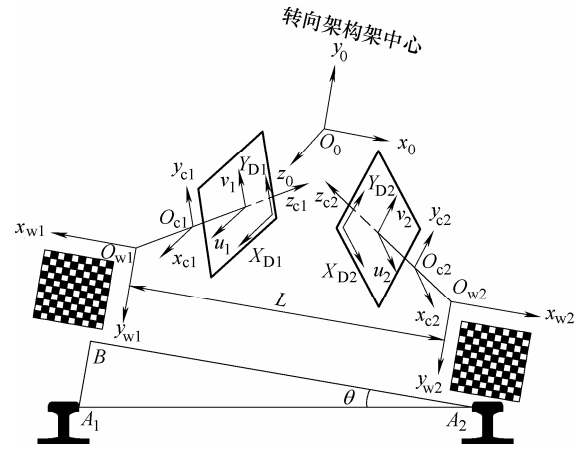


图 11 轨检中激光摄像式传感器标定坐标系

左右激光摄像式传感器, 分别建立测量模型, 如式(10)、(11)所示

$$\begin{cases} x_{w1} = \varphi_{x1}(X_{D1}, Y_{D1}) \\ y_{w1} = \varphi_{y1}(X_{D1}, Y_{D1}) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_{w2} = \varphi_{x2}(X_{D2}, Y_{D2}) \\ y_{w2} = \varphi_{y2}(X_{D2}, Y_{D2}) \end{cases} \quad (11)$$

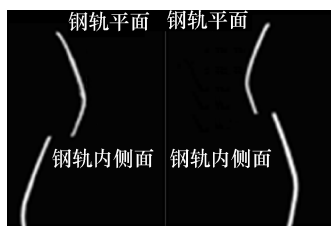
式中, (x_{w1}, y_{w1}) 、 (x_{w2}, y_{w2}) 为左右钢轨轮廓在标定坐标系 $O_{w1}x_{w1}y_{w1}$ 、 $O_{w2}x_{w2}y_{w2}$ 下坐标, (X_{D1}, Y_{D1}) 、 (X_{D2}, Y_{D2}) 为左右激光摄像式传感器图像像素坐标。

图 11 中, A_1 、 A_2 分别为左右钢轨内侧轨距点, A_1A_2 为轨距, θ 为转向架构架在激光平面内与轨距方向的倾摆夹角, 通过图 11 中 $\triangle A_1A_2B$, 可以得出轨距和转向架倾摆角计算公式

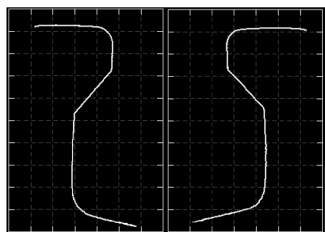
$$\begin{cases} \theta = \arctan(|y_{w1} - y_{w2}| / (x_{w1} + x_{w2} + L)) \\ A_1A_2 = (x_{w1} + x_{w2} + L) / \cos \theta \end{cases} \quad (12)$$

从式(12)中可知, 求取 θ 、 A_1A_2 , 只与 $(x_{w1}, y_{w1}, x_{w2}, y_{w2}, L)$ 相关, $(x_{w1}, y_{w1}, x_{w2}, y_{w2})$ 标定即可得出, 而 L 一般很难精确测量。实际应用中, 一般通过手持式轨距尺多次测量不同点轨距 A_1A_2 , 并与轨检车动态测量对应轨距数据进行比较, 通过多次修正, 可较为准确得出 L 值。由于安装过程存在误差, 左右激光切面不可能在同一个平面上, 可以通过上述类似办法进行多次修正, 达到精确测量轨距目的。

采用激光摄像式传感器进行钢轨轮廓测量, 如图 12 所示。图 12a 为钢轨激光轮廓图像。借助式(10)、(11)中左右激光摄像式传感器测量模型, 将提取的钢轨激光光条中心像素坐标 (X_{D1}, Y_{D1}) 、 (X_{D2}, Y_{D2}) 分别带入对应测量模型 $(\varphi_{x1}, \varphi_{y1})$ 、 $(\varphi_{x2}, \varphi_{y2})$, 即可得到钢轨几何轮廓数据。标定后得到的钢轨几何轮廓数据如图 12b 所示。



(a) 标定前左右钢轨激光轮廓图像



(b) 标定后的左右钢轨轮廓几何数据

图 12 标定前后左右钢轨轮廓

4 结论

(1) 建立了基于非线性最小二乘法及高斯-牛顿最优化计算方法的激光摄像式传感器标定模型。

(2) 采用高斯-牛顿最优化计算方法较非线性最小二乘计算方法标定精度在水平方向和垂直方向分别提高 0.155 mm 和 0.150 mm。

(3) 提出采用高斯-牛顿最优化计算方法对轨检激光摄像式传感器标定模型进行求解。

(4) 给出了轨检中基于高斯-牛顿最优化计算方法的轨距及转向架倾摆角求解方法。

参 考 文 献

- [1] JARVIS R A. A perspective on range finding techniques for computer vision[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, 5(2): 122-139.
- [2] DEWAR R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system[C]//Proceeding of Robots and Vision'88 Conference, 1988: 5-13.
- [3] JAMES K W. Noncontact machine vision metrology within a CAD coordinate system[C]// Proceedings of Autofact'88 Conference, 1988, 12: 9-17.
- [4] 段发阶, 刘凤梅, 叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参数标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2002, 21(1): 108-110.
DUAN Fajie, LIU Fengmei, YIE Shenghua. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 21(1): 108-110.
- [5] 魏振忠, 张广军, 徐园. 一种线结构光视觉传感器标定方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 210-214.
WEI Zhenzhong, ZHANG Guangjun, XU Yuan. Calibration approach for structured-light-stripe vision sensor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 210-214.
- [6] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [7] WANG Jianhua, SHI Fanhuai, ZHANG Jing, et al. A new calibration model of camera lens distortion[J]. Pattern Recognition, 2008, 41: 607-615.
- [8] 周富强, 张广军. 表面视觉传感器模型参数的简易标定方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 175-179.
ZHOU Fuqiang, ZHANG Guangjun. Facilitated method to calibrate model parameters of vision sensor for surface measurement[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 175-179.
- [9] POOPVD V, RYABICHENKO R B, KRIVOSHEINA E A. Calibration of the CCD photonic measuring system for railway inspection[C]// Proceeding of SPIE, 2005: 1-9.
- [10] ALIPPI C, CASAGRANDE E, SCOTTI F. Composite real-time processing for railways track profile measurement[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(3): 559-564.
- [11] LI Guoxin, WANG Chonglin, LIU Jianhua, et al. Dynamic rail-wear inspecting system based on machine vision[C]// 2007 Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007: 1-4.
- [12] REN Shengwei, GU Shiping, XU Guiyang, et al. A new track inspection car based on a laser camera system[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(3): 1-4.
- [13] 柴东明, 魏世斌, 刘玲平, 等. 深圳地铁轨检车检测系统的研制[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(5): 140-143.
CHAI Dongming, WEI Shibin, LIU Lingping, et al. Development of the inspection system for Shenzhen metro track inspection car[J]. China Railway Science, 2005, 26(5): 140-143.
- [14] 刘铁, 任胜伟, 许贵阳, 等. GJ-4 型轨检车轨距-轨向检测系统改造[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 137-140.
LIU Tie, REN Shengwei, XU Guiyang, et al. Upgrade of gauge-alignment system of type GJ-4 track inspection car[J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 137-140.
- [15] 魏世斌, 刘玲萍, 赵延峰, 等. GJ-6 型轨道检测系统[J]. 铁道建筑, 2011(11): 98-101.

- WEI Shibin, LIU Lingping, ZHAO Yanfeng, et al. Track inspection system of type GJ-4[J]. Railway Engineering, 2011(11): 98-101.
- [16] 傅勤毅, 刘姣姣, 邱志强, 等. 光电轨检系统的高精度摄像机标定[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(1): 84-88.
- FU Qinyi, LIU Jiaojiao, QIU Zhiqiang, et al. High precision camera calibration method of track inspection system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(1): 84-88.
- [17] 魏世斌, 李颖, 赵延峰, 等. GJ-6 型轨道检测系统的计与研制[J]. 铁道建筑, 2012(2): 97-100.
- WEI Shibin, LI Ying, ZHAO Yanfeng, et al. The design and development of type GJ-6 track inspection system[J]. Railway Engineering, 2012(2): 97-100.
- [18] 张光澄. 非线性最优化计算方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- ZHANG Guangcheng. Computational methods for nonlinear optimization[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [19] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- GONG Chun, WANG Zhenglin. Proficient in MATLAB optimization computational method[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [20] 段发阶. 计算机视觉检测基础理论及应用技术研究[D]. 天津: 天津大学, 1994.
- DUAN Fajie. Study on fundamental theories and applied technique of computer vision inspection[D]. Tianjin: Tianjin University, 1994.
- [21] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- ZHANG Guangjun. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [22] CUI Dazhi, ZHANG Guangjun. A new sub-pixel detector for x-corners in camera calibration targets[C] // 13th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2005, WSCG'2005-In Co-operation with EUROGRAPHICS, 2005, 1: 97-100.
-
- 作者简介: 占栋(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为计算机视觉、激光、光电检测技术及在铁路中的应用。
E-mail: 15198281626@163.com
- 肖建, 男, 1950 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能控制、计算机控制系统。
E-mail: jxiao@swjtu.edu.cn