

文章编号 1004-924X(2020)12-2737-08

非公共视场双目相机位姿标定

李勤文^{1,2}, 倪首军³, 王志乾^{1*}, 李建荣¹, 沈铖武^{1,2}, 杨文昌^{1,2}, 刘玉生^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

摘要:针对现有双目位姿测量系统中仅有两个目标点,无法利用额外标定物对两个无公共视场相机进行标定的问题,提出一种无需改变系统结构,可以直接利用现有设备的双目相机位姿标定方法。首先固定两相机坐标系与公共目标坐标系的位置关系,通过多次移动标定物的方式得到多组坐标数据;然后,利用一种基于直接线性变换方法的改进算法对每个相机坐标系到公共目标坐标系的转换关系进行优化求解;最后,利用优化后的相机坐标系到公共目标坐标系的转换关系求得两个无公共视场相机坐标系之间的转换关系。利用两个相机坐标系之间的转换关系求得两目标点距离,并作为标定精度的评价指标。实验结果表明:当目标点处在各自相机视场范围内,相机与目标点之间的测量距离为 700~1 300 mm 时,利用本文方法求得的目标点距离的均方差 <0.2 mm,满足实际应用需求。

关键词:视觉测量;非公共视场;相机标定;直接线性变换

中图分类号:TP391.9 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20202812.2737

Calibration of binocular camera with non-common field of view

LI Qin-wen^{1,2}, NI Shou-jun³, WANG Zhi-qian^{1*}, LI Jian-rong¹, SHEN Cheng-wu^{1,2},

YANG Wen-chang^{1,2}, LIU Yu-sheng^{1,2}

(1. *Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhiqian_wang@sina.com*

Abstract: For the existing binocular position and attitude measurement system with only two target points, it is impossible to use additional calibration objects to calibrate the two cameras without a common field of view. In this study, a calibration method for a binocular camera without changing the system structure and instead directly using the existing equipment was proposed. First, the relative position between the two camera coordinate systems and the common coordinate system was fixed, and multiple sets of coordinate data were acquired by moving the calibrator several times. An improved algorithm based on a direct linear transformation (DLT) method was used to optimize the relative transformation from each camera coordinate system to the common coordinate system. Finally, the relative conversion between the two

收稿日期:2020-04-08;修订日期:2020-06-01.

基金项目:吉林省科技厅技术攻关项目资助(No. 20190302086GX, No. 20200403067SF)

camera coordinate systems was obtained using the optimized relative conversion from each camera coordinate system to the common coordinate system. The distance between the two target points could be obtained using the relative conversion between the two camera coordinate systems, and this distance was selected as the evaluation index of the calibration accuracy. The experimental results show that the mean square error of the distance between the target points obtained using this method is less than 0.2 mm, which meets the practical application requirements.

Key words: visual measurement; non-common field of view; camera calibration; direct linear transformation method

1 引言

视觉测量系统由于其具有非接触,灵活性强,采集迅速等优点而被广泛应用^[1]。在大多数视觉测量系统中,单台相机很难覆盖所有测量目标,而多相机系统具有比单个相机更大的视场,通常被用于获取大型物体或场景的几何信息^[2-3]。决定多相机测量系统准确性的关键因素是相机之间的位姿关系标定。目前,多相机系统标定多利用额外的标定物,如平面棋盘格^[4-5]或基于共线三点的一维标定物^[6]来完成。然而当实际实验条件有限,无法借助额外的标定物且已有的目标特征点不足 3 个时,现有的标定方法失效,需要寻求其他解决办法。

目前,双目相机位姿标定方法多是针对于双目立体相机,利用两个几何关系相对固定的相机以不同视角获取被测物体的影像信息,再利用同一个视觉信息在不同相机下的匹配特征不同进行相机标定,因此两相机之间要具有重叠的视场^[7-8]。然而,在一些特殊的环境下,由于物体的遮挡或视场的限制,两相机无法获得重叠的视场,因此要进行非公共视场相机的标定^[9-10]。目前,对无公共视场相机标定的研究可分为两类:一类是利用其他设备建立多相机视场之间的联系,如 Long^[11]和 Wang^[12]等人利用光学镜的反射特性对相机视场进行改善,克服了所有相机必须直接观察普通目标的局限,相机能够通过镜面间接观察目标。Sun^[13]等人利用多组球面目标和高精度辅助相机对非公共视场相机进行标定。标定相机观测一组球体,辅助相机观测所有的球体。每个相机在各自的视场中重建球面中心后实现全局标定。另一类是利用标定物之间固有的位置约束关系进行相机标定,如 Liu^[14]等人利

用两个相对位置关系不变的平面棋盘格组成复合目标对非公共视场相机进行标定。通过求解各视觉传感器坐标系到世界坐标系的关系,进而得到各视觉传感器之间的相对位姿。

本文针对自动对准系统中非公共视场的双目相机标定问题,不借助于高精度靶标或额外标定物,利用现有系统结构寻求两相机位姿关系标定的解决办法。通过多次移动标定物得到多组坐标数据的方法进行解算,由于相机视场范围有限,因此得到的目标点较为密集。然而,传统直接线性变换(Direct Linear Transformation, DLT)算法精度依赖于目标点的稀疏度^[15],为了克服 DLT 方法的局限性,本文对 DLT 求解方法进行了改进,并通过实验对比证明了本文方法的有效性。

2 系统概述

基于双目测量的自动对准系统如图 1 所示,系统由位于上方部件上的两个光学测量装置 A, B 以及位于底部部件上的两个合作目标点 A, B 组成。光学测量装置内含有光学测量相机和激光测距仪,底部部件长 2 m,宽 1.5 m,测量范围为 700~1 300 mm。测量过程中,2 个光学测量相机分别对底部部件上的合作目标点进行拍摄,得到点的图像坐标用于位姿解算,计算两部件的对准偏差,调整部件完成对准,在此过程中系统测量误差要 < 2 mm。为了完成上、下两部件之间对准偏差的解算,需要对光学测量装置内的两个光学相机 A, B 进行标定。然而,由于底部部件尺寸较大,两光学相机之间没有公共视场,因此需要考虑无公共视场相机的标定问题。为了尽可能利用现有系统完成两光学相机之间位姿关

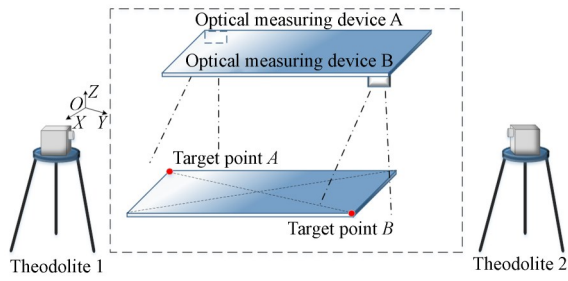


图 1 双目相机标定系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of binocular camera calibration

系的标定,摆脱传统的依靠高精度靶标或较多数量特征点的相机标定方法。本文利用两台莱卡经纬仪测量目标点在经纬仪坐标系下的坐标,进而对两相机之间位姿关系进行标定的方法。图 1 所示为标定系统示意图,以莱卡经纬仪 1 的坐标系 $O\text{-}XYZ$ 为公共目标坐标系,两个经纬仪通过交汇测量得到目标点 A 和目标点 B 在目标坐标系下的坐标。之后利用原有系统中的两个无公共视场相机分别对底部移动部件对角线上的目标点 A 和目标点 B 进行拍摄,得到点的图像坐标。利用得到的点在目标坐标系 $O\text{-}XYZ$ 下的坐标和点的图像坐标进行相机标定。针对仅有两个目标点的情况,为了充分利用点的坐标信息,标定过程中保持上方部件和两经纬仪固定不动,即公共目标坐标系与两测量相机坐标系保持固定不动,通过多次移动底部部件,得到目标点 A 、目标点 B 的多组图像坐标和目标坐标进行两个无公共视场相机的标定。

3 非公共视场双目相机标定

图 2 所示为非公共视场双目相机标定简图。在测量场内建立公共目标坐标系 $O\text{-}XYZ$ 、相机 A 坐标系 $O_{CA}\text{-}X_{CA}Y_{CA}Z_{CA}$ 和相机 B 坐标系 $O_{CB}\text{-}$

$$R_A = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \beta \sin \gamma \\ -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$t_A = [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T, \quad (3)$$

其中: α, β, γ 表示公共目标坐标系到相机 A 坐标系的旋转角。规定坐标系之间的转换关系,采用

$X_{CB}Y_{CB}Z_{CB}$, 各坐标系之间的位置关系保持固定。多次移动标定物,利用两台莱卡经纬仪测得目标点 A, B 每次移动后的坐标,分别为 $P_A^i = (X_A^i, Y_A^i, Z_A^i)^T, P_B^i = (X_B^i, Y_B^i, Z_B^i)^T$, 对应的图像点坐标分别为 $p_a^i = (u_a^i, v_a^i)^T, p_b^i = (u_b^i, v_b^i)^T$, 在各自相机坐标系下的坐标为 $c_a^i = (x_a^i, y_a^i, z_a^i)^T, c_b^i = (x_b^i, y_b^i, z_b^i)^T$, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。为了标定两相机之间的位姿关系,需要先分别标定出相机 A 、相机 B 到公共目标坐标系 $O\text{-}XYZ$ 之间的外参数矩阵 R_A, t_A 和 R_B, t_B , 进而求出两相机坐标系之间的旋转平移关系 R_{AB}, t_{AB} 。

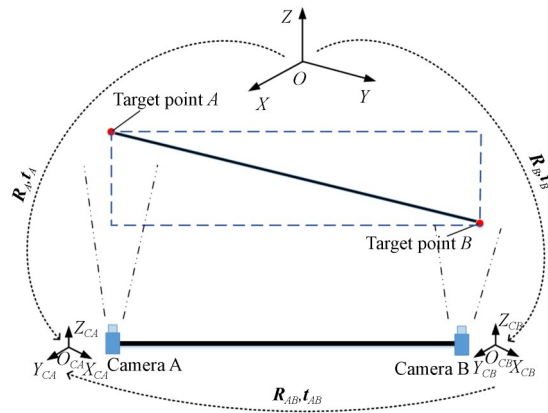


图 2 非公共视场双目相机标定简化图

Fig. 2 Simplified calibration diagram of binocular camera with non-public field of view

3.1 相机外参数矩阵标定原理

以相机 A 为例,建立单相机成像方程:

$$z_a p_a = K_A [R_A \quad t_A] P_A, \quad (1)$$

其中: z_a 为标量系数; K_A 为相机内参数矩阵; $[R_A \quad t_A]$ 表示公共目标坐标系到相机 A 坐标系的转换矩阵,即相机的外参数矩阵, R_A 为旋转矩阵, t_A 为平移矩阵,表示为:

先平移后旋转的表示方式,用齐次坐标写成矩阵形式,得到:

$$z_a^i \begin{bmatrix} u_a^i \\ v_a^i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta X \\ 0 & 1 & 0 & \Delta Y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A^i \\ Y_A^i \\ Z_A^i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A^i \\ Y_A^i \\ Z_A^i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: $i=1, 2, 3, \dots, n$, 为目标点移动的次数; $r_{11} \sim r_{33}$ 表示矩阵 R_A 内相应位置的元素。经典

DLT 算法标定单相机的基本原理是通过矩阵变换将式(4)整理为 $CM=D$ 的形式, 其中:

$$C = \begin{bmatrix} X_A^1 & Y_A^1 & Z_A^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_a^1 X_A^1 & -u_a^1 Y_A^1 & -u_a^1 Z_A^1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_A^1 & Y_A^1 & Z_A^1 & 1 & -v_a^1 X_A^1 & -v_a^1 Y_A^1 & -v_a^1 Z_A^1 \\ & & & & & \dots & \dots & & & & \\ X_A^n & Y_A^n & Z_A^n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_a^n X_A^n & -u_a^n Y_A^n & -u_a^n Z_A^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_A^n & Y_A^n & Z_A^n & 1 & -v_a^n X_A^n & -v_a^n Y_A^n & -v_a^n Z_A^n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}^T$$

$$D = \begin{bmatrix} u_a^1 & v_a^1 & \dots & u_a^n & v_a^n \end{bmatrix}^T$$

C, D 中全部为已知量, M 为 11×1 的未知矩阵。当目标点移动次数 $n \geq 6$ 时, 可以列出的方程多于 11 个, 进而利用最小二乘法解得:

$$M = (C^T C)^{-1} C^T D. \quad (6)$$

结合式(2)~式(5)可分离出相机 A 到公共目标坐标系之间的外参数矩阵, 同理可求出相机 B 到公共目标坐标系之间的外参数矩阵。然而, 由于两光学相机的视场范围有限实际测量中两目标点的移动范围也有限, 目标点分布较为密集, 使得经典 DLT 算法的精度较低甚至出现病态解, 影响标定精度, 因此本文利用激光测距数据对 DLT 算法的解算结果进行了改进。

3.2 基于 DLT 的改进方法

在双目相机系统中增加激光测距仪, 相机与激光测距仪的距离固定, 相机光轴方向与激光测距仪的出光方向基本相同^[16]。在标定后利用激光测距仪得到的一维数据, 对由 DLT 方法求得的相机的外参数矩阵 R_A, t_A 进行优化, 然后利用 Levenberg-Marquardt (LM) 非线性算法进行全局

求解, 提高标定结果的准确度。

以相机 A 为例, 由 3.1 节方法求得的相机参数可以得到目标点 A 在相机坐标系下的坐标 $c_a^i = (x_a^i, y_a^i, z_a^i)^T$, 利用标定后的激光测距仪数据代替目标点 A 在相机 A 坐标系下沿光轴方向的坐标 z_a^i , 得到 $c_a^i = (x_a^i, y_a^i, z_a^i)^T$ 。已知目标点 A 两次移动前后在目标坐标系下的坐标为 P_A^i, P_A^{i+1} , 在相机 A 坐标系下的坐标为 c_a^i, c_a^{i+1} , 相机光心为 C , 则有:

$$(C c_a^i \times C c_a^{i+1}) \cdot (R_A \cdot P_A^i P_A^{i+1}) = 0. \quad (7)$$

这里的 $R_A \cdot P_A^i P_A^{i+1}$ 表示将向量 $P_A^i P_A^{i+1}$ 由目标坐标系空间转换到相机 A 坐标系空间表示, R_A 为待优化的旋转矩阵, 它是沿目标坐标系三轴的旋转角 α, β, γ 的函数, 如公式(2)所示。($C c_a^i \times C c_a^{i+1}$) 表示平面 $C c_a^i c_a^{i+1}$ 的法向量, 若 R_A 为真值, 则 $R_A \cdot P_A^i P_A^{i+1}$ 在平面上, 二者点积为 0。因此可构造目标函数:

$$V(\alpha, \beta, \gamma) = \min \sum_{i=1}^n v_i(\alpha, \beta, \gamma) = \min \sum_{i=1}^n \left[\begin{bmatrix} x_a^i \\ y_a^i \\ z_a^i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_a^{i+1} \\ y_a^{i+1} \\ z_a^{i+1} \end{bmatrix} \cdot \left(R_A(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \begin{bmatrix} X_A^i - X_A^{i+1} \\ Y_A^i - Y_A^{i+1} \\ Z_A^i - Z_A^{i+1} \end{bmatrix} \right) \right]^2. \quad (8)$$

理想情况下 $V(\alpha, \beta, \gamma) = 0$, 然而由于测量噪声的存在, 实际求得的 R_A 不一定使式(8)为 0。为了最小化式(8)的误差, 用 LM 非线性优化方法对式(8)进行优化求解。用以指导优化方向的雅可比矩阵 $J(\alpha, \beta, \gamma)$ 表

示为:

$$J(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial v_1}{\partial \beta} & \frac{\partial v_1}{\partial \gamma} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial v_n}{\partial \alpha} & \frac{\partial v_n}{\partial \beta} & \frac{\partial v_n}{\partial \gamma} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

每次迭代过程中,目标函数 $V(\alpha, \beta, \gamma)$ 的梯度为 $g_k = J_k^T v_k$, k 为迭代次数。迭代步长 $d_k = -(J_k^T J_k + \mu_k I)^{-1} J_k^T v_k$, μ_k 为 LM 算法的阻尼系数,迭代初始值 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ 可由 3.1 节求得的旋转矩阵反算得到。至此可以带入 LM 非线性优化算法求解旋转角,进而得到旋转矩阵 R_A 。

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a^1 - r_{11} X_A^1 - r_{12} Y_A^1 - r_{13} Z_A^1 \\ y_a^1 - r_{21} X_A^1 - r_{22} Y_A^1 - r_{23} Z_A^1 \\ z_a^1 - r_{31} X_A^1 - r_{32} Y_A^1 - r_{33} Z_A^1 \\ \dots \\ x_a^n - r_{11} X_A^n - r_{12} Y_A^n - r_{13} Z_A^n \\ y_a^n - r_{21} X_A^n - r_{22} Y_A^n - r_{23} Z_A^n \\ z_a^n - r_{31} X_A^n - r_{32} Y_A^n - r_{33} Z_A^n \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 $r_{11} \sim r_{33}$ 为由公式(8)求得的旋转矩阵 R_A 中的元素。则公式(11)可表示为 $C_1 t_A = D_1$, 由最小二乘法可得 $t_A = (C_1^T C_1)^{-1} C_1^T D_1$, 从而可以得到优化后的平移矩阵 t_A 。

为了保证解的准确性,防止相机外参旋转矩阵和平移矩阵各自优化有可能带来的局部解问题以及相机实际内参数值与标称值不符,进而影响外参求解精度的问题,通过最小化重投影误差的方法对相机内外参数进行全局求解。构造重投影误差函数:

$$F = \min \sum_{i=1}^n w_i (f_x, \gamma, u_0, f_y, v_0, \alpha, \beta, \gamma, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = \min \sum_{i=1}^n [(u_a^i - M_1 P_A^i / z_a^i)^2 + (v_a^i - M_2 P_A^i / z_a^i)^2], \quad (12)$$

其中: M_1, M_2 表示取投影矩阵 M 的第一、第二行,上标 i 表示所有现存数据, $[u_a^i \ v_a^i]^T$ 表示实际测得的图像点坐标。整个函数表示实际测得图像点坐标与空间点以 $(f_x, \gamma, u_0, f_y, v_0, \alpha, \beta, \gamma, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 为参数进行重投影后得到的图像点坐标之差。以给定的相机内参数值及由式(8)和式(11)求得的相机外参旋转角 α, β, γ 和平移距离 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为初值,再次利用 LM 非线性算法对

已知待优化的平移矩阵 $t_A = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$, 由 $c_a^i = (x_a^i, y_a^i, z_a^i)^T$ 与 $P_A^i = (X_A^i, Y_A^i, Z_A^i)^T$ 的关系:

$$\begin{bmatrix} x_a^i \\ y_a^i \\ z_a^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A^i + \Delta X \\ Y_A^i + \Delta Y \\ Z_A^i + \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (10)$$

可以得到:

$$\begin{bmatrix} x_a^1 - r_{11} X_A^1 - r_{12} Y_A^1 - r_{13} Z_A^1 \\ y_a^1 - r_{21} X_A^1 - r_{22} Y_A^1 - r_{23} Z_A^1 \\ z_a^1 - r_{31} X_A^1 - r_{32} Y_A^1 - r_{33} Z_A^1 \\ \dots \\ x_a^n - r_{11} X_A^n - r_{12} Y_A^n - r_{13} Z_A^n \\ y_a^n - r_{21} X_A^n - r_{22} Y_A^n - r_{23} Z_A^n \\ z_a^n - r_{31} X_A^n - r_{32} Y_A^n - r_{33} Z_A^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (11)$$

标定结果进行全局求解,可以得到优化后的相机外参数值,进而由式(2)和式(3)得到相机的外参旋转矩阵 R_A 和平移矩阵 t_A 。同理可求出相机 B 的外参旋转矩阵 R_B 和平移矩阵 t_B 。因此,按照先平移后旋转定义的相机 B 坐标系到相机 A 坐标系的转换矩阵为:

$$t_{AB} = t_B - t_A, R_{AB} = R_A R_B^{-1}. \quad (13)$$

4 实验

图 3 所示为双目相机标定系统示意图,目标点 A, B (如图 4) 的目标坐标系坐标由两台 TM5100A 徕卡经纬仪通过交汇测量得到,点 A, B 的图像坐标由光学测量装置 A, B 进行测量,光学测量装置如图 5 所示。光学测量装置包含有光学测量相机 A, B 和两个激光测距仪,相机与激光测距仪的位置关系已知。两光学相机采用 MT9V032CMOS 数字图像传感器,像素尺寸为 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$,分辨率为 400×400 ,相机焦距为 35 mm。通过多次移动底部的移动部件,得到多组目标点坐标。然后对直接利用 DLT 算法求解相机 A、相机 B 和公共目标坐标系之间的参数矩阵,进而得到两相机之间的位姿关系,与利用本文提出的方法对相机 A、相机 B 的外参数进行优

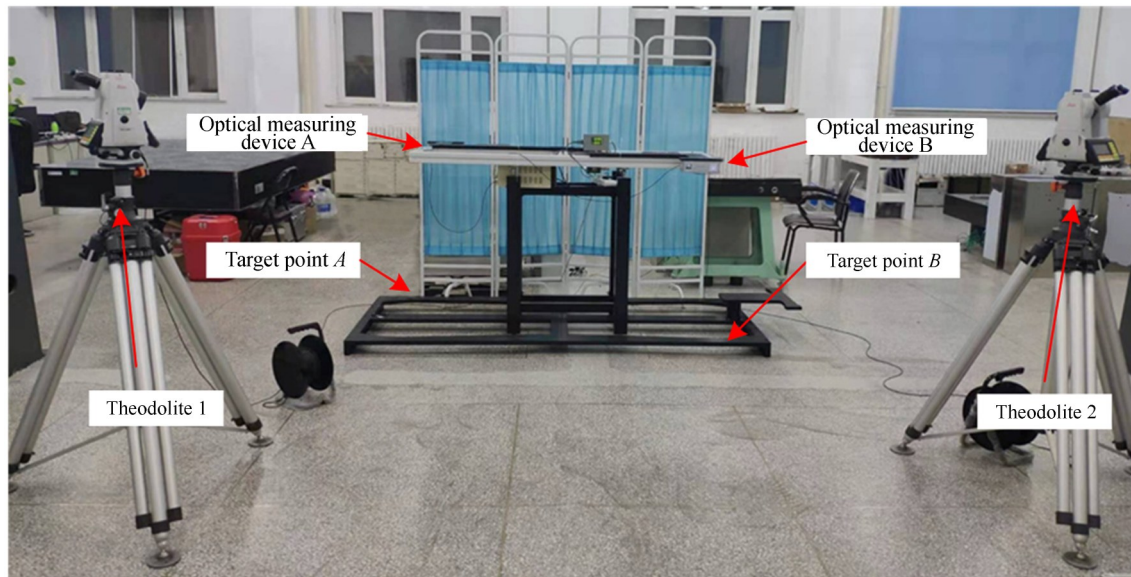


图3 双目相机位姿标定系统

Fig. 3 Pose calibration system of binocular camera



图4 合作目标点

Fig. 4 Cooperation targets

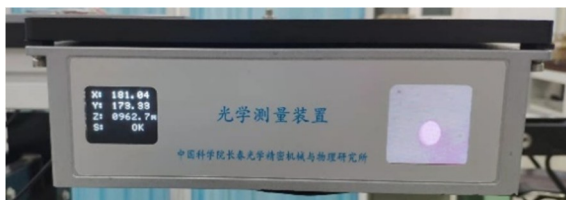


图5 光学测量装置

Fig. 5 Optical measuring device

化后得到的两相机的位姿关系进行对比,结果如表1所示。

为了验证标定结果的准确性,利用求得的两相机之间的位姿参数,将相机B坐标系下的目标点转换到相机A坐标系下,计算两点之间的距离 d_{AB} ,并与经纬仪测得的两点之间的距离 t_{AB} 进行对比,将经纬仪测得的坐标值看作真值,利用公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_{AB} - t_{AB})^2}$$

计算两点之间距离误差的均方值,结果如表2所示。由于实际地面不平整和底部部件微小变形的影响,实际测得两目标点之间的距离 t_{AB} 有所不同。为了保证结果的准确性,在测量范围内选取10组数据对相机A,B进行标定,得到两相机之间的位姿关系,之后选取另外10组数据计算两目标点之间的距离与真值的误差。从表2可以看出,本文标定算法对两相机之间位姿关系标定的准确性优于DLT方法,在系统测量范围700~1300mm内随机选取10组数据,求得目标点之间距离的均方差 <0.2 mm,满足实际应用需求。

表 1 DLT方法与本文标定方法结果对比

Tab. 1 Comparison of DLT method and our calibration method

标定方法	$\alpha_{AB}/(^{\circ})$	$\beta_{AB}/(^{\circ})$	$\gamma_{AB}/(^{\circ})$	$\Delta X_{AB}/\text{mm}$	$\Delta Y_{AB}/\text{mm}$	$\Delta Z_{AB}/\text{mm}$
DLT	-15.27	-0.20	-0.62	-1 491.75	1 013.31	-4.81
本文	1.74	-1.97	1.20	-1 512.18	1 048.81	0.11

表 2 由两相机位姿关系求得的目标点 A, B 距离的均方差

Tab. 2 Mean square error of the distance between target points A and B obtained from the pose relationship of the two cameras (mm)

N	d_{AB}		t_{AB}	$d_{AB} - t_{AB}$		σ	
	DLT	本文		DLT	本文	DLT	本文
1	1 805.58	1 803.31	1 803.37	2.21	-0.06		
2	1 803.97	1 803.15	1 803.14	0.83	0.01		
3	1 810.84	1 803.23	1 803.34	7.50	-0.11		
4	1 807.97	1 803.43	1 803.56	4.41	-0.13		
5	1 807.04	1 802.63	1 802.81	4.23	-0.18		
6	1 808.44	1 802.90	1 803.15	5.29	-0.25	5.566	0.143
7	1 812.13	1 802.76	1 802.87	9.26	-0.11		
8	1 810.87	1 802.67	1 802.84	8.03	-0.17		
9	1 804.31	1 803.03	1 803.13	1.18	-0.10		
10	1 802.80	1 803.03	1 803.10	-0.30	-0.07		

5 结 论

本文针对相机标定过程中目标特征点较少的问题,通过多次移动目标点得到多组数据进行标定,为双目相机位姿关系的标定提供了新思路。针对实际系统中两目标点移动范围有限导致的传统 DLT 方法精度较低的问题,增加激光

测距数据对标定结果进行优化,选取由两相机位姿关系求得的两目标点之间的距离作为标定精度评价指标,以经纬仪测得的两目标点距离作为真值。实验结果表明,当相机与目标点之间的距离为 700~1 300 mm 时,由本文方法求得的两目标点之间距离的均方差 < 0.2 mm,证明本文提出的非公共视场双目相机位姿标定方法是有效的。

参考文献:

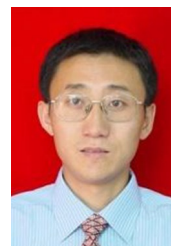
- [1] 王文瑞,刘克俭,顾金麟,等. 有关节约约束超冗余机械臂的增益优化轨迹规划[J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1075-1086.
WANG W R, LIU K J, GU J L, *et al.*. Gain-optimization trajectory planning method for hyper-redundant manipulator with joint constraints[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1075-1086. (in Chinese)
- [2] 吕家国,蒋晓瑜,张鹏炜,等. 医疗机器人双目视觉硬件系统设计与实现[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 307-314.
LÜ J G, JIANG X Y, ZHANG P W, *et al.*. Hardware design and implementation of binocular vision system for a medical robot [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 307-314. (in Chinese)
- [3] 赵祚喜,冯荣,朱裕昌,等. 空间点的多视图 DLT 三维定位[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 212-222.
ZHAO Z X, FENG R, ZHU Y CH, *et al.*. Multi-view DLT three-dimensional positioning method for spatial points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(1): 212-222. (in Chinese)
- [4] YANG T L, ZHAO Q C, WANG X, *et al.*. Accurate calibration approach for non-overlapping multi-camera system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 110: 78-86.

- [5] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [6] LIU Z, ZHANG G J, WEI Z Z, *et al.*. Novel calibration method for non-overlapping multiple vision sensors based on 1D target [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(4): 570-577.
- [7] XIAO Z Z, JIN L, YU D H, *et al.*. A cross-target-based accurate calibration method of binocular stereo systems with large-scale field-of-view [J]. *Measurement*, 2010, 43(6): 747-754.
- [8] YANG L, WANG B Q, ZHANG R H, *et al.*. Analysis on location accuracy for the binocular stereo vision system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-16.
- [9] DONG S, SHAO X X, KANG X, *et al.*. Extrinsic calibration of a non-overlapping camera network based on close-range photogrammetry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6363-6370.
- [10] LIU Z, LI F J, ZHANG G J. An external parameter calibration method for multiple cameras based on laser rangefinder [J]. *Measurement*, 2014, 47: 954-962.
- [11] LONG G, KNEIP L, LI X, ZHANG X, YU Q. Simplified mirror-based camera pose computation via rotation averaging [C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015: 1247-1255.
- [12] WANG P, WANG J M, XU J, *et al.*. Calibration method for a large-scale structured light measurement system [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(14): 3995-4002.
- [13] SUN J H, HE H B, ZENG D B. Global calibration of multiple cameras based on sphere targets [J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 77.
- [14] LIU Z, ZHANG G J, WEI Z Z, *et al.*. A global calibration method for multiple vision sensors based on multiple targets [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(12): 125102.
- [15] 王德咏, 葛修润, 罗先启, 等. 基于改进 DLT 算法的数字近景摄影测量 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(S1): 16-20, 26.
WANG D Y, GE X R, LUO X Q, *et al.*. Study on digital close-range photogrammetry based on improved DLT algorithm [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2011, 45(S1): 16-20, 26. (in Chinese)
- [16] 冯春, 吴洪涛, 陈柏. 基于多传感器融合的航天器间位姿参数估计 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1616-1622.
FENG CH, WU H T, CHEN B. Method for relative pose parameters between spacecrafts based on mixing of multi-sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1616-1622. (in Chinese)

作者简介:



李勤文(1993-),女,山东枣庄人,博士研究生,2016年于山东大学获得学士学位,主要从事光电测量、自动控制等方面的研究。E-mail: liqinwen93@163.com



王志乾(1969-),男,吉林省吉林市人,研究员,博士生导师,1987年于吉林工学院获得学士学位,2009年于吉林大学获得博士学位,主要从事光电测量、数字信号处理方面的研究。E-mail: zhiqian_wang@sina.com