

基于定向分层靶标的相机参数标定

赵敏*, 李晓港, 苏泽鹏, 朱凌建

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 普通靶标用于相机标定时需要保证其在各角度成像的完整, 靶标占相机视场比例较小, 相机标定精度低, 且变焦测量中相机视场改变, 标定精度进一步降低。理论分析了单应矩阵的特点, 发现从各角度拍摄的靶标图片中靶点不完全相同, 这不影响单应矩阵的计算和相机标定。结合仿真分析, 设计了一种定向分层靶标, 第一层设计定向标志点, 靶点向外层逐渐增大, 针对不同的视场采用不同范围的层, 靶点在视场中所占比例一直较大, 确保相机标定精度。提出基于共线原理和射影变换结合的靶点匹配方法, 只要靶标的定向特征点出现在图片中, 即能实现靶点识别与匹配, 进而提高靶标使用的灵活性和相机标定效率。实验结果表明, 定向分层靶标的靶点识别与匹配方法准确有效, 不受靶标部分靶点缺失的影响; 使用该靶标可以提高相机标定精度, 且标定精度不受相机视场改变的影响。

关键词 测量; 相机视场; 单应矩阵; 定向分层靶标; 共线原理; 靶点匹配

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1612004

Camera Parameter Calibration Based on Directional Layered Target

Zhao Min*, Li Xiaogang, Su Zepeng, Zhu Lingjian

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract When an ordinary target is used for camera calibration, it is necessary to ensure the integrity of its imaging at all angles. As the small proportion of the target in the camera field of view leads to the low camera calibration accuracy, the calibration accuracy will be further reduced when the camera field of view changes in zoom measurement. In this paper, we theoretically analyze the characteristics of homography matrices and find that the targets in target images captured from different angles are different, but it does not affect the calculation of homography matrices and camera calibration. According to the simulation analysis, we design a directional layered target. In the first layer of the target, the directional marks are designed, and the size of the targets gradually increases toward the outer layer. In different fields of view, layers of different ranges are used, and the targets should always have a large proportion in the field of view to ensure the camera calibration accuracy. Moreover, the target matching method based on the combination of the collinear principle and projective transformation is proposed. As long as the directional feature points of the target appear in the image, the recognition and matching of targets can be realized, which improves the flexibility of the target and the efficiency of camera calibration. The experimental results indicate that the target recognition and matching method of the directional layered target is accurate and effective, which is not affected by the lack of some targets. Therefore, this target can improve the camera calibration accuracy, and the calibration accuracy is free from the influence of the change in the camera field of view.

Key words measurement; camera field of view; homography matrix; directional layered target; collinear principle; target matching

1 引言

近年来, 视觉测量技术发展迅速, 在工业测量、航

空航天、三维重建等领域中得到广泛应用。相机标定是视觉测量技术中的必不可少的环节, 标定结果直接影响了视觉系统的测量精度^[1]。为了实现清晰的成

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-03-08; 录用日期: 2022-03-24

基金项目: 陕西省重点研发计划(2020ZDLGY10-04)

通信作者: *zhaomin1973@xaut.edu.cn

像,测量过程中可能需要调焦,相机参数随之改变,需要重新标定相机参数^[2]。随着变焦测量的广泛采用^[3-5],实现相机的高精度、高效率现场标定具有现实的研究意义。

张正友标定方法^[1]是目前应用最为广泛的标定方法之一,借助平面靶标实现相机参数标定。许多研究者针对靶标对相机标定精度的影响进行了研究和分析, Li 等^[6]发现除了相机模型和标定方法之外,靶标样式和靶点定位精度也对标定精度的影响较大,当靶点定位精度高于 0.5 pixel 时标定精度较高;袁铭等^[7]通过仿真指出增加靶点数量可以提高标定精度,但靶点数量增加到一定数值后标定精度不再提高;支健辉等^[8-9]实验研究了靶标尺寸对于标定精度的影响,提出选用合适的靶标可以有效提高标定精度。这些研究揭示了靶标是影响测量精度的关键因素。常用靶标都是固定尺寸,靶标必须完全在图片中,才能进行靶点匹配和标定,这样的靶标使用不够灵活,且靶标占成像视场的比例较小,标定精度不高。在视觉测量中,焦距改变导致相机视场发生变化,一般采用同一个靶标重新标定相机内参数^[10],这带来的问题是标定精度随视场的增大而降低;为了保证标定精度,采用大小不同的多块

靶标,针对不同大小的视场选择合适的靶标^[11],这导致标定成本高、效率低。普通靶标用于相机标定时需要保证其在各角度成像的完整,靶标占相机视场的比例较小,标定精度低,且变焦测量中相机视场会改变,标定精度进一步降低。

为了解决以上问题,本文理论分析了单应矩阵的特点,发现由各角度拍摄的靶标图片中靶点不完全相同,不影响单应矩阵的计算和相机标定。结合仿真分析,设计了一种定向分层靶标,只要靶标第一层的定向特征点出现在图片中,即能实现靶点识别与匹配,这提高了靶标使用的灵活性和相机标定效率。在不同相机视场下,采用不同范围的靶点进行计算,可确保相机标定精度。

2 靶标对相机标定的影响

2.1 相机标定原理

如图 1 所示,假设空间中一点在世界坐标系下的坐标向量为 $M = (x_w, y_w, z_w)^T$, 其投影到图像坐标系下的像素坐标向量为 $m = (u, v)^T$, 相应的齐次坐标向量为 $\tilde{M} = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 与 $\tilde{m} = (u, v, 1)^T$ 。

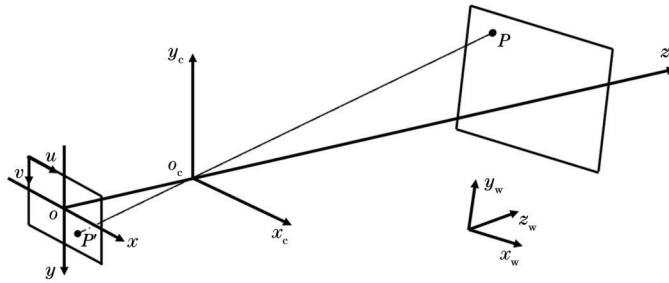


图 1 针孔成像模型

Fig. 1 Pinhole imaging model

根据相机针孔成像模型^[12-14],空间点 M 与其投影点 m 之间的射影关系为

$$s\tilde{m} = K [R \quad t] \tilde{M}, \quad (1)$$

式中: s 为尺度因子; 旋转矩阵 R 与平移向量 t 为相机的外参矩阵; K 为相机的内参矩阵, 定义为

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: f_x, f_y 为相机的等效焦距; (u_0, v_0) 为相机主点的坐标。相机镜头存在畸变^[15], 导致理想成像点与实际成像点并不重合, 考虑二阶径向、切向畸变的数学模型^[16-17]为

$$\begin{cases} x = x_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) + p_1(3x_d^2 + y_d^2) + 2p_2 x_d y_d \\ y = y_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) + p_2(3x_d^2 + y_d^2) + 2p_1 x_d y_d \end{cases}, \quad (3)$$

式中: (x, y) 为理想成像点坐标; (x_d, y_d) 为实际成像点坐标; $r_d^2 = x_d^2 + y_d^2$; k_1, k_2 为径向畸变系数; p_1, p_2 为切

向畸变系数。

本文利用张正友标定法求解相机参数, 该方法具有精度高及操作简单等优点。假设平面靶标所有靶点位于世界坐标系 xy 平面, 即 $z_w = 0$ 。此时 $M = (x_w, y_w)^T$, $\tilde{M} = (x_w, y_w, 1)^T$, 记旋转矩阵 R 的第 i 列为 r_i , 由式(1)可得

$$s\tilde{m} = K [r_1 \quad r_2 \quad t] \tilde{M} = H \tilde{M}, \quad (4)$$

式中: H 为靶标平面与对应图像之间的单应矩阵, 定义为

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad h_3] = \lambda K [r_1 \quad r_2 \quad t], \quad (5)$$

式中: λ 为任意非零的比例系数。

当求解出单应矩阵后, 由式(5)和 R 的正交性质 ($r_1^T r_2 = 0, r_1^T r_1 = r_2^T r_2$) 可以得到 2 个关于相机参数的约束方程。由各角度拍摄靶标, 由每幅图片与靶标平面可以计算出一个单应矩阵, 通过建立方程即可求解出相机参数。根据非线性畸变模型, 利用最小二乘法计算径向、切向畸变系数, 并采用最大似然估计法优化参数标定结果。

2.2 靶标参数对标定结果的影响仿真

通过仿真研究靶标尺寸、靶点数量和部分靶点缺失这三个因素对相机标定结果的影响。仿真以标定结果的标准差为评价标准。仿真中相机参数设置为： $f_x = f_y = 50 \text{ mm}$, $u_0 = 1280 \text{ pixel}$, $v_0 = 1024 \text{ pixel}$, 畸变系数均为 0。多次仿真使用相同的相机内参数和多组不同的外参数,并添加均值为 0.2 pixel 的图像提取误差,投影生成 20 组不同的特征点,模拟 20

张图片。

1) 靶标尺寸对标定结果的影响仿真

假设靶标与相机之间的距离为 2 m,设置靶标尺寸在相机视场中的占比分别为 1/16, 1/8, 1/4, 1/2。根据模拟所得数据进行相机标定,针对每种靶标尺寸仿真 100 次,得到相机参数标定结果的标准差如表 1 所示,焦距、主点横坐标与仿真次数的关系曲线如图 2 所示。

表 1 不同靶标尺寸下相机参数标定结果的标准差

Table 1 Standard error of calibration results of camera parameters under different target sizes

Proportion of target in camera field	Focal length f_x /mm	Focal length f_y /mm	Horizontal coordinate of principal point /pixel	Vertical coordinate of principal point /pixel
1/16	0.3196	0.3097	45.0250	46.0966
1/8	0.1644	0.1645	24.8408	24.9445
1/4	0.0720	0.0718	11.5732	11.6927
1/2	0.0370	0.0371	5.3656	5.7319

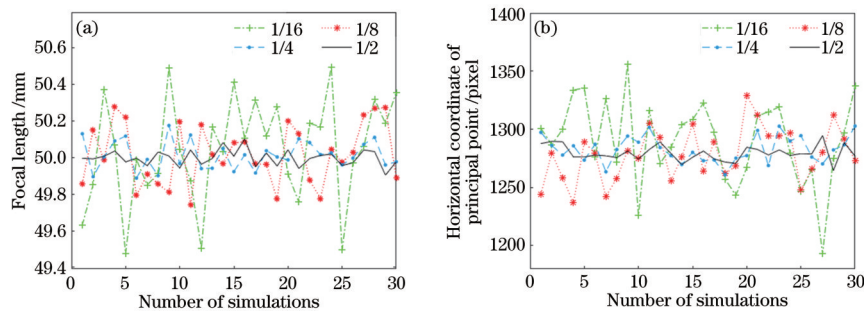


图 2 采用不同尺寸靶标的相机标定结果。(a)焦距;(b)主点横坐标

Fig. 2 Results of camera calibration by using target with different sizes. (a) Focal length; (b) horizontal coordinates of principal points

可以看出,随着靶标在视场中所占比例的增大,相机参数标定结果波动变小。因此提高靶标在相机视场中所占的比例,可以提高标定结果的精度。

2) 靶点数量对标定结果的影响仿真

假设靶标与相机之间的距离为 2 m,靶标大小保

持不变,靶点分布为正方形阵列,分别为 3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9 ,根据模拟所得数据进行相机标定,针对每种靶点数量仿真 100 次,得到相机参数标定结果的标准差如表 2 所示,焦距与仿真次数的关系曲线如图 3 所示。

表 2 不同靶点数量下相机参数标定结果的标准差

Table 2 Standard error of calibration results of camera parameters under different number of targets

Number of targets	Focal length f_x /mm	Focal length f_y /mm	Horizontal coordinate of principal point /pixel	Vertical coordinate of principal point /pixel
3×3	0.1268	0.1267	18.2767	18.4984
5×5	0.0769	0.0774	14.2790	13.9455
7×7	0.0398	0.0390	11.1139	10.7524
9×9	0.0317	0.0313	10.1562	9.9529

可以看出,随着相机视场中靶点数量的增加,标定精度的变化较小。当相机视场中靶点数量为 7×7 时,焦距标定的标准差为 0.040 mm,标定误差小于 1%。

3) 部分靶点缺失对标定结果的影响仿真

在相机标定中,每幅图片和靶标平面之间都对应一个单应矩阵^[18]。单应矩阵描述了图像与靶标平面之间的对应关系,即求解单应矩阵需要保证图像与靶标平面中的靶点是一一对应的。在靶标图片缺失靶点的

情况下,图片中的靶点仍可以与靶标平面中的靶点正确匹配,不会影响单应矩阵的求解。

假设靶标与相机的间距、靶标在相机视场中所占比例相同,模拟得到 20 张图片,即 20 组特征点数据。为了模拟部分靶点缺失和各角度成像靶点不完全一致的情况,对于每一组特征点数据,随机删除一些靶点数据。根据所得数据进行相机标定,在靶标完整和部分靶点缺失情况下各进行 100 次仿真,得到相机参数标

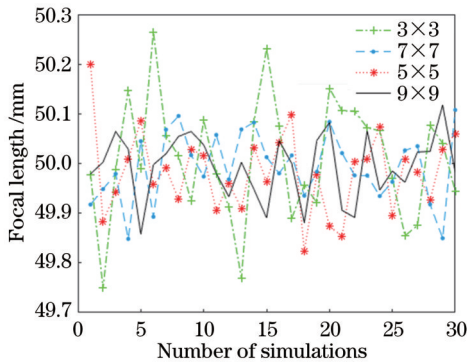


图 3 采用不同数量靶点的焦距标定结果

Fig. 3 Results of focal length calibration by using different number of targets

定结果的标准差如表 3 所示,焦距、主点横向坐标与仿

表 3 完整和局部靶点下相机参数标定结果的标准差

Table 3 Standard error of calibration results of camera parameters for complete and incomplete targets

Target	Focal length f_x /mm	Focal length f_y /mm	Horizontal coordinate of principal point /pixel	Vertical coordinate of principal point /pixel
Complete target	0.0424	0.0426	10.2133	10.3020
Incomplete target	0.0450	0.0454	10.1544	10.5856

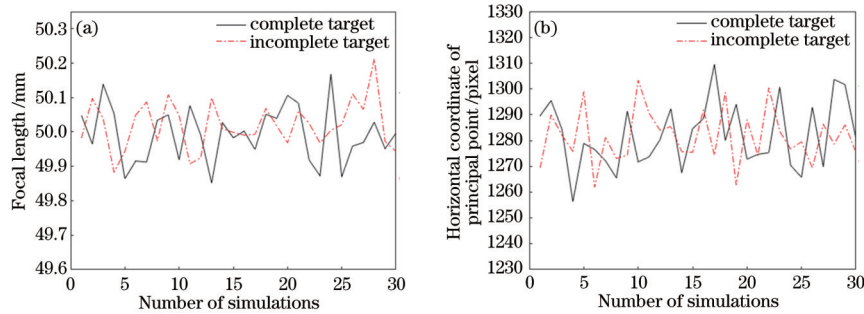


图 4 采用完整和局部靶点的相机标定结果。(a)焦距;(b)主点横坐标

Fig. 4 Results of camera calibration with complete and incomplete targets. (a) Focal length; (b) horizontal coordinates of principal points

仿真结果表明,靶点数量为 7×7 时的标定精度较高,且增加靶点数量对于相机标定精度的影响较小,因此靶标第一层为 7×7 阵列分布。为了保证每层靶点匹配方法的一致性,外层根据第一层的外圈靶点向外扩展。本文所用靶标的第一层为靶标内部均匀分布的 49 个圆形和环形靶点,第二层为靶标中间一圈的 24 个靶点,第三层为靶标边缘一圈的 24 个靶点。为了保证视场变大前后靶点中心的提取精度^[19],设计的第一层至第三层的靶点大小逐渐增大。

部分靶点缺失和各角度成像靶点不完全一致并不影响标定精度,为方便靶标匹配,在第一层中设计 5 个非对称分布的环形靶点作为定向标志点。相机标定时,靶标无需全部成像在相机视场中,只要定向标志点在相机视场内即可实现有效匹配。

3.2 靶点识别和匹配

靶点识别和匹配是相机标定中的重要步骤,通过靶点识别可以自动提取图像中的相关信息,如靶点圆

真次数的关系曲线如图 4 所示。

可以看出,靶标完整和部分靶点缺失情况下的标定结果变化较小,波动曲线接近。靶标完整时焦距标定的标准差为 0.042 mm,靶标靶点部分缺失时焦距标定的标准差为 0.045 mm,两者误差均小于 1%。

3 靶标设计与靶点识别和匹配

3.1 靶标设计

仿真结果表明,增加相机视场中靶标所占的比例可以提高相机标定精度,因此将靶标设计为分层结构。针对不同的视场采用不同范围的层,如小视场仅采用内层即可,大视场采用的层范围向外扩展,靶标在视场中所占比例一直较大,可确保相机在不同视场下的标定精度。为了验证分层结构的有效性,制作了三层实验靶标,如图 5 所示。实际使用中,层数可根据需求扩展。

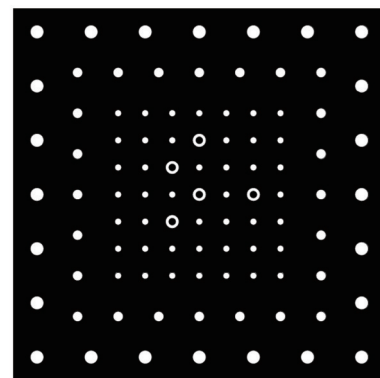


图 5 定向分层靶标

Fig. 5 Directional layered target

心坐标、特征点等;靶点匹配^[20-21]是指建立靶标靶点与其图像像点之间的对应关系,靶点匹配是进行后续标定计算的前提条件。定向分层靶标的靶点识别和匹配算法流程图如图 6 所示。

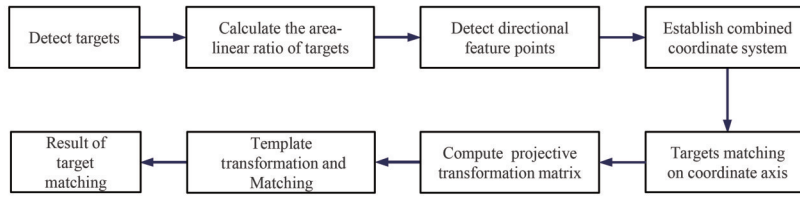


图 6 靶点识别和匹配算法流程图

Fig. 6 Flow chart of target recognition and matching algorithm

靶点识别和定向特征点识别步骤: 1) 通过闭合区域的圆度、偏心率和凸度条件提取图像中的有效靶点^[16]; 2) 根据圆环靶点的面积周长比小于圆形靶点的规律分离圆环靶点; 3) 采用灰度质心法^[22]计算有效靶点的中心坐标。

为了进行靶点匹配, 本文建立了定向分层靶标的模板图片 I , 如图 7 所示。计算模板图片 I 中的靶点坐标, 规定以 O 点作为起点向外螺旋编号, 第 i 号靶点即为 $T_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, n 为靶点总数。待匹配图片中定向分层靶标的靶点匹配过程如下。

1) 建立组合坐标系。假设靶标中 5 个圆环定向靶点的圆心分别为 O, A, B, C, D , 如图 8(a) 所示。其中, O 点位于其他 4 点所组成封闭图形的内部, 与其他靶点的距离之和最小, B 点位于 OY 轴右侧, 与其他靶点的距离之和最大, 据此可识别 O 点和 B 点; 计算向量 \overrightarrow{OB} , 以及 O 点与其他 3 个靶点所构成的向量 $\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OC}$

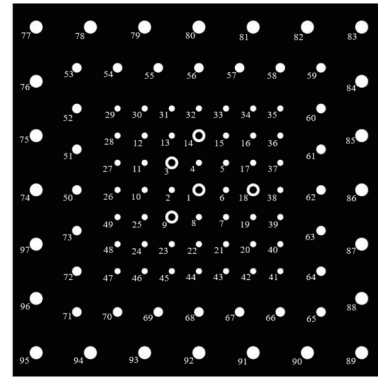


图 7 靶点编号顺序

Fig. 7 Numbering sequence of targets

和 \overrightarrow{OD} 。根据 $\sin \langle \overrightarrow{OB}, \overrightarrow{OC} \rangle < 0$ 可识别出 C 点; 根据 $\cos \langle \overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OB} \rangle > \cos \langle \overrightarrow{OD}, \overrightarrow{OB} \rangle$ 可识别 D 点和 A 点。根据 5 个圆环定向靶点建立 XOY, POQ 组合坐标系。

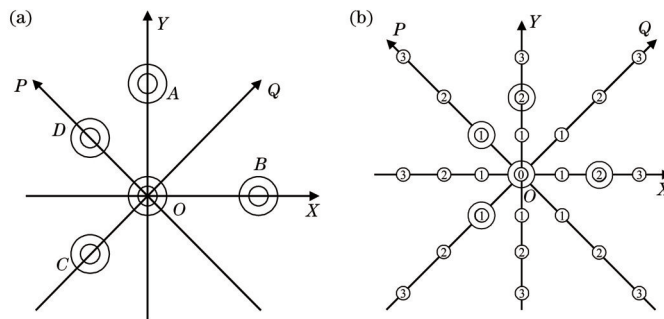


图 8 定向靶点识别和匹配。(a) 组合坐标系示意图; (b) 轴上靶点匹配标记图

Fig. 8 Identification and matching of directional targets. (a) Sketch of combined coordinate system; (b) marker map of target matching on axis

2) 坐标轴上靶点匹配。若某一靶点 M 在 OX 坐标轴上, 根据共线原理:

$$\cos \theta = \frac{\overrightarrow{OB} \cdot \overrightarrow{OM}}{\|\overrightarrow{OB}\| \|\overrightarrow{OM}\|}, \quad (6)$$

本文所用靶标的坐标轴外靶点与坐标轴夹角的最小值为 10° , 因此将 $\theta < 3^\circ$ 作为共线判断阈值, 即 $\theta < 3^\circ$ 时, 认为 M 点为 OX 坐标轴上靶点, 据此可以识别组合坐标系坐标轴上的所有靶点, 并以各靶点中心与 O 点的距离由小到大排列, 标记为 $1, 2, 3, \dots$, 其与模板图片的坐标轴上靶点一一对应, 如图 8(b) 所示。

3) 计算射影变换矩阵。模板图片 I_1 和待匹配图片 I_2 之间存在射影变换关系, 其坐标轴上的匹配靶点

$m_1^{(k)}, m_2^{(k)} (k = 1, 2, 3, \dots, n)$ 之间的变换方程为

$$m_2 = Fm_1, \quad (7)$$

式中: $F (F \in R^{3 \times 3})$ 为模板图片 I_1 和待匹配图片 I_2 的变换矩阵。根据最小二乘法可以求得变换矩阵为

$$F^* = \arg \min \sum_{k=1}^n \|m_2^{(k)} - Fm_1^{(k)}\|^2. \quad (8)$$

4) 模板变换与匹配。根据式 (7) 和变换矩阵 F^* , 对于模板图片中的靶点 T_i 进行坐标变换, 得到坐标变换后的靶点坐标向量 $T_i' = (u_i, v_i)^T (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。待匹配图片中的靶点坐标向量 $T_j = (u_j, v_j)^T$ 与 T_i' 的欧氏距离 G_{ij} 为

$$G_{ij} = \|T_i' - T_j\|^2, \quad (9)$$

$T'_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 与 T_j 存在最小距离 $\min G_{ij}$, 此时待匹配图片中的靶点 T_j 即为第 i 号靶点。重复此过程将待匹配图片中所有靶点进行编号, 完成靶点匹配。

4 实验分析与讨论

4.1 实验环境及设备

本文实验所用相机为 JAI GO-5000M USB 工业相机, 该工业相机的像元尺寸为 $5.0 \mu\text{m} \times 5.0 \mu\text{m}$, 分辨率为 $2560 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。所用工业相机镜头的焦距为 50 mm , 畸变率小于 0.1% , 具有可调光圈, 可进行对焦调节。

4.2 靶标靶点匹配实验

在待匹配图片中定向分层靶标的部分靶点缺失情况下, 从不同角度拍摄靶标, 得到的部分图片如图 9 (a)、(c) 所示, 分别进行靶点匹配实验。将待匹配图片中的靶点与模板图片中的靶点进行匹配, 缺失的靶点不参与匹配。

部分靶点缺失情况下的靶点匹配结果分别如图 9 (b)、(d) 所示, 待匹配图片中的靶点编号与模板图片靶点编号顺序一致, 靶点匹配成功。实验结果表明, 定向分层靶标的靶点识别与匹配方法准确有效, 缺失靶点不影响匹配结果。

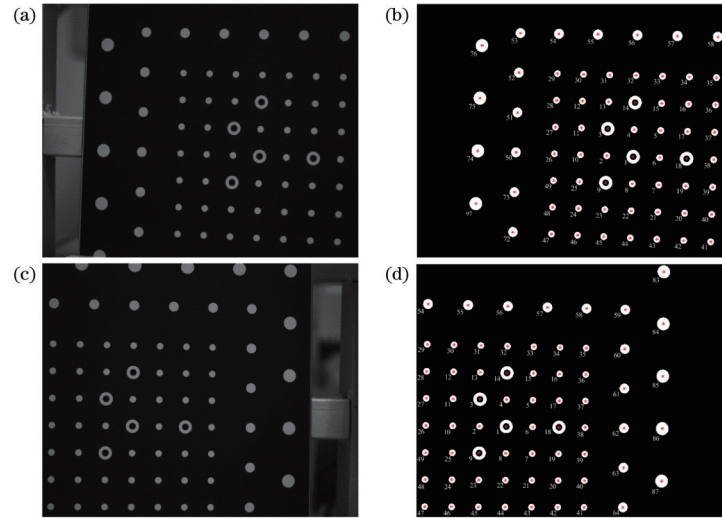


图 9 靶点缺失情况的靶点匹配。(a) 实验图片 I; (b) 实验图片 I 的匹配结果; (c) 实验图片 II; (d) 实验图片 II 的匹配结果
Fig. 9 Target matching for partial target deficiency. (a) Experimental picture I; (b) matching result of experimental picture I; (c) experimental picture II; (d) matching result of experimental picture II

4.3 相机标定实验

利用实验靶标分别在小视场 (约 200 mm) 和大视场 (约 400 mm) 进行了相机标定实验, 2 个视场下的标定实验均从不同角度拍摄靶标, 各采集 15 张图片, 计算相机内参数。小视场和大视场实验的 1 幅图片如图 10 所示。

在小视场分别采用靶标内层 (第 1 组) 和视场内靶标全部靶点 (第 2 组) 进行相机标定; 在大视场分别采用靶标内层 (第 3 组) 和靶标全部靶点 (第 4 组) 进行相机标定。第 1 组和第 3 组靶标的有效靶点区域不变, 可以视作一个大小固定的靶标; 第 2 组和第 4 组靶标的有效靶点区域随相机视场的增大而增大。

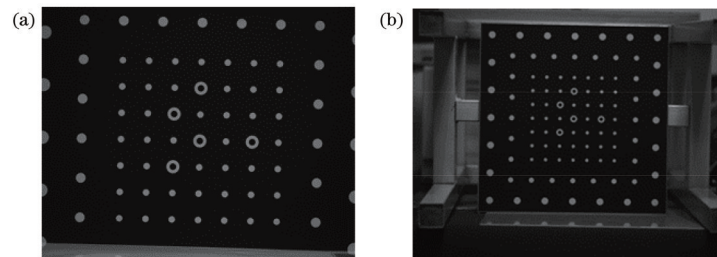


图 10 相机标定实验图片。(a) 小视场 (第 1, 2 组); (b) 大视场 (第 3, 4 组)

Fig. 10 Experimental pictures of camera calibration. (a) Small view (groups 1 and 2); (b) large view (groups 3 and 4)

对于每组采集到的图片分别进行处理, 进行靶点识别和匹配, 并根据靶点匹配结果进行相机标定。相机参数标定结果如表 4 所示, 标定的重投影误差如图 11 所示。

由表 4 中第 1 组、第 2 组的实验结果和图 11(a)、

(b) 的重投影误差图可得: 相机视场较小时, 固定大小靶标和定向分层靶标在视场中所占比例相近, 标定结果和标定精度相近; 对比表 4 中第 3 组、第 4 组的实验结果和图 11(c)、(d) 的重投影误差图, 可以发现相机视场较大时, 定向分层靶标在视场中所占比例远大于

表 4 相机参数标定结果
Table 4 Results of camera parameter calibration

Group No.	Focal length /mm	Principal point (u_0, v_0) (unit: pixel)	Radical distortion coefficient		Tangential distortion coefficient		Reprojection error /pixel
			k_1	k_2	p_1	p_2	
1	53.25	(1315.2, 993.7)	-0.065	-3.244	0.001	0	0.076
2	53.37	(1317.1, 990.1)	-0.064	-3.266	0.001	0	0.073
3	52.57	(1328.0, 995.0)	0.170	-3.437	0.001	0	0.108
4	51.33	(1317.5, 991.2)	0.177	-3.122	0.001	0	0.072

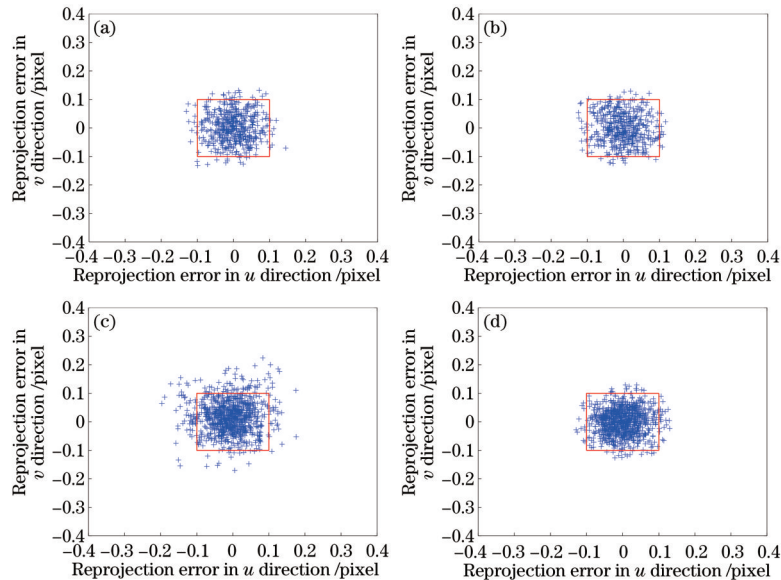


图 11 重投影误差分布图。(a)第 1 组;(b)第 2 组;(c)第 3 组;(d)第 4 组

Fig. 11 Distributions of reprojection error. (a) Group 1; (b) group 2; (c) group 3; (d) group 4

固定大小靶标,其标定精度优于固定大小靶标。

由表 4 中第 1 组、第 3 组的实验结果和图 11(a)、(c) 的重投影误差图可得:随着相机视场变大,固定大小靶标在视场中所占比例变小,标定精度降低;对比表 4 中第 2 组、第 4 组的实验结果和图 11(b)、(d) 的重投影误差图,可以发现:随着相机视场变大,定向分层靶标在视场中所占比例基本不变,标定精度稳定,精度较高。

4.4 变焦相机标定实验

对于一个低分辨率的变焦相机,在 2 个焦距下分别采用固定大小靶标 I 和定向分层靶标 II 进行了相机标定实验。实验中短焦距对应的相机视场约为 150 mm,长焦距对应的相机视场约为 300 mm,实验过程同 4.3 节。变焦相机参数标定结果、图像重投影误差和靶点间距测量误差如表 5 所示。

表 5 相机标定和测量结果
Table 5 Results of camera calibration and measurement

Target	Focal length /mm	Principal point (u_0, v_0) (unit: pixel)	Radical distortion coefficient		Tangential distortion coefficient		Reprojection error /pixel	Measuring error /mm
			k_1	k_2	p_1	p_2		
I	16.50	(788.0, 485.3)	-0.505	-11.851	-0.002	0.001	0.208	0.009
II	16.56	(791.3, 477.6)	-0.533	-10.044	-0.002	0	0.200	0.008
I	34.48	(816.6, 453.4)	3.036	-867.384	0.008	0.015	0.832	0.054
II	32.16	(768.2, 494.6)	0.734	-189.812	-0.001	0.011	0.217	0.008

由表 5 中的实验数据可见:当采用固定大小的靶标进行标定时,精度随视场的增大大幅下降;而采用定

向分层靶标标定时,标定精度始终较高。实验证明了定向分层靶标适用于变焦相机的高精度标定。

5 结 论

针对靶标参数影响相机标定精度的问题,基于理论分析与仿真,设计了一种定向分层靶标,提出了基于共线原理和射影变换的靶点匹配方法。实验结果表明,定向分层靶标的靶点识别和匹配方法准确有效,不受缺失点影响。定向分层靶标第一层的定向特征点出现在图片中,即能实现靶点识别与匹配,这提高了靶标使用的灵活性和相机标定效率。使用该靶标可以提高相机标定精度,且标定精度不受相机视场改变的影响。所设计的定向分层靶标可根据需求扩展层数,具有实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [2] Sanz-Ablanedo E, Chandler J H, Wackrow R. Parameterising internal camera geometry with focusing distance[J]. The Photogrammetric Record, 2012, 27(138): 210-226.
- [3] 殷晨晖, 褚鑫磊, 杨珊, 等. 单摄像机立体视觉测量系统的高精度变焦标定技术[J]. 光学技术, 2019, 45(6): 668-676.
Yin C H, Chu X L, Yang S, et al. High-precision zoom camera calibration of stereo vision measurement system with single camera[J]. Optical Technique, 2019, 45(6): 668-676.
- [4] Tarabanis K, Tsai R Y, Goodman D S. Modeling of a computer-controlled zoom lens[C]//Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 12-14, 1992, Nice, France. New York: IEEE Press, 1992: 1545-1551.
- [5] Sarkis M, Senft C T, Diepold K. Calibrating an automatic zoom camera with moving least squares[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(3): 492-503.
- [6] Li M X, Lavest J M. Some aspects of zoom lens camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(11): 1105-1110.
- [7] 袁铭, 苏显渝, 刘晓青. 影响摄像机标定精度的因素分析[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(4): 18-21.
Yuan M, Su X Y, Liu X Q. Analysis of factors on the precision of the camera calibration[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2010, 8(4): 18-21.
- [8] 支健辉, 董新民, 孔星炜, 等. 相机标定的外界影响因素分析[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 286-291.
Zhi J H, Dong X M, Kong X W, et al. Analysis of external influence factors in camera calibration[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(2): 286-291.
- [9] 郑冬梅, 宋文爱. 相机标定关键设备对标定精度的影响分析[J]. 图学学报, 2017, 38(2): 236-240.
Zheng D M, Song W A. Influence analysis of key equipments for camera calibration accuracy[J]. Journal of Graphics, 2017, 38(2): 236-240.
- [10] 张旭苹, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.
Zhang X P, Wang J Q, Zhang Y X, et al. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.
- [11] 刘巍, 李肖, 马鑫, 等. 采用复合式靶标的近景大视场相机标定方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0717005.
Liu W, Li X, Ma X, et al. Camera calibration method for close range large field of view camera based on compound target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 0717005
- [12] 马颂德, 张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Ma S D, Zhang Z Y. Basis of computer vision-computing theory and algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [13] 石岩青, 常彩霞, 刘小红, 等. 面阵相机内外参数标定方法及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2400001.
Shi Y Q, Chang C X, Liu X H, et al. Calibration methods and progress for internal and external parameters of area-array camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2400001.
- [14] Steger C, Ulrich M, Wiedemann C. Machine vision algorithms and applications[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2008: 255-283.
- [15] Fraser C S, Al-Ajlouni S. Zoom-dependent camera calibration in digital close-range photogrammetry[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006, 72(9): 1017-1026.
- [16] 汪首坤, 赵金枝, 姜明, 等. 基于圆形阵列标定板的张氏相机标定法[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(8): 859-863.
Wang S K, Zhao J Z, Jiang M, et al. Zhang's camera calibration method based on circular array calibration board[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(8): 859-863.
- [17] 王国璋, 钱克矛. 线阵相机标定方法综述[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111011.
Wang G H, Qian K M. Review on line-scan camera calibration methods[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111011.
- [18] 姜涛, 程筱胜, 崔海华, 等. 基于单应性矩阵的变焦双目视觉标定方法[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0315005.
Jiang T, Cheng X S, Cui H H, et al. Calibration method of binocular vision system with zoom lens based on homography matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0315005.
- [19] Zhang G J, Wei Z Z. A position-distortion model of ellipse centre for perspective projection[J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(8): 1420-1426.
- [20] 张效栋, 孙长库. 新型方向性平面靶标及拓扑定位算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(11): 104-106.
Zhang X D, Sun C K. Novel directional pattern and mapping location algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(11): 104-106.

- [21] 李媛, 闫蓓. 一种基于二维平面靶标的标定点匹配方法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(13): 242-244.
Li Y, Yan B. Method of matching calibration points on 2D drone[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(13): 242-244.
- [22] 刘国栋, 刘炳国, 陈凤东, 等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3446-3451.
Liu G D, Liu B G, Chen F D, et al. Study on the method of the accuracy evaluation of sub-pixel location operators[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3446-3451.