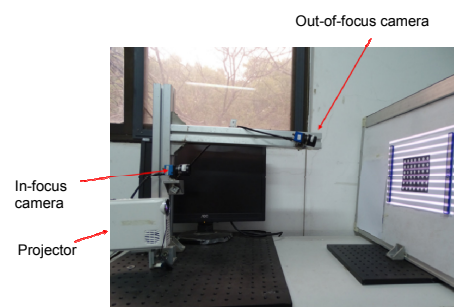




DOI: 10.12086/oe.2018.180100

适用于离焦状态相机的相位编码标定方法

杨浩¹, 蔡宁¹, 林斌^{1,2*}, 曹向群¹¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室国家光学仪器工程技术研究中心, 浙江 杭州 310027;²浙江大学台州研究院, 浙江 台州 318000

摘要: 现阶段通用的相机标定方法需要使用者提供准确的标定板特征点像素坐标。但对某些成像位置特殊的相机而言, 一般标定物(如长宽在厘米级别的标定板)的使用范围在其清晰成像范围之外。使用这些相机拍摄一般标定物, 只能得到离焦的模糊图像, 无法准确提取特征点像素坐标。本文分析了光学系统离焦状态对基于正弦光栅的结构光(简称正弦结构光)相位的影响。利用正弦结构光相位与相机对焦状态无关的性质, 提出了一种利用相移法正弦结构光编码的方法, 对标定物上特征点进行相位编码, 实现了相机在离焦状态下的标定。经过实验验证, 标定结果焦距长度与真实值之间最大偏差为 0.47%, 最大像素重投影误差为 0.17 pixels。该方法为具有特殊成像范围的相机的标定提供了一种解决方案。

关键词: 相机标定; 对焦; 相位匹配; 相移法; 摄影设备

中图分类号: TP391

文献标志码: A

引用格式: 杨浩, 蔡宁, 林斌, 等. 适用于离焦状态相机的相位编码标定方法[J]. 光电工程, 2018, 45(7): 180100

Camera calibration method based on phase encoding for out-of-focus condition

Yang Hao¹, Cai Ning¹, Lin Bin^{1,2*}, Cao Xiangqun¹¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, CNERC for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;²Research Institute of Zhejiang University-Taizhou, Taizhou, Zhejiang 318000, China

Abstract: The state-of-art camera calibration method requires the user to provide accurate pixel coordinates of calibration plate feature points. For some cameras with special sensing range, general calibration objects' (such as calibration plates with a centimeter-long dimension) using range is outside their clear sensing range. Using these cameras to take a picture for general calibration objects, you can only get out-of-focused blurred images that can not accurately extract feature points' pixel coordinates. This paper analyzes the influence on the phase of the structured light based on sine grating (abbreviated as sinusoidal structured light) when optical system is in defocus state. Based on the fact that the state of focus is independent of the phase of sinusoidal structured light, a method of phase-shifted sinusoidal structured light encoding by phase shift is proposed to encode the feature points on the ca-

收稿日期: 2018-03-03; 收到修改稿日期: 2018-04-03

基金项目: 江苏省科技计划项目(工业支撑)(BE2014082); 昆山市机器人及智能装备科技专项(KSJ1517)资助; 浙江省公益技术应用研究(2017C31080)

作者简介: 杨浩(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事机器视觉、相机标定和图像处理的研究。E-mail: 21530012@zju.edu.cn

通信作者: 林斌(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事图像传感及处理、光电测量技术和仪器的研究。E-mail: wjlin@zju.edu.cn

libration object and this method realizes the calibration of the camera under out-of-focus condition. The experimental results show that the maximal deviation of focal length from the real value is 0.47% and the maximal pixel reprojection error is 0.17 pixels. This paper provides a solution to camera calibration with a special sensing range.

Keywords: calibration; focusing; phase matching; phase shift; photographic equipment

Citation: Yang H, Cai N, Lin B, et al. Camera calibration method based on phase encoding for out-of-focus condition[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(7): 180100

1 引言

在三维重建等许多计算机视觉的应用中,相机参数的准确标定是得到良好结果的前提条件。经过多年的发展,高精度、使用方便的相机标定方法的研究取得了长足的进步。目前主流的相机标定方法分为三类,分别为:传统相机标定方法、相机自标定方法以及主动视觉相机标定方法^[1-2]。传统相机的标定方法需要高精度的已知结构信息的标定目标^[3-4],且由于对标定目标的要求较高,在很多情况下无法使用。主动视觉标定方法在使用中需要精确测量标定物或待标定相机的相对位置信息。典型的如 Tsai 提出的一种利用二维平面标定物的相机标定方法^[5]。此方法需要使用造价高昂的精密移动平台记录标定物的位移和角度变化信息,大大限制了使用范围。而相机的自标定方法由于其兼顾了标定精度和使用的简便性得到了最广泛的使用。其中最典型的是 2000 年 Zhang 提出的一种新型的利用二维平面标定板的相机标定方法^[6],该方法在使用中可任意放置相机以及标定板。在标定过程中,待标定相机从不同位置 and 不同角度拍摄标定板上图案(一般为棋盘格),利用图像处理算法精确提取出图像中标定板平面上特征点(棋盘格角点)的图像坐标。依据建立在标定板平面上的世界坐标系与相机坐标系间的角度变化信息,使用特征点的世界坐标和图像坐标建立方程组求得相机的内外参数。

在上文讨论的三类算法中,精确求得标定物上特征点在待标定相机拍摄所得的图像中的像素坐标是得到准确相机参数的基础。对大部分相机来说拍摄得到标定物的清晰图像,经算法处理得到亚像素精度的特征点像素坐标对十分简单。但某些成像范围特殊的相机拍摄一般的标定物只能得到离焦的模糊图像,从而无法得到准确的特征点像素坐标。比如微距相机,其视场与景深较小。在应用 Zhang 方法时,要求标定板多次大幅度改变位姿,因此标定板常会位于微距相机的清晰成像范围之外。目前对于小景深小视场情况下标定方法的研究很少,其中郭涛^[7]针对小视场条件提

出了一种利用二次曲线与直线的混合标定方法,但在应用此方法时对二次曲线的精确拟合是一个难点;Wang 提出了一种在相机离焦状态下仍可检测的标定图案^[8],但其绘制方式较为繁琐。

为解决特殊成像范围相机标定困难的问题,本文提出了一种利用基于正弦光栅的结构光(简称正弦结构光)对一般标定物进行编码的方法。该方法利用待标定相机在离焦状态下得到的标定物的模糊图像,就可以得到标定物特征点的精确像素坐标,使相机在对焦和离焦状态下都可以利用 Zhang 方法等通用方法进行标定,为特殊成像范围相机的标定提供了一种有效的解决方案。

2 标定原理

2.1 相机模型

本文采用相机的针孔模型。空间中存在一点 M , 其世界坐标为 $M = [X, Y, Z]^T$ 。该点投影在相机 CCD 中像素坐标为 $m = [x, y]^T$, 其齐次坐标形式表示为 $\bar{m} = [x, y, 1]^T$ 。这两点之间的关系^[9]:

$$\lambda \bar{m} = K(RM + t), \quad (1)$$

其中: λ 为尺度因子, K 为相机的内参数矩阵, R 和 t 表示从世界坐标到相机坐标的旋转矩阵和平移向量。内参数矩阵的各元素为

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ & \beta & v_0 \\ & & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: α 、 β 分别为 x 方向和 y 方向上焦距与像素大小的比值, γ 为两图像坐标轴的偏移, (u_0, v_0) 为相机光心坐标。

由于相机光学系统的本身特点以及加工和装配误差,系统成像普遍存在畸变。本文中相机的畸变模型由以下几个参数描述:

$$D = [k_1 \quad k_2 \quad p_1 \quad p_2 \quad k_3], \quad (3)$$

其中: k_1 、 k_2 和 k_3 描述相机的径向畸变。无畸变点 (u', v') 与实际成像点 (x, y) 之间的关系如式(4)和式(5)

所示：

$$u' = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (4)$$

$$v' = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (5)$$

其中 $r = \sqrt{(x - u_0)^2 + (y - v_0)^2}$ 表示像点与相机光心之间的距离。

与径向畸变相似， p_1 和 p_2 描述相机的切向畸变。切向畸变下的无畸变点 (u', v') 与实际成像点 (x, y) 之间的关系如式(6)和式(7)所示：

$$u' = x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)], \quad (6)$$

$$v' = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy]。 \quad (7)$$

2.2 正弦结构光编码和相移法解码

相移法是一种具有较高准确度的结构光编码方法。 N 步相移法第 k 步投影正弦结构光到目标上后得到的图像：

$$I_k(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos\left(\phi(x, y) + \frac{2k\pi}{N}\right), \quad (8)$$

其中： $I'(x, y)$ 为背景光强， $I''(x, y)$ 为结构光的调制光强， $\phi(x, y)$ 为待求解的 (x, y) 点相位，其计算式：

$$\phi(x, y) = -\arctan\left[\frac{\sum_{k=1}^N I_k \sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right)}{\sum_{k=1}^N I_k \cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right)}\right]。 \quad (9)$$

很明显利用式(9)计算得到的包裹相位 $\phi(x, y)$ 范围在 $-\pi$ 到 π 之间，需要对包裹相位进行解包裹操作求得绝对相位。本文使用格雷码^[10-11]对正弦结构光各周期进行编码，进而对包裹相位进行解包裹操作，得到绝对相位。

2.3 离焦光学系统对结构光的影响

光学系统的成像效果相当于二维高斯函数空间域滤波器对理想图像进行滤波^[12]，该空间域滤波函数：

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x - u_0)^2 + (y - v_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (10)$$

其中 σ 是高斯函数的标准差，与相机光学系统的状态相关。

正弦结构光图案及其与背景光叠加后频谱如图 1 所示，其在频域下仅有零频项和基频项存在。正弦结构光经过高斯滤波器滤波，仍保持仅有零频项和基频项。由于高斯滤波器对高频信号抑制更强，基频项与零频项的振幅比将下降，但并没有改变基频项的频率大小。这一特性在空间域表现为，随着相机离焦程度的增加，拍摄得到的结构光图案对比度逐渐下降。但是只要得到的结构光图片不是完全模糊，条纹消失，离焦情况下相机拍摄得到的仍为正弦图案，离焦获得的结构光图片解得的相位与清晰成像时获得的结构光图片解得的相位相同^[8,12-13]。在实际应用过程中，需要综合考虑相机离焦量和正弦结构光的条纹频率。如相机的离焦量很大，对高频的抑制非常严重，可以适当降低正弦结构光的条纹频率，防止出现图片完全模糊、条纹消失的情况；或者改变标定物与相机间的距离，通过减小相机离焦程度的方法避免对比度过低的情况出现。综上，我们可以对标定板上的特征点进行相位编码，利用相位信息求得该特征点在离焦光学系统中的精确成像位置，使其与特征点一一对应。

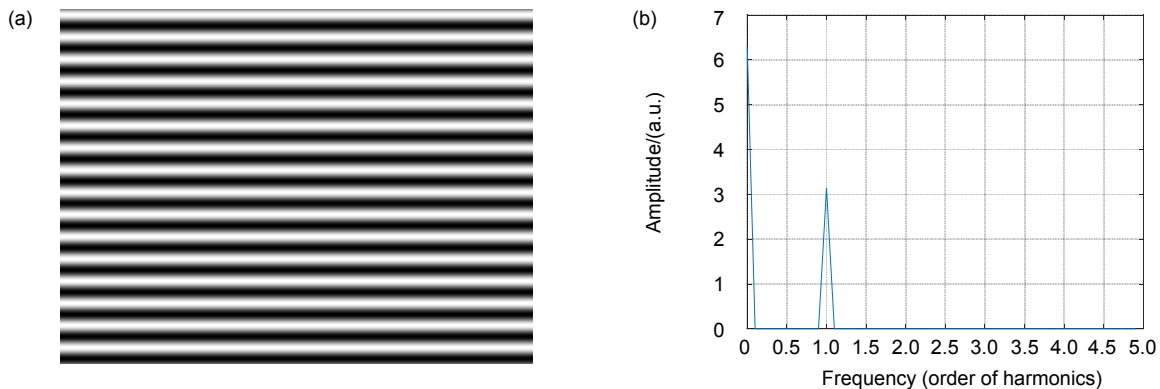


图 1 正弦结构光图案及正弦结构光与背景光叠加后频谱。(a) 正弦结构光图案；(b) 正弦结构光与背景光叠加后频谱

Fig. 1 Pattern of sinusoidal structured light and the spectrum diagram of sinusoidal structured light and background light's superposition. (a) Pattern of sinusoidal structured light; (b) The spectrum diagram of sinusoidal structured light and background light's superposition

2.4 标定系统及标定物的编解码方法

标定系统的结构如图 2 所示。系统由标定物、投影仪、对焦相机和待标定的离焦相机组成。投影仪向标定板投影结构光，用于对标定板上的点进行编码。离焦相机和非离焦相机同时拍摄标定板图片。由于是待标定相机处于离焦状态，只能拍得模糊图像，无法通过传统的特征提取等手段对标定板上的特征点进行准确定位。以横向结构光为例，介绍标定板上特征点的结构光编解码方法。

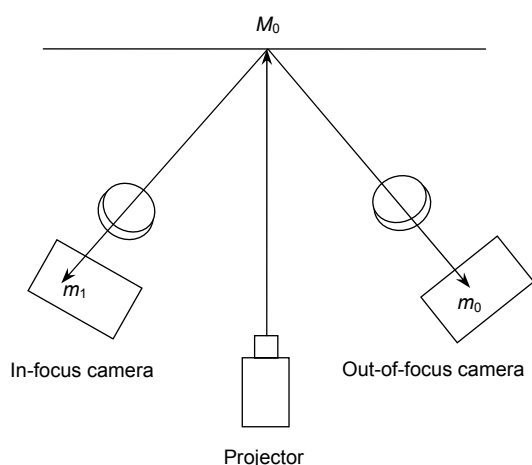


图 2 标定系统组成

Fig. 2 The composition of calibration system

设标定板上一点的世界坐标为 $M_0 = [X, Y, Z]^T$ ，

其经过离焦相机成像得到的像素坐标为 $m_0 = [x_0, y_0]^T$ ，经过对焦相机成像得到 $m_1 = [x_1, y_1]^T$ 。 m_1 的坐标可使用特征提取等手段获得，即 $m_1 = [x_1, y_1]^T$ 为已知量， $m_0 = [x_0, y_0]^T$ 为待求未知量。

投影横向正弦结构光到标定板上，对标定板进行纵向相位编码。设点 M_0 的纵向相位编码值为 $\phi_v^{M_0}$ 。分别使用离焦相机和对焦相机拍摄标定板。使用对焦相机得到的清晰图像，用插值法准确解得 m_1 的纵向相位 ϕ_{v1} 。根据前文讨论，光学成像系统对正弦结构光相位无影响。令 m_0 的纵向相位为 ϕ_{v0} ，此时有

$$\phi_{v0} = \phi_{v1} = \phi_v^{M_0}, \quad (11)$$

根据式(11)可得到 ϕ_{v0} 的值。下一步对离焦相机所得模糊图像的每一个像素计算其纵向相位。

与之前步骤类似，向标定板上投影纵向结构光条纹。使用对焦相机得到的清晰图像计算 m_0 的水平相位 ϕ_{h0} 。在离焦相机所得模糊图像中，利用插值法确定纵向相位值为 ϕ_{v0} 水平相位为 ϕ_{h0} 的点，即为 m_0 的亚像素级准确坐标。

3 模拟实验

为验证本文方法对传统标定板特征提取方法的优越性，进行模拟实验，如图 3 所示，分别使用 7×7 ， 17×17 ， 27×27 的高斯滤波器处理清晰相机得到的标定物编码前(图 3(a1)~3(a3))和编码后(图 3(b1)~3(b3))的

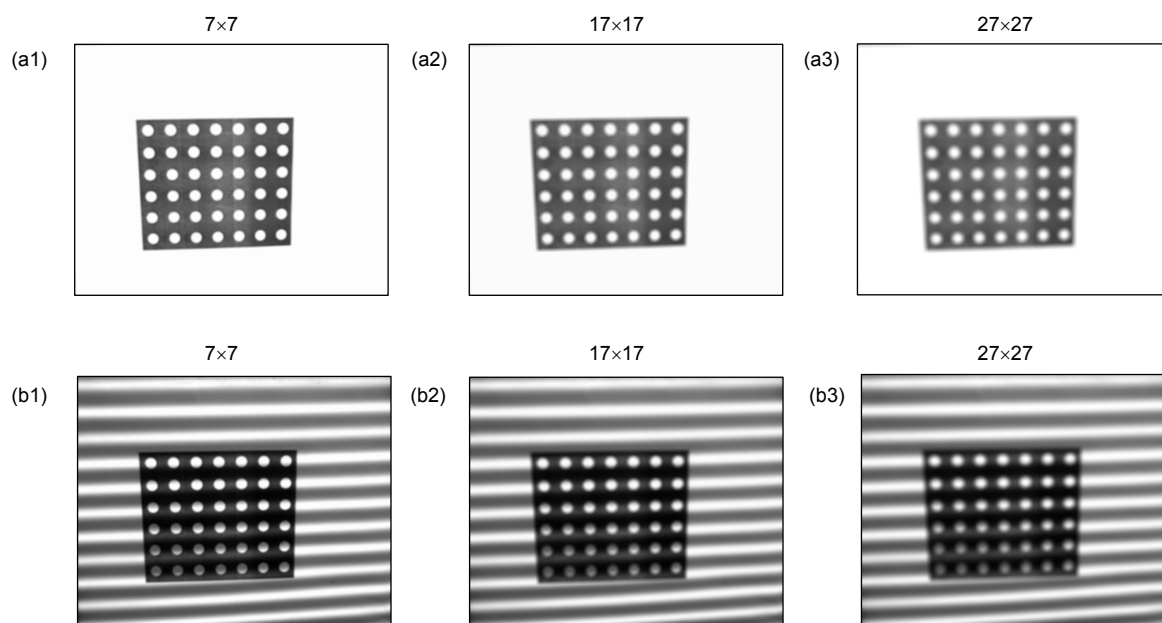


图 3 不同离焦程度下的图像

Fig. 3 Images under different defocus

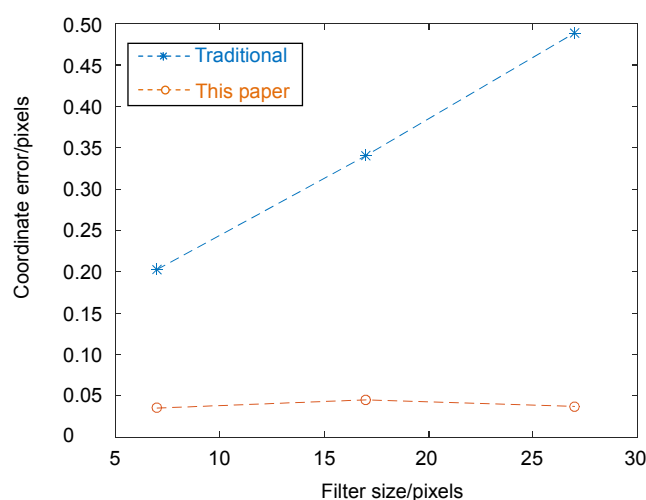


图4 圆心提取误差

Fig. 4 Error of circle centers' extraction

图片, 模拟相机不同程度的离焦。使用 OpenCV 库中广泛使用的 findCirclesGrid 函数作为传统方法的代表, 对比其与本文方法的圆心提取精度。以清晰图像圆心为准确值, 计算平均圆心提取误差, 得到结果如图 4。可以看出, 随着相机离焦程度的增加, 图像逐渐变得模糊, 传统的特征提取方法误差逐渐增大, 而本文方法依然表现良好, 特征提取准确稳定。

4 实验装置及实验结果分析

实验装置如图 5 所示。

待标定离焦相机采用大恒 MER-130-30UM 工业相机。镜头标称焦距 16 mm。分辨率 1280 pixels×1024

pixels。像素为正方形, 边长 5.2 μm 。

标定步骤如下。

1) 使用对焦相机拍摄编码前的标定板。由于黑白交替的颜色在结构光的使用中容易带来较大的噪声和相位求解误差, 本文不使用一般的棋盘格标定板, 而使用黑色底加上整齐排列的白色圆点标定板, 其特征点为圆点的圆心。对焦相机拍摄得到的清晰图像与提取到的特征点坐标如图 6 所示。

2) 投影仪将结构光投影到标定板上, 对标定板进行相位编码。分别使用对焦相机和离焦相机对标定板进行拍照, 得到的一部分图像如图 7 所示。

3) 依前文方法对离焦相机得到的标定板模糊图

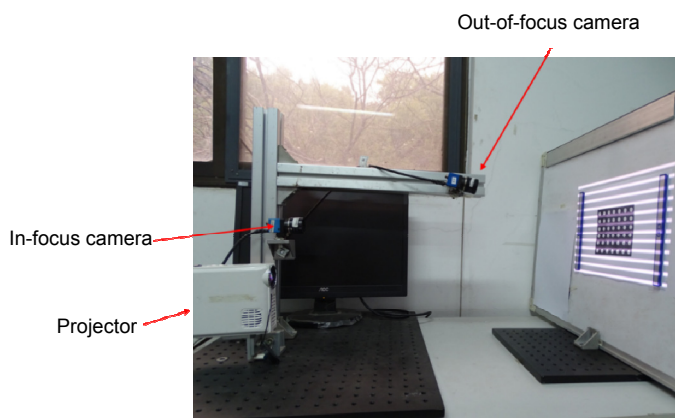


图5 标定实验装置

Fig. 5 Device of calibration experiment

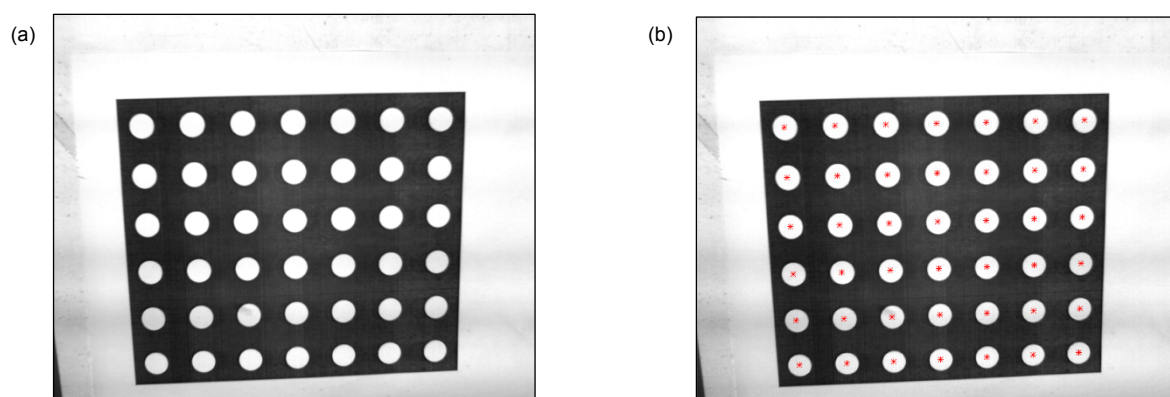


图 6 对焦相机获得的图像。(a) 对焦相机获得的标定板图像；(b) 从 6(a)中提取到的圆心
Fig. 6 The image obtained by the in-focus camera. (a) The calibration plate's image obtained by the in-focus camera; (b) The circle centers extracted from 6(a)

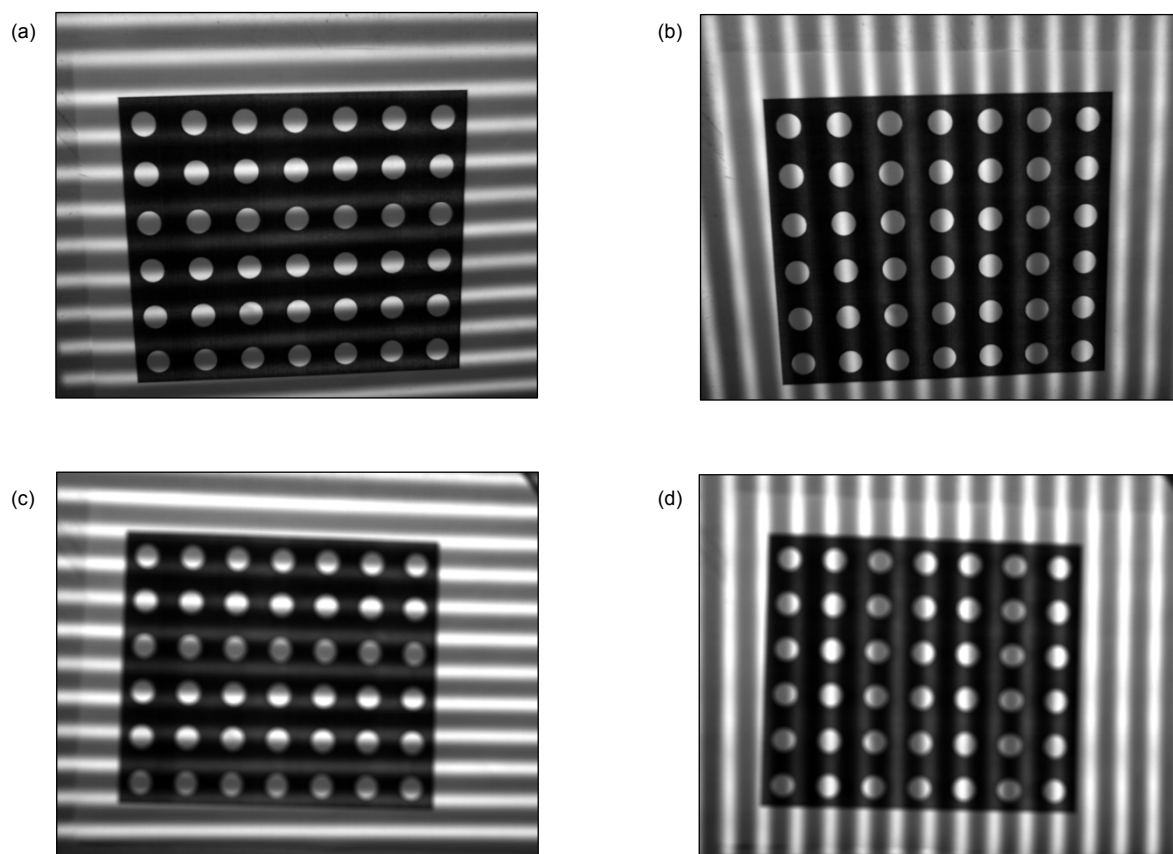


图 7 编码后的标定板图像。(a) 对焦相机得到的水平结构光图像；(b) 对焦相机得到的垂直结构光图像；(c) 离焦相机得到的水平结构光图像；(d) 离焦相机得到的垂直结构光图像

Fig. 7 The images of encoded calibration board. (a) The horizontal structured light image obtained by in-focus camera; (b) The vertical structured light image obtained by in-focus camera; (c) The horizontal structured light image obtained by out-of-focus camera; (d) The vertical structured light image obtained by out-of-focus camera

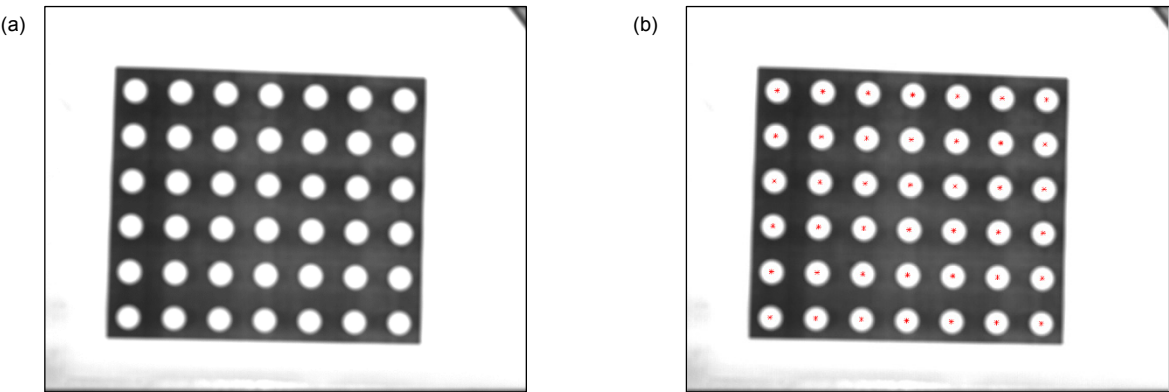


图 8 离焦图像的所有圆心位置。(a) 离焦相机获得的标定板模糊图片；(b) 模糊图片圆心
Fig. 8 All of the circle centers' positions of the blurred image. (a) The blurred calibration plate image obtained by the out-of-focus camera; (b) The centers of the blurred image

像(图 8(a))进行解码。离焦相机所得标定板图像的所有圆心如图 8(b)所示。

- 4) 多次改变离焦相机位置,从不同方向拍摄标定板并求取特征点坐标。尽可能覆盖待标定相机的全部视场范围。
- 5) 利用求得的不同位置标定板的特征点坐标,根据 Zhang 方法对相机参数进行标定。

为验证该方法在相机不同离焦程度下的鲁棒性,将标定物置于距离相机 0.5 m、1 m 和 2 m 左右的距离进行标定实验。随着相机与标定板的距离增大,相机的离焦程度逐渐减小。

标定结果如表 1,表 2。

实验测量得到相机焦距为 16.087 mm。以 α 和 β 的平均数计算相机焦距如表 3 所示。

表 1 不同标定距离下的相机内参数

Table 1 Intrinsic camera parameters at different calibration distances

Distance/m	α	β	γ	u_0	v_0	Reprojection error/pixel
0.5	3105.86	3108.37	0.60	636.73	543.17	0.16
1	3096.71	3097.91	0.47	638.12	541.21	0.17
2	3094.87	3095.40	0.02	628.66	542.26	0.17

表 2 不同距离下的相机畸变参数

Table 2 Distortion parameters at different calibration distances

Distance/m	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
0.5	-0.1736	4.7222	-92.7816	0.0013	-0.0017
1	-0.1285	2.8493	-44.4313	0.0013	-0.0019
2	-0.1603	3.1751	-72.6934	0.0011	-0.0021

表 3 标定得到的焦距

Table 3 Calibrated focal length

Distance/m	Focal length/mm	Error/%
0.5	16.157	0.43
1	16.106	0.12
2	16.094	0.04

由表 3 可见该方法在相机的不同离焦状态下依然可以得到基本稳定的标定结果,与焦距实际测量值最大误差为 0.43%,达到了标定算法的精度要求。以上实验验证了该方法的可行性以及在不同离焦状态下的鲁棒性。

此方法解决了在只能得到相机离焦拍摄的模糊图像的情况下,相机参数的准确标定的问题。不需为成像范围特殊的相机制作特殊标定物,有效地降低了标定成本。

5 总 结

为解决具有特殊成像范围的相机的参数标定问题,本文提出了一种利用正弦结构光编码标定物的方法。使用该方法,实现了相机在离焦条件下的参数准确标定。利用该方法对相机进行离焦条件下的标定实验,标定后焦距长度与真实值之间最大偏差在 0.5%以内。最大像素重投影误差为 0.17 pixels。实验证明,该方法切实可行,为特殊相机的标定提供了一种解决方案。

参考文献

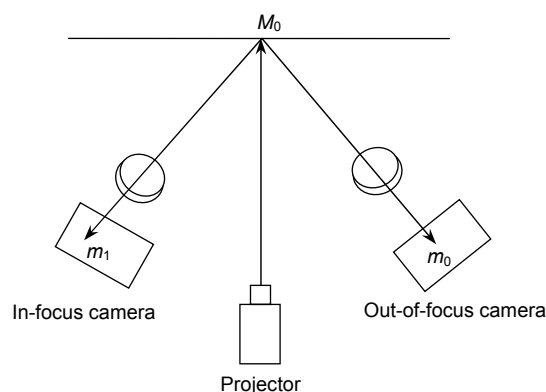
- [1] Salvi J, Armangué X, Batlle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation[J]. *Pattern recognition*, 2002, **35**(7): 1617–1635.
- [2] Qiu M L, Ma S D, Li Y. Overview of camera calibration for computer vision[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1): 43–55.
邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机标定综述[J]. *自动化学报*, 2000, **26**(1): 43–55.
- [3] Abdel-Aziz Y I, Karara H M, Hauck M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, **81**(2): 103–107.
- [4] Faig W. Calibration of close-range photogrammetry systems: Mathematical formulation[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1975, **41**(12): 1479–1486.
- [5] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323–344.
- [6] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330–1334.
- [7] Guo T, Da F P, Fang X. Camera calibration under small field of view[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(8): 164–168
郭涛, 达飞鹏, 方旭. 小视场环境下的摄像机标定[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 164–168.
- [8] Wang Y W, Chen X C, Tao J Y, et al. Accurate feature detection for out-of-focus camera calibration[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(28): 7964–7971.
- [9] Szeliski R. *Computer vision: algorithms and applications*[M]. New York: Springer, 2010: 45–51.
- [10] Shi A J, Bai R L, Tian Q H. 3D measurement based on structured light using a combination of Gray code and line-shift patterns[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(11): 26–32.
石爱军, 白瑞林, 田青华. Gray 码结合线移的结构光三维测量[J]. *光电工程*, 2016, **43**(11): 26–32.
- [11] Lin J Y, Huang J Q, Jiang K Y. Subregional Gamma pre-coding correction for phase error compensation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(9): 32–38.
林俊义, 黄剑清, 江开勇. 分区域 Gamma 预编码校正的相位误差补偿[J]. *光电工程*, 2016, **43**(9): 32–38.
- [12] Zhang W Z. Structured-light three dimensional measurement method based on digital projector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
张万祯. 数字投影结构光三维测量方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [13] Li B W, Karpinsky N, Zhang S. Novel calibration method for structured-light system with an out-of-focus projector[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(16): 3415–3426.

Camera calibration method based on phase encoding for out-of-focus condition

Yang Hao¹, Cai Ning¹, Lin Bin^{1,2*}, Cao Xiangqun¹

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, CNERC for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

²Research Institute of Zhejiang University-Taizhou, Taizhou, Zhejiang 318000, China



The composition of calibration system

Overview: With development in the past decades, the normal camera calibration method has become more and more mature. Among them, the method proposed by Zhang is a representative one. However, there is still a lack of the calibration method of some cameras and lenses used in special occasions. Recently, there are a few calibration studies for cameras with special imaging ranges, such as macro cameras and telephoto cameras. In 2012, Guo proposed a method for macro camera calibration using a semicircle template instead of a checkerboard in the general method. This method needs to fit the semicircle curve during the actual use. This step is difficult in the use of this method. Wang proposed a calibration pattern that can still be detected when the camera is out of focus, but its rendering method is difficult.

Our works are as follows: The state-of-art camera calibration method requires the user to provide accurate pixel coordinate of calibration plate feature points. For some cameras with special sensing range, general calibration objects' (such as calibration plates with a centimeter-long dimension) using range is outside their clear sensing range. This paper analyzes the influence of the focusing state of the camera imaging system on the optical phase information of a sinusoidal structured light. Using the properties that the sinusoidal structured light's phase information is independent of the focusing state of the camera, this paper proposes a method for encoding a normal calibration object using sinusoidal structured light to make the calibration of the camera in the defocus state make true. This method uses an in-focus camera to get the phase information of the encoded normal calibration object. The out-of-focus camera uses the phase information to calculate the feature points' accurate coordinates by the phase information. Then, the traditional method (e.g. Zhang method) is used to calculate the intrinsic, extrinsic parameters and distortion coefficient of the out-of-focus camera. Based on this method, the camera parameters can be accurately calibrated by using a blurred picture of the coded calibration object. This paper provides a cheap and convenient solution to the calibration of these special cameras. We don't have to manufacture the special calibration objects. The experiment results show that this method can calibrate special camera parameters accurately under different defocus state. After experimental verification, the calibrated focal length deviation from the real value is 0.47%, the average pixel reprojection error is 0.17 pixels.

Citation: Yang H, Cai N, Lin B, *et al.* Camera calibration method based on phase encoding for out-of-focus condition[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 180100

Supported by Jiangsu Science and Technology Project (Industry Support) (BE2014082), Kunshan Robotics and Intelligent Equipment Technology Project (KSJ1517), and Zhejiang Research on Application of Commonweal Technology(2017C31080)

* E-mail: wjlin@zju.edu.cn