

基于绝对相位靶的摄像机标定仿真与实验研究

安世勇¹, 朱江平^{1,2*}, 杨红雨^{1,2}, 周佩^{1,2}, 肖雯帆¹, 朱昌会²

¹四川大学视觉合成图形图像技术国家级重点实验室, 四川 成都 610065;

²四川大学计算机学院, 四川 成都 610065

摘要 摄像机标定是结构光三维传感技术中联系测量系统内外参数与三维坐标之间的重要环节。基于灰度信息提取特征点的摄像机标定方法易受图像噪声、对比度等因素的影响。提出一种基于绝对相位靶(APT)的摄像机标定方法,采用时间相位展开算法计算绝对相位,提取相位值为 4π 整数倍的特征点,采用局部窗口最小二乘拟合算法计算特征点的精确亚像素坐标,进而建立特征点的图像坐标与世界坐标的对应关系。通过仿真实验,分析不同高斯噪声和模糊条件下摄像机参数的绝对误差变化,发现相对于传统的棋盘格和圆点标定法,所提 APT 标定法对图像噪声和模糊具有更好的鲁棒性,且具有更高的标定精度。真实的对比实验显示,APT 标定方法的标定精度优于棋盘格和圆点标定法,尤其在“离焦”(标靶处于相机有效工作距离之外)情况下可将重投影误差降低 58.68%,证明了 APT 标定方法的有效性和可行性。

关键词 测量; 摄像机标定; 相移条纹; 绝对相位; 特征点提取; 亚像素拟合

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0412001

Simulation and Experiment Research on Camera Calibration Based on Absolute Phase Target

An Shiyong¹, Zhu Jiangping^{1,2*}, Yang Hongyu^{1,2}, Zhou Pei^{1,2}, Xiao Wenfan¹, Zhu Changhui²

¹National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

²College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract Camera calibration is an essential part of 3D sensing technology based on structured light, which links the intrinsic and extrinsic parameters of the measurement system with the 3D coordinates. The camera calibration approach based on feature points retrieved from gray information can be easily affected by image noise, contrast, and other factors. Thus, this study proposes an active camera calibration approach based on absolute phase target (APT), in which absolute phase is determined using the temporal phase unwrapping algorithm. The point where phase value is the integer multiples of 4π is selected as the feature point. The local window least-square linear-fitting approach is used to determine the precise subpixel coordinates of every feature point, then the one-to-one correspondence between the image and world coordinates of feature points is established. In simulation experiments, according to the absolute error change of the camera parameters under different degrees of Gaussian noise and blur, we concluded that the proposed APT calibration method is more robust to noise and blur than the traditional checkerboard calibration and dot calibration approach, and calibration accuracy is relatively high. The validity and

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-03-05; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(61901287)、四川省重点研发专项(2021YFG0195, 2020YFG0112, 2020YFG0306)、四川省重大科技专项(2019ZDZX0039, 2018GZDZX0029)

通信作者: *zjp16@scu.edu.cn

feasibility of the proposed APT approach are further demonstrated by the real comparison experiment, which reveal that the calibration accuracy of the APT approach is higher and the reprojection error can be reduced by 58.68% under out-of-focus conditions (the target is outside the working distance of the camera).

Key words measurement; camera calibration; phase-shifting fringe; absolute phase; feature point detection; sub-pixel fitting

1 引言

摄像机标定是联系二维图像和三维世界的立体相机的内外参数估计的关键步骤,目前主要通过带有特征点的标定靶实现。这些标定靶主要分为 3 类^[1]:3D 标定靶^[2]、2D 标定靶^[3]、1D 标定靶^[4]。3D 标定靶虽具有较高的标定精度,但体积大、昂贵且制作成本高。1D 标定靶结构简单但特征点少,不能保证标定精度。自从基于 2D 标定板的张氏标定法^[3]被提出后,原本复杂相机标定变得简单易行,并得到广泛应用。这类 2D 标定靶常用的特征点有方形角点^[3]、圆心^[5]和棋盘格角点^[6]等,除了建立合适的标定模型外,特征点的位置提取精度直接影响标定精度。此外,一些学者提出了无需标定靶的自标定方法^[7],但需大量的对应特征和复杂的计算,且标定结果不稳定。由于传统标定方法是直接利用标定靶图像的灰度信息提取特征点的,因此图像质量在很大程度上影响着摄像机的标定精度。

目前使用最广泛的关于棋盘格和圆点的标定方法是基于图像灰度信息提取特征点的^[8-10],很容易受到图像模糊和噪声的干扰,导致特征点提取不准确,进而影响标定精度。当圆点标定靶平面和摄像机的主轴不垂直时,特征圆在图像中的像为椭圆,特征圆的圆心真实像点并不是椭圆的真实中心,使得圆点标定法对特征点进行检测时具有一定的偏心误差^[11]。卢晓冬等^[11]提出的将标定靶图像逆向投影至空间虚拟矩阵以获取真实圆心像点的迭代标定算法,虽然在一定程度上消除了偏心误差的影响,提高了标定精度,但增加了标定算法的复杂性,且标定精度仍然受图像噪声和模糊等因素影响。总之,无论使用何种标定靶,一般都要求将其置于测量景深内以保证摄像机捕获清晰完整的标定靶图像,这使得标定靶的放置受到很多的限制,灵活性不足。

通过条纹提取相位信息用于摄像机标定是光学三维传感技术的研究热点,如正弦相移条纹、圆形相移条纹和正交条纹。Huang 等^[12]使用了正弦条纹主动标定靶对摄像机进行标定,得到了较高的精度,但“离焦”情况下的图像是通过清晰的图片进

行高斯滤波得到的,并非真实实验采集的图像。Wang 等^[13]使用彩色圆形条纹图作为标定靶,用于彩色相机的标定,但使用椭圆拟合提取特征点时依然存在偏心误差,且颜色校正增加了标定算法的复杂度。文献^[14]通过系统的理论推导和实验证明了正交条纹标定靶可用于标定摄像机和投影仪。Wang 等^[15]通过仿真和实验证明了基于正交条纹的摄像机标定法的鲁棒性和准确性,然而在仿真情况下和实验情况下均没有给出同等条件下与其他标定方法的对比实验。与传统的圆点、棋盘格等被动标定靶相比,基于相位的主动标定靶有特征点提取精度高、算法简单、对图像模糊不敏感等显著优势。然而,在理论分析、模拟仿真及实验对比方面,关于相位标定靶和传统典型的 2D 标定靶的标定精度对比和系统分析的方面,缺少全面深入的研究。

针对以上问题,本文提出一种基于相移条纹绝对相位靶(APT)的摄像机标定方法。标定靶图像每个像素点均被唯一的相位值标识,可灵活选择特征点的数量和分布。利用 LCD 液晶显示器主动显示的水平 and 垂直条纹作为 2D 相位标定靶,采用相移算法提取截断相位;然后将两幅截断相位展开为绝对相位,通过相位特征点建立图像坐标与世界坐标之间的映射关系,并根据张氏标定法估计摄像机参数初值;最后经约束的光束平差算法优化,得到高精度的摄像机参数。在不同高斯模糊和噪声条件下,通过仿真实验对比了传统的棋盘格标定法、圆点标定法和所提 APT 标定法,结果显示,APT 标定方法对噪声和模糊具有更好的鲁棒性,且标定精度更高。随后,通过聚焦和“离焦”情况下的两组对比实验,进一步证明了 APT 标定方法的有效性、可行性和灵活性。

2 方法基本原理

2.1 摄像机模型

摄像机作为一个将三维世界点映射为二维像点的光学系统,其成像原理如图 1 所示,先将三维世界坐标 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 转换为摄像机坐标系下的坐

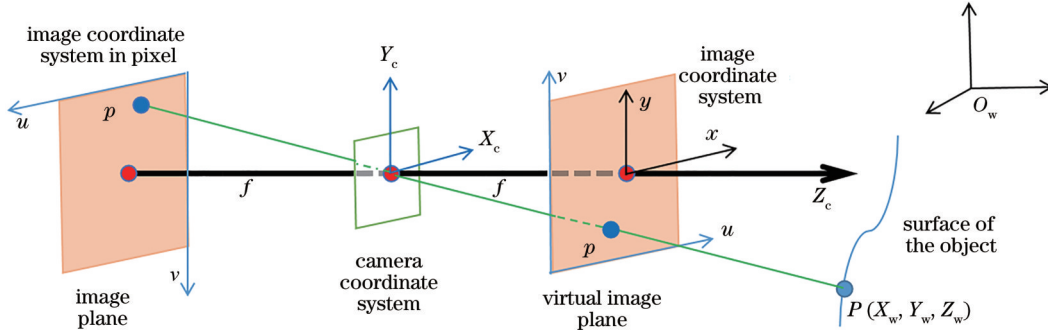


图 1 摄像机成像模型

Fig. 1 Camera imaging model

标 \$P(X_c, Y_c, Z_c)\$, 再转换为图像物理坐标 \$p(x, y)\$, 最后转换为图像像素坐标 \$p(u, v)\$。

令 \$P\$ 为标定靶上的特征点, \$(X_w, Y_w, Z_w, 1)\$ 表示该点在世界坐标系中的三维齐次坐标, \$p(u, v, 1)\$ 表示该点在像平面中像点的二维齐次坐标。\$P\$ 和 \$p\$ 之间的关系可描述为

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}(\mathbf{R}_{wc}, \mathbf{T}_{wc}) \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u & \gamma & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (\mathbf{R}_{wc}, \mathbf{T}_{wc}) \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: \$s\$ 为尺度因子; \$\gamma\$ 为扭曲因子; \$f_u\$ 和 \$f_v\$ 分别为摄像机沿宽度方向和高度方向的测量焦距, 单位为像素; \$(u_0, v_0)\$ 为主点, 即摄像机光心像点; \$\mathbf{K}\$ 为摄像机的内参矩阵; \$\mathbf{R}_{wc}\$ 和 \$\mathbf{T}_{wc}\$ 分别为世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移向量。

单个的摄像机标定是求摄像机内部参数 \$f_u, f_v, \gamma, u_0, v_0\$ 和外部参数 \$\mathbf{R}_{wc}, \mathbf{T}_{wc}\$ 的过程, 通过标定靶上特征点的世界坐标和像素坐标之间的对应关系实现。

由于镜头制造和装配存在误差, 需引入畸变。这里仅考虑径向畸变和切向畸变^[16], 畸变后的像素坐标 \$p_d(x_d, y_d)\$ 为

$$p_d = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) p + \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: \$p_d(x_d, y_d)\$ 和 \$p(x, y)\$ 是以主点为原点的图像物理坐标系下的坐标; \$r^2 = x^2 + y^2\$; \$k_1\$ 和 \$k_2\$ 为径向畸变系数; \$p_1\$ 和 \$p_2\$ 为切向畸变系数。

2.2 APT 标定法

通过相移技术提取条纹的相位信息, 用于摄像机标定; 分别利用显示器上的水平和竖直条纹的相位信息对显示器上的物理特征点 \$P\$ 编码, 依据特征点 \$P\$ 携带的相位, 在图像中搜索其像点的像素坐标 \$p(u, v)\$; 最后依据特征点的世界坐标和像素坐标之间的对应关系计算摄像机参数。

2.2.1 绝对相位获取

如图 2 所示, 在显示器上依次显示水平和竖直方向的 3 频 4 步相移的正弦条纹。同一频率 \$f_i\$ 的第 \$k\$ 张相移条纹灰度可表示为

$$I_k^i(u, v) = I'(u, v) + I''(u, v) \cos \left[\Phi^i(u, v) + \frac{2\pi \cdot (k-1)}{4} \right], \quad (3)$$

式中: \$I'(u, v)\$ 为显示屏上条纹的平均灰度; \$I''(u, v)\$ 为灰度调制; \$\Phi^i(u, v)\$ 为条纹频率为 \$f_i\$ 的绝对相位, 对应的截断相位为 \$\phi^i(u, v)\$。

$$\phi^i(u, v) = \arctan \left\{ \frac{-\sum_{k=1}^4 I_k^i(u, v) \sin \left[\frac{2\pi \cdot (k-1)}{4} \right]}{\sum_{k=1}^4 I_k^i(u, v) \cos \left[\frac{2\pi \cdot (k-1)}{4} \right]} \right\}. \quad (4)$$

(4) 式得到的相位包裹在 \$[-\pi, \pi)\$, 将其整体向上平移 \$\pi\$ 后, 变为 \$[0, 2\pi)\$。相位展开算法是, 在每个像素点处加上 \$2\pi\$ 的整数倍, 去除 \$2\pi\$ 不连续。使用文献[17]的三频时间相位展开法进行绝对相位计算:

$$\begin{aligned} \Phi^{f_1}(u, v) &= \phi^{f_1}(u, v), \quad (5) \\ \Phi^{f_2}(u, v) &= \phi^{f_2}(u, v) + 2\pi \times \left\{ \text{Round} \left[\frac{f_2 \cdot \Phi^{f_1}(u, v) - \phi^{f_2}(u, v)}{2\pi} \right] \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

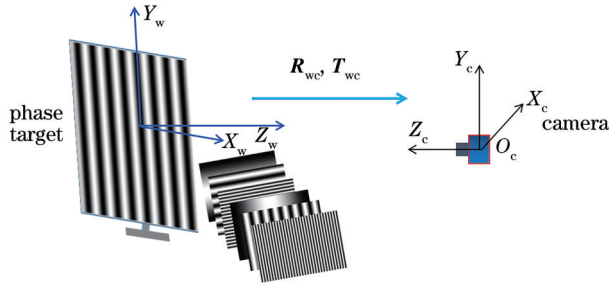


图 2 基于绝对相位标定法的仿真视觉系统

Fig. 2 Simulation vision system based on absolute phase calibration method

$$\Phi^{f_3}(x, y) = \phi^{f_3}(x, y) + 2\pi \times \left\{ \text{Round} \left[\frac{\frac{f_3}{f_2} \cdot \Phi^{f_2}(x, y) - \phi^{f_3}(x, y)}{2\pi} \right] \right\} \quad (7)$$

最终展开的绝对相位 $\Phi^{f_3}(x, y)$ 用于特征点提取。

$$\begin{cases} -a_0\Phi_H(u, v)u - a_1\Phi_H(u, v)v + a_2 + a_3u + a_4v = \Phi_H(u, v) \\ -a_0\Phi_V(u, v)u - a_1\Phi_V(u, v)v + a_5 + a_6u + a_7v = \Phi_V(u, v) \end{cases} \quad (9)$$

根据 (9) 式和特征点处的相位值 $\Phi_H = 2\pi m, \Phi_V = 2\pi n$, 对得到的整像素特征点进行局部窗口的最小二乘线性拟合, 得到具有亚像素精度的特征点。为保证亚像素精度特征点的精确提取, 通过计算邻域内相位的方差对参与拟合的点进行筛选, 剔除方差较大的噪声点。

2.2.3 建立特征点映射

由 2.2.1 节中的方法得到水平方向和竖直方向高精度绝对相位图, 分别为 $\Phi_H^{\text{LCD}}(u, v)$ 和 $\Phi_V^{\text{LCD}}(u, v)$ 。以显示屏中心为世界坐标原点, 对于每个特征点, 依据携带的竖直方向和水平方向的相位信息, 计算出对应的世界坐标, 表达式为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \frac{q \cdot p}{2\pi} \begin{pmatrix} \Phi_H^{\text{LCD}} \\ \Phi_V^{\text{LCD}} \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \begin{pmatrix} L \\ H \end{pmatrix} = q \cdot p \begin{pmatrix} n \\ m \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \begin{pmatrix} L \\ H \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中: e 为重投影误差; p_{ij} 为特征点像素坐标; \hat{p}_{ij} 为由 (1)、(2) 式计算出的特征点像素坐标; N 为相位靶位姿数; M 为相位靶所含特征点个数; X_j 为第 j 个特征点的世界坐标。

2.2.2 特征点提取

解析得到绝对相位后, 实际标定中可取自定义的相位标识位置作为特征点, 通常选取水平方向和竖直方向的绝对相位均为 2π 整数倍的点作为特征点, 即 $\Phi_H = 2\pi m, \Phi_V = 2\pi n$, 其中 m 和 n 为正整数。首先用约束条件 $|\Phi_H - 2\pi m| < \sigma_1$ 且 $|\Phi_V - 2\pi n| < \sigma_2$ 筛选出一部分的候选特征点; 然后从这些候选特征点中选出 $|\Phi_H - 2\pi m| + |\Phi_V - 2\pi n|$ 最小的作为粗提取的整像素特征点。正弦条纹的相位在理想平面上的分布服从的规律^[18]为

$$\begin{cases} \Phi_H(u, v) = (a_2 + a_3u + a_4v) / (1 + a_0u + a_1v) \\ \Phi_V(u, v) = (a_5 + a_6u + a_7v) / (1 + a_0u + a_1v) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: a_0 到 a_7 为拟合系数, 分母中的系数 a_0, a_1 并不依赖于条纹的对比度和方向。故可将 (8) 式转换为一个线性方程组:

式中: p 为显示器上最小条纹周期所包含的像素数; L 为显示器宽度; H 为显示器高度; q 为像素间距。获得每个特征点的像素坐标和世界坐标后, 可依据张氏标定法估计摄像机参数初值。

2.2.4 光束平差优化

2.2.3 节中得到的特征点世界坐标假定相位靶是一个理想平面且像元等间距紧密排列, 但实际上由于显示器并非理想平面、像元间隙等因素, 计算出的特征点的世界坐标不一定准确。因此, 需要依据张氏标定法对得到的摄像机参数进行进一步优化。通过光束平差优化算法调整特征点的世界坐标^[19], 进一步准确地估计相机参数。目标函数为

$$e = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \| p_{ij} - \hat{p}_{ij}(\mathbf{K}, \mathbf{R}_{wc}, \mathbf{T}_{wc}, k_1, k_2, p_1, p_2, \mathbf{X}_j) \| \right\}, \quad (11)$$

考虑到显示器的像元加工精度, 避免优化后的特征点世界坐标变化太大, 添加约束条件, 即

$$\sum_{j=1}^M \| \mathbf{X}_j^* - \mathbf{X}_j \|^2 \rightarrow 0, \quad (12)$$

式中: \mathbf{X}_j^* 为优化后的特征点的世界坐标。

3 仿真实验

对 Matlab 软件生成的条纹图像添加高斯白噪声和高斯模糊,研究 APT 标定法的性能,并将其与同等条件下的棋盘格标定法和圆点标定法进行对比。棋盘格图像、圆点图像、水平和垂直相移条纹

有序地“显示”在分辨率为 1920×1080 pixel LCD 屏上,分辨率为 2048×1080 pixel 虚拟摄像机在同一位姿下依次“抓拍”三种标靶图像。相位靶最小条纹周期 $T=60$ pixel。仿真用的内参矩阵、正视图像位姿中世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量分别为

$$K = \begin{pmatrix} 1455 & 0 & 1024 \\ 0 & 1455 & 540 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, R_{wc} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, T_{wc} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 650 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

焦距为 $f_u = f_v = 1455$,主点为 $u_0 = 1024, v_0 = 540$,单位均为像素。扭曲因子和畸变系数均设为 0。使用

$$R^x_{wc} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, R^y_{wc} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, R^z_{wc} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

替换 R_{wc} 。 $R^x_{wc}, R^y_{wc}, R^z_{wc}$ 分别为相位靶绕着图 2 所示的世界坐标系中的 X, Y, Z 轴旋转 θ 角之后的旋转矩阵。仿真得到 22 个图像位姿。位姿 1 为正视图像位姿;位姿 2~8 为 7 个绕 X 轴旋转 $3^\circ \sim 21^\circ$ 的位姿;位姿 9~15 为 7 个绕 Y 轴旋转 $3^\circ \sim 21^\circ$ 的位姿;位姿 16~22 为 7 个绕 Z 轴旋转 $3^\circ \sim 21^\circ$ 的位姿。22 个仿真位姿在摄像机视角下的相对位置如图 3 所示,相邻位姿的旋转角度间隔为 3° 。

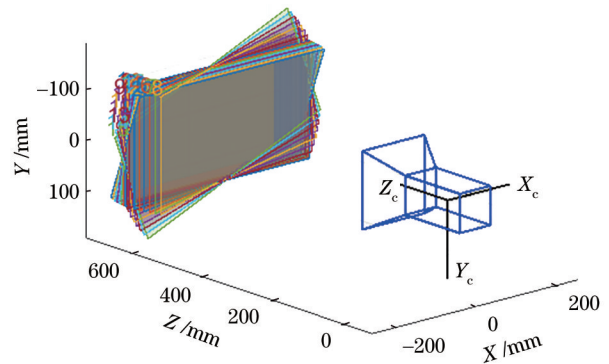


图 3 摄像机视角下的 22 种仿真位姿

Fig. 3 22 simulated poses in the camera's view

部分仿真位姿如图 4 所示。水平方向、竖直方向的条纹数分别为 $[1, 6, 18], [1, 8, 32]$,与圆点、棋盘格标靶的特征点保持一致;选取 4π 整数倍的点,剔除 3×3 邻域中灰度方差大于 2 的点;对整像素特征点进行局部窗口拟合,求取亚像素特征点。相位标靶特征点由 2.2.2 节的方法提取,棋盘格、圆点标靶图像特征点分别用 Matlab2020a 标定工具箱中的

detectCheckerboardPoints.m 函数、OpenCV 标定工具箱中 findCirclesGrid 提取。先由 Matlab 标定工具箱计算出标定初值,再将标定初值、角点的世界坐标和像素坐标作为输入进行光束平差优化。

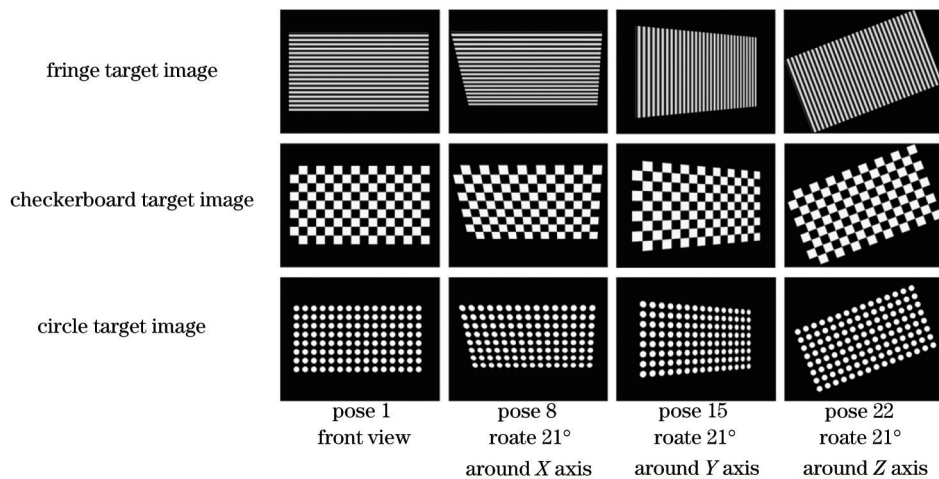


图 4 部分仿真位姿图

Fig. 4 Part of the simulated images

将图 2 中虚拟标靶上世界坐标系下的特征点直接投影至图像坐标系下,得到 22 个位姿特征点的像素坐标,作为特征点的像素坐标真值 \bar{p} ,计算出摄像

机的内外参数,与仿真所用真值作差得到摄像机参数的绝对误差,结果如表 1 所示,其中 (u_0, v_0) 为主点, (t_x, t_y, t_z) 为平移向量的三个分量。

表 1 仿真视觉系统和标定软件的系统误差

Table 1 Systematic errors of visual simulation system and calibration software

Parameter	f_u / pixel	f_v / pixel	u_0 / pixel	v_0 / pixel	t_x / mm	t_y / mm	t_z / mm
Ground truth	1455	1455	1024	540	0	0	650
Absolute error	0.0036	0.0037	0.0003	0.00056	0.03477	0.02785	0.0283

基于相位值提取的特征点像素坐标 p 与真值 \bar{p} 作差,得到每个特征点的位置误差,对 22 个位姿中

每个特征点的像素误差进行平均,得到 120 个特征点在 u, v 方向的绝对误差分布,如图 5 所示。

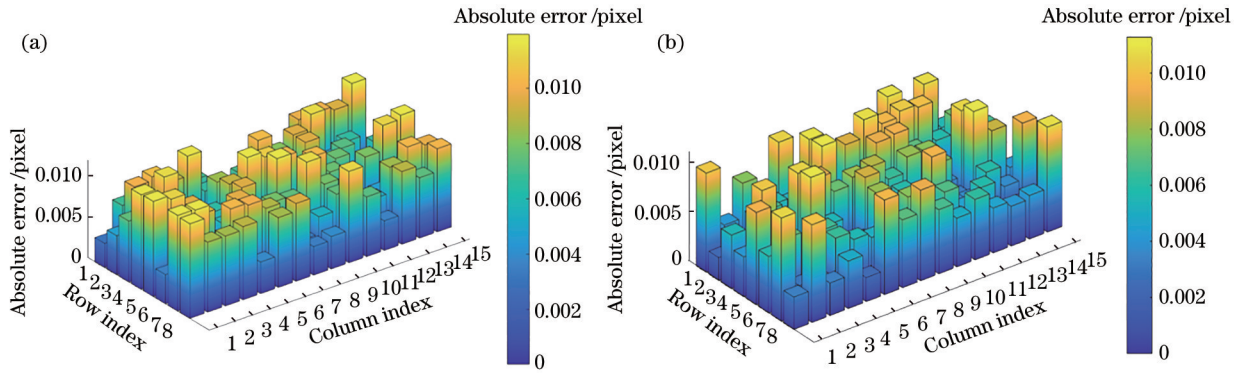


图 5 仿真结果。(a) u 方向像素误差;(b) v 方向像素误差

Fig. 5 Simulated results. (a) Pixel error in u direction; (b) pixel error in v direction

由表 1 和图 5 知,各个参数绝对误差均较小,仿真视觉系统和 Matlab 标定工具箱是可信的,相位法的特征点精度较高,可用于摄像机标定。

进一步,将零均值、不同标准差的高斯噪声添加到仿真图像中。高斯噪声的标准差由 0 变化到 10,间隔为 1。对每组添加特定的高斯噪声水平的位姿图像重复标定 10 次,对标定结果求平均值,计算出各个参数的误差绝对值。

图 6(a)~(i)显示了棋盘格、圆点、APT 三种标定方法下,摄像机内参和外参(正视图位姿的旋转角度和平移向量)的绝对误差随高斯噪声水平的变化曲线。由图 6(a)~(c)知:在棋盘格和圆点标靶情况下,焦距的绝对误差随噪声水平的增大呈上升趋势;在相位标靶下,则表现相对平稳且误差较小,绝对误差在 0.5 个像素以内。在不同的噪声水平下,3 种标靶算出的主点的误差均较小,且没有较大的起伏,主要是因为仿真图像没有畸变,且主点真值为图像的中心,标定优化过程中使用的最小二乘法对噪声也有一定的抑制作用。由图 6(d)~(f)知,三种方法对平移向量沿 X 和 Y 方向的分量的估计均较为准确且差异不大,然而在对 Z 方向的分量进行

估计中,APT 法优势明显。由图 6(g)~(i)知,三种方法对旋转角的估计误差均在 2.5×10^{-4} rad 以内,相比之下 APT 标定法更优。

使用窗口大小为 25×25 像素的高斯低通滤波器模拟摄像机的低通滤波效应^[20],标准差由 0 到 10 变化,间隔为 1。图 7(a)~(i)展示了在不同模糊水平下,分别使用棋盘格、圆点、APT 标定法计算出的摄像机标定参数的绝对误差变化曲线。由图 7(a)~(c)知:在棋盘格和圆点标靶情况下,焦距的绝对误差随模糊水平的增大呈上升趋势,当模糊水平超过 7 时,绝对误差明显变大,出现较大的波动;APT 标定法则表现相对平稳且误差较小;其中模糊水平超过 7 时,棋盘格标靶估计的主点变得不准确,由此可知棋盘格标靶对模糊最为敏感,而 APT 标定法计算出的摄像机内参的绝对误差均在 0.5 个像素以内且波动较小。由图 7(d)~(i)知,在不同程度的高斯模糊下,APT 标定法计算出的摄像机正视图下的外参的绝对误差都处在较低的水平。

总体上,圆点和棋盘格标定法对内参的标定精度相近,圆点和 APT 标定法对外参的标定精度相近。在标准差不超过 10 的高斯噪声和模糊的情况

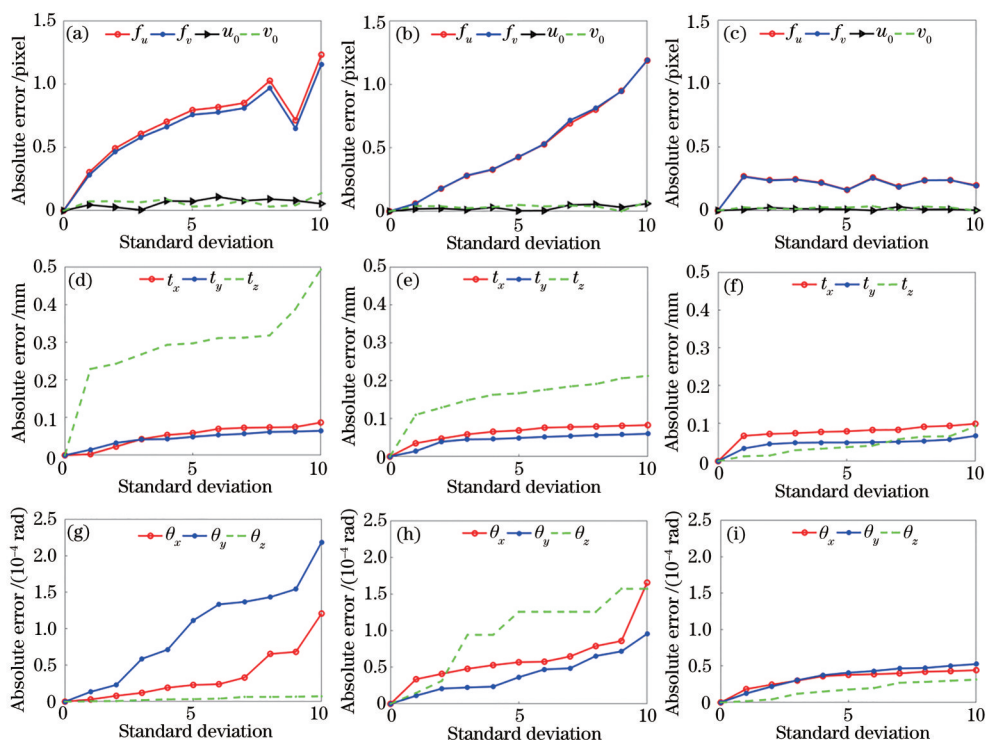


图 6 不同噪声水平下的绝对误差。(a)(d)(g)棋盘格标定法的绝对误差曲线；(b)(e)(h)圆点标定法的绝对误差曲线；(c)(f)(i) APT 标定法的绝对误差曲线

Fig. 6 Absolute error at different noise levels. (a)(d)(g) Absolute error of checkerboard calibration method; (b)(e)(h) absolute error of circle calibration method; (c)(d)(g) absolute error of APT calibration method

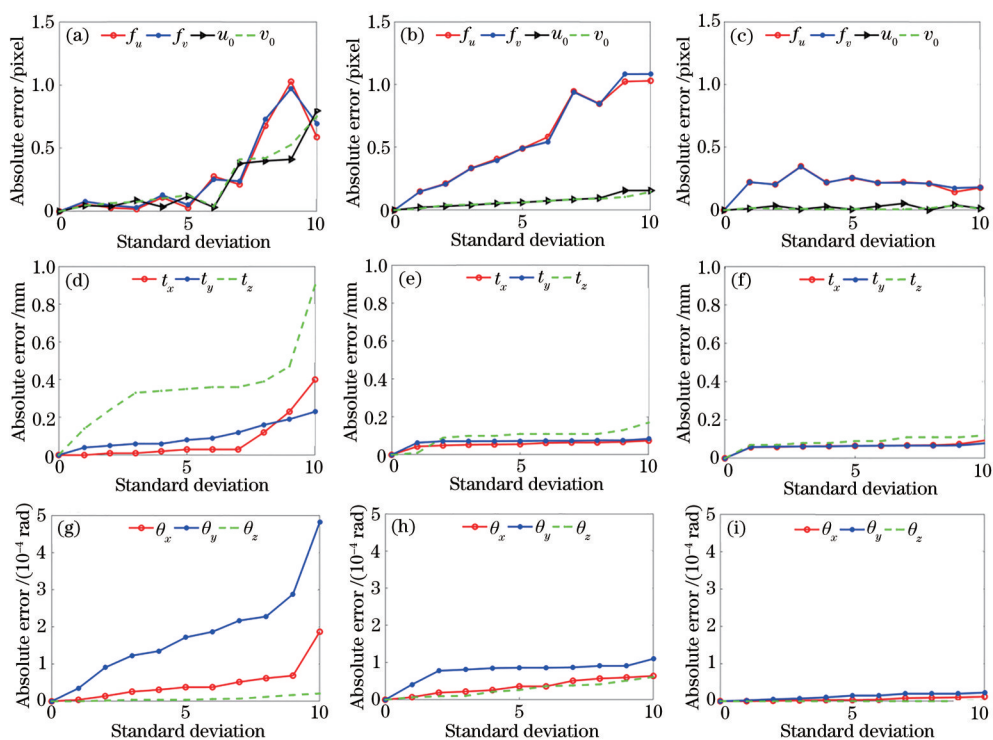


图 7 不同模糊水平下的绝对误差。(a)(d)(g)棋盘格标定法的绝对误差曲线；(b)(e)(h)圆点标定法的绝对误差曲线；(c)(f)(i) APT 标定法的绝对误差曲线；

Fig. 7 Absolute error at different fuzzy levels. (a)(d)(g) Absolute error of checkerboard calibration method; (b)(e)(h) absolute error of circle calibration method; (c)(d)(g) absolute error of APT calibration method

下,使用圆点和棋盘格标定法计算出的焦距的绝对误差在 1.5 像素以内,而同等条件下 APT 标定法的标定精度在 0.5 个像素以内,呈现对图像噪声和图像模糊更好的鲁棒性。此外,在不同等级的高斯模糊和噪声下,APT 标定法对计算出的摄像机正视图下的外参均具有较好的鲁棒性和可靠性。

4 实验研究

为进一步验证 APT 标定法的性能,搭建如图 8 所示的实验平台,包括一台分辨率为 1280×1024 、像元大小为 $4.8 \mu\text{m}$ 的海康相机 (MV-CA013-21UC),一个焦距为 12 mm 的工业镜头 (SV-1214H, 日本),一台分辨率为 1080×1920 、像元大小为 0.2745 mm 的显示器 (243V7Q, 飞利浦公司)。

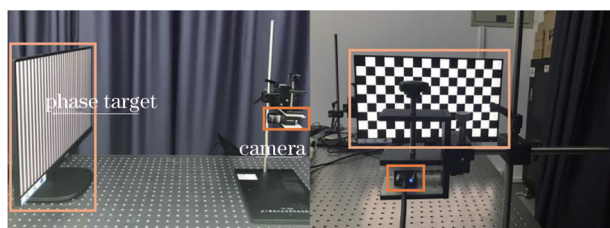


图 8 基于 APT 的实验装置
Fig. 8 APT experimental device

在显示屏上依次显示棋盘格标靶、圆点标靶、水平和竖直相移条纹相位靶序列,并在同一空间位姿抓拍图像。采集到 16 个不同的位姿图像,在同一标靶姿态下依次采集 12 张棋盘格标靶图像、12 张圆点标靶图像、12 张水平条纹标靶图、12 张竖直条纹标靶位姿图,共采集到聚焦情况的 16 个不同的位姿图像 768 张。图 9 第 1 列和第 2 列分别显示了聚焦

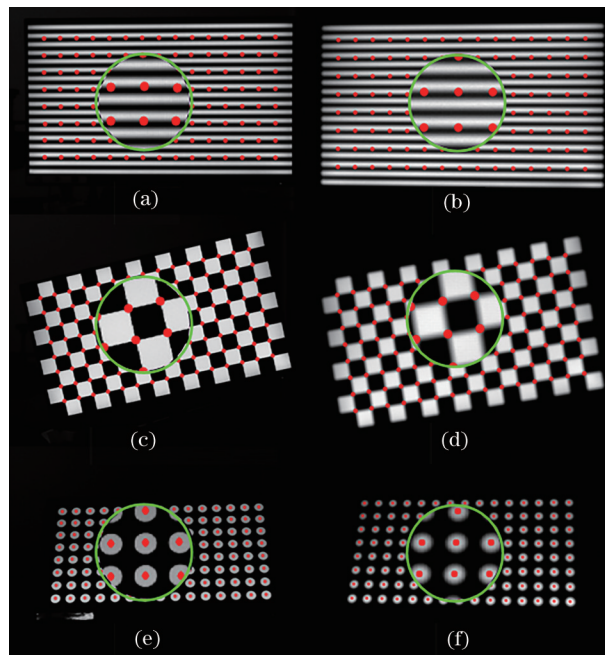


图 9 部分标定图像和特征点。(a)(c)(e)聚焦情况下的图像;
(b)(d)(f)“离焦”情况下的图像
Fig. 9 Part calibration images and part feature points. (a)(c)(e)
In-focus images; (b)(d)(f) out-of-focus images

和“离焦”情况下的 3 种标靶的 3 个位姿图及提取到的特征点。为实现 3 种标靶实验的公平对比,对每个位姿下采集到的 12 张棋盘格(圆点)图片进行平均,用于标定参数和重投影误差的计算。16 个姿态下标靶相对于摄像机的位置如图 10(a)所示。将标靶置于摄像机当前的有效工作距离之外,在标靶图像模糊的情况下重复上述操作,共采集到 16 个不同的位姿模糊图像 768 张,圆点标靶图像中有 2 个位姿的图像由于质量太差而不用于标定,故有效位姿只有 14 个,其相对于相机的位置如图 10(b)所示。

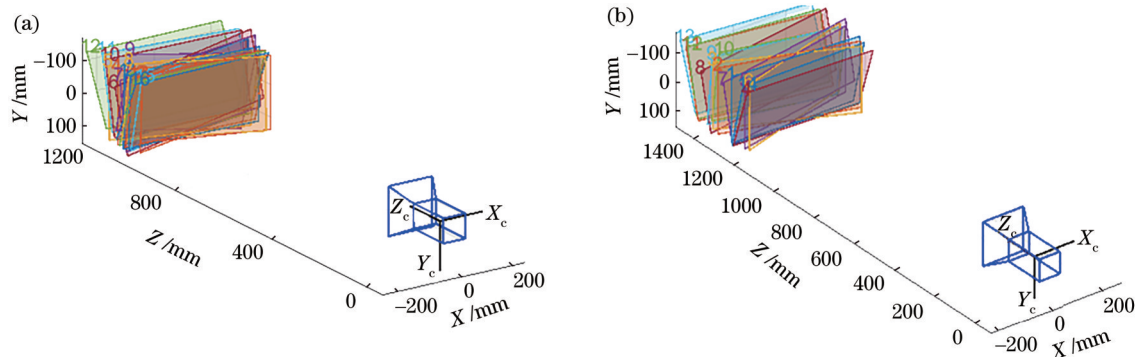


图 10 摄像机视角下的标靶位姿。(a)聚焦情况下的 16 个位姿;(b)“离焦”情况下的 14 个位姿
Fig. 10 Target poses in the camera's view. (a) 16 poses under in-focus condition; (b) 14 poses under out-of-focus condition

在摄像机聚焦的情况下,对圆点、棋盘格和 APT 标定法的摄像机参数初始标定结果进行光束

平差优化,结果如表 2 所示。表 2 中, f_u, f_v, u_0, v_0 为内参; k_1, k_2, p_1, p_2 为畸变系数; $t_x, t_y, t_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 为平

移向量 T_{wc} 中的 3 个分量和 3 个旋转角；向量 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 经过 Rodrigues 变换得到旋转矩阵 R_{wc} 。图 11 中, 相对于棋盘格和圆点标定法, APT 标定法

的重投影误差较为汇聚但优势不明显, 由于聚焦情况下噪声和模糊均处在较低水平, 故三种标定方法估计的摄像机内参与畸变参数的差别不大, 但在使用“相同数目”的标定图片情况下, 依据表 2 中重投影误差对比, APT 标定法具有一定优势。

表 2 摄像机标定结果

Table 2 Calibration results of the camera

Parameter	Checkerboard	Circle	APT
f_u /pixel	2605.92	2606.92	2603.82
f_v /pixel	2606.03	2607.11	2603.74
u_0 /pixel	648.82	647.13	648.38
v_0 /pixel	511.21	510.75	511.68
k_1	-0.03199	-0.04702	-0.05360
k_2	0.01309	0.4687	0.58223
p_1	0.00044	0.00016	0.00021
p_2	0.00086	0.00062	0.00085
t_x	0.02901	0.073178	0.10481
t_y	3.84972	3.13728	3.87875
t_z	1001.60622	1094.46671	1095.71075
θ_x	0.02898	0.06827	0.02897
θ_y	0.043195	-0.45406	0.04366
θ_z	-0.003219	0.047016	-0.003272
Re-project_error /pixel	0.03366	0.02840	0.02262

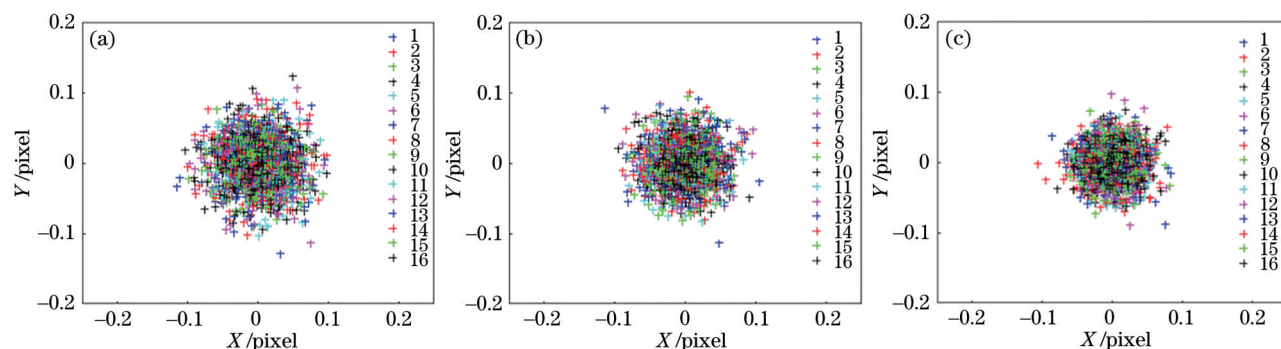


图 11 聚焦情况下三种标定方法的重投影误差。(a)棋盘格标定法;(b)圆点标定法;(c) APT 标定法

Fig. 11 Re-projection errors of three calibration methods under in-focus condition. (a) Checkerboard calibration method; (b) circle calibration method; (c) APT calibration method

由图 9 知, 在标靶远离摄像机有效工作距离之外的情况下, 摄像机采集到的图像的模糊较为严重。光束平差优化后的标定结果如表 3 所示。标靶远离摄像机有效工作距离以外情况下 3 种标定方法的重投影误差如图 12 所示。

由表 3 和图 12 知, 相比于圆点标靶、棋盘格标靶, APT 标定法重投影误差仅为 0.014 pixel。在摄像机聚焦情况下, 获取的图像比较清晰, 不可避免地会拍摄到显示器上的像素网格, 导致条纹的灰度过渡不够平滑, 进而影响了最终绝对相位的精度; 适度的图像模糊避免了条纹的灰度不够平滑的情

况, 故能得到更优的标定结果。由此可见, APT 摄像机标定法无论是在理论上还是在实际实验中都具有较高的精度。

采用欧氏空间距离度量光束平差优化导致的世界坐标差异。在聚焦和“离焦”情况下, 对于三种标定方法获取的 120 个特征点, 分别计算优化前的三维世界坐标 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 和优化后的三维世界坐标 $P'(X'_w, Y'_w, Z'_w)$, 两者之间的欧氏距离为 $d = \sqrt{(X_w - X'_w)^2 + (Y_w - Y'_w)^2 + (Z_w - Z'_w)^2}$ (图 13 中的 Z 轴)。世界坐标差异越小, 表明光束平差优化前

表 3 标靶远离摄像机有效工作距离以外的标定结果

Table 3 Calibration results when the target is far away from the effective working distance of the camera

Parameter	Checkerboard	Circle	APT
f_u /pixel	2650.70	2637.38	2641.39
f_v /pixel	2649.46	2636.90	2640.65
u_0 /pixel	627.04	624.25	622.55
v_0 /pixel	501.50	502.06	505.19
k_1	-0.06195	-0.00610	-0.04133
k_2	0.86519	-0.19245	0.17647
p_1	0.00030	0.00027	0.00014
p_2	0.00211	-0.00137	-0.00202
t_x	5.76005	6.69944	5.47052
t_y	-24.34501	-24.12537	-23.96307
t_z	1305.40317	1303.11704	1301.76072
θ_x	-0.00512	-0.0027632	-0.12287
θ_y	0.081087	0.079357	-0.00606
θ_z	0.0029841	0.0028501	0.0028776
Re-project_error /pixel	0.04641	0.03371	0.01393

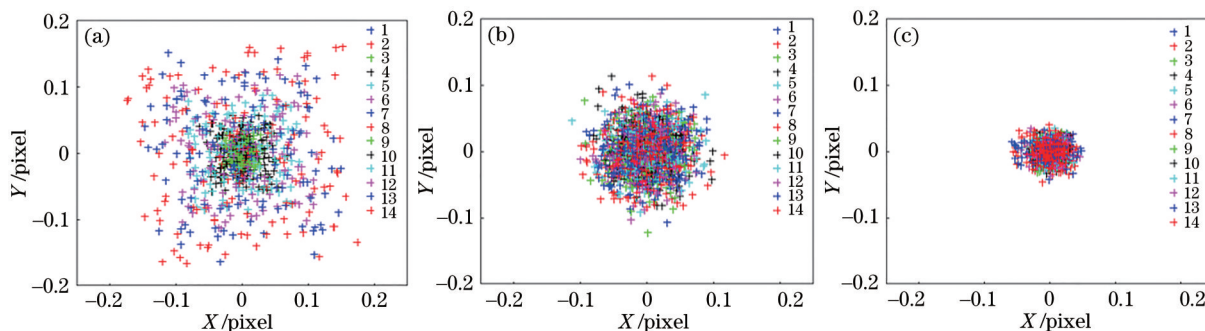


图 12 标靶远离摄像机有效工作距离以外情况下 3 种标定方法的重投影误差。(a)棋盘格标定法; (b)圆点标定法; (c) APT 标定法
Fig. 12 Re-projection errors of three calibration methods when the target is far away from the effective working distance of the camera. (a) Checkerboard calibration method; (b) circle calibration method; (c) APT calibration method

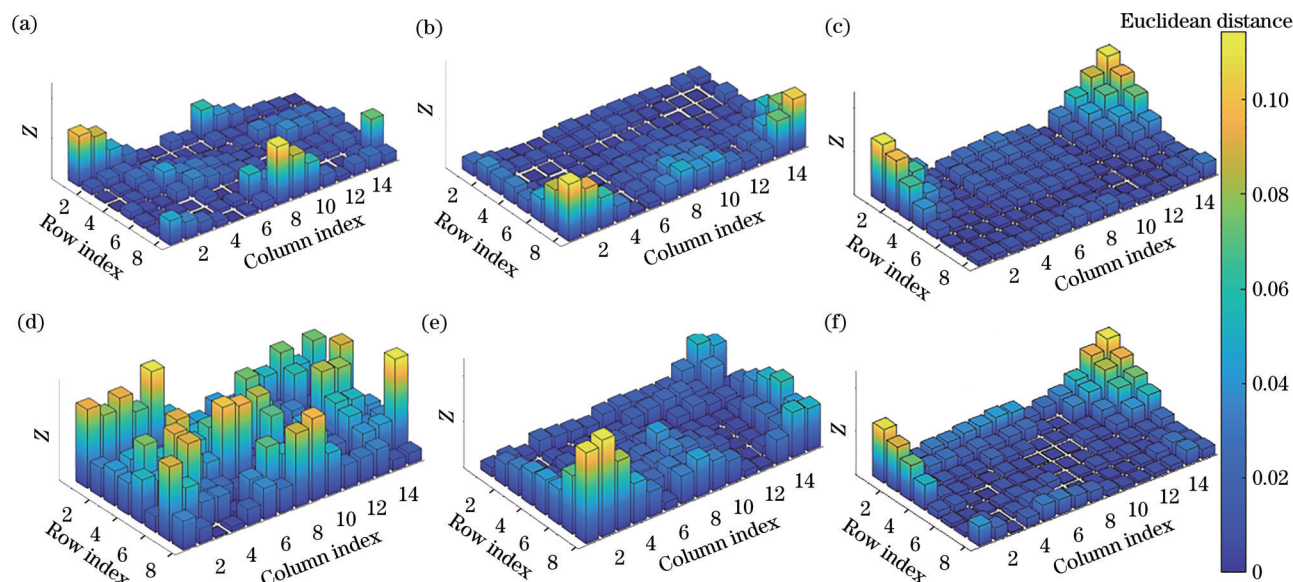


图 13 优化前后世界坐标差异的柱形图。(a)(d)聚焦和“离焦”情况下的棋盘格标定法; (b)(e)聚焦和“离焦”情况下的圆点标定法; (c)(f)聚焦和“离焦”情况下的 APT 标定法
Fig. 13 Column charts of world coordinate difference before and after optimization. (a)(d) Checkerboard calibration method under in-focus condition and out-of-focus condition; (b)(e) circle calibration method under in-focus condition and out-of-focus condition; (c)(f) APT calibration method under in-focus condition and out-of-focus condition

的初值越接近优化解,进而说明方法的特征点提取精度越高。图 13(a)~(c)为聚焦情况下的世界坐标差异,图 13(d)~(f)为“离焦”情况下的世界坐标差异。由图 13 知,“离焦”情况下棋盘格标定法和圆点标定法经光束平差优化前后,世界坐标的变动相对于聚焦情况更大。在“离焦”情况下,棋盘格标定法得到的优化前的标定初值并不准确,故优化后世界坐标会有较大幅度的变化;圆点标定法在聚焦情况下可以计算出较为准确的摄像机参数,在“离焦”情况下则不然;APT 标定法在摄像机聚焦和“离焦”情况下均能得到较好的标定初值结果,故光束平差优化前后特征点世界坐标的差异最小。

5 结 论

提出了一种基于绝对相位靶的摄像机标定技术,利用相移技术、局部窗口最小二乘拟合算法提取相位特征点。通过仿真实验对比了棋盘格、圆点、APT 3 种标定方法,结果显示 APT 标定法对图像模糊和图像噪声具有很好的鲁棒性。而后,通过聚焦和“离焦”下的对比实验进一步验证了 APT 标定法的实际表现,实验结果表明 APT 标定法具有更高的标定精度,且在“离焦”情况下优势明显,可将重投影误差降低 58.68%。由于基于相位提取特征点比传统基于灰度提取特征点的精度高,能够实现摄像机参数的精确标定,实际标定过程中 APT 标定法对标靶没有严格的要求,满足工业生产精密测量对摄像机参数高精度标定的要求。目前,APT 标定法使用图像数较多,下一步将通过设计新的相位靶及相位解析方法进行改进。

参 考 文 献

- [1] Wu F C, Hu Z Y, Zhu H J. Camera calibration with moving one-dimensional objects[J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(5): 755-765.
- [2] Heikkila J. Geometric camera calibration using circular control points[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(10): 1066-1077.
- [3] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [4] Zhang Z Y. Camera calibration with one-dimensional objects[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(7): 892-899.
- [5] Xue J, Su X, Xiang L, et al. Using concentric circles and wedge grating for camera calibration[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(17): 3811-3816.
- [6] Nousias S, Chadebecq F, Pichat J, et al. Corner-based geometric calibration of multi-focus plenoptic cameras[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2017: 957-965.
- [7] Jin J, Li X F. Efficient camera self-calibration method based on the absolute dual quadric[J]. *Journal of the Optical Society of America. A Optics, Image Science and Vision*, 2013, 30(3): 287-292.
- [8] Xie Z X, Yu J S, Chi S K, et al. Underwater calibration and measurement based on non-parallel stereovision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0912004. 解则晓,余江姝,迟书凯,等.非平行双目视觉系统水下标定与测量[J].*光学学报*, 2019, 39(9): 0912004.
- [9] Liu Q S, Xie X F, Zhang X Z, et al. Checkerboard corner detection algorithm for calibration of focused plenoptic camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1415002. 刘青松,谢晓方,张焯喆,等.用于聚焦型光场相机标定的棋盘角点检测算法[J].*光学学报*, 2020, 40(14): 1415002.
- [10] Yang W S, Guo S P, Li X J, et al. Checkerboard corner detection based on Hough transform and circular template[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181510. 杨炜松,郭帅平,李学军,等.基于Hough变换和圆形模板的棋盘格角点检测[J].*激光与光电子学进展*, 2020, 57(18): 181510.
- [11] Lu X D, Xue J P, Zhang Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304008. 卢晓冬,薛俊鹏,张启灿.基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J].*中国激光*, 2020, 47(3): 0304008.
- [12] Huang L, Zhang Q C, Asundi A. Camera calibration with active phase target: improvement on feature detection and optimization[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1446-1448.
- [13] Wang Y W, Cai B L, Wang K Y, et al. Out-of-focus color camera calibration with one normal-sized color-coded pattern[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 98: 17-22.
- [14] Juarez-Salazar R, Guerrero-Sanchez F, Robledo-

- Sanchez C, et al. Camera calibration by multiplexed phase encoding of coordinate information[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4895-4906.
- [15] Wang Y W, Liu L, Cai B L, et al. Stereo calibration with absolute phase target[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22254-22267.
- [16] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1989, 11(3): 185-215.
- [17] Zhang S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 28-37.
- [18] Guo H W, Chen M Y, Zheng P. Least-squares fitting of carrier phase distribution by using a rational function in fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(24): 3588-3590.
- [19] Yin Y K, Peng X, Li A M, et al. Calibration of fringe projection profilometry with bundle adjustment strategy[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 542-544.
- [20] Zhou P, Zhu J P, Jing H L, et al. Design and experimental study of sinusoidal structured light mask with “S” shaped binary coding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 151203.
- 周佩, 朱江平, 荆海龙, 等. “S”型二元编码的正弦结构光模板设计与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 151203.