

图像式路基监测系统中站内多相机间位姿标定方法

闵永智^{1,2*}, 胡捷¹, 孙天放¹

¹ 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

² 甘肃省人工智能与图形图像处理工程研究中心, 甘肃 兰州 730070

摘要 相机间位姿关系是影响图像式无砟轨道路基沉降测量精度的主要因素。监测站中相机必需指向各自的监测靶面,因此相机间常存在无公共视场的情况。根据机器视觉中手眼标定问题与相机间位姿标定的等价性,提出了一种基于特征点的相机间位姿标定方法。通过在监测靶面上设置 4 个呈方形分布的特征点,使相机组执行 2 次运动,并在 3 个不同的位置拍摄靶面图像,通过 P4P(perspective-four-point)算法求解相机与靶标的位姿关系,进而得到相机的移动轨迹;用矩阵重排的方法求得相机间位姿转换矩阵,并利用 Levenberg-Marquardt 算法进行非线性优化。仿真结果表明噪声方差在 1 pixel 内时角度误差小于 0.03° ,平移误差小于 0.3 cm。通过仿真验证了本文方法的有效性 with 实用性,本文方法能够满足无砟轨道路基沉降测量的需求。

关键词 机器视觉; 无公共视场; 位姿测量; 非线性优化

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1215007

Calibration Method of Position-Pose Relation Between Cameras in Transfer Station of Image-Based Subgrade Monitoring System

Min Yongzhi^{1,2*}, Hu Jie¹, Sun Tianfang¹

¹ School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

² Gansu Provincial Engineering Research Center for Artificial Intelligence and Graphics and Image Processing, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract The position-pose relation between cameras is the main factor that affects the accuracy of an image-based ballastless track subgrade monitoring system. Each camera in the monitoring station must face the corresponding monitoring target surface, so there is often no public field of view between the cameras. According to the equivalence between the hand-eye calibration problem in robot vision and the calibration of position-pose relation between cameras, a position-pose calibration method based on feature points is proposed. Four feature points with square distribution are set on the monitoring target surface. A set of cameras is moved twice in small step and takes the pictures of the target surface in three different positions. The P4P (perspective-four-point) algorithm is used to solve the position-pose relation between the camera and the target, and then obtains the movement trajectory of the camera. The matrix rearrangement method is used to obtain the pose conversion matrix between the cameras, and the Levenberg-Marquardt algorithm is used for nonlinear optimization. Simulation results indicate that the angle error is less than 0.03° and the translation error is less than 0.3 cm when the noise variance is less than 1 pixel. The effectiveness and practicability of the method in this paper are verified by simulation, and the method in this paper can meet the needs of the settlement measurement of the ballastless track subgrade.

Key words machine vision; no public view; position-pose measurement; nonlinear optimization

OCIS codes 150.1135; 150.1488; 150.6044

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-09-04; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61663022)、甘肃省自然科学基金(18JR3RA105)

* E-mail: minyongzhi@mail.lzjtu.cn

1 引言

无砟轨道由于具有平顺性好、几何形位能持久保持的特点,已经成为高速铁路的主要结构形式。高速铁路对无砟轨道沉降要求十分严格,要求工后沉降在使用年限内不大于 15 mm。沉降变形传递相机网络视觉测量系统通过激光光斑中心定位^[1-2]得到沉降前后的位置数据差值,以反映监测点相对于基准点的路基沉降变形。根据节点位置的不同,相机网络中监测站可能有多种组合形式,包括多相机-多靶面-多激光器的组合和多相机-多靶面的组合。传递站中不同的相机必须指向各自的监测靶面,相机间不存在公共的视场。相机间位姿关系是影响路基沉降测量精度的重要因素,有必要对监测站中相机之间的位姿关系进行精确标定。

针对该问题,文献[3]利用精密二轴转台提供角度基准,当转台带动相机转动时使用相机拍摄多个位置的靶标图片,通过求解转台坐标系与相机坐标系间的位姿参数,得到相机间的位姿参数,该方法需要处理多个位置拍摄的靶标图像,工作量较大。文献[4]提出利用靶标间固定的位姿关系求解相机间的位姿,但该方法需要在标定前通过在靶标旁布置大量编码点解算出靶标间的位姿。文献[5]在平面镜反射辅助视场下研究了多相机位姿标定方法,克服了多相机系统需看到相同标志物的限制。上述方法借助高精度的大型测量设备,难以应用在较小的场景中,且无法保证相机直接或间接地观测到标志物。文献[6]提出了一种基于手眼标定的相机间位姿测量方法,区别于传统方法,该方法操作简单、对环境要求较低,但在求取拍摄图像对应的相机外部参数时需提取大量棋盘格角点坐标,且提取时存在很大偏差;对相机间位姿转换矩阵的求解需要多次移动相机组,移动后很难保证靶标出现在相机视野

中,这不利于测量工作的开展。

本文通过解算相机与靶面的位姿关系得到相机的移动轨迹,结合相机间位姿固定不变的性质,构建位姿方程。根据 PnP 原理,求解相机与靶面的位姿转换矩阵。研究人员对 PnP 问题的研究集中在 P3P、P4P 问题,这是因为 P2P 问题有无限解,当特征点的个数 $n \geq 5$ 时, PnP 问题变成了经典的 DLT (Direct Linear Transformation) 问题,这时可进行线性求解。P3P 问题使用的特征点数最少,但容易出现多解的情况,判定条件较为繁杂。PnP 问题的通用求解方法一般是针对空间分布无规律情形下的特征点而设计的,算法的精度及抗噪声能力有一定的局限性,不利于高精度实时测量应用。本文在位姿求解过程中使用 4 个呈方形分布的特征点,利用其几何关系实现对靶面位姿的线性求解。针对位姿方程的求解, Tsai 等^[7]提出转站法,该方法需要相机组进行多次运动^[7],本文利用矩阵重排的方法进行求解,使相机组仅运动两次即可完成标定。通过采用非线性优化的方法优化相机间的位姿参数,提高了相机间位姿标定的精度,该算法操作简单,可应用于安装现场监测站中相机间位姿标定。

2 图像式无砟轨道路基沉降监测系统工作原理

2.1 图像式沉降监测原理

图像式沉降监测终端系统一般由监测靶面、激光器、相机和嵌入式图像处理系统组成,如图 1 所示,其中 L_1 、 L'_1 分别为路基沉降前、后激光器的位置, P_2 为路基沉降后光斑中心的位置。该系统的原理为:将发射端的激光器发出的准直激光束投射到远处监测靶面上,形成一个近似圆形的光斑,发射端、接收端与路基刚性连接,被测点路基发生沉降时,接收端的靶面的激光光斑会产生相应位移,通过

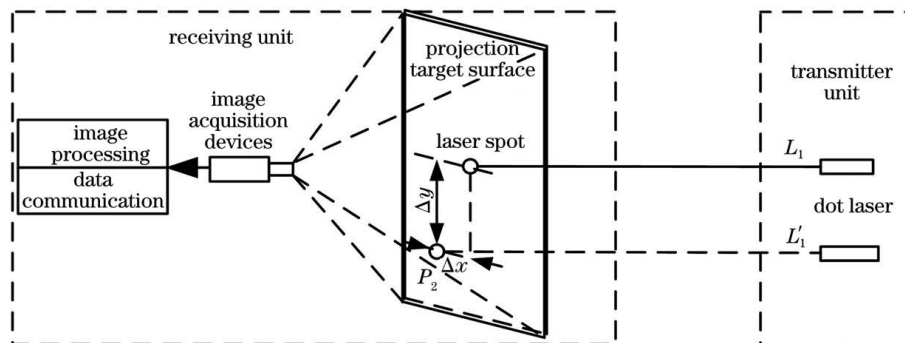


图 1 图像式沉降监测终端原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of image settlement monitoring terminal

激光光斑中心定位算法得到光斑的中心位置 (x, y) 和 (x', y') , 从而得到路基的横向沉降量 $\Delta x = x - x'$ 和纵向沉降量 $\Delta y = y - y'$ 。

2.2 沉降变形传递相机网络视觉测量原理

在沉降变形传递相机网络中, 基准坐标系的位

姿数据可通过相机网络传递到任何一个节点, 从而得到任意一个观测点的沉降变形数据。沉降变形传递相机网络视觉测量系统的总体布局如图 2 所示, 测量系统由测量基准(基准点 01)、传递监测站(监测点 11、12 等)和待测目标(监测点 02、 n_1 等)组成。

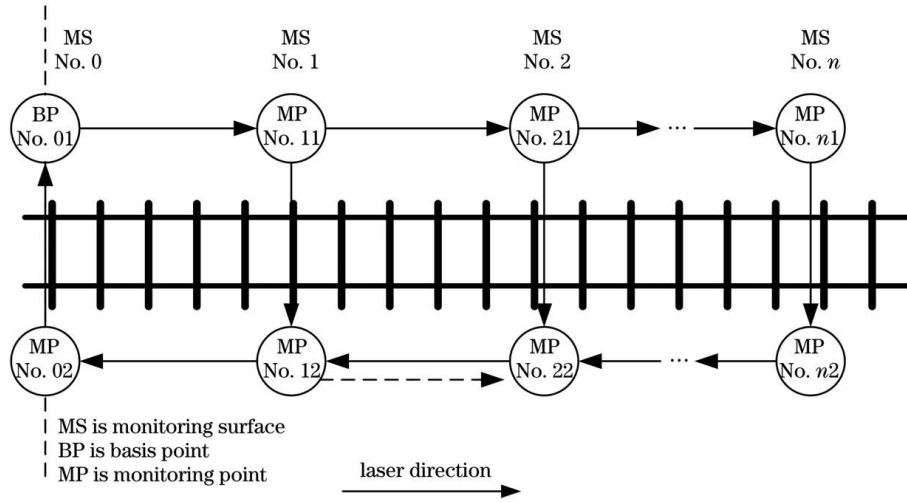


图 2 沉降变形传递相机网络视觉测量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of camera network vision measurement for settlement deformation transfer

测量基准为相机网络的起始节点, 一般将离路基较远并且不容易发生沉降变形的地方作为起始节点, 以提供全局统一的基准坐标; 传递监测站为相机网络的中转节点, 不仅传递两个相邻节点之间的沉降变形关系, 还起到监测自身沉降变形的作用; 待测目标为相机网络的末级节点, 用来监测该节点相对于基准坐标的沉降。

若设第 i 个坐标系到第 $i+1$ 个坐标系的旋转矩阵和平移向量分别为 $R_{i,i+1}$ 和 $t_{i,i+1}$, 则从第 1 个坐标系(基准坐标系)到第 n 个坐标系(监测站坐标系)的旋转矩阵 $R_{1,n}$ 和平移矩阵 $t_{1,n}$ 为

$$\begin{cases} R_{1,n} = \prod_{i=1}^{n-1} R_{n-1,n-i+1} = R_{n-1,n} R_{n-2,n-1}, \dots, R_{1,2} \\ t_{1,n} = \sum_{i=1}^{n-2} \left[\left(\prod_{j=0}^{n-2-i} R_{n-j-1,n-j} \right) t_{i,i+1} \right] + t_{n-1,n} \end{cases} \quad (1)$$

借助相机网络中的闭合回路, 通过闭合平差的方法来消除累积误差, 例如图 2 中的 11→21→22→12 形成闭合回路, 如图 3 所示, 图 3 中激光器为 $L_1 \sim L_4$, 相机为 $C_1 \sim C_4$, 监测靶面为 $M_1 \sim M_4$ 。

图 3 中闭合回路对应的旋转约束关系为

$$R_{L_1, M_1} R_{M_1, C_1} R_{C_1, L_2} R_{L_2, M_2} R_{M_2, C_2} R_{C_2, L_3} \times R_{L_3, M_3} R_{M_3, C_3} R_{C_3, C_4} R_{C_4, M_4} R_{M_4, L_4} R_{L_4, L_1} = I, \quad (2)$$

式中: I 为单位矩阵; R_{L_1, M_1} 表示从 L_1 位置到 M_1 位置的旋转矩阵, 其他 R 的含义类似。

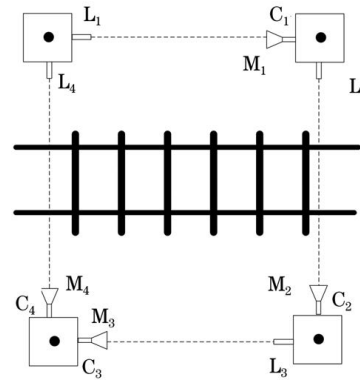


图 3 相机网络闭合回路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of closed loop in camera network

同理, 对应的平移约束可以表示为从回路中任意一点出发到其自身坐标的变化为零向量。可以看出, 传递站中相机间的位姿会对沉降测量带来影响, 因此对相机间位姿的标定至关重要。

3 测量模型

无公共视场的相机间相对位姿标定与机器人视觉中手眼标定问题十分相似^[8-9], 在用手眼相机对目标进行抓取时, 需确定机械手与相机之间的相对位姿, 手眼标定通常以棋盘格作为模板, 用张正友平面标定法求解相机对应靶标的外部参数 A , 结合转动平台得到机械手的运动参数 B , 通过解基础方程 $AX = XB$ 得到手眼转换关系 X 。中间站两相机存

在刚性连接,一个相机可看作手眼系统中的手,另一个相机可看作手眼系统中的眼。

如图 4 所示,在相机组由 L_1 位置移动到 L_2 位置的过程中,定义相机移动轨迹分别为 H, G , 相机间的相对位姿为 X 。1 号相机移动前后的坐标系原点分别为 C_1, C'_1 , 2 号相机移动前后的坐标系原点分别为 C_2, C'_2 。假设空间中一点 P 在 C_1, C'_1 坐标系下的坐标向量分别为 P_{c1}, P'_{c1} , 在 C_2, C'_2 坐标系下坐标向量分别为 P_{c2}, P'_{c2} , 移动前后 1 号相机和 2 号相机对应各自固定靶面的位姿关系分别为 $V_1^{(0)}, V_2^{(0)}, V_1^{(1)}, V_2^{(1)}$, 利用相机的移动轨迹表示出相机坐标系移动前后 P 点坐标的转换关系, 利用相机间的位姿关系 X 表示 P 点在不同相机坐标系下的转换关系, 则有:

$$\begin{cases} P'_{c1} = HP_{c1} \\ Q'_{c2} = GP_{c2} \\ P_{c1} = XQ_{c2} \\ P'_{c1} = XQ'_{c2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $H = V_1^{(1)} V_1^{(0)-1}, G = V_1^{(1)} V_1^{(0)-1}$, 求解(3)式得

$$HX = XG, \quad (4)$$

式中: H 和 G 为已知的 4×4 矩阵; X 为待求的相机间的位姿矩阵。 H, G, X 都是由旋转矩阵 R 和平移向量 t 组成, 以 X 为例, 可表示为

$$X = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

因此 $HX = XG$ 可展开为

$$R_H R - R R_G = 0, \quad (6)$$

$$(R_H - I)t = R t_G - t_H, \quad (7)$$

式中: R_H 和 R_G 分别为相机移动轨迹 H 和 G 中的旋转矩阵; t_G 和 t_H 分别为相机移动轨迹 H 和 G 中的平移矩阵。

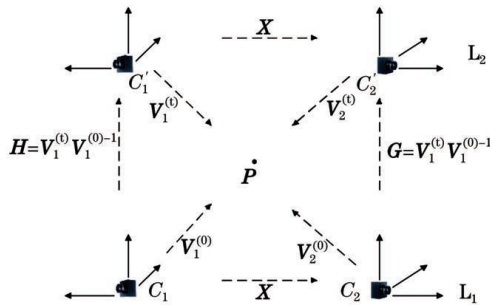


图 4 移动前后各坐标系关系图

Fig. 4 Geometric relationship before and after movement

4 标定方法

4.1 求解相机与靶标间位姿关系

系统测量原理如图 5 所示^[10-12], Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 是靶标上 4 个呈方形分布的特征点, 其边长为 d , 以 Q_0 为原点、 $Q_0 Q_1$ 为 x 轴、 $Q_0 Q_3$ 为 y 轴建立靶标坐标系, 以光心 O 为原点的 $O_c x_c y_c z_c$ 是相机坐标系, $q_i (i=0, 1, 2, 3)$ 为靶标上 4 个标志点在像平面上的投影, 其在相机坐标系下的坐标分别为 $q_0(x_0, y_0, f), q_1(x_1, y_1, f), q_2(x_2, y_2, f), q_3(x_3, y_3, f)$, 其中, f 为相机焦距, $x_i, y_i (i=0, 1, 2, 3)$ 为像点的图像物理坐标, 可通过中心定位算法并结合相机内参数得到。

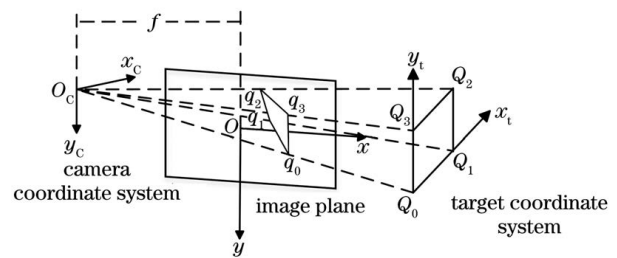


图 5 相机与靶标间位姿关系解算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of solution of posture relation between camera and target

假设相机坐标系是靶标坐标系先经旋转后经平移得到的, 对于靶面上空间特征点坐标 (x_t, y_t, z_t) , 相机坐标 (x_c, y_c, z_c) , 则两坐标之间的关系为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: 旋转矩阵 $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$; t_x, t_y, t_z 分别

为平移向量 t 沿 x 轴、 y 轴、 z 轴的平移量。

设光心 O_c 与 $q_2 q_3$ 所形成的平面为 π_1 , 其法向量 $n_1 = \overrightarrow{O_c q_2} \times \overrightarrow{O_c q_3}$, 记 $n_1 = (n_{x1}, n_{y1}, n_{z1})$, 光心到标志点 Q_0, Q_1 与光心到像点 q_0, q_1 距离的比值分别为 $k_0 = \frac{|OQ_0|}{|Oq_0|}$ 和 $k_1 = \frac{|OQ_1|}{|Oq_1|}$, 则

$$\overrightarrow{Q_0 Q_1} = \overrightarrow{OQ_1} - \overrightarrow{OQ_0} = k_1 \overrightarrow{Oq_1} - k_0 \overrightarrow{Oq_0}. \quad (9)$$

由于 $Q_0 Q_1 // \pi_1$, 可知 $\overrightarrow{Q_0 Q_1} \cdot n_1 = 0$, 由此可得

$$(k_1 x_1 - k_0 x_0) \cdot n_{x1} + (k_1 y_1 - k_0 y_0) \cdot n_{y1} + (k_1 f - k_0 f) \cdot n_{z1} = 0, \quad (10)$$

由 $|Q_0 Q_1| = d$ 得

$$\sqrt{(k_1x_1 - k_0x_0)^2 + (k_1y_1 - k_0y_0)^2 + (k_1f - k_0f)^2} = d. \quad (11)$$

由(8)、(9)式可以计算出 k_0, k_1 , 因此得到标志点 Q_0, Q_1 在相机坐标系的坐标 $Q_0(k_0x_0, k_0y_0, k_0f), Q_1(k_1x_1, k_1y_1, k_1f)$ 。其中, 靶标坐标系原点 Q_0 在相机坐标系下的坐标即为平移向量 t , 靶标坐标系的 x_T 轴在相机坐标系的方向为

$$\begin{aligned} \overrightarrow{Q_0Q_1} &= \overrightarrow{OQ_1} - \overrightarrow{OQ_0} = \\ &(k_1x_1 - k_0x_0, k_1y_1 - k_0y_0, k_1f - k_0f). \end{aligned} \quad (12)$$

将该向量标准化, 记为 (r_{11}, r_{21}, r_{31}) , 它是旋转矩阵 R 的第一个列向量。同理可求得 Q_2, Q_3 在相机坐标系下的坐标, 得到目标坐标系 y_T 轴的相机坐标, 通过将该向量标准化, 得到旋转矩阵的第二个列向量 (r_{11}, r_{21}, r_{31}) 。由旋转矩阵的正交

性得

$$(r_{13}, r_{23}, r_{33}) = (r_{11}, r_{21}, r_{31}) \times (r_{11}, r_{22}, r_{32}), \quad (13)$$

至此求解出旋转矩阵 R 。

4.2 求解相机间相对位姿

首先, 仅考虑位姿转换矩阵 X 的旋转部分, 则有

$$R_H R - R R_G = 0. \quad (14)$$

(14)式是一个特殊的 Sylvester 方程, 其中由 $R_H R - R R_G$ 所形成的矩阵中的各元素可表示为 R_H, R_G 与 R 的线性组合, 因此(14)式可改写为

$$F v = 0, \quad (15)$$

式中: F 为由 R_H 和 R_G 中的元素组成的矩阵, 可表示为

$$F = \begin{bmatrix} R_{H11} - R_{G11} & -R_{G12} & -R_G & R_{H12} & 0 & 0 & R_{H13} & 0 & 0 \\ -R_{G12} & R_{H11} - R_{G22} & -R_G & 0 & R_{H12} & 0 & 0 & R_{H13} & 0 \\ -R_{G13} & -R_{G23} & R_{H11} - R_{G33} & 0 & 0 & R_{H12} & 0 & 0 & R_{H13} \\ R_{H21} & 0 & 0 & R_{H22} - R_G & -R_G & R_{G31} & R_{H23} & 0 & 0 \\ 0 & R_{H21} & 0 & -R_{G12} & R_{H22} - R_G & R_{G32} & 0 & R_{H23} & 0 \\ 0 & 0 & R_{H21} & -R_{G113} & -R_G & R_{H22} - R_{G33} & 0 & 0 & R_{H23} \\ R_{H31} & 0 & 0 & R_{H32} & 0 & 0 & R_{H33} - R_{G11} & -R_{G21} & -R_{G31} \\ 0 & R_{H31} & 0 & 0 & R_{H32} & 0 & -R_{G12} R_{H33} & -R_{G22} & -R_{G32} \\ 0 & 0 & R_{H31} & 0 & 0 & R_{H32} & -R_{G13} & -R_{G23} & R_{H33} - R_G \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$v = [R_{11} \ R_{12} \ R_{13} \ R_{21} \ R_{22} \ R_{23} \ R_{31} \ R_{32} \ R_{33}]^T, \quad (17)$$

式中: $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{22}, R_{23}, R_{31}, R_{32}, R_{33}$ 是旋转矩阵 R_G 中的 9 个元素; $R_{H11}, R_{H12}, R_{H13}, R_{H21}, R_{H22}, R_{H23}, R_{H31}, R_{H32}, R_{H33}$ 为旋转矩阵 R_H 中的 9 个元素; $R_{G11}, R_{G12}, R_{G13}, R_{G21}, R_{G22}, R_{G23}, R_{G31}, R_{G32}, R_{G33}$ 为旋转矩阵 R_G 中的 9 个元素。

这样求解旋转矩阵 R 的问题就转换成求解 9×1 向量 v 的问题, 关于齐次方程的解, 当 F 的秩等于 9 时, 方程有唯一有意义的解, 当 F 的秩等于 8 时, 方程基础解系中解向量的个数为 1, 通过旋转矩阵的正交性可得到方程的特解, 当 F 的秩小于 8 时, 方程的解不唯一, 因此为使 F 的秩大于等于 8, 通常进行两组测量, 为使测量结果相互独立, 第二次的转轴必须不同于第一次, 因此可以得到

$$\begin{cases} R_{H_1} R - R R_{G_1} = 0 \\ R_{H_2} R - R R_{G_2} = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

式中: R_{H_1} 和 R_{G_1} 为首次移动时 1 号相机和 2 号相机移动轨迹的旋转部分; R_{H_2} 和 R_{G_2} 为第二次移动时 1 号相机和 2 号相机移动轨迹的旋转部分。

联立这两个方程, 可以得到 18×9 矩阵, 用奇异值分解的方法得到此超定方程的最小二乘解, 对矩阵 $F^T F$ 进行奇异值分解, 其中最小奇异值所对应的奇异向量即为最小二乘解, 将其重新排列成 3×3 的矩阵后进行 Schimidt 正交化, 得到旋转矩阵 R 。

通过求解平移部分 t , 得到

$$(R_H - I)t = R t_G - t_{H_1}. \quad (19)$$

通过两次旋转得到的方程组为

$$\begin{bmatrix} R_{H_1} - I \\ R_{H_2} - I \end{bmatrix} t = \begin{bmatrix} R t_{G_1} - t_{H_1} \\ R t_{G_2} - t_{H_2} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

式中: t_{G_1} 和 t_{H_1} 为首次移动时 1 号相机和 2 号相机移动轨迹的平移部分; t_{G_2} 和 t_{H_2} 为第二次移动时 1 号相机和 2 号相机移动轨迹的平移部分。

$$\text{将(16)式记为 } \mathbf{A} \mathbf{t} = \mathbf{b}, \text{ 其中, } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{H_1} - \mathbf{I} \\ \mathbf{R}_{H_2} - \mathbf{I} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} \mathbf{t}_{G_1} - \mathbf{t}_{H_1} \\ \mathbf{R} \mathbf{t}_{G_2} - \mathbf{t}_{H_2} \end{bmatrix}.$$

用最小二乘法求解 \mathbf{t} , 可得

$$\mathbf{t} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (21)$$

将旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 重新组合, 即可得到位姿转换矩阵 \mathbf{X} 。

4.3 相机间位姿参数的非线性优化

在标定过程中, 因存在特征点中心提取误差, 标定结果并不理想, 常存在重投影误差^[13]较大的情况。为使投影误差函数最小化, 需要将系统中的转换关系考虑在内。相机组在位置 k 时, 靶面 1 和靶面 2 中特征点 j 的重投影像素坐标为 $\tilde{P}_{t1,j}^k (\tilde{u}_{t1,j}^k, \tilde{v}_{t1,j}^k)$, $\tilde{P}_{t2,j}^k (\tilde{u}_{t2,j}^k, \tilde{v}_{t2,j}^k)$, 依据相机的透视投影模型得

$$\boldsymbol{\rho}_1^k \begin{bmatrix} \tilde{u}_{t1,j}^k \\ \tilde{v}_{t1,j}^k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_{x1} & 0 & u_1 \\ 0 & 1/d_{y1} & v_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{c2,c1}^k & \mathbf{t}_{c2,c1}^k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{t2,c2} & \mathbf{t}_{t2,c2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{t2,t1}^k & \mathbf{t}_{t2,t1}^k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{t1} \\ Y_{t1} \\ Z_{t1} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\boldsymbol{\rho}_2^k \begin{bmatrix} \tilde{u}_{t2,j}^k \\ \tilde{v}_{t2,j}^k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_{x2} & 0 & u_2 \\ 0 & 1/d_{y2} & v_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{c2,c1}^k & \mathbf{t}_{c2,c1}^k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{t1,c1} & \mathbf{t}_{t1,c1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{t2,t1}^k & \mathbf{t}_{t2,t1}^k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{t2} \\ Y_{t2} \\ Z_{t2} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

式中: d_{x1}, d_{y1} 和 d_{x2}, d_{y2} 分别为相机 1 与相机 2 中 X 方向和 Y 方向的像元尺寸; f_1, f_2 为相机 1 与相机 2 的焦距; $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ 分别为相机 1 和相机 2 在像素坐标系下的坐标; $\mathbf{R}_{c2,c1}, \mathbf{T}_{c2,c1}$ 为相机 2 到相机 1 的旋转矩阵和平移矩阵; $\mathbf{R}_{t2,c2}, \mathbf{T}_{t2,c2}$ 为相机组在位置 i 时靶面 2 到相机 2 的旋转矩阵和平移矩阵; $\mathbf{R}_{t2,t1}^k, \mathbf{T}_{t2,t1}^k$ 为相机组在位置 i 时靶面 2 到靶面 1 的旋转矩阵和平移矩阵; $\boldsymbol{\rho}_1^k, \boldsymbol{\rho}_2^k$ 为相机 1 和相机 2 在位置 k 时的尺度因子。

结合(20)式和(21)式构建靶面特征点与重投影点间误差最小的目标优化函数, 得到 $\mathbf{R}_{c2,c1}, \mathbf{T}_{c2,c1}$ 的最优解, 即

$$F_{\min} = \min \left[\sum_{k=1}^3 \sum_j^4 (|\mathbf{P}_{t1,j}^k - \tilde{\mathbf{P}}_{t1,j}^k| + |\mathbf{P}_{t2,j}^k - \tilde{\mathbf{P}}_{t2,j}^k|) \right], \quad (24)$$

式中: $\mathbf{P}_{t1,j}^k$ 和 $\mathbf{P}_{t2,j}^k$ 分别为相机组在位置 k 时, 靶面 1 和靶面 2 中特征点 j 实际的像素坐标向量; $\tilde{\mathbf{P}}_{t1,j}^k$ 和 $\tilde{\mathbf{P}}_{t2,j}^k$ 分别为相机组在位置 k 时, 靶面 1 和靶面 2 中特征点 j 的重投影像素坐标向量。

利用 Levenberg-Marquardt 算法^[14], 用求得相机间位姿参数作为初值, 对相机间位姿转换矩阵中的 12 个参数进行优化。

5 仿真和实验

5.1 仿真

为得到特征点中心提取误差对相机间位姿标定精度的影响程度, 通过数值仿真对标定误差进行分析。设置相机间位姿矩阵对应的欧拉角 (α, β, γ) 为 $(0^\circ, 180^\circ, 0^\circ)$, 平移向量 (t_x, t_y, t_z) 为 $(0, 0, 10)$ (单位为 mm), 依据相机的针孔成像模型, 得到特征点中心的真实像素坐标。

在像素坐标中加入均值为 0、方差为 σ 的高斯噪声, 噪声方差从 0 pixel 变化到 1.0 pixel, 间隔为 0.1 pixel。对每组噪声独立重复计算 100 次, 计算标定误差。

图 6 为非线性优化前后相机间角度和平移误差随噪声水平变化的结果, 可以看出, 通过非线性优化, 可以明显降低特征点中心提取误差对标定精度的影响。当方差在 1 pixel 内, 角度误差小于 0.03° , 平移误差小于 0.3 cm。在标定现场, 噪声误差一般小于 0.1 pixel, 结合相机网络数据优化模型^[15], 可判定位姿测量误差基本满足测量要求。

5.2 实验

实验采用 TMS32 作为处理器, 采用两个 OV2640 摄像头模块, 用张正友平面标定法^[16]对相

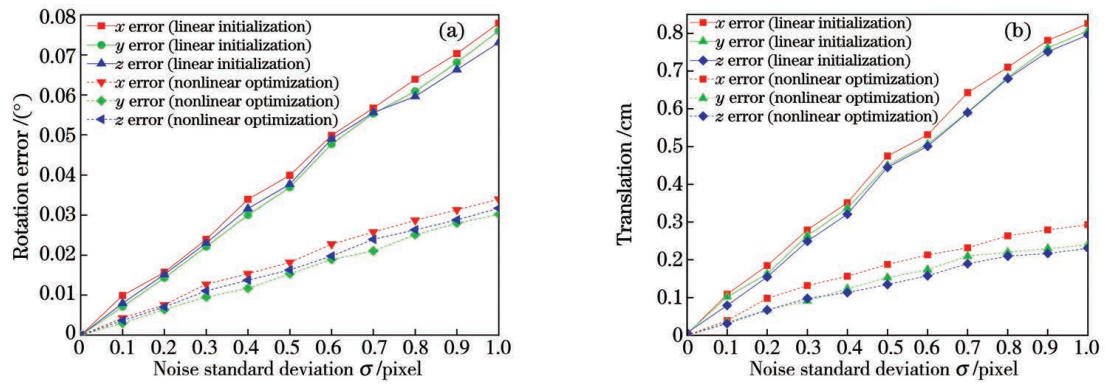


图 6 不同噪声水平下的角度和平移误差。(a)角度误差;(b) 平移误差

Fig. 6 Angle and translation errors at various noise levels. (a) Angle error; (b) translation error

机内参数进行标定, 标定结果如表 1 所示, 其中, $f_u = f/d_x, f_v = f/d_y$ 。

将相机放在精密位移平台上, 通过微调螺栓移动相机组。在监测靶面上设置 4 个直径为 10 mm、呈边长为 50 mm 的正方形分布的特征点, 实现相机间位姿的站内标定。实验装置如图 7 所示。

表 1 摄像机内参数标定结果

Table 1 Calibration results of inner parameters of camera

Camera	f /mm	u /pixel	v /pixel	f_u	f_v
Camera #1	3.16	816.37	816.59	513.10	513.37
Camera #2	3.13	916.14	916.53	513.63	513.70

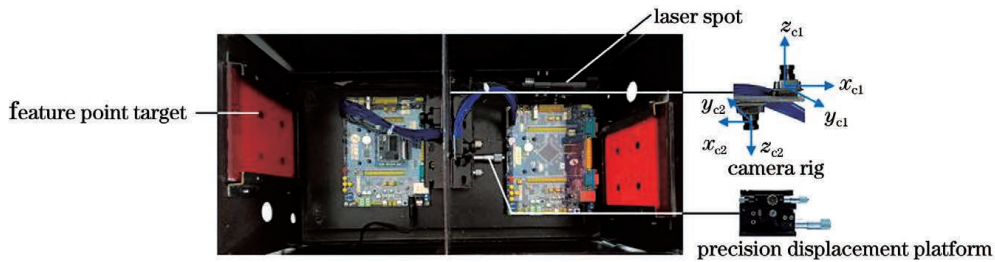


图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental setup

首先控制位移平台绕 z 轴旋转 5° , 相机组由位置 1 移动到位置 2, 然后使平台绕 y 轴旋转 5° , 并沿 x 轴方向移动 10 mm, 使相机组在 3 个不同的位置各采集 100 张靶面图像。通过提取特征点的中心像素坐标^[17], 得到每个特征点中心的平均坐标, 图像特征点提取以及中心定位结果如图 8 所示。

通过 P4P 算法求解相机与固定靶标之间的位姿关系, 进而得到相机的移动矩阵 H_1 、 G_1 、 H_2 、 G_2 为

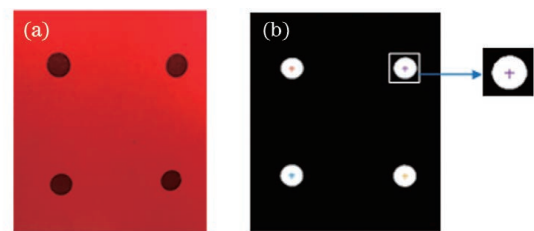


图 8 靶标原始图和特征点中心定位结果。(a)靶标原始图;(b)特征点中心定位结果

Fig. 8 Original target image and feature point center location result. (a) Original target image; (b) feature point center location result

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0.996133 & -0.087850 & 0.001150 & 0.087625 \\ 0.087851 & 0.996132 & -0.010012 & 0.083908 \\ -0.001047 & 0.001221 & 0.996133 & 0.961237 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} 0.996083 & 0.088406 & 0.000978 & 0.215178 \\ -0.088407 & 0.996084 & 0.000561 & 0.088021 \\ -0.000925 & -0.000645 & 0.996084 & 0.172316 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0.996110 & -0.008439 & 0.087667 & 0.041961 \\ 0.009214 & 0.999948 & -0.004251 & 0.230351 \\ -0.087626 & 0.005041 & 0.999944 & 30.013243 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 0.996113 & 0.004625 & -0.087986 & 0.231417 \\ -0.004868 & 0.999985 & 0.002537 & -0.048139 \\ 0.087973 & 0.002955 & 0.999983 & -30.601321 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}. \quad (28)$$

用本文算法得到的位姿转换矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} -0.759695 & -0.641369 & 0.107272 & 1.631721 \\ -0.492317 & 0.459501 & -0.739243 & 5.237192 \\ 0.424836 & -0.614412 & 0.616311 & 1.369018 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

使用方便描述角度变换的欧拉角 (ϕ, θ, φ) 代替旋转矩阵 \mathbf{R} , (t_x, t_y, t_z) 表示平移向量,得到 2 号相机坐标系到 1 号相机坐标系的变换即相对于 x 、 y 、 z 轴分别转动了 0.746° 、 -178.632° 和 0.575° , 平移了 1.63 cm 、 5.23 cm 、 1.37 cm 。

为得到相机间位姿标定的精确程度,使相机组

在 30 个不同的位置拍摄靶面图像,得到 240 个特征点的像素坐标,利用求得的相机间位姿转换关系,结合(20)、(21)式得到特征点的重投影坐标,进而求得重投影坐标和像素坐标的偏差。图 9 为特征点的重投影误差, x 、 y 轴的重投影误差均优于 0.08 pixel , 这进一步证明了本文算法的有效性。

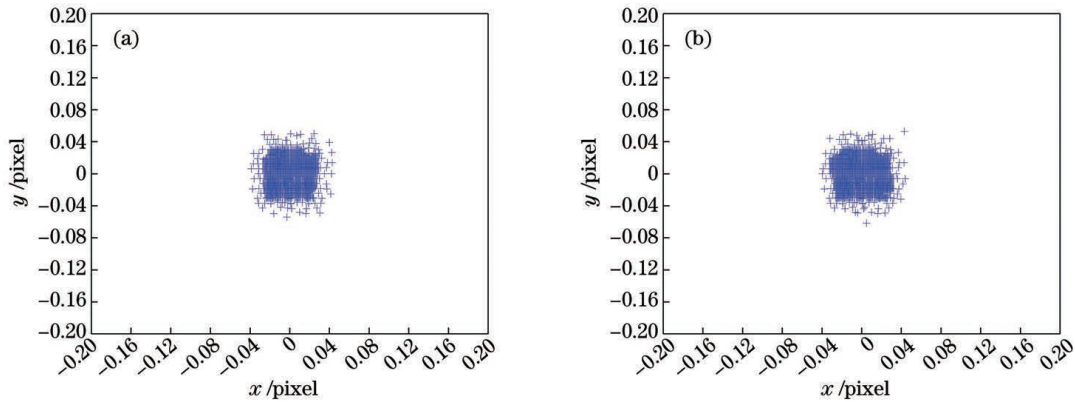


图 9 特征点重投影误差。(a)靶面 1;(b)靶面 2

Fig. 9 Reprojection error of feature point. (a) Target 1; (b) target 2

6 结 论

沉降变形传递相机网络视觉测量系统常用到由无公共视场的多相机组成的监测站。针对相机间位姿标定的问题,提出了一种基于特征点的相机间位姿标定方法。该方法中相机组执行 2 次运动即可完成标定,避免相机多次运动带来的不便。采用该方

法进行标定的过程仅需处理 6 幅图片中的 24 个特征点,计算量少。采用非线性优化的方法优化相机间的位姿参数,有效降低了特征点中心提取误差对标定精度的影响。通过实验评估标定结果的精度与准确性,所得结果验证了本文算法的可行性与有效性。

参 考 文 献

- [1] Min Y Z, Dang J W, Zhang Z H, et al. Online

- surface settlement monitoring system of image-based ballastless track[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1621-1627.
- 闵永智, 党建武, 张振海, 等. 图像式无砟轨道表面沉降在线监测系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1621-1627.
- [2] Min Y Z, Kang F, Dang J W, 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.
- 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.
- [3] Xu Q Y, Yang L H, Niu Z Y, et al. High-accuracy calibration of multi-camera positioning system based on precision angle reference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 115001.
- 徐秋宇, 杨凌辉, 牛志远, 等. 精密角度基准下的多相机定位系统高精度标定[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 115001.
- [4] Hu M B, Xia R B, Chen S L, et al. Global calibration of non-overlapping field of views cameras based on photogrammetry [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(10): 89-92.
- 胡茂邦, 夏仁波, 陈松林, 等. 基于摄影测量的非重叠视场相机全局标定[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(10): 89-92.
- [5] Xu Z Y, Wang Y, Yang C, et al. Multi-camera global calibration for large-scale measurement based on plane mirror[J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4149-4154.
- [6] Wang G, Shang Y, Guan B L, et al. Flexible calibration of setting relation of a multi-camera rig for non-overlapping views[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0604004.
- 王刚, 尚洋, 关棒磊, 等. 无重叠视场多相机组安装关系的灵活标定[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0604004.
- [7] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(3): 345-358.
- [8] Wen Z M, Wang Y J, Di N, et al. On-orbit hand-eye calibration using cooperative target [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1005-1012.
- 温卓漫, 王延杰, 邸男, 等. 基于合作靶标的在轨手眼标定[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(5): 1005-1012.
- [9] Ruland T, Pajdla T, Krüger L, et al. Globally optimal hand-eye calibration[C]//2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1035-1042.
- [10] Xiao X Z, Li W T, Tang Y D, et al. Position-pose measurement of rectangle with unknown aspect ratio based on nonlinear optimization[J]. *Information and Control*, 2016, 45(1): 108-113.
- 肖锡臻, 李文涛, 唐延东, 等. 基于非线性优化的长宽比未知矩形的位姿测量[J]. *信息与控制*, 2016, 45(1): 108-113.
- [11] Wang T Y, Dong W B, Wang Z Y, et al. Position and orientation measurement system based on monocular vision and fixed target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0427003.
- 王天宇, 董文博, 王震宇, 等. 基于单目视觉和固定靶标的位姿测量系统[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0427003.
- [12] Sun F M, Wang B. A note on the roots distribution and stability of the PnP problem[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(9): 1213-1219.
- 孙凤梅, 王波. 关于 PnP 问题多解的分布与解的稳定性的讨论[J]. *自动化学报*, 2010, 36(9): 1213-1219.
- [13] Huo J, Li Y H, Yang M, et al. Multi-camera calibration method based on minimizing the difference of reprojection error vectors[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(4): 844-853.
- [14] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory[M]//Watson G A. Numerical analysis. Heidelberg: Springer, 1978: 105-116.
- [15] Min Y Z. Study on camera chain vision measurement method of railway subgrade surface settlement[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014: 83-91.
- 闵永智. 铁路路基表面沉降相机链视觉测量方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014: 83-91.
- [16] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [17] Wang J, Wang H L, Xiang M S, et al. Subpixel accuracy central location of circle target based on nonmaximum suppression [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7): 1460-1468.
- 王静, 王海亮, 向茂生, 等. 基于非极大值抑制的圆目标亚像素中心定位[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(7): 1460-1468.